



II. ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТҮРКІ ӘЛЕМІ

ЖАСЫЛ ЭНЕРГИЯ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТА ҒЫЛЫМДАРЫ КОНГРЕСІ



*Ахмет Ясауи университеті,
“Экология” ғылыми-зерттеу институты,
Түркістан, Қазақстан*

КОНГРЕСС МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ ЖИНАҒЫ

14-15 мамыр 2026ж.



ISBN: 978-601-339-508-1



AHMET YESEVI ÜNİVERSİTESİ
Köklü geçmişten güçlü geleceğe...





КОНГРЕСС МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ ЖИНАҒЫ

II. ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТҮРКІ ӘЛЕМІ ЖАСЫЛ ЭНЕРГИЯ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТА ҒЫЛЫМДАРЫ КОНГРЕСІ
14-15 МАМЫР 2026Ж.

Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
“Экология” ғылыми-зерттеу институты, Түркістан қ.

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА

Темірбекова Ж.А., Ошибаева А.Е., Ахметов Н.А., Шейда Ташар, Нұрділлаева Р.Н., Зелиха Селамоглу

ISBN: 978-601-339-508-1

© Ахмет Ясауи университеті,
Түркістан қаласы, Бекзат Саттарханов даңғылы, 29
Tel: +7 725 336 36 36 • info@ayu.edu.kz
www.ayu.edu.kz

Кітапта айтылған ойлар мен пікірлер толығымен авторларға тиесілі және Ахмет Ясауи университеті басқару кеңесінің көзқарасын білдірмейді.
Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің басылымдары
Шығарылған: 22.05.2026

Түркістан, 2026

ISBN 978-601-339-508-1



КОНГРЕСІТІҢ ҚҰРМЕТТІ ТӨРАҒАЛАРЫ
KONGRE ONUR KURULU

Док., проф. Мухиттин Шимшек

Prof. Dr. Muhittin Şimşek

(Ахмет Ясауи университеті Өкілетті кеңесінің төрағасы)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi Mütevelli Heyet Başkanı)

Док., проф. Пеями Баттал

Prof. Dr. Peyami Battal

(Ахмет Ясауи университетінің ректор өкілі)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi Rektör Vekili)

Док., Жанар Темірбекова

Dr. Janar Temirbekova

(Ахмет Ясауи университетінің ректоры)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi Rektörü)

ҰЙЫМДАСТЫРУ АЛҚАСЫ
KONGRE DÜZENLEME KURULU

м.ғ.к., қауымд. проф. Ошибаева Айнаш Есімбекқызы

Доғ. Dr. Aynash Oşıbaeva

(Ахмет Ясауи университетінің вице-ректоры, Қазақстан)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi Rektör Yardımcısı, Kazakistan)

Док. Нурлан Ахметов

Dr. Nurlan Akhmetov

(Ахмет Ясауи университеті, «Экология» ҒЗИ директоры, Қазақстан)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi, "Ekoloji" Araştırma Enstitüsü Müdürü, Kazakistan)

х.ғ.к., проф. Раушан Нұрділлаева

Prof. Dr. Rauşan Nurdıllayeva

(Ахмет Ясауи университеті, Жаратылыстану ғылымдары факультетінің

деканы, Қазақстан)

(Fen Bilimleri Fakültesi Dekanı, Kazakistan)

Док., проф. Зелиха Селамоглу

Prof. Dr. Zeliha Selamoğlu

(Нигде Өмер Халисдемир университеті, Түркия)

(Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye)

Док., қауымд. проф. Арман Маханбетов

Доғ. Dr. Arman Mahanbetov

(Ахмет Ясауи университеті, «Экология» ҒЗИ, Қазақстан)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi, "Ekoloji" Araştırma Enstitüsü, Kazakistan)

х.ғ.к. Гульнар Койшиева

Dr. Gulnar Koşiyeva

(Ахмет Ясауи университеті, «Экология» ҒЗИ, «Экологиялық бақылау және

химиялық талдау» аналитикалық зертханасының меңгерушісі, Қазақстан)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi, "Ekoloji" Araştırma Enstitüsü, 'Çevresel Kontrol ve

Kimyasal Analiz' Analitik Laboratuvarı Müdürü, Kazakistan)

ҒЫЛЫМИ КЕҢЕС МҮШЕЛЕРІ
BİLİM KURULU

Док., проф. Пеями Баттал

Prof. Dr. Peyami Battal

(Ахмет Ясауи университетінің ректор өкілі)

(Ahmet Yesevi Üniversitesi Rektör Vekili)

Док., проф. Тамарахан Өсербаева

Prof. Dr. Oserbayeva Tamarahan

(Қарақалпақ ауыл шаруашылығы және агротехнологиялар институты,

Қарақалпақстан)

(Karakalpak Tarım ve Tarımsal Teknoloji Enstitüsü, Karakalpakstan)

Док., проф. Зелиха Селамоглу

Prof. Dr. Zeliha Selamoğlu

(Нииде Өмер Халисдемир университеті, Түркия)
(Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye)

Док., проф. Айсел Чаалан Гүнал

Prof. Dr. A. Çağlan Günel

(Гази университеті, Түркия)
(Gazi Üniversitesi, Türkiye)

Док., проф. Фарук Селчук

Prof. Dr. Faruk Selçuk

(Кыршехир Ахи Евран университеті, Түркия)
(Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Türkiye)

Док., проф. Фехиман Чинер

Prof. Dr. Fehiman Çiner

(Нииде Өмер Халисдемир университеті, Түркия)
(Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye)

Док., проф. Неслихан Доған Сааламтимур

Prof. Dr. Neslihan Doğan Sağlamtimur

(Нииде Өмер Халисдемир университеті, Түркия)
(Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye)

х.ғ.к., қауымд. проф. Қарлыға Сарбаева

Doç. Dr. Karlığa Sarbayeva

(Ахмет Ясауи университеті, Жаратылыстану ғылымдары факультеті,
«Экология және Химия» кафедрасының меңгерушісі, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Ekoloji ve Kimya Bölüm Başkanı, Kazakhstan)

техн.ғ.к., қауымд. проф. Ғани Исаев

Doç. Dr. Gani İsayev

(Ахмет Ясауи университеті, Жаратылыстану ғылымдары факультеті,
«Биология» кафедрасының меңгерушісі, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

техн.ғ.к., қауымд. проф. Эльмира Ибрагимова

Doç. Dr. Elmira İbragimova

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

Док., қауымд. проф. Гульнар Зияева

Doç. Dr. Gulnar Ziyayeva

(Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Қазақстан)
(Dulati Taraz Bölge Üniversitesi, Kazakistan)

Док., қауымд. проф. Абдалова Гулистан

Doç. Dr. Abdalova Gülistan

(Ташкент мемлекеттік ауылшаруашылық университеті, Өзбекстан)
(Tashkent Devlet Tarım Üniversitesi, Özbekistan)

Док., қауымд. проф. Нұрлыбек Әбдімүтәліп

Doç. Dr. Nurlıbek Abdımutalıp

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

Док. Нурлан Ахметов

Dr. Nurlan Akhmetov

(Ахмет Ясауи университеті, «Экология» ҒЗИ директоры, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, “Ekoloji” Araştırma Enstitüsü Müdürü, Kazakistan)

Док. Асия Майматаева

Dr. Asiya Maymataeva

(Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазақстан)
(Abay Kazak Milli Pedagoji Üniversitesi, Kazakistan)

х.ғ.к., проф. Раушан Нұрділлаева

Prof. Dr. Rauşan Nurdıllayeva

(Ахмет Ясауи университеті, Жаратылыстану ғылымдары факультетінің
деканы, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi Dekanı, Kazakistan)

Док., проф. Ахмет Казанкая

Prof. Dr. Ahmet Kazankaya

(Кыршехир Ахи Евран университеті, Түркия)
(Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Türkiye)

Док., проф. Зарлық Маймекөв

Prof. Dr. Zarlyk Maimekov

(Қырғызстан-Түркия Манас университеті, Қырғызстан)
(Kyrgyzstan-Türkiye Manas Üniversitesi, Kirgizistan)

Док., қауымд. проф. Алмагүл Убадуллаева

Doç. Dr. Almagul Ubaydullaeva

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

Док., қауымд. проф. Нурдана Салыбекова

Doç. Dr. Nurdana Salybekova

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

х.ғ.к., қауымд. проф. Индира Аймбетова

Doç. Dr. İndira Aimbetova

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

техн.ғ.к., қауымд. проф. Құралай Абдраимова

Doç. Dr. Kuralay Abdraimova

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

Док., қауымд. проф. Дилара Сунакбаева

Doç. Dr. Dilara Sunakbaeva

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

Док. қауымд. проф. Ғазиза Тойчибекова

Doç. Dr. Gaziza Toychibekova

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

Док. қауымд. проф. Баян Тойжигитова

Doç. Dr. Bayan Toizhigitova

(Ахмет Ясауи университеті, Қазақстан)
(Ahmet Yesevi Üniversitesi, Kazakistan)

Док., қауымд. проф. м.а. Кубат Кемелов

Yrd. Doç. Dr. Kubat Kemelov

(Қырғызстан-Түркия Манас университеті, Қырғызстан)
(Kyrgyzstan-Türkiye Manas Üniversitesi, Kirgizistan)

Док. Антони Суред

Dr. Antoni Sureda

(Балеар аралдарының университеті, Испания)
(Balear Adaları Üniversitesi, İspanya)

Док. Дариуш Илгхари

Dr. Dariush Ilghari

(Техас университеті, АҚШ)
(Teksas Üniversitesi, ABD)

Док. Гүлжайна Алпамысова

Dr. Gulzhayna Alпамysova

(Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік педагогикалық университеті, Қазақстан)
(Güney Kazakhstan Devlet Pedagoji Üniversitesi, Kazakistan)

Док. Александрос Г. Георакилас

Dr. Alexandros G. Georgakilas

(Афины ұлттық техникалық университеті, Греция)
(Atina Ulusal Teknik Üniversitesi, Yunanistan)

Док. Ева Ургеова

Dr. Eva Urgeova

(SS университеті, Словакия)
(SS Üniversitesi, Slovakia)

Док. Габриель Плаван

Dr. Gabriel Plavan

(Александру Иоан Куза Яси университеті, Румыния)
(Alexandru Ioan Cuza Iasi Üniversitesi, Romanya)

Док. Гамал Бадр

Dr. Gamal Badr

(Ассиут университеті, Египет)
(Assiut Üniversitesi, Mısır)

Док. М. Б. Таж

Dr. M. B. Taj

(Бахавалпур Ислам университеті, Пәкістан)
(Bahawalpur İslam Üniversitesi, Pakistan)

Док. Роза Мария Орриолс

Dr. Rosa Maria Orriols

(Барселона университеті, Испания)
(Barcelona Üniversitesi, İspanya)

Док. Сачио Абуратани

Dr. Sachiyo Aburatani

(Жетілдірілген өнеркәсіптік ғылым және технологиялар ұлттық институты, Жапония)

Док. Самра Медедович

Dr. Samra Mededovic

(Мостар Дземал Биедич университеті, Босния және Герцеговина)
(Mostar Dzermal Bijedic Üniversitesi, Bosna-Hersek)

Док. Сanel Риданович

Dr. Sanel Ridanovic

(Мостар Дземал Биедич университеті, Босния және Герцеговина)
(Mostar Dzermal Bijedic Üniversitesi, Bosna-Hersek)

Док. Ибрахим Алиния-Ахандани

Dr. Ebrahim Alinia-Ahandani

(Гуйлан медициналық ғылымдар университеті, Рашт, Иран)
(Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran)

Док. Едуардо Собарзо-Санчес

Dr. Eduardo Sobarzo-Sanchez

(Орталық университет, Чили)
(Central Üniversitesi, Şili)

Док. Мария Даглия

Dr. Maria Daglia

(Павия университеті, Италия)
(Pavia Üniversitesi, İtalya)

Док. Нади Брэйди

Dr. Nady Braidy

(Жаңа Оңтүстік Уэльс университеті, Австралия)
(New South Wales Üniversitesi, Avustralya)

Док. Нуреддин Джебли

Dr. Noureddine Djebli

(Мостаганем университеті, Алжир)
(Mostaganem Üniversitesi, Cezayir)

Док. Рамин Ектейари Салмас

Dr. Ramin Ekhteiri Salmas

(Кингс колледжі, Лондон, Англия)
(King's College Londra, İngiltere)

Док. Татьяна Круподорова

Dr. Tetiana Krupodorova

(Украина Ұлттық ғылым академиясының Тағамдық биотехнология және геномика институты, Украина)

Док. Сейфуддин Жомма

Dr. Seifeddine Jomaa

(Гельмгольц қоршаған ортаны зерттеу орталығы – UFZ, Германия)
(Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Germany)

Док. Гизем Хазан Акчай

Dr. Gizem Hazan Akcaу

(Муш Алпарслан университеті, Түркия)
(Muş Alparslan Üniversitesi, Türkiye)

ҚАТЫСУШЫ ЕЛДЕР

KATILIMCI ÜLKELER

PARTICIPANT COUNTRIES

Қазақстан

Kazakistan

Kazakhstan

Түркия

Türkiye

Türkiye

Қырғызстан

Kırgızistan

Kyrgyzstan

Румыния

Romanya

Romania

Молдовия

Moldova

Moldova

Қытай

Çin

China

Иран

İran

Iran

Польша

Polonya

Poland

Италия

İtalya

Italy

MAZMҰНЫ

Yaşar Erdoğan, Ümmügülsüm Erdoğan, Sadık Çıvracı <i>Kuraklık ve Sıcaklık Stresinin Bitki-Mikrobiyota Etkileşimleri ve Arı Beslenmesine Etkileri</i>	1
Ümmügülsüm Erdoğan, Yaşar Erdoğan <i>Bal Ormanlarının Toprak Erozyonu Kontrolündeki Rolü: Polinasyon Destekli Vegetasyon Sürekliliği ve Ekosistem Stabilitesi</i>	14
Batuhan Selamoğlu, Ferdi Güler <i>Yüksek Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Sektör Entegrasyonu ve İletim Güçlendirmesi</i>	28
Zeliha Selamoglu <i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Environmental Threats: The Current Situation</i>	47
Zeliha Selamoglu <i>Studies on Aquatic Animal Health and Aquaculture within the Scope of Apitherapy Applications</i>	53
Zeliha Selamoglu <i>The Environmental Importance of Bee Products and Bee Health Within the Scope of One Health</i>	62
Mesut Selamoğlu <i>Basel Sözleşmesi Çerçevesinde Elektronik Atık Ticareti ve Lojistik Yönetimi</i>	68
Mesut Selamoğlu <i>Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Atık Lojistiği: Kavramsal Bir Değerlendirme</i>	76
Fatma Burcu Karakoç <i>Endüstriyel ve Evsel Atıkların Geri Dönüşümü ve Bertarafında Döngüsel Ekonomi Yaklaşımı: Sürdürülebilir Atık Yönetimi İçin Bütüncül Bir Model</i>	84
Mesut Selamoğlu <i>İkincil Hammadde Ticareti Olarak Atık: Uluslararası Ticaretin Dönüşen Yapısı Üzerine Bir Derleme</i>	90
Маханбетов Арман, Юлдашбек Давлат, Гаипов Тулкинжон, Адылов Айдарбек, Сатанов Якубжан, Ахметов Нурлан <i>Глауконит және вермикомпост негізіндегі органо-минералды тыңайтқыш: әзірлеу және қолдану мүмкіндіктері</i>	97
Юлдашбек Давлат, Нарзулла Тоғжан, Тайметова Индира, Жаңабекқызы Ақерке, Акайчикова Мадина, Серікова Элнара, Ахметов Нурлан <i>Вермикомпост негізіндегі органикалық тыңайтқыштың топырақ құнарлылығы мен көкөніс дақылдарының өнімділігіне әсері</i>	103
Арман Маханбетов, Тулкинжон Гаипов, Мырзабеков Бегзат <i>Электрохимиялық әдіспен алынған ультрадисперсті мыс ұнтақтарының түзілу ерекшеліктері және олардың трибологиялық қолданылу перспективалары</i>	109
Yaşar Erdoğan, Ümmügülsüm Erdoğan, Veli Acar <i>Çevre Mikrobiyolojisi Perspektifinden Bal Arılarının (Apis mellifera) Biyolojik İndikatör Olarak Kullanımı</i>	115

Ümmügülsüm Erdoğan, Yaşar Erdoğan <i>Mikrobiyal Biyogübrelerin Bitki Kalitesi ve Polinatör Çekiciliği Üzerindeki Etkileri: Ekosistem Etkileşimleri</i>	128
Elvan Yalçınkaya <i>Sürdürülebilir Gelecek İçin Enerji Vatandaşlığı ve Sosyal Bilgiler Eğitimi</i>	144
İrem Can, Osama Qandeel, Levent Nuralın <i>Yeşil Ekstraksiyonla Elde Edilen Fındık Zurufu ve Biberiye Uçucu Yağının Sinerjik Etkisi: Üzüm Çekirdeği Ekstresinin Raf Ömrünün Uzatılması ve Kinetik Modellemesi</i>	152
Эртаев Нұрсұлтан, Курбанбеков Шерзод, Амангельдиева Юлдуз, Токежанов Азамат <i>Механикалық түрде белсендірілген Pd-Ti-Mg жүйесінің құрылымдық-фазалық күй-күйін зерттеу</i>	158
Eyüp Artvinli, Niyazi Kaya <i>Green Energy Literacy in Secondary Geography Curricula of the Organization of Turkic States: A Comparative Curriculum Analysis</i>	172
Eyüp Artvinli, Niyazi Kaya <i>The Climate Change–Renewable Energy Relationship in Turkish High School Geography Textbooks: A Document Analysis Study</i>	184
Eyüp Artvinli, Niyazi Kaya <i>Preparing Geography Teachers for the Green Transition: An Analysis of Geography Teacher Education Programs in Türkiye</i>	192
Esmeray Alacadağlı <i>İklim Değişikliğinin Arı Popülasyonu ve Arıcılık Faaliyetlerine Etkileri: Türkiye Örneği</i>	210
Muhammad Yasir Naeem, Batuhan Selamoglu, Zeliha Selamoglu <i>Artificial Intelligence in Agriculture for Drone Based Crop Monitoring and Sustainable Intensification</i>	221
Muhammad Umair Asghar, Mariusz Korczyński <i>Large-Scale Screening of Hydrobarothermally Processed Soybean Prototypes to Identify Optimal Nutritional Quality for Poultry</i>	223
Muhammad Umair Asghar, Qurat ul ain Sajid, Martyna Wilk, Mariusz Korczyński <i>Feed Efficiency and Environmental Sustainability: Key Challenges in Global Poultry Production</i>	224
Muhammad Yasir Naeem, Yaira Ulugbekovna Rakhmetova, Zeliha Selamoglu <i>Biological Nitrification Inhibition in Legumes and Cereals for Improved Nitrogen Retention and Sustainable Crop Production</i>	225
Sergiu Dobrojan, Gabriel-Ionuț Plavan, Zeliha Selamoglu, Oana-Alexandra Plavan, Melnic Victor, Jigău Gheorge, Galina Dobrojan <i>General Biochemical Composition of Chlorella Vulgaris Biomass Grown on Wastewater from the Recirculating Aquaculture System</i>	227
Muhammad Yasir Naeem, Furkat Ubaev, Zeliha Selamoglu <i>Haskap (Lonicera caerulea) A Potent New Source of Natural Antioxidants</i>	229
Şeyda Taşar, Beyda Taşar, Nurlan Akhmetov, Meltem Çakmak Kalkan	231

<i>Biyokütle Piroliz Ürünleri ve Biyoyağ Üst Isıl Değerinin Tahmini İçin Yorumlanabilir Çoklu-Çıkışlı Makine Öğrenmesi Yaklaşımı</i>	
Muhammad Tayyeb Tahir, Şeyda Taşar, Fatih Kaya	
<i>Plastik Atıkların Katalitik Torrefaksiyonu: Süreç Mekanizmaları, Enerji İyileştirme ve Sürdürülebilir Kaynak Geri Kazanımı</i>	233
Qurat ul ain Sajid, Muhammad Umair Asghar, Patrycja Wróblewska, Barbara Król, Mariusz Korczyński	
<i>Microbial Phytase Supplementation Enhances Phytate Degradation and Mineral Utilization in Equine Diets</i>	235
Sergiu Dobrojan1, Gabriel-Ionuț Plavan, Zeliha Selamoglu, Galina Dobrojan1, Oana-Alexandra Plavan, Mircea Nicușor Nicoară, Aurica Doina, Cristina Croitoru	
<i>Use of Wastewater From Recirculating Aquaculture Systems for the Production of Spirulina Platensis Biomass with Optimal Amino Acid Profile</i>	236
Damira Sambaeva, Chynara Jayloobai kyzy, Zarlik Maimekov, Miraida Turgunbekova, Janarbek Izakov	
<i>Assessment of the Carbon Footprint in the Clinker-Based Cement Production Process</i>	238
Eren Balcı, Selçuk Arıkan, Levent Nuralın	
<i>Nikel Floroborat Sentez Reaksiyonunun Kinetik İncelenmesi ve Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi</i>	239
Bekzhan D. Kossalbayev, Mingda Lyu, Assemgul K. Sadvakasova, Dilnaz E. Zaletova, Meruyert O. Bauenova, Jingjing Wang, Zhiyong Huang	
<i>Lysinibacillus fusiformis BG46 Promotes Rice Growth and Reshapes the Rhizosphere Microbiome Under Drought Stress</i>	241
Altynbek Abseyt, Nazym Yelibayeva, Gulzat Abdikarim, Nurlan Akhmetov	
<i>Determination of Saponins in the Plant Raw Material of Acanthophyllum pungens</i>	243
Madina Suleimenova, Zhandos Tauanov	
<i>Development of A Method for Obtaining Synthetic Zeolites and Nanocomposites from Industrial Waste for Water Purification from Pollutants</i>	244
Nuraly S. Akimbekov, Kuanysh T. Tastambek	
<i>Application of Humic-Enriched Fly Ash for Slow-Release Improvement of Soil Health</i>	246
Antoni Sureda, Jessica Lombardo, Maria Magdalena Quetglas-Llabrés, Amanda Cohen-Sánchez, Silvia Tejada, Samuel Pinya, Montserrat Compa	
<i>Rapid expansion and physiological impacts of the invasive macroalga Batophora occidentalis in a Mediterranean coastal lagoon</i>	247
Ebrahim Alinia-Ahandani, Sahebe Hajipour, Zahra Alizadeh-Tarpoei	
<i>Green Extraction and Pharmaceutical Applications of Plant-Derived Bioactive Compounds: Advancing Sustainable Food Safety and Human Health</i>	248
Amir Aris, Ebrahim Alinia-Ahandani	250

<i>Climate Change-Induced Heatwaves Trigger Malignant Ventricular Arrhythmias via Autonomic Dysfunction and Cardiac Electrical Remodeling: A Path to Green Energy Mitigation</i>	
Ebrahim Alinia-Ahandani, Amir Aris	
<i>Environmental Heavy Metals (Lead and Cadmium) from Fossil Fuel Combustion Drive Epigenetic Remodeling and Subclinical Cardiac Fibrosis: A Multimodal Imaging and DNA Methylation Study</i>	252
Ebrahim Alinia-Ahandani, Arian Mirzapour-Pahmedani	
<i>Engineered Microbial Consortia for Bioleaching of Critical Metals from Spent LIBs: A Green Circular Economy Approach</i>	254
Ebrahim Alinia-Ahandani, Sahebe Hajipour, Amir Aris, Zeliha Selamoglu	
<i>Honey Bees as Bio-indicators in the One Health Continuum: Bridging Environmental Monitoring, Pharmaceutical Toxicology, and Public Health</i>	255

Kuraklık ve Sıcaklık Stresinin Bitki-Mikrobiyota Etkileşimleri ve Arı Beslenmesine Etkileri

Effects of Drought and Heat Stress on Plant-Microbiota Interactions and Honey Bee Nutrition

Yaşar Erdoğan

Prof. Dr., Bayburt University, Demirözü Vocational School, Department of Veterinary Medicine, Bayburt, Türkiye.

Ümmügülsüm Erdoğan

Prof. Dr., Bayburt University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Bayburt, Türkiye.

Sadık Çıvracı

Assist. Prof. Dr., Bayburt University, Demirözü Vocational School, Department of Veterinary Medicine, Bayburt, Türkiye.

Özet

Küresel iklim değişikliği, kuraklık ve yüksek sıcaklık streslerinin sıklığını ve şiddetini artırarak bitki fizyolojisi, toprak mikrobiyal toplulukları ve polinatör ekolojisi üzerinde önemli değişimlere neden olmaktadır. Özellikle bitki-mikrobiyota etkileşimleri, bitkilerin stres koşullarına adaptasyonunda kritik rol oynarken, bu süreçlerin nektar ve polen kalitesi üzerindeki dolaylı etkileri arı beslenmesi açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve arbusküler mikorizal funguslar (AMF), su ve besin elementi alımını artırarak bitkilerin kuraklık ve sıcaklık stresine toleransını geliştirebilmektedir. Bununla birlikte, bu mikrobiyal etkileşimler bitkilerde karbon metabolizması, sekonder metabolit üretimi, nektar şeker kompozisyonu, amino asit içeriği ve uçucu organik bileşik (VOC) üretimi gibi birçok fizyolojik süreci de etkileyebilmektedir. Bu değişimler, polinatörlerin besin tercihleri, foraging davranışları ve koloni performansı üzerinde dolaylı sonuçlar oluşturabilmektedir. Özellikle *Apis mellifera* gibi geneli polinatörler, nektar ve polen kalitesindeki değişimlere duyarlı olup floral kaynakların besinsel değerine bağlı olarak ziyaret davranışlarını değiştirebilmektedir. Bu derlemede, kuraklık ve sıcaklık stresinin bitki-mikrobiyota etkileşimleri üzerindeki etkileri ile bu süreçlerin arı beslenmesi ve polinatör davranışları üzerindeki potansiyel sonuçları mevcut literatür ışığında değerlendirilmiştir. Mevcut bulgular, stres koşullarının yalnızca bitki verimliliğini değil, aynı zamanda polinatör beslenmesini ve arıcılık sistemlerini de etkileyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük ölçüde kontrollü deney koşullarına dayandığı ve saha koşullarında koloni düzeyinde uzun dönemli araştırmaların yetersiz olduğu görülmektedir. Gelecekteki çalışmaların, iklim değişikliği, bitki fizyolojisi, mikrobiyal topluluklar ve polinatör ekolojisini birlikte değerlendiren çok trofik düzeyli yaklaşımlara odaklanması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kuraklık stresi, sıcaklık stresi, bitki mikrobiyotası, PGPR, AMF, arı beslenmesi, polinator davranışı, *Apis mellifera*

Abstract

Global climate change is increasing the frequency and severity of drought and heat stress, causing significant alterations in plant physiology, soil microbial communities, and pollinator ecology. Plant-microbiota interactions play a critical role in plant adaptation to environmental stress conditions, while their indirect effects on nectar and pollen quality are becoming increasingly important for honey bee nutrition. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can enhance plant tolerance to drought and heat stress by improving water and nutrient uptake. In addition, these microbial interactions may influence several physiological processes in plants, including carbon metabolism, secondary metabolite production, nectar sugar composition, amino acid content, and volatile organic compound (VOC) production. Such changes may indirectly affect pollinator feeding preferences, foraging behavior, and colony performance. Generalist pollinators such as *Apis mellifera* are particularly sensitive to variations in nectar and pollen quality and may modify their visitation behavior according to the nutritional value of floral resources. This review evaluates the effects of drought and heat stress on plant-microbiota interactions and discusses their potential consequences for honey bee nutrition and pollinator behavior based on current literature. Existing evidence indicates that environmental stress conditions may affect not only plant productivity but also pollinator nutrition and apicultural systems. However, most available studies are based on controlled experimental conditions, while long-term colony-level field studies remain limited. Future research should focus on multitrophic approaches integrating climate change, plant physiology, microbial communities, and pollinator ecology.

Keywords: Drought stress, heat stress, plant microbiota, PGPR, AMF, honey bee nutrition, pollinator behavior, *Apis mellifera*

Giriş

Küresel iklim değişikliği, tarımsal üretim sistemleri ve doğal ekosistemler üzerinde giderek artan düzeyde baskı oluşturmaktadır. Özellikle kuraklık ve yüksek sıcaklık stresleri, bitki büyümesi, fizyolojik süreçler ve tarımsal verimlilik üzerinde önemli sınırlayıcı faktörler arasında yer almaktadır (IPCC, 2023). İklim değişikliği senaryoları, birçok bölgede sıcak hava dalgalarının sıklığının artacağını, yağış rejimlerinin düzensizleşeceğini ve kuraklık olaylarının daha uzun süreli hale geleceğini göstermektedir. Bu süreçler yalnızca bitkilerin büyüme ve gelişimini değil, aynı zamanda bitki-toprak mikroorganizması ilişkilerini ve polinator ekolojisini de doğrudan etkilemektedir.

Bitkiler, çevresel stres koşullarına karşı adaptasyon geliştirebilmek amacıyla kök bölgesindeki mikrobiyal topluluklarla karmaşık simbiyotik ilişkiler kurmaktadır. Özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (Plant Growth-Promoting

Rhizobacteria; PGPR) ve arbusküler mikorizal funguslar (AMF), bitkilerin kuraklık ve sıcaklık stresine toleransını artırabilen önemli mikrobiyal gruplar arasında yer almaktadır (Vessey, 2003; Smith ve Read, 2008). Bu mikroorganizmalar, su ve besin elementi alımını artırmanın yanı sıra hormonal düzenleme, ozmotik denge, antioksidan savunma mekanizmaları ve sekonder metabolit üretimi gibi birçok fizyolojik süreç üzerinde etkili olabilmektedir (Glick, 2012; Pozo ve Azcón-Aguilar, 2007).

Bitki-mikrobiyota etkileşimleri yalnızca bitki stres toleransı açısından değil, aynı zamanda floral kaynakların kalitesi bakımından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Nektar ve polen bileşimi, polinatörlerin besin tercihleri ve foraging davranışları üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Nicolson ve Thornburg, 2007). Özellikle *Apis mellifera* gibi genelci polinatörler, nektar şeker kompozisyonu, amino asit içeriği ve sekonder metabolit düzeylerine duyarlı olup floral kaynakların besinsel kalitesine bağlı olarak ziyaret davranışlarını değiştirebilmektedir (Vaudo ve ark., 2015; Wright ve ark., 2013).

Kuraklık ve sıcaklık stresleri, bitkilerde karbon metabolizması, fotosentetik aktivite ve sekonder metabolit üretiminde önemli değişimlere neden olarak nektar ve polen kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, stres koşullarının bitki-mikrobiyota etkileşimleri aracılığıyla polinatör beslenmesi üzerindeki dolaylı etkileri henüz yeterince açıklığa kavuşmamıştır. Özellikle stres altındaki bitkilerde mikrobiyal simbiyontların nektar üretimi, amino asit kompozisyonu ve VOC profilleri üzerindeki etkilerinin polinatör davranışlarını yönlendirebildiği bildirilmekle birlikte, bu mekanizmaların ekolojik sonuçlarına ilişkin bilgi hâlen sınırlıdır (Vannette, 2020; Pineda ve ark., 2010).

Son yıllarda polinatör popülasyonlarında gözlenen küresel azalış eğilimi, bitki-polinatör etkileşimlerini etkileyen tüm faktörlerin daha bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Potts ve ark., 2010; Vanbergen, 2013). Arılar başta olmak üzere birçok polinatör grubu, habitat kaybı, pestisit kullanımı, besin kaynaklarının azalması ve iklim değişikliği gibi çoklu stres faktörlerinin etkisi altında bulunmaktadır. Bu durum, polinatör beslenmesinin sürdürülebilirliği açısından bitki kalite parametrelerinin ve bitki-mikrobiyota ilişkilerinin önemini artırmaktadır.

Bu derlemenin amacı, kuraklık ve sıcaklık stresinin bitki-mikrobiyota etkileşimleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve bu süreçlerin arı beslenmesi ile polinatör davranışları üzerindeki potansiyel sonuçlarını mevcut literatür ışığında ortaya koymaktır. Ayrıca çalışma kapsamında, bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinin iklim değişikliği bağlamında çok trofik düzeyde değerlendirilmesinin gerekliliği tartışılmıştır.

Kuraklık ve Sıcaklık Stresinin Bitki Fizyolojisine Etkileri

Kuraklık ve yüksek sıcaklık stresleri, bitkilerde fotosentetik kapasitenin azalması, stomatal kapanma, oksidatif stres artışı ve karbon metabolizmasının değişmesi gibi çok sayıda fizyolojik değişime neden olmaktadır (Farooq ve ark., 2009). Özellikle uzun süreli su eksikliği, hücresel su potansiyelinin düşmesine, büyüme hızının azalmasına ve biyokütle üretiminin sınırlanmasına yol açmaktadır. Yüksek sıcaklık stresinin ise

protein denatürasyonu, membran stabilitesinde bozulma ve enzim aktivitelerinde azalma gibi olumsuz etkiler oluşturduğu bildirilmektedir.

Kuraklık koşullarında bitkiler, su kaybını sınırlandırabilmek amacıyla stomatal iletkenliği azaltmakta ve buna bağlı olarak fotosentetik aktiviteyi baskılamaktadır. Bu durum karbon asimilasyonunun azalmasına ve enerji metabolizmasının bozulmasına yol açabilmektedir. Benzer şekilde yüksek sıcaklık stresinin fotosistem II aktivitesini baskılayarak fotosentetik verimliliği düşürdüğü bildirilmektedir. Söz konusu fizyolojik değişimler, bitki büyüme performansını doğrudan etkilerken aynı zamanda floral kaynakların miktarı ve besinsel kalitesi üzerinde de önemli sonuçlar oluşturmaktadır.

Çevresel stres koşulları, bitkilerde primer ve sekonder metabolit üretiminde önemli değişimlere neden olabilmektedir. Özellikle fenolik bileşikler, flavonoidler ve çeşitli antioksidan metabolitlerin üretiminin stres altında arttığı bildirilmektedir (Pozo ve Azcón-Aguilar, 2007). Bu bileşikler bitkilerin savunma mekanizmalarında görev almakta ve oksidatif hasarın azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca sekonder metabolit profillerinde meydana gelen değişimlerin nektar ve polen bileşimini etkileyerek polinatör beslenmesi ve floral tercih davranışları üzerinde dolaylı sonuçlar oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

Kuraklık ve sıcaklık streslerinin nektar üretimi üzerindeki etkileri birçok çalışmada ortaya konmuştur. Özellikle su stresi altında nektar hacminin azaldığı ve nektardaki şeker konsantrasyonunun değişebildiği bildirilmektedir (Takkis ve ark., 2015). Bunun yanında polen protein içeriği, amino asit kompozisyonu ve lipid profillerinin de çevresel koşullardan etkilenebileceği ifade edilmektedir. Bu değişimler, polinatörlerin besin tercihlerini ve ziyaret davranışlarını doğrudan etkileyebilecek potansiyele sahiptir.

Bu fizyolojik değişimlerin, floral kaynakların besinsel kalitesi üzerinden polinatör ekolojisi ve arıcılık sistemleri üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği düşünülmektedir. Floral kaynakların miktarı ve besinsel kalitesi, arı kolonilerinin gelişimi, bağışıklık sistemi ve üretim performansı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır (Alaux ve ark., 2010). Nektar ve polen bileşiminde meydana gelen değişimlerin; brood gelişimi, işçi arı popülasyonu, bağışıklık kapasitesi ve koloni dayanıklılığı gibi temel biyolojik süreçleri etkileyebildiği bildirilmektedir (Di Pasquale ve ark., 2013). Özellikle iklim değişikliğinin yoğunlaştığı bölgelerde, bitki fizyolojisinde meydana gelen stres kaynaklı değişimlerin polinatör ekolojisi üzerindeki etkilerinin daha belirgin hale gelebileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle çevresel stres koşullarının bitki fizyolojisi üzerindeki etkilerinin, bitki-mikrobiyota etkileşimleri ve polinatör beslenmesi bağlamında birlikte ele alınması gerekmektedir.

Bitki-Mikrobiyota Etkileşimleri ve Stres Adaptasyonu

Bitkiler, çevresel stres koşullarına karşı adaptasyon sağlayabilmek amacıyla kök bölgesindeki mikrobiyal topluluklarla karmaşık simbiyotik ilişkiler geliştirmektedir. Özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve arbusküler mikorizal funguslar (AMF), kuraklık ve sıcaklık stresine karşı bitki toleransını artıran temel

микробиал группар араcында деғерлендирилмекедир (Vessey, 2003; Smith ve Read, 2008).

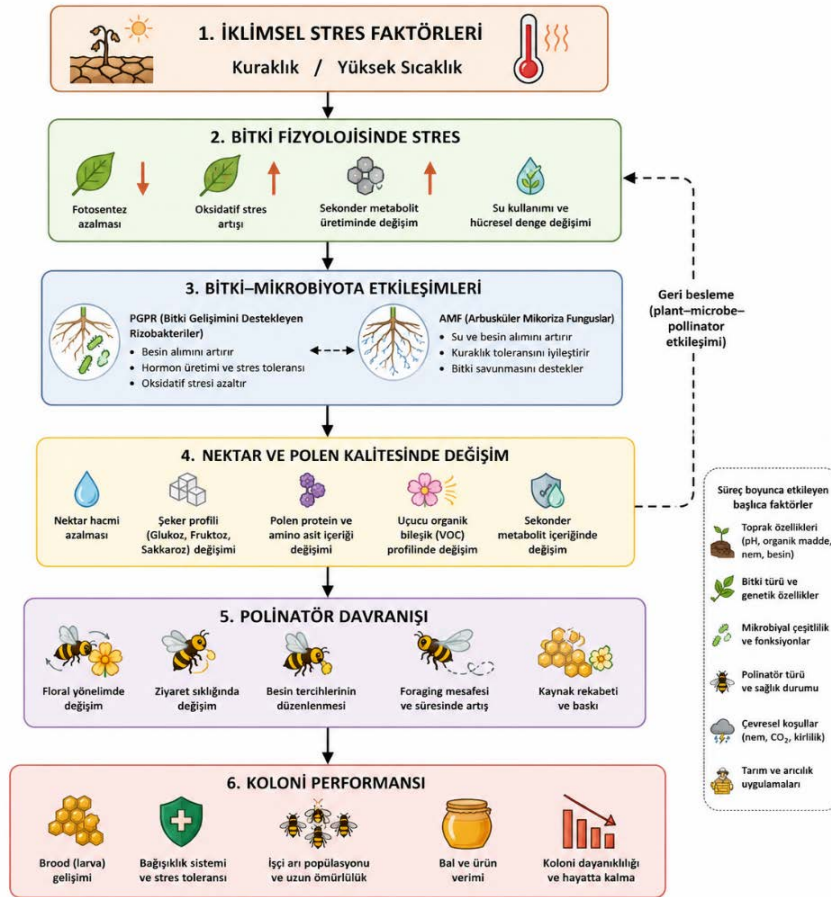
PGPR'лер, бики бүйүмесини доғрудан ве долайлы мекеанизмалар арацılıғıyla деcтекейебилмекедир. Бу микроорганизмалар; азот фиксasyonu, фосфат чөзүнүрлүгүнүн артırılması, фитогормон үрецими ве cтес етиленинин азалтılması gibi мекеанизмалар yoluyla бики гешімине katkı сағламaktadır (Glick, 2012; Khalid ve ark., 2004). Özellikle kuraklık koşullarında bazı PGPR türlerinin kök gelişimini teşvik ederek su alım kapasitesini artırdığı ve antioksidan savunma sistemlerini desteklediği bildirilmektedir.

Arbusküлер микоризал funguslar ise kök yüzey alanını genişleterek bitkilerin su ve mineral madde alımını artırabilmektedir. AMF kolonizasyonunun özellikle fosfor alımını iyileştirdiği ve kuraklık koşullarında bitki su dengesinin korunmasına yardımcı olduğu bildirilmektedir (Pozo ve Azcón-Aguilar, 2007). Bunun yanında микоризал симбиозун, bitkilerde ozmotik düzenleme ve sekonder metabolit üretimi üzerinde de etkili olabileceği belirtilmektedir.

Kuraklık ve sıcaklık stresleri yalnızca bitkileri değil, aynı zamanda toprak микробиал topluluklarını da doğrudan etkilemektedir. Toprak nemindeki azalma ve yüksek sıcaklık koşulları, микробиал çeşitlilikte деğişimlere ve bazı faydalı mikroorganizma popülasyonlarında azalmaya neden olabilmektedir. Bu durum, bitki-mikrop etkileşimlerinin yapısını деğiştirerek bitki stres toleransı üzerinde dolaylı sonuçlar oluşturabilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, bitki-mikrobiyota etkileşimlerinin yalnızca bitki büyümesi ve stres toleransı üzerinde değil, aynı zamanda floral kaynakların kimyasal bileşimi ve besinsel kalitesi üzerinde de etkili olabileceğini göstermektedir. Микробиал симбионтların karbon metabolizması, amino asit sentezi ve sekonder metabolit üretimi üzerindeki etkileri; nektar şeker kompozisyonu, polen protein içeriği ve VOC profillerinde деğişimlere neden olabilmektedir (Pineda ve ark., 2010). Bu деğişimlerin, polinatörlerin floral tercihleri, foraging davranışları ve besin seçimleri üzerinde belirleyici rol oynayabileceği düşünülmektedir.

Bununla birlikte mevcut çalışmaların büyük bölümü kontrollü deney koşullarına dayanmakta olup, saha koşullarında çok trofik düzeyde gerçekleştirilen uzun dönemli araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Kuraklık ve sıcaklık stresinin bitki fizyolojisi, bitki-mikrobiyota etkileşimleri ve polinatör davranışı üzerindeki etkilerini gösteren kavramsal model.

Nektar ve Polen Kalitesindeki Değişimler

Nektar ve polen, polinatörlerin temel besin kaynakları olup koloni gelişimi, bağışıklık sistemi ve üretim performansı açısından kritik öneme sahiptir. Nektar başlıca enerji kaynağını oluştururken, polen protein, amino asit, lipid, vitamin ve mineral içeriği sayesinde özellikle larval gelişim ve fizyolojik süreçlerde temel besin kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Roulston ve Cane, 2000).

Kuraklık ve sıcaklık stresleri, bitkilerde floral kaynakların hem miktarını hem de kimyasal bileşimini değiştirebilmektedir. Özellikle su stresi altında birçok bitki türünde nektar hacminin azaldığı, şeker konsantrasyonlarının değiştiği ve amino asit profilinde farklılıkların olduğu bildirilmektedir (Takkis ve ark., 2015). Bu değişimler, polinatörlerin besin tercihlerini ve ziyaret sıklığını doğrudan etkileyebilmektedir. Kuraklık ve sıcaklık stresleri, bitki fizyolojisi ve floral kaynak kalitesi üzerinde çok yönlü değişimlere neden olmakta; bu değişimler polinatör davranışı ve arı beslenmesi üzerinde dolaylı sonuçlar oluşturmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Kuraklık ve sıcaklık stresinin bitki özellikleri ve polinatörler üzerindeki potansiyel etkileri

Stres Faktörü	Bitkide Değişim	Oluşan	Polinatörler Üzerindeki Olası Etki	Kaynak
Kuraklık	Nektar azalma	hacminde	Ziyaret azalma	sıklığında Takkis ve ark.. (2015)
Kuraklık	Polen içeriğinde değişim	protein	Larval yetersizlik	beslenmede Takkis ve ark. (2015)
Yüksek sıcaklık	VOC değişim	profilinde	Floral değişim	yönelimde Raguso (2008)
PGPR/AMF etkileşimi	Su ve besin alımında artış		Floral kalitesinde iyileşme	kaynak Glick (2012)
Sekonder metabolit artışı	Antioksidan kapasitede artış		Bağışıklık ve detoksifikasyon desteği	ve Mao ve ark. (2013)

Nektardaki sakkaroz, glukoz ve fruktoz oranları polinatör tercihlerini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Baker ve Baker, 1983; Nicolson ve Thornburg, 2007). Özellikle *Apis mellifera* gibi genelci polinatörlerin belirli şeker oranlarına duyarlı olduğu ve nektar kalitesindeki değişimlere bağlı olarak foraging davranışlarını değiştirebildiği bildirilmektedir. Bunun yanında nektardaki amino asit kompozisyonunun da polinatör beslenmesinde önemli rol oynadığı belirtilmektedir. Prolin gibi amino asitlerin uçuş aktivitesi ve enerji metabolizması açısından arılar için önemli olduğu ifade edilmektedir (Vaudo ve ark., 2015).

Polen kalitesi de çevresel stres koşullarından önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Kuraklık ve yüksek sıcaklık stresleri altında polen protein içeriğinde azalma meydana gelebileceği ve bazı amino asitlerin konsantrasyonlarının değişebileceği bildirilmektedir. Polen lipid profili ve antioksidan bileşik içeriğindeki değişimler de polinatör fizyolojisi üzerinde etkili olabilmektedir. Düşük kaliteli polen kaynaklarının larval gelişimi, bağışıklık sistemi ve koloni dayanıklılığı üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturabileceği çeşitli çalışmalarda vurgulanmaktadır (Di Pasquale ve ark., 2013).

Son yıllarda bitki-mikrobiyota etkileşimlerinin nektar ve polen bileşimi üzerindeki etkileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. PGPR ve AMF gibi mikrobiyal simbiyontların bitki karbon metabolizmasını ve sekonder metabolit üretimini etkileyerek floral kaynak kalitesini değiştirebildiği bildirilmektedir. Özellikle bazı mikrobiyal etkileşimlerin nektar amino asit içeriğini artırabileceği ve polen protein düzeyleri üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceği ifade edilmektedir.

Bununla birlikte, sekonder metabolitlerde meydana gelen değişimler her zaman olumlu sonuçlar oluşturmamaktadır. Bazı fenolik bileşikler ve alkaloidler düşük konsantrasyonlarda arılar üzerinde koruyucu etkiler gösterebilirken, yüksek düzeylerde floral çekiciliği azaltabilmekte veya beslenme davranışını baskılayabilmektedir (Adler, 2000). Dolayısıyla floral kaynak kalitesindeki değişimlerin polinatörler üzerindeki etkileri; bileşik türü, konsantrasyon ve çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

İklim değışikliği koşullarında floral kaynak kalitesinde meydana gelen değışimlerin, yalnızca bireysel polinatör davranışlarını değil, aynı zamanda koloni düzeyinde enerji dengesi, brood gelişimi ve üretim performansını da etkileyebileceği düşünölmektedir. Bu nedenle nektar ve polen kalitesindeki değışimlerin, bitki-mikrop-polinatör etkileşimleri çerçevesinde bütöncöl biçimde değerdendirilmesi gerekmektedir (Goulson ve ark., 2015).

Polinatör Davranışı ve Arı Beslenmesi

Polinatör davranışı, floral kaynakların miktarı, besinsel kalitesi ve kimyasal bileşimi ile çevresel koşulların birleşik etkisi altında şekillenmektedir. Özellikle arılar, nektar ve polen kalitesindeki değışimlere duyarlı olup besin tercihlerini floral kaynakların enerji ve besin değeriine göre düzenleyebilmektedir (Wright ve ark., 2013). Bu nedenle iklim değışikliğine bağlı çevresel streslerin bitki fizyolojisi ve floral kaynak kalitesi üzerindeki etkileri, polinatör davranışları açısından önemli sonuçlar doğurabilmektedir.

Kuraklık ve sıcaklık stresleri altında nektar hacminde meydana gelen azalmalar, polinatör ziyaret sıklığını doğrudan etkileyebilmektedir. Düşük nektar üretimi, arıların daha geniş alanlarda foraging yapmak zorunda kalmasına neden olarak koloni düzeyinde enerji maliyetlerini artırabilmektedir. Bunun yanında nektar şeker kompozisyonunda meydana gelen değışimlerin de besin tercihleri ve ziyaret davranışları üzerinde belirleyici rol oynadığı bildirilmektedir (Nicolson ve Thornburg, 2007).

Polen kalitesindeki değışimler de arı beslenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Polen protein içeriği, amino asit kompozisyonu ve lipid profili, özellikle larval gelişim ve bağışıklık sistemi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Düşük kaliteli polen kaynaklarının brood gelişimini sınırlayabileceği, işçi arı yaşam süresini azaltabileceği ve koloni dayanıklılığını olumsuz etkileyebileceği bildirilmektedir (Brod Schneider ve Crailsheim, 2010). Bu nedenle iklim değışikliği koşullarında floral kaynakların besinsel değeriinde meydana gelen değışimlerin, koloni sağlığı üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği düşünölmektedir.

Bitki-mikrobiyota etkileşimleri, polinatör davranışlarını yönlendirebilecek önemli ekolojik mekanizmalar arasında değerdendirilmektedir. Mikrobiyal simbiyontların nektar ve polen bileşimini değıştirmesinin yanı sıra VOC üretimini de etkileyebileceği bildirilmektedir (Pineda ve ark., 2010). Çiçek kokuları, polinatörlerin bitkileri tanımasında ve yönelim davranışlarında temel sinyallerden biridir. Bu nedenle VOC profilindeki değışimler, polinatör ziyaret sıklığı ve floral tercih davranışı üzerinde önemli sonuçlar oluşturabilmektedir.

Bazı çalışmalar, stres koşullarında bitkiler tarafından üretilen belirli sekonder metabolitlerin arılar üzerinde koruyucu fizyolojik etkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Özellikle bazı fenolik bileşiklerin antioksidan kapasiteyi artırabileceği ve detoksifikasyon mekanizmalarını destekleyebileceği bildirilmektedir (Mao ve ark., 2013). Ancak sekonder metabolit düzeylerindeki aşırı artışın floral çekiciliği azaltabileceği ve beslenme davranışını baskılayabileceği de belirtilmektedir.

Bununla birlikte mevcut çalışmaların büyük bölümü kontrollü deney koşullarına dayanmakta olup, saha koşullarında bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinin koloni düzeyindeki sonuçlarını inceleyen uzun dönemli araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Koloni Düzeyinde Olası Etkiler

Floral kaynakların miktarı ve besinsel kalitesi, arı kolonilerinin gelişimi, bağışıklık sistemi ve üretim performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Alaux ve ark., 2010). Nektar ve polen kalitesinde meydana gelen değişimler yalnızca bireysel beslenme davranışını değil, aynı zamanda brood gelişimi, işçi arı popülasyonu, bağışıklık kapasitesi ve koloni dayanıklılığı gibi birçok biyolojik süreci etkileyebilmektedir (Di Pasquale ve ark., 2013).

Kuraklık ve sıcaklık stresleri altında floral kaynakların azalması, koloni düzeyinde enerji dengesinin bozulmasına neden olabilmektedir. Özellikle nektar üretimindeki düşüşler, işçi arıların daha geniş alanlarda ve daha uzun süre foraging yapmasına yol açarak enerji maliyetlerini artırabilmektedir. Bu durumun koloni içi iş bölümü organizasyonu ve besin depolama kapasitesi üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

Polen kalitesindeki düşüşler, özellikle larval gelişim ve bağışıklık sistemi açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Protein ve amino asit içeriği düşük polen kaynaklarının brood gelişimini sınırlandırabileceği, işçi arı dayanıklılığını azaltabileceği ve koloni sağlığını olumsuz etkileyebileceği bildirilmektedir (Brodschneider ve Crailsheim, 2010).

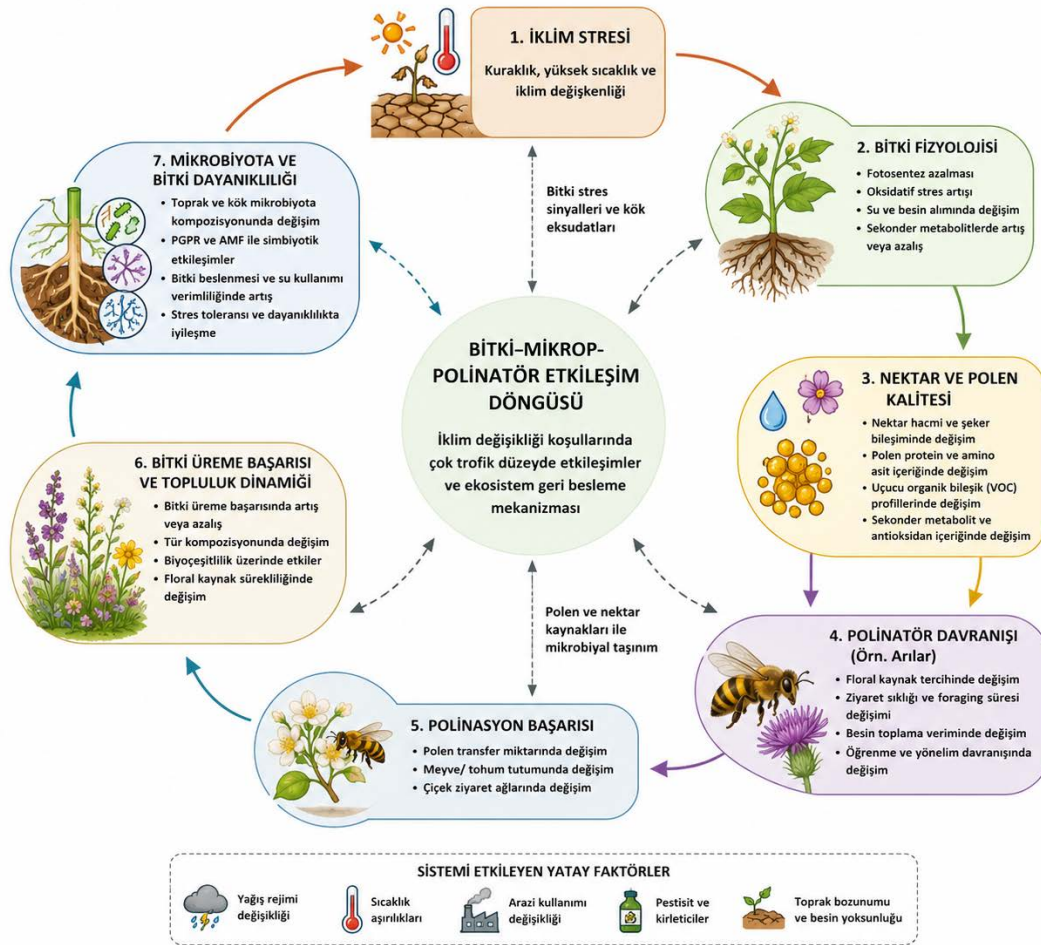
Bitki-mikrobiyota etkileşimleri sonucunda floral kaynak kalitesinde meydana gelen değişimlerin koloni performansı üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği düşünülmektedir. Özellikle PGPR ve AMF gibi mikrobiyal simbiyontların bitki beslenmesini iyileştirmesi ve sekonder metabolit üretimini düzenlemesi sayesinde nektar ve polen kalitesinde olumlu değişimler meydana gelebileceği bildirilmektedir. Bu değişimlerin brood gelişimi, işçi arı popülasyonu ve koloni dayanıklılığı üzerinde olumlu etkiler oluşturma potansiyeli bulunmaktadır.

Bununla birlikte, çevresel stres koşullarının toprak mikrobiyal topluluklarını da etkilemesi nedeniyle bitki-mikrop ilişkilerinin kararlılığı değişebilmektedir. Özellikle uzun süreli kuraklık koşullarında bazı faydalı mikroorganizmaların aktivitesinde azalma meydana gelebileceği ve bunun bitki beslenmesi ile floral kaynak kalitesi üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturabileceği belirtilmektedir. Dolayısıyla iklim değişikliğinin etkileri yalnızca bitki düzeyinde değil, aynı zamanda mikrobiyal topluluklar ve polinatör kolonileri arasındaki ilişkiler üzerinden de değerlendirilmelidir.

Mevcut literatürde koloni düzeyindeki etkileri inceleyen çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Çalışmaların büyük bölümü kontrollü laboratuvar veya kısa süreli sera koşullarında gerçekleştirilmiş olup, gerçek ekosistem koşullarındaki etkiler henüz yeterince açıklığa kavuşmamıştır. Özellikle iklim değişikliğinin yoğunlaştığı

bölgelerde floral kaynak kalitesi, polinatör davranışı ve koloni performansı arasındaki ilişkileri inceleyen uzun dönemli saha çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bağlamda, bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinin çok trofik düzeyde değerlendirilmesi, sürdürülebilir tarım ve arıcılık sistemlerinin geliştirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Floral kaynakların besinsel kalitesinin korunması ve polinatör sağlığının desteklenmesi, yalnızca arıcılık verimliliği açısından değil, aynı zamanda agroekosistemlerin sürdürülebilirliği bakımından da temel öneme sahiptir.



Şekil 2. Kuraklık ve sıcaklık stresinin bitki-mikrobiyota etkileşimleri, floral kaynak kalitesi ve bal arısı beslenmesi üzerindeki etkilerini gösteren kavramsal çerçeve.

Tartışma ve Sonuç

Bu derleme, kuraklık ve sıcaklık stresinin bitki-mikrobiyota etkileşimleri ile polinatör beslenmesi arasındaki ilişkileri çok trofik bir ekosistem yaklaşımı çerçevesinde değerlendirmektedir. Mevcut literatür bulguları, iklimsel stres koşullarının yalnızca bitki büyümesi ve verimliliği üzerinde değil, aynı zamanda floral kaynak kalitesi, mikrobiyal topluluk yapısı ve polinatör davranışları üzerinde de önemli etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen kavramsal çerçeve, bitki-mikrobiyota etkileşimlerinin yalnızca bitki stres toleransı açısından değil, aynı zamanda floral kaynak kalitesi ve polinatör sağlığı açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kuraklık ve yüksek sıcaklık streslerinin bitki fizyolojisi üzerinde oluşturduğu değişimler; nektar üretimi, şeker kompozisyonu ve polen besin içeriği gibi floral kaynak özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu değişimlerin, polinatörlerin besin tercihleri, foraging davranışları ve koloni düzeyindeki enerji dengesi üzerinde belirleyici rol oynayabileceği değerlendirilmektedir.

Bitki-mikrobiyota etkileşimleri, bitkilerin çevresel stres koşullarına adaptasyonunda temel biyolojik mekanizmalar arasında değerlendirilmektedir. Özellikle PGPR ve AMF gibi faydalı mikroorganizmaların; su ve besin elementi alımını artırması, antioksidan savunma sistemlerini desteklemesi ve sekonder metabolit üretimini düzenlemesi sayesinde bitkilerin kuraklık ve sıcaklık stresine karşı toleransını artırabildiği bildirilmektedir. Bununla birlikte, bu mikrobiyal etkileşimlerin floral kaynak kalitesi üzerindeki etkileri henüz yeterince açıklığa kavuşmamıştır.

Mevcut çalışmaların büyük bölümü kontrollü laboratuvar veya sera koşullarında yürütülmüş olup, gerçek ekosistem koşullarındaki etkileri inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinin koloni düzeyindeki sonuçlarını değerlendiren uzun dönemli saha araştırmaları oldukça yetersizdir. Bu durum, mevcut bilgi birikiminin büyük ölçüde deneysel sistemlere dayandığını ve saha koşullarında doğrulanmaya ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Mevcut literatürde özellikle saha koşullarında yürütülen çok trofik düzeyli çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Mevcut bilgi boşlukları ve gelecekteki araştırma ihtiyaçları

Araştırma Alanı	Mevcut Sınırlılık	Gelecekteki İhtiyacı	Araştırma
Bitki-mikrobiyota etkileşimleri	Çalışmaların çoğu kontrollü koşullarda yürütülmüştür	Uzun dönemli saha çalışmaları	
Polinatör davranışı	Bireysel düzey odaklı araştırmalar	Koloni düzeyinde araştırmalar	
Nektar ve polen kimyası	Sınırlı veri setleri	Çok yıllık izleme çalışmaları	
İklim değişikliği etkileri	Faktörler çoğunlukla ayrı değerlendirilmiştir	Çok faktörlü ekolojik modeller	
Arıcılık uygulamaları	Uygulamalı çalışma eksikliği	Sürdürülebilir arıcılık sistemlerine entegrasyon	

İklim değişikliği koşullarında floral kaynak kalitesinde meydana gelen değişimlerin arı kolonilerinin bağışıklık sistemi, brood gelişimi, işçi arı popülasyonu ve üretim performansı üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği düşünülmektedir. Özellikle

besin kalitesindeki azalmaların koloni dayanıklılığını düşürebileceği ve çoklu stres faktörleri altında polinatör popülasyonlarını daha kırılgan hale getirebileceği değerlendirilmektedir (Goulson ve ark., 2015).

Son yıllarda polinatör sağlığı ve agroekosistem sürdürülebilirliği arasındaki ilişkileri inceleyen çalışmaların artmasına rağmen, iklimsel stres faktörleri ile bitki-mikrobiyota ilişkilerini birlikte değerlendiren araştırmalar hâlen sınırlıdır. Bu nedenle gelecekteki çalışmaların; bitki fizyolojisi, toprak mikrobiyolojisi, floral kaynak kimyası ve polinatör davranışlarını entegre eden çok trofik düzeyli yaklaşımlara odaklanması gerekmektedir.

Sonuç olarak, kuraklık ve sıcaklık stresleri yalnızca bitki verimliliği açısından değil, aynı zamanda floral kaynak kalitesi, polinatör beslenmesi ve arıcılık sistemleri açısından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Bitki-mikrobiyota etkileşimlerinin bu süreçlerdeki rolünün daha iyi anlaşılması, sürdürülebilir tarım uygulamaları ile polinatör sağlığının korunmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Özellikle iklim değişikliğinin etkilerinin giderek arttığı günümüzde, bitki-mikrop-polinatör ilişkilerinin bütüncül bir ekosistem yaklaşımıyla değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

References

- Adler LS (2000). The ecological significance of toxic nectar. *Oikos* 91: 409–420.
- Alaux C, Ducloz F, Crauser D, Le Conte Y (2010). Diet effects on honeybee immunocompetence. *Biology Letters* 6: 562–565.
- Baker HG, Baker I (1983). A brief historical review of the chemistry of floral nectar. In: Bentley B, Elias T (eds), *The Biology of Nectaries*. Columbia University Press, New York, pp. 126–152.
- Brodschneider R, Crailsheim K (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie* 41: 278–294.
- Di Pasquale G, Salignon M, Le Conte Y, Belzunces LP, Decourtye A, Kretzschmar A, Suchail S, Brunet JL, Alaux C (2013). Influence of pollen nutrition on honey bee health. *PLoS ONE* 8(8): e72016.
- Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra SMA (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 185–212.
- Glick BR (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica* 2012: 1–15.
- Goulson D, Nicholls E, Botías C, Rotheray EL (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347: 1255957.
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

- Khalid A, Arshad M, Zahir ZA (2004). Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. *Applied Soil Ecology* 24: 47–54.
- Mao W, Schuler MA, Berenbaum MR (2013). Honey constituents up-regulate detoxification and immunity genes in the western honey bee *Apis mellifera*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 8842–8846.
- Nicolson SW, Thornburg RW (2007). Nectar chemistry. In: Nicolson SW, Nepi M, Pacini E (eds), *Nectaries and Nectar*. Springer, Dordrecht, pp. 215–264.
- Pineda A, Zheng SJ, van Loon JJA, Pieterse CMJ, Dicke M (2010). Helping plants to deal with insects: The role of beneficial soil-borne microbes. *Trends in Plant Science* 15: 507–514.
- Pozo MJ, Azcón-Aguilar C (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology* 10: 393–398.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE (2010). Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 25: 345–353.
- Raguso RA (2008). Wake up and smell the roses: The ecology and evolution of floral scent. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39: 549–569.
- Roulston TH, Cane JH (2000). Pollen nutritional content and digestibility for animals. *Plant Systematics and Evolution* 222: 187–209.
- Smith SE, Read DJ (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. Academic Press, London.
- Takkis K, Tscheulin T, Tsalkatis P, Petanidou T (2015). Differential effects of climate warming on the nectar secretion of early- and late-flowering Mediterranean plants. *Frontiers in Plant Science* 6: 1–12.
- Vanbergen AJ (2013). Threats to an ecosystem service: Pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11: 251–259.
- Vannette RL (2020). The floral microbiome: Plant, pollinator, and microbial perspectives. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 51: 363–386.
- Vaudo AD, Tooker JF, Grozinger CM, Patch HM (2015). Bee nutrition and floral resource restoration. *Current Opinion in Insect Science* 10: 133–141.
- Vessey JK (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil* 255: 571–586.
- Wright GA, Baker DD, Palmer MJ, Stabler D, Mustard JA, Power EF, Borland AM, Stevenson PC (2013). Caffeine in floral nectar enhances a pollinator's memory of reward. *Science* 339: 1202–1204.

Bal Ormanlarının Toprak Erozyonu Kontrolündeki Rolü: Polinasyon Destekli Vejetasyon Sürekliliği ve Ekosistem Stabilitesi

The Role of Honey Forests in Erosion Control: Linking Pollination and Ecosystem
Stability

Ümmügülsüm Erdoğan

*Prof. Dr., Bayburt University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Bayburt,
Türkiye*

Yaşar Erdoğan

*Prof. Dr., Bayburt University Department of Veterinary Medicine, Demirözü Vocational High
School, Bayburt, Türkiye*

Özet

Toprak erozyonu, özellikle yarı kurak ve dağlık ekosistemlerde arazi degradasyonunun en önemli bileşenlerinden biri olup, bitki örtüsünün zayıflaması ile doğrudan ilişkilidir. Bitki örtüsünün sürekliliği yalnızca fiziksel faktörlere değil, aynı zamanda biyotik etkileşimlere, özellikle polinasyon süreçlerine de bağlıdır (Potts et al., 2010). Son yıllarda yaygınlaşan bal ormanları, nektar ve polen kaynağı sağlayan bitki türleri ile arıcılığı desteklemenin ötesinde, ekosistem restorasyonu ve toprak koruma açısından çok işlevli sistemler olarak değerlendirilmektedir (Roubik, 2018). Bu çalışmada, bal ormanlarının toprak erozyonunun önlenmesindeki potansiyel rolü; vejetasyon yapısı, polinasyon dinamikleri ve ekosistem stabilitesi arasındaki etkileşimler çerçevesinde kavramsal olarak değerlendirilmiştir. Özellikle *Apis mellifera* gibi polinatörlerin bitki üreme başarısını artırarak vejetasyon yoğunluğunu yükselttiği ve bunun kök biyokütlesi ile toprak agregat stabilitesini güçlendirerek erozyon riskini azalttığı vurgulanmaktadır (Garibaldi et al., 2013; Ollerton et al., 2011). Sonuç olarak, bal ormanlarının yalnızca fiziksel toprak koruma sistemleri değil, aynı zamanda polinatör destekli ekolojik süreçler aracılığıyla işlev gören doğa temelli çözümler olarak değerlendirilebileceği anlaşılmaktadır. Bu çalışma, mevcut literatüre dayalı kavramsal bir sentez olup, bal ormanlarında tozlaşma ile desteklenen bitki örtüsü sürekliliğini erozyon kontrol süreçleriyle ilişkilendiren mekanistik bir ekolojik çerçeve oluşturmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bal ormanları, toprak erozyonu, polinasyon, ekosistem stabilitesi, doğa temelli çözümler

Abstract

Soil erosion is one of the major components of land degradation, particularly in semi-arid and mountainous ecosystems, and is closely associated with the degradation of vegetation cover. Vegetation continuity depends not only on physical factors but also on biotic interactions, particularly pollination processes. In recent years, honey forests have been increasingly recognized not only as systems supporting beekeeping

through nectar- and pollen-rich plant species, but also as multifunctional ecosystems contributing to ecosystem restoration and soil conservation. This study conceptually evaluates the potential role of honey forests in soil erosion control within the framework of vegetation structure, pollination dynamics, and ecosystem stability. Pollinators such as *Apis mellifera* may enhance plant reproductive success, increase vegetation density, and indirectly strengthen root biomass and soil aggregate stability, thereby reducing erosion risk. In this context, honey forests may function not only as physical soil conservation systems but also as nature-based solutions supported by pollinator-mediated ecological processes. The present study is a conceptual synthesis based on current literature and aims to establish a mechanistic ecological framework linking pollination-supported vegetation continuity with erosion control processes in honey forests.

Keywords: Honey forests, soil erosion, pollination, ecosystem stability, nature-based solutions

Giriş

Toprak erozyonu, küresel ölçekte arazi degradasyonunun en önemli nedenlerinden biri olup, ekosistem fonksiyonları, tarımsal sürdürülebilirlik ve biyolojik çeşitlilik üzerinde ciddi çevresel etkiler oluşturmaktadır (Lal, 2001; Pimentel, 2006). Özellikle yarı kurak, eğimli ve yüksek rakımlı bölgelerde, bitki örtüsünün zayıflaması ile birlikte yüzey akışı ve toprak kaybı hızlanmakta, bu durum ekosistem stabilitesini tehdit etmektedir. Bu nedenle, erozyon kontrolünde yalnızca fiziksel önlemler değil, vejetasyon sürekliliğini destekleyen ekolojik süreçler de kritik önem taşımaktadır. Vejetasyon örtüsü, erozyon kontrolünde en etkili doğal mekanizmalardan biri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, bitki örtüsünün erozyon kontrolündeki etkinliği yalnızca mevcut biyokütle miktarına değil, aynı zamanda vejetasyonun yenilenme kapasitesi ve sürekliliğine de bağlıdır. Bu noktada, bitki-polinatör etkileşimleri önemli bir ekolojik süreç olarak öne çıkmaktadır. Polinasyon, çiçekli bitkilerin büyük çoğunluğu için üreme başarısının temel belirleyicilerinden biri olup, ekosistem fonksiyonlarının sürdürülmesinde anahtar bir süreçtir. Özellikle *Apis mellifera* gibi genelci polinatörler, geniş bitki spektrumunda tozlaşmayı sağlayarak hem bitki çoğalmasını hem de genetik çeşitliliği artırmaktadır. Bu durumun, bitki popülasyonlarının dayanıklılığı ve çevresel streslere karşı adaptasyon kapasitesi üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceği bildirilmektedir (Ollerton et al., 2011; Garibaldi et al., 2013). Buna karşın, son yıllarda polinatör popülasyonlarında gözlenen küresel azalış eğilimi (Potts et al., 2010; Vanbergen, 2013; Wagner et al., 2021) bitki-polinatör etkileşimlerinin zayıflamasına ve dolaylı olarak vejetasyon sürekliliğinin bozulmasına yol açmaktadır (Potts et al., 2010).

Son yıllarda, ekosistem restorasyonu ve arazi degradasyonunun azaltılması amacıyla geliştirilen doğa temelli çözümler (nature-based solutions, NBS), sürdürülebilir arazi yönetimi stratejilerinin önemli bileşenleri haline gelmiştir (Cohen-Shacham et al., 2016; Seddon et al., 2020). Bu yaklaşımlar, yalnızca fiziksel restorasyonu değil, aynı zamanda biyolojik etkileşimler ve ekosistem hizmetleri aracılığıyla sistem dayanıklılığının artırılmasını hedeflemektedir. Özellikle biyolojik çeşitlilik,

polinasyon hizmetleri ve ekosistem fonksiyonları arasındaki ilişkilerin güçlendirilmesi, uzun vadeli ekosistem stabilitesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Bu bağlamda, doğa temelli çözümler kapsamında geliştirilen bal ormanları, yalnızca arıcılık faaliyetlerini destekleyen alanlar değil, aynı zamanda bitki-polinatör etkileşimlerini güçlendiren ekosistem restorasyon araçları olarak öne çıkmaktadır. Bal ormanları, polinatörleri desteklemek amacıyla nektar ve polen üretimi yüksek bitki türleri kullanılarak oluşturulan planlı ve çok işlevli ekosistemler olarak tanımlanabilir. Bal ormanları, nektar ve polen üretimi yüksek bitki türlerinden oluşan planlı sistemler olup, polinatör varlığını artırarak bitki üreme başarısını dolaylı olarak desteklemektedir. Bu yönüyle, klasik ağaçlandırma uygulamalarından farklı olarak, ekolojik geri besleme mekanizmaları ile desteklenen dinamik sistemler olarak değerlendirilebilir.

Ancak mevcut literatür incelendiğinde, bal ormanlarının ekosistem hizmetleri çoğunlukla arıcılık verimliliği, biyolojik çeşitlilik ve karbon sekestrasyonu bağlamında değerlendirilmektedir. Buna karşın, polinasyon süreçleri aracılığıyla vejetasyon sürekliliğinin desteklenmesi ve bunun toprak stabilitesi üzerindeki dolaylı etkileri büyük ölçüde göz ardı edilmektedir. Özellikle polinatör destekli ekolojik süreçlerin erozyon kontrol mekanizmaları ile ilişkisini bütüncül olarak ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, bal ormanlarının ekosistem restorasyonu ve sürdürülebilir arazi yönetimi kapsamındaki potansiyel rolünün tam olarak anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışma, söz konusu literatür boşluğunu doldurmayı amaçlamakta olup, bal ormanlarının toprak erozyonu kontrolündeki potansiyel rolünü vejetasyon yapısı, polinasyon dinamikleri ve ekosistem stabilitesi arasındaki ilişkiler çerçevesinde kavramsal olarak değerlendirmektedir. Çalışma kapsamında, polinatör destekli vejetasyon sürekliliğinin toprak stabilitesi üzerindeki dolaylı etkileri açıklanmakta ve bal ormanlarının doğa temelli çözümler kapsamında çok işlevli ekosistem restorasyon araçları olarak değerlendirilebileceği önerilmektedir.

Bu yönüyle çalışma, polinasyon hizmetlerini yalnızca biyolojik çeşitlilik ve tarımsal üretim açısından değil, aynı zamanda toprak koruma ve ekosistem dayanıklılığı bağlamında değerlendiren disiplinler arası bir yaklaşım sunmaktadır.

Bal Ormanları ve Vejetasyon Yapısı

Bal ormanları, nektar ve polen üretim kapasitesi yüksek bitki türlerinin planlı biçimde bir araya getirildiği ve hem polinatörleri desteklemeyi hem de ekosistem hizmetlerini güçlendirmeyi amaçlayan çok işlevli arazi kullanım sistemleridir. Bu sistemlerde kullanılan bitki türleri yalnızca arıcılık açısından değil, aynı zamanda toprak koruma, biyokütle üretimi ve ekolojik dayanıklılık gibi özellikler bakımından da değerlendirilmektedir.

Bal ormanlarında yaygın olarak tercih edilen türler arasında *Robinia pseudoacacia*, *Tilia* spp. ve *Castanea sativa* gibi odunsu türlerin yanı sıra *Thymus* spp. gibi otsu ve yarı odunsu türler yer almaktadır. Bu türlerin ortak özelliği, hem yüksek nektar üretimi ile polinatörleri desteklemeleri hem de toprak koruma açısından kritik olan vejetatif özelliklere sahip olmalarıdır.

Toprak erozyonunun kontrolünde vejetasyonun rolü üç temel mekanizma üzerinden açıklanmaktadır: (i) yüzey koruma, (ii) kök sistemi ile mekanik stabilizasyon ve (iii) toprak yapısının biyolojik iyileştirilmesi. Bitki örtüsü, yağmur damlalarının kinetik enerjisini absorbe ederek toprak parçacıklarının ayrılmasını önlemekte ve yüzey akışını azaltmaktadır. Aynı zamanda kök sistemleri, toprağı fiziksel olarak bağlayarak kesme kuvvetlerine karşı direnç oluşturmakta ve toprak kaybını azaltmaktadır (Gyssels et al., 2005). Bu mekanizmalar, özellikle yüksek eğimli ve yoğun yağış alan bölgelerde erozyonun sınırlandırılmasında kritik rol oynamaktadır.

Bal ormanlarında kullanılan türlerin önemli bir kısmı, derin ve yaygın kök sistemlerine sahip olup, özellikle eğimli arazilerde toprak stabilitesini artırmada etkilidir. Örneğin, *Robinia pseudoacacia* gibi türler, hem hızlı büyüme özellikleri hem de azot fiksasyonu kapasitesi sayesinde toprak verimliliğini artırarak bitki gelişimini desteklemektedir. Benzer şekilde, *Tilia* spp. ve *Castanea sativa* gibi türler, geniş yaprak yüzey alanları ile yağışın doğrudan toprak yüzeyine ulaşmasını azaltmakta ve mikroiklim koşullarını iyileştirmektedir.

Bununla birlikte, vejetasyonun erozyon kontrolündeki etkinliği yalnızca tür seçimi ve biyokütle miktarı ile sınırlı değildir. Vejetasyonun mekânsal dağılımı, tür çeşitliliği ve sürekliliği, sistemin uzun vadeli başarısını belirleyen kritik faktörlerdir. Yüksek tür çeşitliliği, farklı kök derinlikleri ve büyüme formları sayesinde toprağın farklı katmanlarında stabilizasyon sağlayarak erozyon riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir (Reubens et al., 2007).

Ancak burada önemli bir sınırlayıcı faktör ortaya çıkmaktadır. Bitki örtüsünün sürdürülebilirliği yalnızca dikim başarısına değil, aynı zamanda doğal yenilenme süreçlerine de bağlıdır. Tohum üretimi, çimlenme ve yeni bireylerin oluşumu gibi süreçler büyük ölçüde polinasyon başarısı ile ilişkilidir. Bu nedenle, bal ormanlarının vejetasyon yapısı yalnızca statik bir bitki örtüsü olarak değil, polinatör etkileşimleri ile sürekli yenilenen dinamik bir sistem olarak değerlendirilmelidir.

Bu bağlamda, bal ormanları klasik ağaçlandırma projelerinden ayrılmaktadır. Geleneksel ağaçlandırma uygulamaları genellikle tek tür veya sınırlı tür çeşitliliği ile gerçekleştirilirken, bal ormanları polinatörleri çekmek amacıyla daha çeşitli bitki kompozisyonlarına sahiptir. Bu durum yalnızca biyolojik çeşitliliği artırmakla kalmamakta, aynı zamanda ekosistem dayanıklılığını ve vejetasyon sürekliliğini de güçlendirmektedir.

Sonuç olarak, bal ormanlarının vejetasyon yapısı, toprak erozyonunun önlenmesinde doğrudan fiziksel etkilerin ötesinde, biyolojik ve ekolojik süreçlerle desteklenen çok katmanlı bir rol oynamaktadır. Ancak bu rolün tam olarak anlaşılabilmesi için, vejetasyon-polinasyon etkileşimlerinin daha derinlemesine incelenmesi gerekmektedir. Yaygın bal ormanı türlerinin ekolojik özellikleri ve erozyon kontrol işlevleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yaygın bal ormanı türlerinin ekolojik özellikleri ve erozyon kontrol işlevleri.

Tür	Büyüme Formu	Kök Özellikleri	Polinatör Değeri	Ekolojik Katkı	Erozyon Kontrol İşlevi
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Ağaç	Derin ve yaygın	Yüksek nektar	Azot fiksasyonu, hızlı biyokütle üretimi	Toprak stabilizasyonu
<i>Tilia spp.</i>	Ağaç	Orta derinlikte-derin	Çok yüksek nektar	Taç örtüsü ile yağışın tutulması, mikroiklim düzenlenmesi	Yüzey akışının azaltılması
<i>Castanea sativa</i>	Ağaç	Derin	Yüksek nektar/polen	Organik madde birikimi	Toprak yapısının iyileştirilmesi
<i>Thymus spp.</i>	Çalı/Otsu	Yoğun yüzeysel kökler	Yüksek	Sürekli toprak örtüsü oluşturma	Yüzey erozyonunun tamponlanması

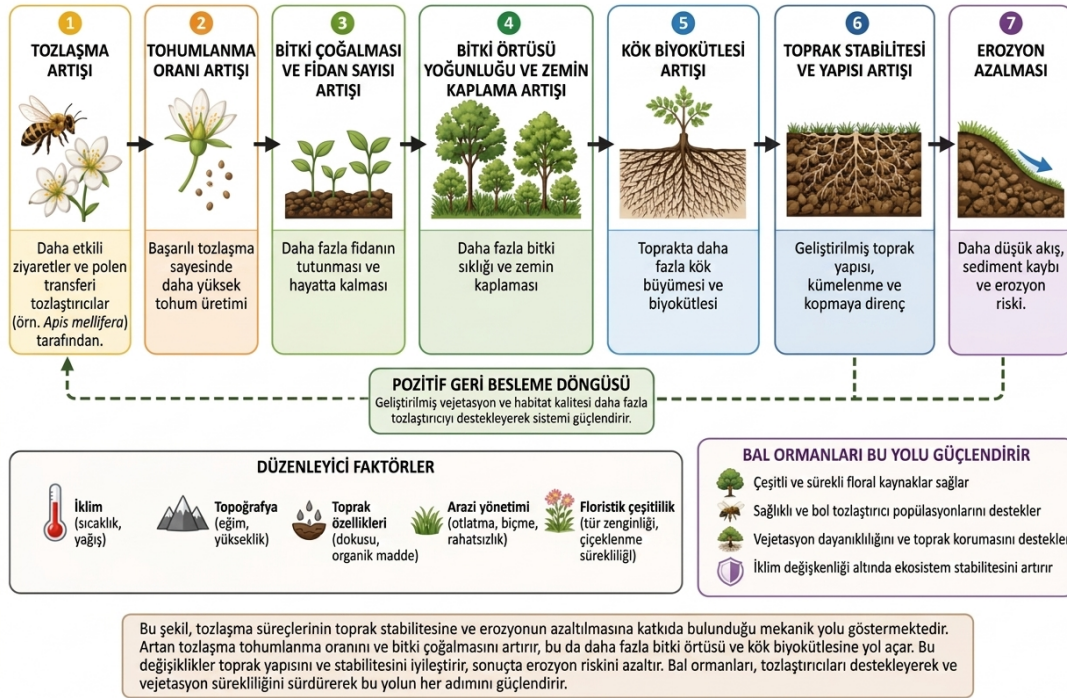
Tablo 1’de özetlenen bu özellikler, bal ormanlarının yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda ekolojik süreçler aracılığıyla da erozyon kontrolüne katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Vegetasyon yapısının sürdürülebilirliği ise büyük ölçüde bitki üreme başarısına ve polinasyon süreçlerinin devamlılığına bağlıdır.

Polinasyon ve Vegetasyon Sürekliliği

Polinasyon, çiçekli bitkilerin üreme başarısını belirleyen temel ekolojik süreçlerden biri olup, karasal ekosistemlerde bitki çeşitliliği ve üretkenliğin sürdürülmesinde merkezi bir rol oynamaktadır. Dünya genelinde çiçekli bitkilerin yaklaşık %85’inin hayvan aracılı tozlaşmaya bağımlı olduğu ve bu sürecin ekosistem fonksiyonları açısından vazgeçilmez olduğu bildirilmektedir (Ollerton et al., 2011). Bu bağlamda, geneli bir polinatör olan *Apis mellifera*, geniş bitki spektrumu üzerinde etkin rol oynayarak hem doğal ekosistemlerde hem de tarımsal sistemlerde bitki üreme başarısını artırmaktadır. Polinasyonun artması, yalnızca tohum ve meyve oluşumunu artırmakla kalmayıp, aynı zamanda bitkiler arasında genetik çeşitliliğin korunmasını ve adaptif kapasitenin güçlenmesini sağlamaktadır (Garibaldi et al., 2013).

Bitki popülasyonlarının sürdürülebilirliği açısından kritik olan bu süreç, doğrudan vegetasyon sürekliliğini belirlemektedir. Polinasyon yetersizliği durumunda tohum üretimi azalmakta, yeni birey oluşumu sınırlanmakta ve bitki örtüsü zamanla seyrekleşebilmektedir. Bu durum özellikle kuraklık, yüksek rakım ve düşük toprak verimliliği gibi stres koşullarının hâkim olduğu ekosistemlerde daha belirgin hale gelmektedir. Nitekim, polinatör popülasyonlarında son yıllarda gözlenen küresel azalış eğilimi, bitki-polinatör etkileşim ağlarını zayıflatarak ekosistem stabilitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir (Potts et al., 2010).

Bal ormanları, bu noktada kritik bir ekolojik müdahale olarak değerlendirilebilir. Nektar ve polen üretimi yüksek bitki türlerinin kullanılması, polinatörler için sürekli ve güvenilir besin kaynakları oluşturarak onların populasyon yoğunluğunu ve aktivitesini artırmaktadır. Bu durum, ekosistem içerisinde pozitif geri besleme mekanizmalarının oluşmasına katkı sağlayabilmektedir. Polinatör destekli vejetasyon sürekliliğinin ekosistem stabilitesi ve erozyon kontrolü üzerindeki potansiyel etkileri Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Polinasyon süreçleri ile toprak stabilitesi ve erozyon azalması arasındaki mekanistik ilişki.

Artan polinasyon etkinliği, bitki yenilenmesini ve vejetasyon yoğunluğunu destekleyerek kök biyokütlesinin artmasına katkı sağlamaktadır. Bu süreçler toprak yapısını ve stabilitesini güçlendirerek erozyon riskinin azalmasına yardımcı olmaktadır. Bal ormanları, polinatör populasyonlarını destekleyerek bu mekanizmanın sürekliliğini güçlendirebilmektedir.

Bu döngü, bal ormanlarının klasik ağaçlandırma projelerinden ayrılmasını sağlayan temel mekanizmadır.

Artan polinasyon etkinliği, bitki topluluklarında tür ve fonksiyonel çeşitliliğin korunmasına katkıda bulunarak ekosistem dayanıklılığını destekleyebilir. Farklı kök derinlikleri ve büyüme stratejilerine sahip türlerin bir arada bulunması, toprağın farklı katmanlarında stabilizasyon sağlayarak erozyon riskinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Fontaine et al., 2006; Dainese et al., 2019).

Özellikle yarı kurak ve yüksek rakımlı bölgelerde, bitki yenilenmesi çoğu zaman polinasyonla sınırlı bir süreçtir. Bu tür ekosistemlerde polinatör aktivitesindeki küçük değişimler dahi bitki örtüsü dinamikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturabilmektedir. Bu bağlamda, bal ormanları yalnızca mevcut vejetasyonu desteklemekle kalmayıp,

айны заманда yeni bitki bireylerinin oluşumunu teşvik ederek uzun vadeli vejetasyon sürekliliğini sağlamaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, polinasyon hizmetlerinin yalnızca tarımsal verimlilik açısından değil, aynı zamanda doğal ekosistemlerin sürdürülebilirliği açısından da kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Potts et al., 2016). Ancak bu hizmetlerin toprak erozyonu gibi jeomorfolojik süreçlerle olan dolaylı bağlantıları literatürde sınırlı şekilde ele alınmıştır. Bu nedenle, polinasyon hizmetlerinin toprak koruma süreçleriyle ilişkilendirilmesi, ekosistem hizmetlerinin değerlendirilmesinde yeni ve bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında önerilen yaklaşım, polinasyonun yalnızca bir üreme süreci değil, aynı zamanda toprak stabilitesini belirleyen dolaylı bir ekosistem hizmeti olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, bal ormanları, polinatör destekli vejetasyon sürekliliği aracılığıyla erozyon kontrolünde işlev gören bütüncül ekosistemler olarak değerlendirilebilir.

Polinasyon destekli vejetasyon sürekliliğinin erozyon kontrolüne katkısı, bal ormanlarının yalnızca biyolojik çeşitlilik açısından değil, aynı zamanda toprak koruma ve ekosistem restorasyonu açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bal Ormanlarının Erozyon Kontrol Mekanizmaları (Entegratif Yaklaşım)

Toprak erozyonu, yağışın yüzey akışına dönüşmesi ve toprak parçacıklarının taşınması ile gerçekleşen kompleks bir süreç olup, bu sürecin şiddeti büyük ölçüde yüzey örtüsü, toprak yapısı ve biyolojik aktivite tarafından belirlenmektedir (Morgan, 2005). Bu bağlamda, bal ormanları erozyon kontrolünde yalnızca tek bir mekanizma üzerinden değil, birbirini tamamlayan fiziksel, biyolojik ve ekolojik süreçler aracılığıyla etkili olmaktadır.

Fiziksel Mekanizmalar: Yüzey Koruma ve Hidrolojik Düzenleme

Bal ormanlarında gelişen bitki örtüsü, yağmur damlalarının kinetik enerjisini absorbe ederek toprak yüzeyine doğrudan etkisini azaltmakta ve böylece parçacık ayrışmasını önlemektedir. Aynı zamanda bitki örtüsü ve döküntü tabakası (litter), suyun infiltrasyonunu artırarak yüzey akışını azaltmaktadır.

Özellikle geniş yapraklı türler (örneğin *Tilia* spp. ve *Castanea sativa*), yağışın önemli bir kısmını tutarak toprağa ulaşan suyun miktarını ve hızını düşürmektedir. Bu durum, eğimli arazilerde yüzey akışının yavaşlatılması açısından kritik öneme sahiptir.

Biyolojik Mekanizmalar: Kök Sistemi ve Toprak Stabilitesi

Bitki kökleri, toprağın mekanik dayanıklılığını artırarak erozyon süreçlerine karşı direnç oluşturmaktadır. Kök sistemleri, toprak parçacıklarını birbirine bağlayarak kesme kuvvetlerine karşı stabilite sağlamak ve toprak kaybını azaltmaktadır (Gyssels et al., 2005).

Bal ormanlarında kullanılan türlerin önemli bir kısmı derin ve yaygın kök sistemlerine sahiptir. Örneğin, *Robinia pseudoacacia*, güçlü kök yapısı ve azot fiksasyonu

kapasitesi sayesinde hem toprak stabilitesini artırmakta hem de toprak verimliliğini iyileştirmektedir. Bunun yanı sıra, köklerin ölümü ve yenilenmesi ile oluşan organik madde, toprak agregat stabilitesini artırarak erozyon riskini daha da azaltmaktadır (Six et al., 2004).

Ekolojik Mekanizmalar: Polinasyon Destekli Vejetasyon Sürekliliği (Ana Katkı)

Bal ormanlarının erozyon kontrolündeki en özgün ve literatürde en az vurgulanan yönü, polinatör destekli vejetasyon sürekliliği üzerinden ortaya çıkan dolaylı etkileridir.

Özellikle *Apis mellifera* gibi polinatörlerin varlığı, bitki üreme başarısını artırarak yeni birey oluşumunu teşvik etmektedir. Bu durum, bitki örtüsünün yalnızca korunmasını değil, aynı zamanda sürekli olarak yenilenmesini sağlamaktadır.

Bu süreç kavramsal olarak şu mekanizma ile açıklanabilir: Polinasyon etkinliği $\uparrow \rightarrow$ Tohum üretimi ve bitki yenilenmesi $\uparrow \rightarrow$ Vejetasyon sürekliliği $\uparrow \rightarrow$ Kök biyokütlesi ve toprak agregat stabilitesi $\uparrow \rightarrow$ Erozyon riski $\downarrow$

Bu ekolojik mekanizma, bal ormanlarını klasik erozyon kontrol yaklaşımlarından ayırmaktadır. Geleneksel yöntemler genellikle statik bitki örtüsüne dayanırken, bal ormanları dinamik ve kendini sürdüren sistemler olarak işlev görmektedir.

Mekanizmaların Entegrasyonu: Çok Katmanlı Etki

Bal ormanlarının erozyon kontrolündeki başarısı, yukarıda tanımlanan mekanizmaların tek başına değil, eş zamanlı ve etkileşimli olarak çalışmasından kaynaklanmaktadır.

- Fiziksel süreçler yüzey koruması sağlar.
- Biyolojik süreçler toprak stabilitesini artırır.
- Ekolojik süreçler sistem sürekliliğini destekler.

Bu üçlü yapı, bal ormanlarını yalnızca kısa vadeli çözümler olmaktan çıkararak uzun vadeli ekosistem restorasyon araçlarına dönüştürmektedir.

Ekosistem Stabilitesi ve İklim Etkileşimi

Ekosistem stabilitesi, bir sistemin çevresel değişkenlik ve stres koşulları altında fonksiyonlarını sürdürebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (Holling, 1973). Karasal ekosistemlerde bu stabilitenin temel belirleyicilerinden biri, bitki örtüsünün sürekliliği ve yenilenme kapasitesidir. Ancak bu süreç, yalnızca abiyotik faktörlere değil, aynı zamanda biyotik etkileşimlere – özellikle polinasyon süreçlerine – bağlıdır.

İklim değişkenliği, hem bitki gelişimini hem de polinatör aktivitesini doğrudan etkileyerek bu etkileşim ağlarını şekillendirmektedir. Özellikle sıcaklık ve yağış rejimindeki değişimler, polinatörlerin uçuş aktivitesi ve çiçeklenme dönemleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. *Apis mellifera* gibi türlerde uçuş aktivitesi belirli sıcaklık eşiklerine bağlı olup, düşük sıcaklık ve yüksek yağış koşullarında önemli ölçüde sınırlanmaktadır (Vicens & Bosch, 2000).

Bu durum, polinasyon hizmetlerinin zamanlaması ile bitki fenolojisi arasında senkronizasyon gerekliliğini ortaya koymaktadır. Polinatör aktivitesi ile çiçeklenme dönemleri arasındaki uyumsuzluk (phenological mismatch), bitki üreme başarısını azaltarak vejetasyon sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Forrest, 2015). Bu bağlamda, iklim değişikliğinin dolaylı etkileri, bitki örtüsü dinamikleri üzerinden toprak stabilitesi ve erozyon süreçlerine kadar uzanabilmektedir.

Bal ormanları, bu karmaşık etkileşimler içerisinde iklim dalgalanmalarına karşı tampon görevi görebilen sistemler olarak değerlendirilebilir. Tür çeşitliliğinin yüksek olması ve farklı çiçeklenme dönemlerine sahip bitkilerin bir arada bulunması, polinatörler için daha uzun süreli ve kesintisiz besin kaynakları sağlamaktadır. Bu durum, polinatör popülasyonlarının sürekliliğini destekleyerek polinasyon hizmetlerinin daha stabil hale gelmesine katkı sağlamaktadır.

İklim-polinasyon-vejetasyon etkileşimi aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Sıcaklık ve yağış koşulları → Polinatör uçuş aktivitesi → Polinasyon başarısı → Bitki üreme başarısı → Vejetasyon yoğunluğu → Toprak stabilitesi → Erozyon riski

Bu zincir, ekosistem stabilitesinin yalnızca bitki örtüsüne bağlı olmadığını, aynı zamanda polinatörlerin ekosistem içerisindeki işlevsel rolüne de bağlı olduğunu göstermektedir. Polinatör destekli vejetasyon sürekliliğinin ekosistem stabilitesi ve erozyon kontrolü üzerindeki potansiyel etkileri Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

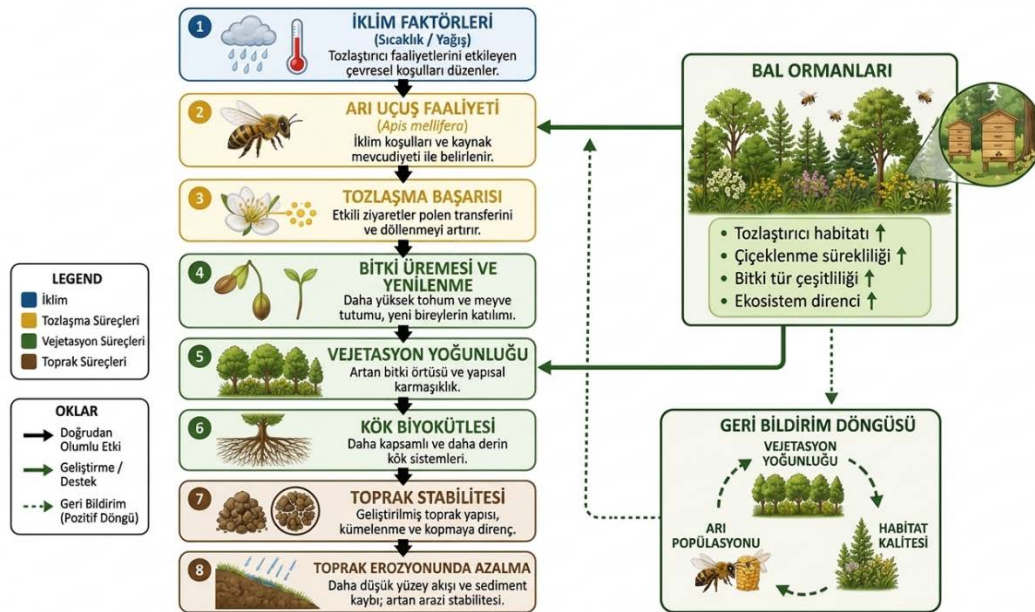
Özellikle yarı kurak ve yüksek rakımlı bölgelerde, uygun polinatör aktivitesinin gerçekleştiği gün sayısı sınırlı olduğundan, bu süreç daha hassas hale gelmektedir. Bu tür ekosistemlerde, küçük iklim dalgalanmaları bile polinasyon hizmetlerinde belirgin değişimlere yol açabilmekte ve bunun sonucunda vejetasyon sürekliliği etkilenmektedir.

Bu bağlamda, bal ormanları yalnızca mevcut vejetasyonu koruyan sistemler değil, aynı zamanda polinatör faaliyetlerini destekleyerek iklim değişkenliği altında ekosistem stabilitesini artıran yapılar olarak değerlendirilebilir. Bu özellik, bal ormanlarını erozyon kontrolü açısından stratejik hale getirmektedir.

Son yıllarda ekosistem hizmetleri çerçevesinde yapılan çalışmalar, polinasyon hizmetlerinin yalnızca tarımsal üretim için değil, aynı zamanda doğal ekosistemlerin sürdürülebilirliği için de kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Potts et al., 2016). Ancak bu hizmetlerin iklim değişkenliği ve toprak erozyonu ile olan dolaylı ilişkileri henüz yeterince bütüncül bir yaklaşımla ele alınmamıştır.

Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurarak, bal ormanlarının iklim-polinasyon-vejetasyon etkileşimleri üzerinden ekosistem stabilitesine katkısını ve bunun erozyon kontrolü üzerindeki dolaylı etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

İklim değişkenliği, tozlayıcı aktivitesi, bitki örtüsü dinamikleri ve toprak stabilitesi arasındaki etkileşimler kavramsal olarak bütünleştirilmiş ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. İklim-tozlaşma-bitki örtüsü etkileşimleri yoluyla bal ormanlarının toprak erozyonunun azaltılmasındaki potansiyel rolünü gösteren kavramsal çerçeve.

İklim koşulları, tozlayıcı aktivitesini ve tozlaşma başarısını düzenleyerek bitki yenilenmesini, bitki örtüsü sürekliliğini, kök biyokütlesini ve toprak stabilitesini etkiler. Bal ormanları, tozlayıcı popülasyonlarını, çiçek sürekliliğini ve ekosistem direncini destekleyerek bu süreçleri güçlendirebilir.

Tartışma

Bu çalışma, bal ormanlarının toprak erozyonu kontrolündeki potansiyel rolünü polinasyon süreçleri, vejetasyon sürekliliği ve ekosistem stabilitesi arasındaki ilişkiler çerçevesinde değerlendiren kavramsal bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında önerilen kavramsal model, polinasyon süreçlerinin yalnızca biyolojik çeşitlilik açısından değil, aynı zamanda toprak koruma süreçleri açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Literatürde erozyon kontrolü çoğunlukla fiziksel ve hidrolik mekanizmalar üzerinden açıklanırken, bu çalışma polinatör destekli ekolojik süreçlerin de toprak stabilitesi üzerinde dolaylı ancak önemli etkiler oluşturabileceğini öne sürmektedir. Bu yönüyle çalışma, polinasyon hizmetlerini erozyon kontrolü ve sürdürülebilir arazi yönetimi ile ilişkilendiren disiplinler arası bir çerçeve önermektedir.

Çalışma kapsamında değerlendirilen mekanizmalar, bal ormanlarının erozyon kontrolüne fiziksel, biyolojik ve ekolojik düzeylerde çok katmanlı katkılar sağlayabileceğini göstermektedir. Vejetasyon örtüsünün yüzey akışını azaltması ve kök sistemlerinin toprak stabilitesini desteklemesi, erozyon kontrolünün doğrudan bileşenlerini oluştururken; polinasyon destekli bitki yenilenmesi, sistemin uzun dönemli sürdürülebilirliği açısından kritik bir ekolojik mekanizma olarak öne çıkmaktadır.

Özellikle *Apis mellifera* gibi genelci polinatörlerin bitki üreme başarısı üzerindeki etkileri, çalışmanın temel kavramsal dayanaklarından birini oluşturmaktadır. Artan polinasyon etkinliği, tohum üretimi ve bitki yenilenmesini destekleyerek vejetasyon yoğunluğu ve sürekliliğinin korunmasına katkı sağlayabilmektedir. Vejetasyon örtüsündeki bu süreklilik, kök biyokütlesi, organik madde birikimi ve toprak agregat stabilitesi gibi süreçler aracılığıyla erozyon riskinin azaltılması ile ilişkilendirilebilir. Bu nedenle polinasyon hizmetleri, yalnızca biyolojik çeşitlilik veya tarımsal üretim açısından değil, aynı zamanda toprak koruma süreçleri açısından da değerlendirilmesi gereken kritik ekosistem hizmetleri arasında yer almaktadır.

İklim değişkenliği bağlamında değerlendirildiğinde, polinatör aktivitesinin çevresel koşullara yüksek duyarlılık göstermesi, bu ekolojik mekanizmayı daha kırılgan hale getirmektedir. Sıcaklık ve yağış rejimindeki değişimler, hem çiçeklenme fenolojisini hem de polinatör uçuş aktivitesini etkileyerek bitki-polinatör senkronizasyonunda bozulmalara yol açabilmektedir. Özellikle yarı kurak ve yüksek rakımlı ekosistemlerde, polinatör aktivitesine uygun gün sayısının sınırlı olması nedeniyle bu etkiler daha belirgin hale gelebilmektedir. Bu durum, iklim değişikliğinin dolaylı etkilerinin yalnızca biyolojik çeşitlilik üzerinde değil, aynı zamanda vejetasyon sürekliliği ve toprak stabilitesi üzerinde de sonuçlar oluşturabileceğini göstermektedir.

Tür çeşitliliği yüksek ve farklı çiçeklenme dönemlerine sahip bitkiler içeren bal ormanları, polinatörler için daha sürekli besin kaynakları sağlayarak ekosistem fonksiyonlarının sürekliliğini destekleyebilir. Bu durum, yalnızca polinatör popülasyonlarının korunmasına değil, aynı zamanda bitki yenilenmesi ve vejetasyon stabilitesinin sürdürülmesine de katkı sağlayabilmektedir. Bu yönüyle bal ormanları, iklim değişkenliği altında ekosistem dayanıklılığını destekleyen çok işlevli sistemler olarak değerlendirilebilir.

Bununla birlikte, bu çalışmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Özellikle bal ormanlarının erozyon üzerindeki etkilerine ilişkin doğrudan nicel ölçümler sınırlıdır ve mevcut değerlendirmeler büyük ölçüde literatür sentezine dayanmaktadır. Ayrıca, mevcut çalışma doğrudan saha ölçümlerine değil, mevcut literatürün kavramsal sentezine dayanmaktadır. Bu nedenle önerilen mekanizmaların farklı ekosistem tiplerinde uzun dönemli saha çalışmaları ile test edilmesi gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, polinasyon hizmetleri ile toprak kaybı arasındaki ilişkiyi doğrudan ölçen deneysel çalışmalar, uzaktan algılama verileri ve uzun dönemli ekolojik izleme yaklaşımları ile desteklenmesi önemli olacaktır. Bu tür çalışmalar, bal ormanlarının polinatör destekli ekosistem hizmetleri aracılığıyla erozyon kontrolüne olan katkısının nicel olarak ortaya konulmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma bal ormanlarının yalnızca arıcılık ve biyolojik çeşitlilik açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir arazi yönetimi, ekosistem restorasyonu ve iklim değişikliğine uyum stratejileri açısından da önemli potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Polinasyon süreçlerinin toprak koruma mekanizmaları ile ilişkilendirilmesi, ekosistem hizmetlerinin değerlendirilmesinde daha bütüncül yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Sonuç

Bu çalışma, bal ormanlarının toprak erozyonu kontrolündeki potansiyel rolünü polinasyon süreçleri, vejetasyon sürekliliği ve ekosistem stabilitesi arasındaki ilişkiler çerçevesinde kavramsal olarak değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında önerilen yaklaşım, polinasyon hizmetlerinin yalnızca biyolojik çeşitlilik ve tarımsal üretim açısından değil, aynı zamanda toprak koruma ve sürdürülebilir arazi yönetimi açısından da önemli ekolojik işlevler taşıyabileceğini ortaya koymaktadır.

Özellikle polinasyon destekli bitki yenilenmesi ile vejetasyon sürekliliği arasındaki ilişkinin, kök biyokütlesi ve toprak stabilitesi aracılığıyla erozyon süreçleri üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği düşünülmektedir. Bu kavramsal çerçeve, bal ormanlarının yalnızca pasif bitki örtüsü sistemleri değil, ekolojik geri besleme mekanizmaları ile desteklenen dinamik doğa temelli çözümler olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Uygulama açısından değerlendirildiğinde, bal ormanlarının özellikle erozyon riski yüksek bölgelerde yaygınlaştırılması, tür seçiminde polinatör çekiciliği ve ekolojik dayanıklılık kriterlerinin dikkate alınması, ayrıca farklı çiçeklenme dönemlerine sahip bitki türlerinin birlikte kullanılması önerilmektedir. Bu yaklaşım, hem polinatör sürekliliğinin desteklenmesine hem de ekosistem fonksiyonlarının daha stabil hale gelmesine katkı sağlayabilir.

Ayrıca, iklim değişikliği bağlamında polinatör aktivitesinin korunması ve desteklenmesi, yalnızca biyolojik çeşitlilik açısından değil, aynı zamanda toprak koruma ve arazi sürdürülebilirliği açısından da stratejik önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, bal ormanları polinatör destekli ekolojik süreçler aracılığıyla toprak koruma, ekosistem restorasyonu ve iklim değişikliğine uyum stratejileri açısından önemli potansiyele sahip çok işlevli sistemler olarak değerlendirilebilir. Polinasyon süreçlerinin erozyon kontrol mekanizmaları ile ilişkilendirilmesi, ekosistem hizmetlerinin değerlendirilmesinde daha bütüncül yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Gelecekte yapılacak deneysel ve uzun dönemli saha çalışmaları, bu kavramsal çerçevenin farklı ekosistem koşullarında doğrulanmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

References

Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C, Maginnis S (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN, Gland, Switzerland.

Dainese M, Martin EA, Aizen MA, Albrecht M, Bartomeus I, Bommarco R, Carvalheiro LG, Chaplin-Kramer R, Gagic V, Garibaldi LA, Ghazoul J, Grab H, Jonsson M, Karp DS, Kennedy CM, Kleijn D, Kremen C, Landis DA, Letourneau DK, Steffan-Dewenter I (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances* 5: eaax0121.

Forrest JRK (2015). Plant-pollinator interactions and phenological mismatch in the context of climate change. *Ecology* 96: 594–601.

- Fontaine C, Dajoz I, Meriguet J, Loreau M (2006). Functional diversity of plant-pollinator interaction webs enhance the persistence of plant communities. *PLoS Biology* 4: e1.
- Garibaldi LA, Steffan-Dewenter I, Winfree R, Aizen MA, Bommarco R, Cunningham SA, Kremen C, Carvalheiro LG, Harder LD, Afik O, Bartomeus I, Benjamin F, Boreux V, Cariveau D, Chacoff NP, Dudenhöffer JH, Freitas BM, Ghazoul J, Greenleaf S, Hipólito J et al. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* 339: 1608–1611.
- Gyssels G, Poesen J, Bochet E, Li Y (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. *Progress in Physical Geography* 29: 189–217.
- Holling CS (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1–23.
- Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B* 274: 303–313.
- Lal R (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development* 12: 519–539.
- Morgan RPC (2005). Soil erosion and conservation. 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S (2011). How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos* 120: 321–326.
- Pimentel D (2006). Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability* 8: 119–137.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE (2010). Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution* 25: 345–353.
- Potts SG, Ngo HT, Biesmeijer JC, Breeze TD, Dicks LV, Garibaldi LA, Hill R, Settele J, Vanbergen AJ (2016). The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.
- Reubens B, Poesen J, Danjon F, Geudens G, Muys B (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review. *Trees* 21: 385–402.
- Roubik DW (2018). Pollination of cultivated plants: A compendium for practitioners. Volume 2. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Seddon N, Chausson A, Berry P, Girardin CAJ, Smith A, Turner B (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 375: 20190120.

Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7–31.

Vanbergen AJ, Insect Pollinators Initiative (2013). Threats to an ecosystem service: Pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11: 251–259.

Vicens N, Bosch J (2000). Weather-dependent pollinator activity in apple orchards. *Environmental Entomology* 29: 413–420.

Wagner DL, Grames EM, Forister ML, Berenbaum MR, Stopak D (2021). Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118: e2023989118.

Sector Coupling and Transmission Reinforcement in High-Renewable Energy Systems

Yüksek Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Sektör Entegrasyonu ve İletim Güçlendirmesi

Batuhan Selamoğlu

Department of Electronics Technology, Istanbul Arel University, İstanbul, Türkiye

Ferdi Güler*

Department of Computer Programming, Istanbul Arel University, İstanbul, Türkiye

**Corresponding Author's E-mail: ferdiguler@arel.edu.tr*

Abstract

This study aims to evaluate the relationship between sector coupling and cross-border transmission reinforcement in a highly renewable European energy system from the perspective of environmental sustainability and cost-effective decarbonization. Rather than producing a new simulation, the research is based on a secondary analysis of an existing study built on the PyPSA-Eur-Sec-30 model, supported by a comparative review of the relevant literature. In this context, scenarios integrating the electricity, transport, and heating sectors were examined in terms of total system cost, flexibility capacity, storage requirements, and transmission needs. The analysis shows that the success of highly renewable energy systems depends not only on expanding generation capacity but also on how the system is integrated. The findings indicate that adding the transport sector without flexibility mechanisms increases system costs, whereas battery electric vehicles provide substantial benefits through smart charging and vehicle-to-grid applications. By contrast, fuel cell vehicle options appear more expensive from a system perspective due to lower efficiency and additional infrastructure requirements. Another major finding is that the heating sector constitutes the strongest cost pressure in the energy transition process. Therefore, heat pumps, district heating, long-term thermal storage, and power-to-gas solutions emerge as critical components. In addition, as sector coupling deepens, the value of cross-border transmission infrastructure does not disappear, but its marginal contribution becomes relatively weaker. Overall, the study demonstrates that sustainable and low-carbon energy systems can be achieved not through isolated technology choices, but through a multilayered flexibility architecture integrating electricity, transport, and heating sectors. It is concluded that the most rational pathway for the energy transition is an integrated planning approach that optimizes transmission investments together with internal system flexibility options.

Keywords: Battery electric vehicles, Cross-border transmission, Energy storage, Renewable energy, Sector coupling, Sustainable energy systems

Özet

Bu çalışma, yüksek yenilenebilir enerjiye dayalı Avrupa enerji sisteminde sektör entegrasyonu ile sınır ötesi iletim güçlendirmesi arasındaki ilişkinin çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet-etkin karbonsuzlaşma açısından değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Araştırma, yeni bir simülasyon üretmek yerine, PyPSA-Eur-Sec-30 modelini temel alan mevcut bir çalışmanın ikincil analizi ve ilgili literatürün karşılaştırmalı incelenmesi üzerine kurulmuştur. Bu kapsamda elektrik, ulaştırma ve ısıtma sektörlerini birlikte ele alan senaryolar; toplam sistem maliyeti, esneklik kapasitesi, depolama gereksinimi ve iletim ihtiyacı bakımından çözümlenmiştir. İnceleme sonucunda, yüksek yenilenebilir enerji sistemlerinde başarının yalnızca kurulu güç artışına değil, sistemin nasıl bütünleştirildiğine bağlı olduğu görülmüştür. Bulgular, ulaştırma sektörünün sisteme esneklik olmadan eklenmesinin maliyetleri artırdığını; buna karşılık bataryalı elektrikli araçların akıllı şarj ve araçtan şebekeye enerji aktarımı uygulamalarıyla önemli maliyet avantajı sağladığını göstermektedir. Yakıt hücreli araç seçenekleri ise daha düşük verimlilik ve ek altyapı gereksinimi nedeniyle sistem açısından daha pahalı bulunmuştur. Çalışmanın bir diğer önemli sonucu, ısıtma sektörünün enerji dönüşümündeki en büyük maliyet baskısını oluşturduğudur. Bu nedenle ısı pompaları, bölgesel ısıtma, uzun dönemli termal depolama ve güçten-gaza çözümleri kritik öneme sahiptir. Ayrıca sektör entegrasyonu derinleştikçe sınır ötesi iletim altyapısının faydası ortadan kalkmamakta, ancak marjinal katkısı görece azalmaktadır. Sonuç olarak, çalışma sürdürülebilir ve düşük karbonlu enerji sistemlerinin tekil teknoloji tercihlerinden çok, elektrik, ulaştırma ve ısıtma sektörlerini bir araya getiren çok katmanlı bir esneklik mimarisiyle kurulabileceğini ortaya koymaktadır. Enerji geçişinde en rasyonel yaklaşımın, iletim yatırımları ile sistem içi esneklik seçeneklerini birlikte optimize eden bütünsel planlama anlayışı olduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bataryalı elektrikli araçlar, Enerji depolama, Sektör Entegrasyonu, Sınır ötesi iletim, Sürdürülebilir enerji sistemleri, Yenilenebilir enerji

Introduction

Climate change, energy supply security, dependence on fossil fuels, and increasing energy demand have made it necessary to redesign energy systems not only in a cleaner manner but also in a more flexible, resilient, and economically sustainable way. Particularly at the European scale, deep decarbonization targets require an increase in the share of renewable energy in the electricity sector; however, they also demonstrate that the problem cannot be solved solely at the level of electricity generation. This is because end-use sectors such as transport, heating and cooling, and, to some extent, industry continue to account for a significant share of energy consumption and greenhouse gas emissions. Therefore, the central debate that has gained prominence in the literature in recent years is that the energy transition is not merely a matter of “greening” the generation portfolio; rather, it requires a holistic system transformation that jointly addresses cross-sectoral interactions, sources of flexibility, storage options, and transmission infrastructure (Wietschel et al., 2020; Wang et al., 2023; Thellufsen et al., 2023; van der Zwaan et al., 2025; Odenweller et al., 2026; Gøtske et al., 2025).

One of the main challenges in the transition toward systems based on high shares of wind and solar energy is the temporal and spatial variability of renewable generation. The supply from wind and solar resources does not always coincide with demand. This creates problems related to short-term balancing, seasonal flexibility, reserve capacity, and grid management. Early studies conducted in the European context revealed the decisive role of cross-border interconnections and transmission grid expansion in the large-scale integration of variable renewable energy sources. Accordingly, increasing transmission capacity between countries enables the exploitation of geographical diversity, more efficient energy flows between regions with surplus generation and demand centers, and consequently a reduction in system costs (Schlachtberger et al., 2017; Brown et al., 2016; Becker et al., 2014; Rodriguez et al., 2014; Fürsch et al., 2013).

Similarly, more recent studies show that cross-border transmission reduces total costs, can decrease regional price differences, and contributes to the more efficient use of renewable resources (Chen et al., 2020; Carlini et al., 2024; Herding et al., 2024; Shen et al., 2023; Emdadi and Pirouzi, 2025). Nevertheless, it is also emphasized that transmission investments cannot be expanded without limit under all circumstances due to factors such as public acceptance, uncertainty, grid architecture, and scenario assumptions; under certain conditions, storage and additional flexibility technologies may serve as alternatives to transmission expansion (Cao et al., 2021; Al-Dhaifallah et al., 2024).

The second approach that has received more attention lately is cross-sectoral integration, otherwise known as sector coupling. The term sector coupling refers to the integration of electricity with transport, heating, cooling, gas, and selected industrial uses. The idea behind the approach is to treat the energy system as an interconnected unit instead of its fragmented subsectors. In doing so, it allows for using the flexibility capacity created in one sector to compensate for the imbalance in another. For example, electric vehicles could create the needed flexibility with smart charging or vehicle-to-grid applications, whereas heat pumps or district heating systems would accommodate surplus renewable generation. Power-to-gas would serve as long-lasting seasonal energy storage. For all these reasons, sector coupling is considered both an effective modeling method and a decarbonization strategy as well due to cost savings related to this approach (Pavičević et al., 2020; Gea-Bermúdez et al., 2021; Thellufsen et al., 2023; Wietschel et al., 2020; Wang et al., 2023).

Research conducted about sector coupling demonstrates that different sectors provide different types of flexibility within the energy system. In the transport sector, batteries of electric vehicles are particularly important for achieving flexibility in the short term, specifically, by means of smart charging and vehicle-to-grid energy transmission. As a result, electric cars can perform not only as additional sources of electricity consumption but also as energy storage capacities (Pavičević et al., 2020; Victoria et al., 2019; Bernath et al., 2021). In heating, heat pumps, thermal energy storage, district heating, and central heat storage become critical in balancing the seasonal fluctuations. Optimizing integrated systems of electricity and residential heating can bring significant savings compared to the individual management of these segments, with even greater gains resulting from including options for centralized and district storage.

Moreover, increasing energy efficiency and demand side measures have already proven effective at reducing heating peaks and relieving strain on both generation and transmission facilities (Optimization of Integrated Systems, n.d.; Akhmetov et al., 2025).

Another important dimension of sector coupling is the division of roles among storage technologies and energy carriers. The literature indicates that there is no single “miracle technology”; rather, different solutions become prominent at different time scales. Batteries and electric vehicles are effective for short-term balancing; hydrogen is relevant for medium-term variability; and synthetic gases, thermal storage, and district heating solutions are effective in addressing seasonal imbalances (Victoria et al., 2019; Bernath et al., 2021; Gea-Bermúdez et al., 2021). However, recent studies show that direct electrification is, in most cases, more cost-effective than hydrogen-based end-use options, while hydrogen plays a complementary role, particularly in sectors that are difficult to electrify (van der Zwaan et al., 2025). This finding strengthens the principle of “electrification first, strategic hydrogen use second” in discussions of sector coupling, especially in transport and heating.

However, the analysis of energy systems with significant renewable fractions cannot be simply solved by listing technological options. The reliable analysis of such systems requires modeling tools that have the capability of modeling both high spatial-temporal resolution and cross-sectoral interactions simultaneously. Otherwise, there might arise situations where long-term energy transition pathways are assessed using too simplified assumptions, while high-resolution operational analyses lack strategic meaning. This is clearly seen in recent research that attempts to link together integrated assessment models and energy system models (Yueksel-Erguen et al., 2025; Gøtske et al., 2025; Odenweller et al., 2026). Moreover, issues related to regional renewable energy scarce events, like Dunkelflaute, indicate the need to take into account such factors as extreme weather and resilience in addition to average-year assumptions (Bernecker et al., 2025). As a result, nowadays, the scientific literature changes the discussion around the energy transition to one about not only "what technology should be installed?" but rather "what technology, taking into account the sectoral interaction and power grid architecture, should be considered?"

Thus, the significance of open-source modeling ecosystems becomes obvious. The PyPSA platform is able to provide an open and transparent infrastructure for evaluating energy systems with significant renewables' shares (Brown, Hörsch, and Schlachtberger, 2017). The PyPSA-Eur model creates an opportunity to optimize the structure of the European power transmission network (Hörsch et al., 2018). The credibility of the above-mentioned models is based on the hourly data about energy demand and system conditions taken from open data sets provided, for example, by Open Power System Data and ENTSO-E (Open Power System Data, 2017; European Transmission System Operators for Electricity [ENTSO-E], 2011). Based on the methodological foundations described above, renewable energy integration, power grid expansion, energy demand profile, and cross-sectoral energy flows can be assessed simultaneously at the European level.

The core study on which this paper is based is positioned precisely within this context. Brown et al. (2018) jointly examine two strategies that are often presented as competing

approaches for a European energy system with high shares of renewable energy: first, strengthening cross-border transmission infrastructure, and second, more tightly integrating the electricity, transport, and heating sectors. Using the PyPSA-Eur-Sec-30 model, this approach covers 30 European countries at hourly resolution and analyzes the cost-optimal system composition under a 95% CO₂ reduction target. Thus, the study provides an analytical framework for comparing the geographical balancing function of the transmission grid with the temporal balancing function of technologies such as battery electric vehicles, power-to-gas solutions, heat pumps, district heating, and thermal energy storage (Brown et al., 2018). In this respect, the study does not merely ask whether more grid infrastructure or more sector coupling is needed; rather, it discusses under which conditions these two strategies complement each other and under which conditions they reduce each other's marginal benefits.

Accordingly, the central problem of this study is how to establish the relationship between spatial flexibility and temporal-sectoral flexibility in a system based on high shares of renewable energy. Although the existing literature has strongly demonstrated the importance of transmission expansion (Brown et al., 2016; Becker et al., 2014; Rodriguez et al., 2014; Fürsch et al., 2013; Chen et al., 2020), more recent studies show that as sector coupling deepens, the marginal benefit obtained from transmission may relatively weaken, because the system can generate internal flexibility through demand-side management, storage, and multiple energy carriers (Brown et al., 2018; Pavičević et al., 2020; Victoria et al., 2019; Bernath et al., 2021; Gea-Bermúdez et al., 2021). Therefore, treating sector coupling and transmission reinforcement as alternatives to one another is an incomplete approach. The real issue is to determine which combination of these strategies provides lower costs, higher reliability, and stronger emission reductions.

In this context, this paper aims to evaluate the relationship between sector coupling and cross-border transmission reinforcement in debates on a European energy system based on high shares of renewable energy, with a focus on environmental sustainability and the green energy transition. The study particularly focuses on the role of flexibility mechanisms such as battery electric vehicles, vehicle-to-grid energy transfer, power-to-gas solutions, thermal energy storage, and district heating in shaping system costs, emission reductions, and infrastructure requirements. In doing so, it aims to discuss which policy and planning priorities come to the fore in terms of renewable energy, sustainable development, and the low-carbon transition.

Method

This study was designed as a qualitative document review and secondary model analysis aimed at examining the relationship between sector coupling and cross-border transmission reinforcement in a European energy system based on high shares of renewable energy. The primary data source of the research is the study developed by Brown et al. (2018), which is based on the PyPSA-Eur-Sec-30 model. Within this framework, no new optimization model was constructed, no new field data were collected, and no new numerical simulation was conducted. Instead, the model structure, data components, scenario design, and results of the relevant study were

systematically analyzed, and the findings were comparatively evaluated in relation to the recent studies included in the bibliography file provided by the user. This approach makes it possible to interpret how open-source modeling frameworks, which are widely used in energy system planning, jointly address two critical flexibility strategies: sector coupling and transmission expansion.

The methodological framework of the study was structured in five stages. In the first stage, the aim, system boundaries, and optimization logic of the primary study were identified. The examined model represents 30 European countries using a single-node approach and evaluates electricity, heat, transport, hydrogen, and methane components within the same system. The model has a linear optimization structure that aims to minimize total annual system costs and jointly considers investment decisions and hourly operational decisions. These characteristics are consistent with studies in the literature arguing that sector coupling should be evaluated not only from the generation side but also together with demand-side flexibility, storage, and infrastructure dimensions.

In the second stage, the technical components of the model were classified. In this context, the supply side included solar PV, onshore wind, offshore wind, hydropower, and natural gas; the storage side included batteries, hydrogen storage, hot water tanks, and synthetic methane; the conversion side included heat pumps, resistive heaters, gas boilers, combined heat and power plants, and power-to-gas solutions; and the transport side included battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles. In the model architecture, the multilayered structure of cross-sectoral energy conversion was interpreted through the flow relationships among energy supply, energy conversion, and load demand. This integrated structure is schematically presented in Figure 1. Figure 1 visualizes that the system does not consist solely of the electricity grid; rather, storage, P2G, CCS, heat pumps, and gas-based units should also be considered within the same analytical framework. This methodological choice is also consistent with the literature that evaluates sector coupling as a cost-effective decarbonization strategy.

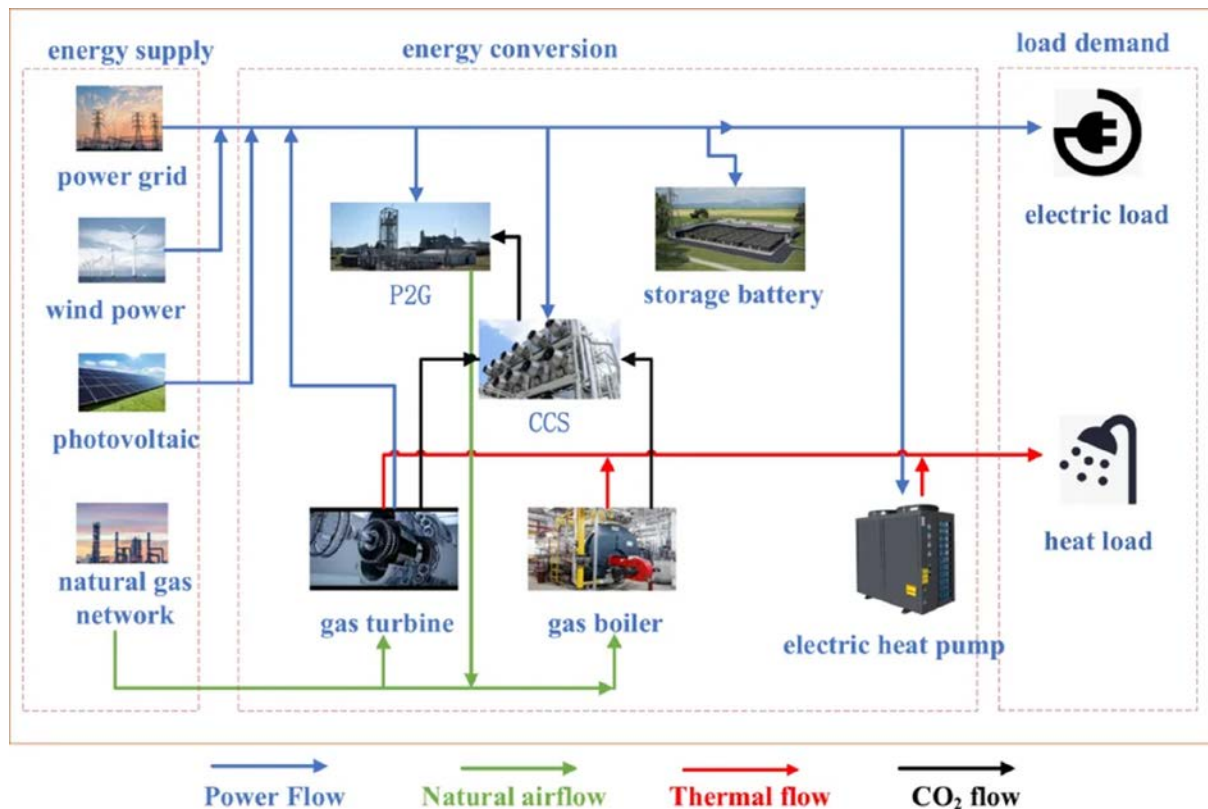


Figure 1. Integrated energy system model architecture: main flows among energy supply, energy conversion, and load demand components.

In the third stage, the scenario set in the primary study was taken as the unit of analysis. Within this scope, the baseline scenario, including only electricity demand, transport integration, demand-side management for electric vehicles, vehicle-to-grid energy transfer, the fuel cell vehicle scenario, heating integration, methanation, thermal energy storage, district heating, and the full flexibility scenario, in which all flexibility options are evaluated together, were examined comparatively. All scenarios were assessed under a 95% CO₂ reduction target compared with 1990 levels. Thus, the study interpreted not only the presence of technologies but also the effects of different combinations of these technologies on system costs, transmission requirements, and flexibility levels. The literature also emphasizes that sector coupling, storage, and interconnection options should be considered together rather than individually to obtain more realistic results.

At the fourth stage, the P2G infrastructure was evaluated as an independent subcomponent. Such a decision was made based on the focus of the article under examination on the conversion of hydrogen into methane and the creation of seasonal flexibility through the gas grid as the most efficient ways to reduce costs in the case of high heating demand. The scheme of this subsystem is presented in Figure 2. Figure 2 reveals how renewable electricity production, electrolysis, hydrogen storage, biological methanation, and heat products interact, thus explaining why the P2G mechanism acts more like a means for balancing medium and long periods than for balancing short periods. Also, from the works referred to in the bibliography, it

becomes clear that hydrogen, synthetic gas, and thermal energy storage are effective ways to manage seasonal fluctuations.

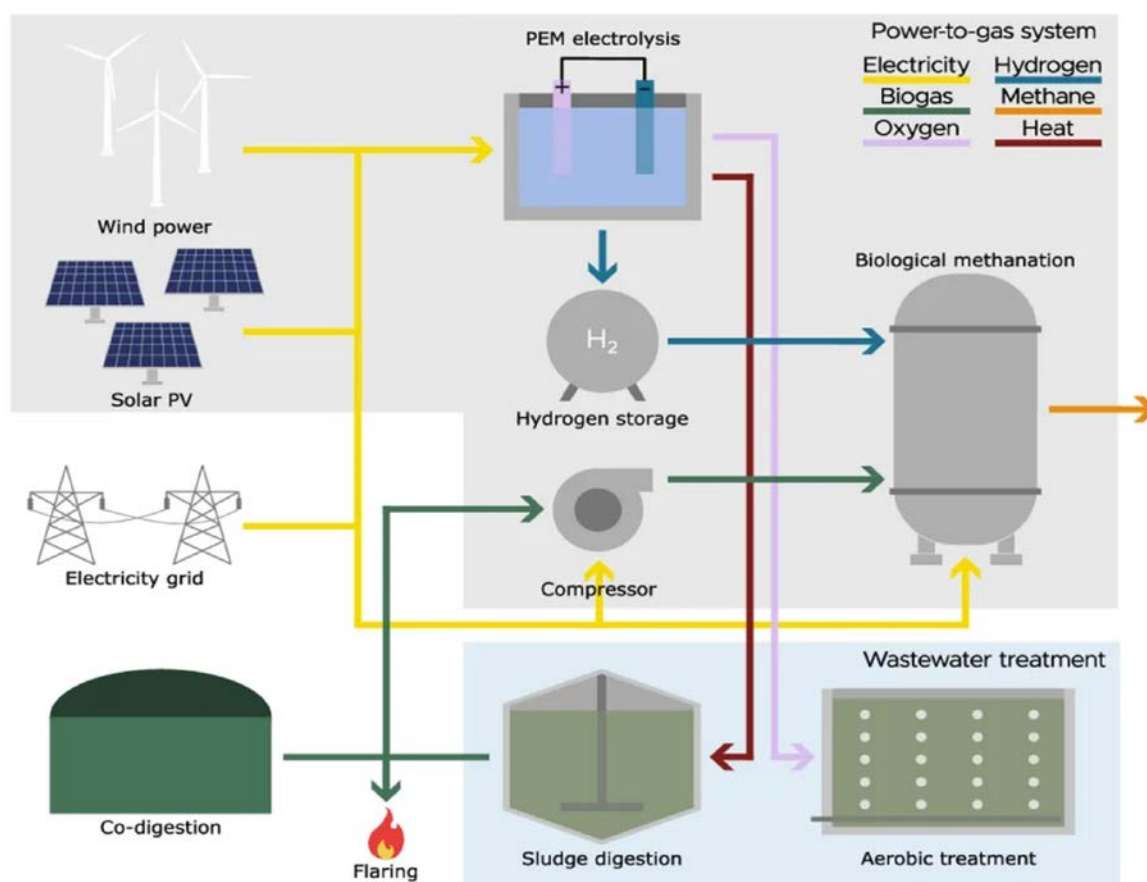


Figure 2. Schematic overview of the integrated power-to-gas subsystem.

At the last, fifth stage, the criteria for analysis were set. As a result, the scenarios were analyzed with respect to: (i) the total cost of the system, (ii) the need for cross-border transmission, (iii) the possibility of balancing in the short and long term, (iv) the need for storage, and (v) compliance with the goal of decarbonization. Of special interest is the examination of whether electric vehicle flexibility, thermal energy storage, district heating, and P2G technology compete with or complement the increase in transmission capacity, which will be the main criterion for analysis in this paper. It can be said that this approach is consistent with the literature because it highlights the fact that sectoral integration and reinforcement of transmission lines are not alternatives but interconnected approaches that influence each other's marginal benefits.

Findings

The findings of this study indicate that cost-effective decarbonization in a European energy system based on high shares of renewable energy is shaped not merely by increasing generation capacity, but by the interaction among sector coupling, flexibility technologies, and cross-border transmission capacity. All scenarios

examined were evaluated under a 95% CO₂ emission reduction target compared with 1990 levels. Total system cost, transmission requirements, storage needs, and the effects of different flexibility mechanisms on the system were considered jointly in the analysis. The results reveal that battery electric vehicles, vehicle-to-grid applications, methanation, district heating, and long-term thermal energy storage have a significant effect on the economic feasibility of high-renewable energy systems.

1. Comparison of Main Scenarios

From what can be seen, the first conclusion that we can make is that cross-border transmission capacity turns out to be quite an effective tool in terms of reducing system costs, provided that we consider only electricity in our system. If we limit ourselves to electricity, then a lack of transmission capacity would imply that we need to balance the system using local resources, and this leads to higher electricity prices. Meanwhile, if we expand the transmission, we will be able to balance the load using renewable energy generation, which is cheaper. However, this positive effect tends to weaken in the presence of other system sectors.

It comes as no surprise that direct integration of the transport sector into the system leads to quite a heavy cost burden before the addition of flexibility tools, as expected. Thus, in the transport scenario, where land transport demand is added, electricity demand increased by 37%, while the cost of the entire system without transmission expansion increased by 41%. In this case, we observe an increase in peak loads, higher costs related to capacity expansion, and the increased preference for solar PV due to more aligned generation. In other words, in its basic form, electrification does not provide any benefit to the system; on the contrary, it makes things worse.

However, everything changes once we add flexibility-related applications in transport. In particular, DSM scenarios demonstrate that the costs were reduced by 10% and 14%, respectively, when battery electric vehicles performed only controlled charging, depending on their participation. This means that the vehicles can offer significant cost benefits to the system, even in the case of non-export of energy, due to proper timing. Moreover, they help shift electricity consumption to hours of the day with the highest generation from PV plants.

One of the most striking results emerges in the Vehicle-to-Grid scenarios. In V2G applications, battery electric vehicles do not merely provide demand-side flexibility; they also act as distributed storage units by feeding electricity back into the grid when needed. In this scenario, total system cost decreases by up to 22% compared with the basic transport scenario, bringing the system cost close to that of the electricity-only scenario. In addition, V2G reduces storage requirements, lowers the CO₂ shadow price, eases transmission needs, and increases the share of solar PV. The implication is clear: electric vehicles generate real system value when they are treated not only as consumers but also as active components of system flexibility.

Fuel cell electric vehicles do not show the same level of positive performance. Although hydrogen demand in FCEV scenarios theoretically provides a flexible load capable of balancing wind and solar fluctuations, system costs increase due to the low efficiency of the electrolysis–fuel cell chain. The study shows that FCEV scenarios increase total costs by up to 16% compared with the fully electric transport scenario.

The limited flexibility benefit obtained from electrolyzers, hydrogen storage, and additional renewable capacity requirements cannot compensate for the additional investment costs. Therefore, from a system perspective, BEVs are clearly more suitable than FCEVs for general transport electrification.

The real challenge of the system becomes apparent when the heating sector is added. In the heating scenario, the inclusion of heating demand in addition to electricity and transport demand increases total system cost by 117%. This sharp increase results from the fact that heating demand is both great in volume and highly seasonal. Heat pumps account for a significant share of total costs, while gas boilers serve as backup units during peak periods. This result shows that, in high-renewable energy systems, the main bottleneck is often not electricity generation itself but the seasonal nature of heating demand. It is also noteworthy that transmission expansion reduces costs by 25% in the same scenario, since the value of geographical balancing increases again as heating load grows.

One of the key mechanisms reducing this cost pressure in the heating sector is methanation. In the methanation scenario, converting hydrogen into synthetic methane, storing it in the natural gas infrastructure, and using it for heating and electricity generation reduces total system cost by 11% compared with the heating scenario. Synthetic methane is particularly useful in meeting peak heating demand; some heat pumps are replaced by gas-based solutions, while the CO₂ price and marginal energy prices decline. However, the important point here is that as internal storage capacity is strengthened through methanation, the marginal benefit of transmission reinforcement decreases. Indeed, the cost reduction achieved through optimal transmission falls from 25% in the heating scenario to 17% in the methanation scenario. This means that as time-based flexibility increases, the relative return of spatial flexibility decreases.

By contrast, short-term thermal energy storage alone does not create a major improvement. In the TES scenario, hot water tanks are added to the methanation scenario, allowing heat demand to be shifted to certain hours. However, due to thermal losses and the limited time constant, the reduction in total system cost remains only 1.3%. This does not mean that thermal storage is irrelevant; rather, it shows that its effect is limited when used alone, while it functions as a complementary component within broader system architectures. The study also reports that a total of 57 million m³ of thermal storage capacity is installed, corresponding to an average of 0.108 m³ per capita.

A more significant cost-effective improvement is observed in the combination of district heating and long-term thermal energy storage. In the Central scenario, the use of district heating in densely populated areas and the integration of large CHP units reduce costs by 6% compared with the methanation scenario. More importantly, Long-Term Thermal Energy Storage used together with district heating enables seasonal heat shifting and reduces dependence on gas boilers during cold periods. The long-term thermal storage volume reaches 13 m³ per capita in district heating areas. This finding shows that higher efficiency in the heating sector can be achieved not only through individual solutions but also through spatially organized heat infrastructure.

The strongest result is observed in the All-Flex-Central scenario, where all flexibility options are operated together. In this scenario, 50% BEV-DSM, 50% BEV-V2G, methanation, and thermal storage are simultaneously activated. Without transmission expansion, the total system cost is 28% lower than in the heating scenario; under optimal transmission, it is 17% lower. In the conclusion of the study, it is stated that when sector-coupling-based flexibility and cross-border transmission are used together, the total cost reduction can reach up to 37%. This result demonstrates that appropriate combinations of technologies, rather than individual technologies alone, are decisive in high-renewable energy systems. In addition, the presence of BEV-V2G and LTES in this scenario reduces the need for stationary battery storage, hydrogen storage, and synthetic methane, while making a larger share of solar PV economically feasible.

Table 1. Comparison of key findings by scenario

Scenario	Main Characteristic	Cost Impact Relative to the Reference Scenario	Analytical Implication
Electricity-only	Electricity demand only	No quantified percentage reported; transmission expansion reduces costs	Transmission is critical for spatial balancing
Transport	Transport electrification without flexibility	+41%	Electrification alone may increase system costs
DSM-25	Controlled charging of 25% of BEVs	-10%	Load shifting reduces system costs
DSM-100	Controlled charging of all BEVs	-14%	Flexible charging enables better alignment with PV generation
V2G	BEVs feed electricity back into the grid	-22%	The strongest short-term flexibility mechanism
FCEV	Integration of fuel cell electric vehicles	+16%	Hydrogen-based transport is more costly from a system perspective
Heating	Heating sector added	+117%	The greatest cost pressure originates from the heating sector
Methanation	H ₂ converted into synthetic methane	-11%	Effective for seasonal balancing
TES	Short-term thermal energy storage	-1.3%	Limited contribution when used alone

Central	District heating and centralized infrastructure	-6%	Shared heat infrastructure is advantageous in dense areas
All-Flex-Central	All flexibility options combined	-28%	The most suitable system is achieved through technology combinations

2. Relationship Between Transmission Reinforcement and Sector Coupling

The second main axis of the findings concerns the relationship of complementarity and tension between transmission reinforcement and sector coupling. In scenarios where flexibility is limited, such as the electricity-only and heating scenarios, expanding interconnections significantly reduces costs. By contrast, as mechanisms such as V2G, methanation, thermal storage, and district heating are included in the system, the additional benefit obtained from transmission expansion decreases. This is because the system becomes capable of balancing not only through geographical flexibility but also through temporal and sectoral flexibility. This result does not make transmission unimportant; rather, it shows that transmission investments should be addressed in a more balanced and selective manner. The system is optimized not simply through the logic of “more transmission lines,” but through a smarter combination of flexibility components.

This finding is also consistent with the broader literature included in the bibliography file. Various studies emphasize that transmission investments are important for renewable integration and system adequacy, while storage and other flexibility tools may function as alternatives or complements to transmission expansion in certain scenarios. Similarly, the positive effects of sector coupling on renewable market value, system flexibility, and decarbonization costs are supported by the broader literature. What is distinctive in the study examined here is that these two approaches are directly compared within the same modeling framework.

Table 2. Relative effects of transmission and flexibility options

Dimension of Analysis	Transmission Reinforcement	Sector Coupling / Flexibility Options	Analytical Conclusion
Balancing in the electricity sector	Very strong	Limited	Transmission plays a dominant role
When transport is added	Important	Very strong with DSM and V2G	Flexible BEVs partially reduce transmission requirements
When heating is added	Becomes highly important again	Critical through P2G, TES, and district heating	Seasonal loads require hybrid solutions

Under full flexibility	Still useful	Very strong	Transmission benefits remain, but their marginal contribution decreases
------------------------	--------------	-------------	---

3. Findings on Storage and Time Scales

One of the important results of the study is that not all storage technologies perform the same function. When the storage states in the All-Flex-Central scenario are examined, methane storage is found to address mainly seasonal supply-demand imbalances, hydrogen storage balances shorter-term wind fluctuations, long-term hot water storage enables seasonal heat shifting, and vehicular and stationary batteries manage daily demand and solar fluctuations. In other words, system flexibility does not arise from a single type of storage technology, but from a multilayered structure distributed across different time scales. This finding clearly demonstrates why a multi-storage architecture is needed in high-renewable systems that include heating and transport.

Table 3. Functions of storage and flexibility mechanisms by time scale

Flexibility / Storage Option	Dominant Function	Time Scale	Role Within the System
Controlled BEV charging (DSM)	Load shifting	Hourly / daily	Matching load with solar generation
V2G	Distributed battery storage	Hourly / daily	Peak reduction and grid support
Stationary batteries	Short-term balancing	Intra-day	Management of solar-based fluctuations
Hydrogen storage	Medium-term flexibility	Days / weeks	Balancing wind fluctuations
Methanation + gas storage	Long-term storage	Seasonal	Meeting peak heating demand
TES	Short-term thermal shifting	Days	Timing heat consumption
LTES	Long-term thermal shifting	Seasonal	Supplying heat during cold periods

4. Key Findings in Terms of Sustainability and Applicability

When the findings are evaluated from a sustainability perspective, three main conclusions stand out. First, direct electrification appears to be more cost-effective than hydrogen-based end-use options, particularly in the transport sector. Second, the heating sector represents the real stress test of the high-renewable energy transition; therefore, deep decarbonization becomes more expensive without solutions such as district heating, heat pumps, and long-term thermal storage. Third, the transmission grid and internal system flexibility must be planned together, because neither fully

substitutes for the other, although each significantly changes the marginal value of the other. Therefore, the findings show that technology selection in the green energy transition should be based not on isolated tools, but on system design.

Finally, the comparative result presented in the discussion section of the study is particularly noteworthy. Based on an approximate calculation using 2011 data, the annual cost of the existing European energy system is taken as €390 billion per year, while the All-Flex-Central scenario with optimal transmission is reported to be only 13% more expensive. Moreover, this comparison does not include external costs such as greenhouse gas emissions and air pollution. This finding shows that high-renewable and sector-integrated energy systems are defensible not only theoretically but also economically. In academic terms, the issue is not an excessively costly environmental ideal, but a rational system design that becomes feasible through the correct combination of flexibility options.

Discussion and Conclusion

Based on the results provided in this work, it is possible to conclude that the success of an energy system with a high share of renewable energy sources in Europe does not depend on increasing the installed capacity of wind and solar farms exclusively. Instead, what matters is the architecture of the system design that provides the necessary flexibility for the efficient functioning of a system with significant shares of intermittent energy sources. As seen in the presented research, cross-border transmission expansion and sector coupling, often represented as opposing options in literature, are not substitutes for each other; rather, they serve as complementary tools for amplifying the marginal benefits of each other. The main analysis implemented in the context of this study proves this statement with the help of comparing electricity, transport, and heating sectors in terms of their interaction within one model setting.

First of all, according to the conducted scenario analyses using the PyPSA-Eur-Sec-30 model, it may be concluded that electrification alone is insufficient. Incorporating the transport sector into the system without the use of any flexibility mechanism raises electricity demand and the costs of system operation. Hence, replacing fossil fuels with electricity in end-use sectors does not necessarily lead to a cost-efficient transition. On the contrary, incorporating the transport sector by means of smart charging and, especially, vehicle-to-grid energy transfers decreases the costs and lowers the need for additional storage capacity, and improves the use of solar power. In other words, only if the electric vehicle is considered not as consumption but as an integrated part of the energy system does it add value to the system in terms of its costs and flexibility. The statement corresponds to research proving the transport sector to have one of the highest flexibility potentials in future energy systems.

Another crucial issue discussed in the present study is the limitation of inflated expectations related to hydrogen. Thus, it is evident from the conducted scenarios that fuel cell vehicle scenarios cost much more compared to battery electric vehicle scenarios, owing to lower efficiency and additional required infrastructure. As a result, the authors argue that it is more beneficial to implement direct electrification in all the end-use sectors and limit the use of hydrogen to specific cases in the form of

supplementary technology. More recent studies included in the bibliography file also show that electricity becomes the dominant energy carrier in net-zero emission pathways, whereas hydrogen performs a more limited but indispensable complementary function in specific areas. Therefore, extending hydrogen indiscriminately to all end-use applications reflects a technically and academically weak overgeneralization.

Thirdly, an important issue for discussion is the significant weight of the heating sector in the energy transition. It has been found that the integration of heating demand into the energy transition system significantly increases the costs in comparison with the integration of transport demand. On the one hand, it stems from the large volumes of heating demands. However, the seasonal nature of this demand and its peak load properties contribute even more. Even though daily balancing issues within the electrical system may seem less acute for consideration, the presence of heavy heating loads makes them extremely relevant. Therefore, it is no wonder that approaches to the use of district heating, thermal energy storage, seasonal hot water storage, and methanation gain traction. The findings from the literature reviewed within the bibliography prove that the joint optimization of residential heat and electricity production brings considerable savings due to the introduction of district-level facilities. Hence, it can be said unequivocally that any energy transition models disregarding the heating sector remain unfinished and unrealistic on a conceptual basis.

Fourthly, it is important to address the reconsideration of the role of expanding the transmission capacity. As has been found in this research, transmission expansion is highly beneficial within both electricity-only and inflexible cases. This conclusion confirms previous studies on the crucial role of interconnections in cost-effective renewable integration at the European scale. Nevertheless, the essential distinction consists in a smaller marginal benefit provided by such measures as sector coupling goes further because it allows for balancing not only geographically but also in terms of time and various sectors. Of course, it does not mean that investment in transmission becomes irrelevant. However, it cannot be considered as the only decisive factor for system optimization anymore. Whereas most works analyzed within the bibliography agree with the importance of interconnection for system adequacy and efficiency, recent models prove that the role of such measures varies depending on the assumed scenario and flexibility options. In other words, the discourse regarding "transmission vs sector coupling" should evolve to "which combinations make more sense under what circumstances?".

Another noteworthy contribution of the paper lies in its demonstration of how various storage technologies operate depending on different time scales. The role of methane storage lies in addressing seasonal variations, while hydrogen serves to balance shorter-term variations in wind production. Batteries and batteries in electric vehicles adjust based on daily changes in solar radiation. These findings suggest that depending on only one storage technology for a low-carbon energy system is impractical. Another relevant point made in the literature is that batteries are best suited for balancing at short periods, hydrogen becomes important for balancing at longer periods, and thermal storage technologies become necessary when integrating

the heating sector into the energy system. In light of that, considering "storage" as one concept without making distinctions between technologies by time scale and sector coupling would be scientifically flawed. Rather, there needs to be differentiation of storage technology by both time scale and sector.

In terms of sustainability, the key takeaway from the research findings is that energy systems with high amounts of renewable energy are financially justified. According to the main study examined in the work, it is estimated that implementing all the flexibility measures and optimal transmission requires only minor additional costs compared to current system costs. Additionally, these calculations do not include externalities like CO₂ emissions and air pollution. It shows that transitioning to an energy system is not an expensive environmentalist endeavor disconnected from practical concerns. Instead, through leveraging system flexibility and coupling, a future with high amounts of renewable energy can also be economically justified, in addition to being environmentally beneficial. Finally, according to other literature included in the bibliography, sector coupling can not only increase the value of renewable resources but it can also create savings and help achieve carbon neutrality.

However, it should be noted that the analysis carried out in the study contains several methodological problems. To begin with, the model used consists of a single node for each country and ignores some grid constraints locally. Also, certain technologies are excluded from calculations, and certain CO₂ sources are excluded. Furthermore, the majority of calculations are performed based on a single historic year and exclude other years. Moreover, some constraints about natural gas are implemented in the model only partially. According to other scientific sources, energy security issues like climate disasters, extreme weather, and renewable scarcity events called *Dunkelflaute* need to be considered in models of energy. Therefore, although the findings are highly valuable, they should not be presented as universally fixed truths in every context. From a scientific perspective, the sounder position is to interpret these results as strong but conditional conclusions.

The conclusion drawn in this work is that the application of the sector coupling approach can be regarded as one of the crucial strategies within the energy systems featuring high proportions of renewable energy sources in Europe. Technologies such as battery electric vehicles, smart charging, vehicle-to-grid energy exchange, heat pumps, district heating, thermal energy storage, and power-to-gas have been found to result in cost savings on top of integrating renewables in a more efficient way. While transmission lines between states become relevant in terms of interconnections, their importance becomes secondary as the concept of sector coupling advances, proving that there is no single solution determining the transition processes. Therefore, energy transition strategies need to consider both internal system flexibility opportunities and investments into transmission technologies as a complementary solution rather than a choice to be made exclusively in favor of one of them.

From this standpoint, the main finding of the work is that the sustainable and low-carbon energy future can be built through the construction of a new type of intelligent system that would be based on combining the electricity, transport, and heating sectors; would be supplemented by means of storage at multiple scales; and would include proper transmission lines. From among transport technologies, battery electric

vehicles turn out to be the most promising ones, while from among heating technologies, heat pumps and district heating. Moreover, seasonally balanced systems are considered vital in this case, which transforms the question about the preferred solution from "Which technology would prevail?" to "Which system design would be more flexible, cheaper, and low-carbon?"

References

- Akhmetov, Y., Fedotova, E., & Frysztacki, M. M. (2025). Flattening the peak demand curve through energy-efficient buildings: a holistic approach towards net-zero carbon. *Applied Energy*, 384, 125421.
- Al-Dhaifallah, M., Refaat, M. M., Alaas, Z., Aleem, S. H. A., El-kholy, E. E., & Ali, Z. M. (2024). Multi-objectives transmission expansion planning considering energy storage systems and high penetration of renewables and electric vehicles under uncertain conditions. *Energy Reports*, 11, 4143-4164.
- Becker, S., Rodriguez, R. A., Andresen, G. B., Schramm, S., & Greiner, M. (2014). Transmission grid extensions during the build-up of a fully renewable pan-European electricity supply. *Energy*, 64, 404-418.
- Bernath, C., Deac, G., & Sensfuß, F. (2021). Impact of sector coupling on the market value of renewable energies—A model-based scenario analysis. *Applied Energy*, 281, 115985.
- Bernecker, M., Sgarciu, S., Kan, X., Anvari, M., Riepin, I., & Müsgens, F. (2025). Adaptive Robust Optimization for European Electricity System Planning Considering Regional Dunkelflaute Events. *arXiv preprint arXiv:2507.11361*.
- Brown, T., Hörsch, J., & Schlachtberger, D. (2017). PyPSA: Python for power system analysis. *arXiv preprint arXiv:1707.09913*.
- Brown, T., Schierhorn, P. P., Tröster, E., & Ackermann, T. (2016). Optimising the European transmission system for 77% renewable electricity by 2030. *IET Renewable Power Generation*, 10(1), 3-9.
- Brown, T., Schlachtberger, D., Kies, A., Schramm, S., & Greiner, M. (2018). Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, 160, 720-739.
- Cao, K. K., Pregger, T., Haas, J., & Lens, H. (2021). To prevent or promote grid expansion? Analyzing the future role of power transmission in the European energy system. *Frontiers in Energy Research*, 8, 541495.
- Carlini, E. M., Gadaleta, C., Migliori, M., Ferretti, F., Vailati, R., Venturini, A., & Puglisi, C. (2024). Cost-effective target capacity assessment in the energy transition: The italian methodology. *Energies*, 17(12), 2824.
- Chen, Y. K., Koduvere, H., Gunkel, P. A., Kirkerud, J. G., Skytte, K., Ravn, H., & Bolkesjø, T. F. (2020). The role of cross-border power transmission in a renewable-rich power system—a model analysis for Northwestern Europe. *Journal of Environmental Management*, 261, 110194.

- Emdadi, K., & Pirouzi, S. (2025). Benders Decomposition-Based Power Network Expansion Planning According to Eco-Sizing of High-Voltage Direct-Current System, Power Transmission Cables and Renewable/Non-Renewable Generation Units. *IET Renewable Power Generation*, 19(1), e70025.
- European Transmission System Operators. Country-specific hourly load data.2011. <https://www.entsoe.eu/data/data-portal/consumption/>.
- Fürsch, M., Hagspiel, S., Jägemann, C., Nagl, S., Lindenberger, D., & Tröster, E. (2013). The role of grid extensions in a cost-efficient transformation of the European electricity system until 2050. *Applied Energy*, 104, 642-652.
- Gea-Bermúdez, J., Jensen, I. G., Münster, M., Koivisto, M., Kirkerud, J. G., Chen, Y. K., & Ravn, H. (2021). The role of sector coupling in the green transition: A least-cost energy system development in Northern-central Europe towards 2050. *Applied Energy*, 289, 116685.
- Götske, E. K., Pratama, Y., Andresen, G. B., Gidden, M. J., Victoria, M., & Zakeri, B. (2025). First steps towards bridging integrated assessment modeling and high-resolution energy system models: a scenario matrix for a low-emissions sector-coupled European energy system. *Environmental Research Communications*, 7(8), 085010.
- Herding, L., Cossent, R., Rivier, M., & Bañales, S. (2024). Assessing the impact of renewable energy penetration and geographical allocation on transmission expansion cost: A comparative analysis of two large-scale systems. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 38, 101349.
- Hörsch, J., Hofmann, F., Schlachtberger, D., & Brown, T. (2018). PyPSA-Eur: An open optimisation model of the European transmission system. *Energy strategy reviews*, 22, 207-215.
- Odenweller, A., Ueckerdt, F., Hampp, J., Ramirez, I., Schreyer, F., Hasse, R., ... & Luderer, G. (2026). REMIND-PyPSA-Eur: Integrating power system flexibility into sector-coupled energy transition pathways. *Progress in Energy*, 8(2), 025001.
- Open Power System Data. Data package time series. Version 2017-07e09. July 2017. https://data.open-power-systemdata.org/time_series/2017-07-09/.
- Pavičević, M., Mangipinto, A., Nijs, W., Lombardi, F., Kavvadias, K., Navarro, J. P. J., ... & Quoilin, S. (2020). The potential of sector coupling in future European energy systems: Soft linking between the Dispa-SET and JRC-EU-TIMES models. *Applied Energy*, 267, 115100.
- Rodriguez, R. A., Becker, S., Andresen, G. B., Heide, D., & Greiner, M. (2014). Transmission needs across a fully renewable European power system. *Renewable Energy*, 63, 467-476.
- Schlachtberger, D. P., Brown, T., Schramm, S., & Greiner, M. (2017). The benefits of cooperation in a highly renewable European electricity network. *Energy*, 134, 469-481.
- Shen, L., Jiang, L., Wang, Q., Wen, Y., & Liu, T. (2023). Multi-period transmission expansion planning for renewables-rich power grid enabling transfer capacity enhancement of hybrid AC/DC interface. *Energies*, 16(5), 2170.

- Thellufsen, J. Z., Lund, H., Sorknæs, P., Nielsen, S., Chang, M., & Mathiesen, B. V. (2023). Beyond sector coupling: Utilizing energy grids in sector coupling to improve the European energy transition. *Smart Energy*, 12, 100116.
- van der Zwaan, B., Fattahi, A., Dalla Longa, F., Dekker, M., van Vuuren, D., Pietzcker, R., ... & Usher, W. (2025). Electricity-and hydrogen-driven energy system sector-coupling in net-zero CO2 emission pathways. *Nature Communications*, 16(1), 1368.
- Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2019). The role of storage technologies throughout the decarbonisation of the sector-coupled European energy system. *Energy Conversion and Management*, 201, 111977.
- Wang, Q., Hou, Z., Guo, Y., Huang, L., Fang, Y., Sun, W., & Ge, Y. (2023). Enhancing energy transition through sector coupling: a review of technologies and models. *Energies*, 16(13), 5226.
- Wietschel, M., Held, A., Pfluger, B., & Ragwitz, M. (2020). Energy integration across electricity, heating & cooling and the transport sector-Sector coupling (No. S08/2020). Working paper sustainability and innovation.
- Yueksel-Erguen, I., Most, D., Wyrwoll, L., Schmitt, C., & Zittel, J. (2025). Modeling the transition of the multimodal pan-European energy system including an integrated analysis of electricity and gas transport: I. Yueksel-Erguen et al. *Energy Systems*, 16(3), 1187-1232.

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Environmental Threats: The Current Situation

Zeliha Selamoglu^{1,2}

¹*Department of Medical Biology, Faculty of Medicine, Nigde Ömer Halisdemir University, Nigde, Türkiye*

²*Department of Biology, Faculty of Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are a class of organic compounds composed of two or more fused aromatic rings, primarily produced through incomplete combustion of organic matter. These compounds are widely distributed in the environment due to both natural and anthropogenic sources such as fossil fuel combustion, industrial activities, vehicle emissions, and biomass burning. PAHs are persistent, bioaccumulative, and toxic, making them significant environmental pollutants. Many PAH compounds are known or suspected carcinogens, mutagens, and endocrine disruptors. This paper reviews the sources, environmental fate, toxicological impacts, and ecological risks of PAHs, emphasizing their long-term threats to ecosystems and human health.

Keywords: Environmental pollution, Oxidative stress, PAHs

Introduction

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) represent a large group of organic contaminants consisting of carbon and hydrogen atoms arranged in multiple fused benzene rings. Their formation occurs mainly during incomplete combustion processes, including fossil fuel burning, waste incineration, industrial production, and natural events such as forest fires and volcanic eruptions. Due to their hydrophobic nature and chemical stability, PAHs persist in environmental compartments such as air, water, soil, and sediments. The United States Environmental Protection Agency (US EPA) has identified 16 priority PAHs due to their toxicity and environmental relevance. The increasing industrialization and urbanization worldwide have significantly elevated PAH concentrations in the environment, making them a global environmental concern. Environmental sources of free radicals and reactive oxygen species include some pollutants, organic solvents, pesticides, tobacco smoke. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are also an important source of environmental stress emitters, and their longterm bioaccumulation causes severe environmental pollution (Selamoglu, 2018).

Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are ubiquitous environmental contaminants that originate from both natural processes and human activities. Although they can be formed in nature, contemporary environmental burdens of PAHs are overwhelmingly dominated by anthropogenic emissions (Boström et al., 2002). Production of free radicals, which can be caused by environmental pollution plays an important role in damage and loss of function in tissues and organs. Lipid peroxidation, which results from the oxidative injury of saturated and unsaturated lipids, has been broadly used as a marker of the induction of oxidative damage in rats suffering from environmental stress induced by PAHs. PAHs, such as petroleum and petroleum derivatives, are widespread organic pollutants originated from oil spills and incomplete combustion of fossil fuels at the environment (Selamoglu, 2018).

Natural Sources

Natural sources contribute relatively small but ecologically significant amounts of PAHs. One of the most important natural formation pathways is incomplete combustion of organic matter during forest and grassland fires. During such high-temperature combustion processes, plant biomass undergoes pyrolysis, producing a wide range of PAH compounds that are released into the atmosphere (Neff, 1979). Another natural source is volcanic activity, where high-temperature geochemical reactions lead to the formation and emission of organic pollutants including PAHs. Although less studied compared to anthropogenic sources, volcanic emissions can locally elevate PAH concentrations in air and soil. In addition, diagenetic processes in sediments represent a geological pathway of PAH formation. Over long timescales, organic matter buried in sediments undergoes chemical transformation under heat and pressure, forming petrogenic PAHs that can later be released through natural seepage or erosion processes (ATSDR, 1995).

Anthropogenic Sources

Human activities represent the dominant global source of PAHs, especially in industrialized and urbanized regions. The most significant contributor is vehicle exhaust emissions, particularly from diesel engines, which produce high concentrations of high-molecular-weight PAHs due to incomplete combustion of fossil fuels (WHO, 2010). Industrial processes such as steel manufacturing, aluminum production, petroleum refining, and coke production are also major sources. These industries operate at high temperatures where organic compounds are thermally decomposed, releasing PAHs into the atmosphere and surrounding environments. Residential heating systems, especially those using coal, wood, and biomass fuels, significantly contribute to PAH emissions in developing and cold-climate regions. Inefficient combustion in household stoves and fireplaces leads to high local exposure levels. Another important source is waste incineration, where municipal and hazardous waste combustion produces PAHs if combustion conditions are not fully optimized. Similarly, oil spills and petroleum leakage release petrogenic PAHs directly into marine and terrestrial ecosystems, causing long-term contamination (Selamoglu, 2018).

As a result, urban areas consistently show much higher PAH concentrations than rural environments, largely due to traffic density, industrial clustering, and energy consumption patterns (Boström et al., 2002).

Environmental Fate and Transport

PAHs are classified as semi-volatile organic compounds (SVOCs), meaning they can exist in both gaseous and particulate phases. Their environmental behavior is governed by physicochemical properties such as vapor pressure, solubility, and hydrophobicity.

Atmospheric Transport

In the atmosphere, PAHs are distributed between gas and particulate phases depending on their molecular weight. Low molecular weight PAHs (2–3 rings) tend to exist in gaseous form, while high molecular weight PAHs (4–6 rings) strongly adsorb onto airborne particulate matter. This dual-phase behavior enables PAHs to undergo long-range atmospheric transport, allowing them to travel hundreds or even thousands of kilometers before being deposited through wet (rain, snow) or dry deposition processes (ATSDR, 1995). This explains why PAHs can be detected even in remote regions such as the Arctic.

Soil and Sediment Accumulation

Due to their highly hydrophobic nature, PAHs strongly bind to organic carbon in soils and sediments. Once deposited, they tend to persist for long periods because they are poorly soluble in water and resistant to microbial degradation. Sediments in rivers, lakes, and coastal zones act as major sinks for PAHs, where they accumulate over decades. These reservoirs can later act as secondary pollution sources when disturbed by dredging, floods, or biological activity (Neff, 1979).

Aquatic Systems

PAHs enter aquatic environments through atmospheric deposition, urban runoff, industrial discharge, and accidental oil spills. Once in water bodies, they tend to partition into sediments rather than remaining dissolved. Aquatic organisms, especially benthic species, are highly exposed to PAHs due to their sediment association. Fish and invertebrates can bioaccumulate these compounds, leading to toxic effects that propagate through aquatic food webs (WHO, 2010).

Toxicological Effects on Humans

PAHs are of major concern due to their mutagenic, carcinogenic, and endocrine-disrupting properties. Human exposure occurs mainly through inhalation of polluted air, ingestion of contaminated food, and dermal contact. Oxidative stress is described as the formation of toxic effect due to the deficiency of cellular antioxidative level toward the level of reactive oxygen species (ROS). The excess production of ROS or the decrease in the antioxidative defense system could be the cause for oxidative stress. 7, 12-dimethylbenz [a] anthracene (DMBA) is a PAH known to cause tumors in rats. DMBA that is known to be the major cause the increment in lipid peroxidation level

and the oxidative damage in the tissues. ,12-Dimethylbenz[a]anthracene (DMBA) is a poly-cyclic aromatic hydrocarbon (PAH) known as an agent causing stress in rats. Organic pollutants are the most important environmental factor for the biologic systems. DMBA exposure appears to be associated with a number of physiological disease processes (Selamoglu, 2018).

Carcinogenicity

Many health problems can be induced by many environmental pollutants. Several PAHs, particularly benzo[a]pyrene, are classified as Group 1 carcinogens by the International Agency for Research on Cancer (IARC). Once inside the human body, PAHs undergo metabolic activation via cytochrome P450 enzymes, forming reactive intermediates that bind to DNA and cause mutations. These DNA adducts are strongly associated with the initiation of cancers, particularly lung, skin, and bladder cancers (Boström et al., 2002). Besides the formation of DNA adducts, oxidative products derived from mutagen metabolism such as DMBA, might impair vital cellular functions by damaging proteins and lipid membranes. DMBA (7,12dimethylbenz[a]anthracene) is a polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) known to cause tumors in rats. DMBA is known to generate DNA-reactive species, which may enhance oxidative stress in cells, during its metabolism (Selamoglu, 2018).

Respiratory and Cardiovascular Effects

Inhalation of PAH-contaminated air is linked to multiple respiratory problems. Exposure has been associated with:

- 1-Reduced lung function
- 2-Increased asthma incidence
- 3-Chronic bronchitis

In addition, PAHs contribute to cardiovascular diseases through oxidative stress and inflammation, which affect vascular function and increase the risk of heart disease (WHO, 2010).

Endocrine Disruption

Some PAHs interfere with endocrine signaling pathways, disrupting hormonal balance. These effects can impair reproductive health, fetal development, and growth processes. Endocrine disruption is particularly concerning due to long-term generational impacts (ATSDR, 1995).

Ecological Impacts

Aquatic Organisms

PAHs are highly toxic to aquatic life. Fish embryos and larvae are particularly sensitive. Exposure can result in:

- 1-Developmental deformities
- 2-Cardiac dysfunction

3-Reduced hatching success

4-Increased mortality

These effects significantly disrupt aquatic population dynamics (Neff, 1979).

Soil Ecosystems

In soils, PAHs negatively affect microbial diversity and activity. Since soil microorganisms play a key role in nutrient cycling, PAH contamination can reduce soil fertility and slow organic matter decomposition processes.

Bioaccumulation and Biomagnification

Due to their lipophilic nature, PAHs accumulate in fatty tissues of organisms. As contaminated organisms are consumed by predators, PAHs can biomagnify through the food chain, ultimately reaching humans through seafood and animal products (WHO, 2010).

Environmental Persistence and Risk Factors

PAHs are highly persistent in the environment due to their stable aromatic ring structure. Their degradation is slow and depends on environmental conditions.

Key factors influencing persistence include:

1-Molecular weight: Higher molecular weight PAHs degrade more slowly

2-Temperature and sunlight: Higher temperatures and UV exposure increase degradation

3-Oxygen availability: Aerobic conditions enhance microbial breakdown

4-Soil organic matter: High organic content increases adsorption and reduces mobility

This persistence leads to long-term environmental contamination and chronic exposure risks.

Mitigation and Control Strategies

Source Reduction

The most effective strategy for controlling PAHs is reducing emissions at the source:

1-Transition to renewable energy systems

2-Improved combustion efficiency in industrial processes

3-Strict emission standards for vehicles

4-Cleaner residential heating technologies

Environmental Remediation

Contaminated environments can be treated using several methods:

1-Bioremediation: Use of PAH-degrading bacteria and fungi

2-Phytoremediation: Use of plants to absorb or degrade PAHs

3-Chemical oxidation: Application of oxidizing agents to break down PAHs

4-Soil washing: Physical removal of contaminants from soil

Policy and Regulation

International organizations such as the US EPA and WHO recommend continuous monitoring of PAHs in air, water, soil, and food. Regulatory frameworks aim to limit industrial emissions and reduce human exposure.

Conclusion

Polycyclic aromatic hydrocarbons remain among the most important global environmental pollutants due to their persistence, toxicity, and widespread distribution. Although natural sources exist, anthropogenic activities are the dominant contributors to environmental PAH burdens. Their ability to persist in ecosystems, accumulate in organisms, and induce serious health effects such as cancer makes them a critical environmental and public health concern. Addressing PAH pollution requires an integrated approach combining emission reduction, environmental remediation, and strict regulatory control. Future research should focus on improving biodegradation technologies and understanding long-term ecological impacts in a changing global environment.

References

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (1995). *Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)*. U.S. Department of Health and Human Services.
- Boström, C. E., Gerde, P., Hanberg, A., et al. (2002). Cancer risk assessment of PAHs in ambient air. *Environmental Health Perspectives*, 110(Suppl 3), 451–488.
- Neff, J. M. (1979). *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Environment*. Applied Science Publishers.
- Selamoglu, Z. (2018). 7, 12-dimethylbenz (a) anthracene toxicity and cancer. *SF Oncol Can Res J*, 2(2), 1-3.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2020). *Priority Pollutant List*.
- World Health Organization (WHO). (2010). *Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Drinking-water*.

Studies on Aquatic Animal Health and Aquaculture within the Scope of Apitherapy Applications

Zeliha Selamoglu^{1,2*}

¹*Department of Medical Biology, Faculty of Medicine, Nigde Ömer Halisdemir University, Nigde, Türkiye*

²*Department of Biology, Faculty of Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

**Email: zselamoglu@ohu.edu.tr*

Abstract

Apitherapy, defined as the use of bee-derived products such as honey, propolis, royal jelly, bee pollen, and bee venom for therapeutic purposes, has gained increasing attention as a sustainable alternative in aquaculture. The intensification of aquaculture systems has led to the widespread emergence of infectious diseases, environmental stress, and antimicrobial resistance. This study comprehensively examines the role of apitherapy in enhancing aquatic animal health, focusing on immunomodulatory, antimicrobial, antioxidant, and growth-promoting effects. By synthesizing recent literature, this paper highlights both the potential and limitations of integrating apitherapy into aquaculture practices. The findings suggest that apitherapy-based interventions could significantly reduce reliance on antibiotics while improving productivity and sustainability.

Keywords: Antimicrobial resistance, Apitherapy, Aquaculture, Fish health, Honey, Immunostimulation, Propolis.

Introduction

Aquaculture has emerged as one of the fastest-growing sectors in global food production, contributing significantly to food security and economic development (FAO, 2022). However, the intensification of aquaculture practices has resulted in increased disease outbreaks, environmental degradation, and the excessive use of antibiotics and chemicals (Cabello, 2006). The overuse of antibiotics in aquaculture has raised serious concerns regarding antimicrobial resistance, environmental contamination, and food safety (Defoirdt et al., 2011). Consequently, there is a growing demand for natural, eco-friendly, and sustainable alternatives. In this context, apitherapy has gained attention due to its bioactive compounds and therapeutic properties. Bee products such as propolis, honey, royal jelly, and bee pollen have been extensively studied in human and veterinary medicine. However, their application in aquaculture remains an emerging field with promising potential (Babaei et al., 2016). Honeybee products are apicultural products which are composed of nutritionally valuable substances and contains considerable amounts of polyphenolic compounds, mainly flavonoids, which may act as potent anti-oxidants. Polyphenols are responsible for the antioxidative and radical scavenging activities of plant food.

Natural honeybee products are apicultural compounds which are composed of nutritionally valuable substances and contains considerable amounts of polyphenolic compounds, mainly flavonoids, which may act as potent antioxidant molecules (Selamoglu et al., 2016).

Bee Products and Their Bioactive Components

Apitherapy encompasses a wide range of bee-derived products characterized by complex biochemical compositions and diverse biological activities. These natural substances, including propolis, honey, royal jelly, bee pollen, and bee venom, contain a broad spectrum of bioactive compounds such as flavonoids, phenolic acids, enzymes, peptides, amino acids, vitamins, and minerals. These compounds are responsible for the therapeutic properties of apitherapy products and their increasing relevance in aquaculture applications. However, the chemical composition of these products is highly variable and depends on several factors, including botanical origin, geographical location, climatic conditions, and seasonal variations. This variability presents a significant challenge in terms of standardization and reproducibility, which remains a critical issue in apitherapy research (Bankova et al., 2016). Propolis is one of the most extensively studied apitherapeutic substances due to its potent biological properties. It is a resinous material collected by bees from plant exudates and subsequently modified with beeswax and enzymes. Its chemical composition is rich in flavonoids such as quercetin, galangin, and pinocembrin, as well as phenolic acids like caffeic acid phenethyl ester (CAPE), terpenoids, and aromatic compounds. These constituents confer strong antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory properties. The antimicrobial activity of propolis is primarily attributed to its ability to disrupt bacterial cell membranes, inhibit nucleic acid synthesis, and interfere with energy metabolism in pathogenic microorganisms (Sforcin, 2016). In aquaculture systems, propolis has demonstrated significant antibacterial effects against pathogens such as *Aeromonas hydrophila* and *Vibrio spp.*, as well as antifungal activity. In addition, it exhibits immunostimulatory properties by activating macrophages and leukocytes and modulating cytokine production. Propolis also plays a crucial role in reducing oxidative stress by enhancing antioxidant enzyme activity, thereby contributing to improved health and disease resistance in aquatic organisms. Honey, another fundamental component of apitherapy, is a supersaturated sugar solution mainly composed of fructose and glucose, but its biological activity extends far beyond its carbohydrate content. It contains a variety of bioactive compounds, including phenolic compounds, flavonoids, enzymes such as glucose oxidase and catalase, organic acids, and hydrogen peroxide. The antibacterial activity of honey is multifactorial, involving osmotic effects due to high sugar concentration, acidic pH that inhibits microbial growth, and the enzymatic production of hydrogen peroxide. Additionally, certain types of honey contain non-peroxide antimicrobial compounds, further enhancing their effectiveness (Molan, 1992). In aquaculture, honey has been utilized for wound healing, prevention of external infections, and promotion of tissue regeneration. Its anti-biofilm properties are particularly valuable in controlling persistent infections, as biofilm formation is a major factor contributing to antimicrobial resistance in aquatic environments. Royal jelly is a nutrient-rich secretion produced by worker bees and

serves as the exclusive food source for queen bees. It contains major royal jelly proteins (MRJPs), free amino acids, lipids such as 10-hydroxy-2-decenoic acid (10-HDA), vitamins, and essential minerals. Royal jelly is known for its immunomodulatory, antioxidant, and growth-promoting properties. The presence of 10-HDA contributes significantly to its antimicrobial and anti-inflammatory effects. In aquatic organisms, supplementation with royal jelly has been associated with improved larval survival rates, enhanced growth performance, and increased resistance to environmental stressors. Furthermore, royal jelly has been shown to influence gene expression related to immune responses and metabolic processes, suggesting that its effects extend to the molecular level (Ramadan & Al-Ghamdi, 2012). Bee pollen is considered a highly nutritious natural product due to its rich composition, which includes proteins, essential amino acids, carbohydrates, lipids, vitamins, minerals, and phenolic compounds. It functions as a natural growth promoter and immunostimulant in aquaculture. Its high protein content supports muscle development, while its bioactive compounds enhance immune responses and antioxidant capacity. Bee pollen also plays a significant role in improving digestive efficiency by stimulating enzyme activity and promoting a healthy gut microbiota. Studies have demonstrated that dietary inclusion of bee pollen leads to improved growth performance, increased survival rates, and enhanced resistance to diseases in various fish species (Campos et al., 2008). Bee venom, although less commonly used in aquaculture, has attracted scientific interest due to its potent bioactive components, including melittin, apamin, phospholipase A2, and other peptides. Melittin, the active compound, exhibits strong antimicrobial activity by disrupting microbial cell membranes and inducing cell lysis. Despite its therapeutic potential, the application of bee venom in aquaculture is limited by concerns regarding toxicity and dosage sensitivity. Nevertheless, recent studies suggest that controlled use of purified components of bee venom may provide novel antimicrobial and immunostimulatory strategies, although further research is required to establish safe and effective application methods. A major challenge associated with the use of apitherapy products is the lack of standardization. The variability in composition due to environmental and biological factors affects their efficacy and reproducibility. Differences in botanical sources, climate, geographical origin, and processing techniques lead to inconsistencies in the concentration of active compounds (Selamoglu et al., 2016). Therefore, future research should focus on the development of standardized extraction methods, chemical profiling techniques, and quality control protocols to ensure consistent and reliable application of apitherapy in aquaculture.

Immunomodulatory Effects in Aquatic Organisms

The immune system of aquatic organisms, particularly fish and crustaceans, relies predominantly on innate immunity, as their adaptive immune responses are relatively less developed compared to those of terrestrial vertebrates. Innate immunity serves as the first line of defense against invading pathogens and plays a crucial role in maintaining health in aquaculture systems. Consequently, enhancing innate immune responses is considered a primary strategy for improving disease resistance and reducing mortality in aquaculture (Magnadóttir, 2006). Apitherapy-derived products have been shown to exert significant immunomodulatory effects through a variety of

biochemical and cellular mechanisms. These effects are largely attributed to the presence of bioactive compounds such as flavonoids, phenolic acids, peptides, and fatty acids, which influence both cellular and humoral components of the immune system (Aldemir et al., 2014). One of the key mechanisms involves the activation of innate immune responses, including increased lysozyme activity, enhanced phagocytic function, and stimulation of respiratory burst activity. Lysozyme is an essential antimicrobial enzyme that degrades bacterial cell walls, thereby providing protection against pathogenic infections. Studies have demonstrated that dietary supplementation with propolis significantly increases lysozyme activity in fish species such as *Oreochromis niloticus*, leading to enhanced antibacterial defense (Abd-El-Rhman, 2009). Similarly, phagocytic activity, which involves the engulfment and destruction of pathogens by immune cells such as macrophages and neutrophils, is markedly enhanced by apitherapy products. This results in a more efficient elimination of invading microorganisms (Babaei et al., 2016). At the molecular level, apitherapy compounds modulate immune responses by influencing cytokine production and intracellular signaling pathways. Flavonoids and phenolic compounds found in propolis regulate the expression of both pro-inflammatory and anti-inflammatory cytokines, ensuring a balanced immune response. For example, the upregulation of cytokines such as IL-1 β and TNF- α during early stages of infection enhances the organism's ability to combat pathogens, while the subsequent increase in anti-inflammatory cytokines such as IL-10 prevents excessive immune reactions and tissue damage (Sforcin, 2016). These effects are mediated through key signaling pathways, including the NF- κ B and MAPK pathways, which regulate the expression of genes involved in immune responses (Xue et al., 2019).

In addition to cellular immunity, apitherapy products also enhance humoral immune responses. These include increased levels of immunoglobulins, activation of the complement system, and production of antimicrobial peptides. Bee pollen, in particular, has been shown to significantly increase immunoglobulin (IgM) levels in fish, indicating improved humoral immunity (Turan & Yılmaz, 2019). Propolis also enhances complement activity, which plays a critical role in pathogen recognition and elimination. Another important aspect of immunomodulation is the role of antioxidant defense systems. Oxidative stress, caused by the excessive production of reactive oxygen species, can impair immune function and increase susceptibility to diseases. Apitherapy products mitigate oxidative stress by enhancing the activity of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase, catalase, and glutathione peroxidase. This not only protects immune cells from damage but also supports overall immune function (Fang et al., 2002). The gut-associated immune system also plays a vital role in aquatic organism health. The gastrointestinal tract is a major site of interaction between the host and external pathogens. Apitherapy products positively influence gut health by promoting beneficial microbiota, inhibiting pathogenic bacteria, and strengthening intestinal barrier function. Bee pollen and honey act as prebiotic-like substances, supporting the growth of beneficial bacteria such as *Lactobacillus spp.*, which in turn enhances nutrient absorption and immune responses (Nya & Austin, 2009). The effectiveness of apitherapy varies among different aquatic species due to physiological and immunological differences. Fish species such as tilapia and carp exhibit strong innate immune responses, while crustaceans such as shrimp rely heavily on hemocyte

activity and the phenoloxidase system. In shrimp, propolis supplementation has been shown to increase hemocyte density and phenoloxidase activity, leading to improved disease resistance (Zhang et al., 2014). Additionally, early life stages of aquatic organisms benefit significantly from apitherapy, as it enhances survival rates and stress tolerance. Despite these promising findings, several limitations remain in understanding the immunological effects of apitherapy. There is a lack of standardized experimental protocols, limited molecular-level studies, and insufficient long-term trials. Variability in dosage and product composition further complicates the interpretation of results. Moreover, excessive immune stimulation may lead to immunopathological effects, highlighting the importance of determining optimal dosage levels.

Antimicrobial Properties and Disease Control

Aquaculture systems are highly vulnerable to a wide range of pathogenic microorganisms, particularly bacterial species such as *Aeromonas hydrophila*, *Vibrio spp.*, and *Pseudomonas spp.*, which are responsible for significant economic losses worldwide. The intensive nature of modern aquaculture practices, including high stocking densities and fluctuating environmental conditions, creates an ideal environment for the rapid proliferation and transmission of these pathogens. Consequently, the search for effective, sustainable, and environmentally friendly antimicrobial agents has become a priority. Within this context, apitherapy-derived products, particularly propolis, honey, and bee venom, have demonstrated remarkable antimicrobial properties. Propolis, in particular, has been extensively studied due to its rich composition of flavonoids, phenolic acids, and aromatic compounds, which collectively contribute to its broad-spectrum antimicrobial activity (Orun et al., 2014; Selamoglu et al., 2015). These compounds exert their effects through multiple mechanisms, including disruption of microbial cell membranes, inhibition of nucleic acid synthesis, and interference with enzymatic systems essential for bacterial survival (Sforzin, 2016). Experimental studies have shown that propolis extracts significantly reduce bacterial load in infected aquatic organisms, thereby improving survival rates. In addition, propolis has demonstrated inhibitory effects against biofilm formation, which is a critical factor in the persistence and resistance of bacterial infections in aquaculture environments. The ability to disrupt biofilms enhances its effectiveness compared to conventional antimicrobial agents. Honey, another key apitherapeutic product, exhibits strong antibacterial activity through a multifactorial mechanism. Its high osmotic pressure, acidic pH, and enzymatic production of hydrogen peroxide collectively create an inhospitable environment for microbial growth. Moreover, certain types of honey contain non-peroxide antimicrobial compounds, further enhancing their efficacy. In aquaculture applications, honey has been successfully used in the treatment of external wounds and infections, promoting faster healing and reducing the risk of secondary bacterial invasion (Molan, 1992). Bee venom, although less commonly applied, contains potent antimicrobial peptides such as melittin, which can disrupt bacterial cell membranes and induce cell lysis. While its application in aquaculture is still limited due to concerns regarding toxicity and dosage control, emerging research suggests that controlled use of bee venom

components may offer a novel approach to disease management. In shrimp aquaculture, where bacterial infections caused by *Vibrio* species are particularly problematic, dietary supplementation with propolis has been associated with significantly reduced mortality rates. Studies have demonstrated that propolis not only inhibits bacterial growth but also enhances the immune response of shrimp, providing a dual mechanism of protection (Zhang et al., 2014). These findings highlight the potential of apitherapy as an alternative to antibiotics in controlling infectious diseases in aquaculture systems (Dastan et al., 2017).

Antioxidant Activity and Stress Reduction

Aquatic organisms are continuously exposed to a variety of environmental stressors, including poor water quality, high stocking densities, temperature fluctuations, and handling stress. These stress factors can disrupt physiological homeostasis and lead to the excessive production of reactive oxygen species (ROS), resulting in oxidative stress. Oxidative stress is known to damage cellular components such as lipids, proteins, and DNA, ultimately compromising immune function and increasing susceptibility to diseases. Apitherapy products, particularly propolis and honey, are rich sources of natural antioxidants, including flavonoids and phenolic compounds, which play a crucial role in neutralizing free radicals and reducing oxidative damage. These bioactive compounds enhance the antioxidant defense system of aquatic organisms by increasing the activity of key enzymes such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and glutathione peroxidase (GPx). The upregulation of these enzymes improves the organism's ability to detoxify reactive oxygen species and maintain cellular integrity under stress conditions. As a result, fish and other aquatic species exhibit increased physiological resilience, better adaptation to environmental changes, and reduced stress-induced mortality (Fang et al., 2002). Furthermore, the antioxidant properties of apitherapy products are closely linked to their immunomodulatory effects. By reducing oxidative stress, these substances help preserve the functionality of immune cells, thereby enhancing the overall immune response. This dual role—antioxidant and immunostimulant—makes apitherapy particularly valuable in intensive aquaculture systems, where stress management is critical for maintaining animal health and productivity (Orun et al., 2014).

Growth Performance and Feed Efficiency

Enhancing growth performance and feed efficiency is a central objective in aquaculture, as these factors directly influence production costs and profitability. In recent years, bee-derived products such as bee pollen and royal jelly have gained attention as natural dietary supplements capable of improving growth parameters in aquatic species. Bee pollen is a nutrient-rich substance containing high levels of proteins, essential amino acids, vitamins, and minerals, which are essential for growth and development. Similarly, royal jelly provides a unique combination of bioactive compounds that support metabolic processes and cellular growth. Studies have consistently shown that the inclusion of these substances in aquafeeds leads to increased weight gain, improved feed conversion ratios (FCR), and enhanced protein

utilization. The underlying mechanisms of these effects are multifaceted. Firstly, bee-derived products stimulate digestive enzyme activity, including proteases, amylases, and lipases, which enhances the breakdown and absorption of nutrients. Secondly, they positively influence the composition of gut microbiota, promoting beneficial bacterial populations that improve digestion and nutrient assimilation. Thirdly, their immunostimulatory properties reduce the energy expenditure associated with immune responses, allowing more energy to be allocated toward growth. For instance, experimental studies on carp species have demonstrated that dietary supplementation with bee pollen results in significantly higher growth rates compared to control groups. This improvement is attributed not only to enhanced nutritional intake but also to improved physiological and metabolic efficiency (Nya & Austin, 2009). Overall, the integration of apitherapy products into aquafeeds represents a promising strategy for improving growth performance in a sustainable and environmentally friendly manner.

Applications in Different Aquaculture Systems

The application of apitherapy in aquaculture varies depending on the type of production system and the species being cultivated. In fish farming, bee-derived products are primarily used as feed additives to enhance immune function, improve growth performance, and increase resistance to diseases. Their incorporation into formulated feeds has been shown to provide both prophylactic and therapeutic benefits, reducing the need for chemical treatments. In shrimp farming, which is particularly susceptible to bacterial diseases, propolis has emerged as a valuable natural additive. Its antimicrobial and immunostimulatory properties help mitigate disease outbreaks, especially in intensive production systems where stress levels are high and pathogen transmission is rapid. The use of propolis in shrimp diets has been associated with improved survival rates and overall health status. In hatchery systems, where early life stages are highly vulnerable, honey has been utilized for its wound-healing and antimicrobial properties. It is often applied to treat injuries and infections, as well as to support larval health and development. These applications highlight the versatility of apitherapy products across different stages of aquaculture production. Despite the promising benefits of apitherapy in aquaculture, several challenges limit its widespread adoption. One of the primary issues is the lack of standardization in bee-derived products. The chemical composition of these substances can vary significantly depending on factors such as botanical origin, geographic location, and environmental conditions, leading to inconsistencies in their effectiveness. Another major limitation is the lack of precise dosage guidelines. The optimal concentration of apitherapy products varies across species, developmental stages, and environmental conditions, making it difficult to establish universal application protocols. In some cases, excessive dosages may lead to toxicity or adverse physiological effects. Additionally, most existing studies are conducted under laboratory conditions, with limited large-scale field trials available. This restricts the ability to generalize findings and apply them in commercial aquaculture settings. Regulatory challenges also exist, as there are currently no standardized guidelines governing the use of apitherapy products in aquaculture.

Results and Conclusions

Apitherapy represents a promising, sustainable, and eco-friendly approach to improving aquatic animal health and aquaculture productivity. Its antimicrobial, antioxidant, and immunostimulatory properties make it a viable alternative to antibiotics. However, further research is necessary to address current limitations and facilitate its practical implementation. Future research on apitherapy in aquaculture should focus on addressing existing limitations and exploring new opportunities for application. Standardization of bee-derived products through chemical profiling and quality control is essential to ensure consistency and reliability. Large-scale field studies are needed to validate experimental findings and assess the practical feasibility of apitherapy in commercial operations. Moreover, further investigation into the molecular mechanisms underlying the effects of apitherapy will provide deeper insights into its therapeutic potential. The integration of apitherapy with other natural approaches, such as probiotics and phytotherapy, may lead to synergistic effects, enhancing overall aquaculture sustainability. In the long term, the development of innovative delivery systems, such as nano-encapsulation, could improve the stability and bioavailability of apitherapy compounds, further expanding their use in aquaculture.

References

- Abd-El-Rhman, A. M. (2009). Antagonism of *Aeromonas hydrophila* by propolis in Nile tilapia. *Fish & Shellfish Immunology*, 27(3), 454–459.
- Aldemir, O. S., Selamoglu, Z., Gulhan, M. F., Cakir, O., Ozdemir, I., Dastan, S. D., & Dogan, H. (2014). Role of propolis on oxidative stress in various tissues of fish. *Fresenius Environ Bull*, 23(12), 1-5.
- Babaei, S., et al. (2016). Effects of propolis on fish health. *Aquaculture Research*, 47(4), 1230–1240.
- Bankova, V., et al. (2016). Propolis: Recent advances. *Phytochemistry Reviews*, 15(3), 1–24.
- Cabello, F. C. (2006). Heavy use of antibiotics in aquaculture. *Environmental Microbiology*, 8(7), 1137–1144.
- Campos, M. G., et al. (2008). Pollen composition and health benefits. *Journal of Apicultural Research*, 47(2), 154–161.
- Dastan, S. D., Gulhan, M. F., Selamoglu, Z., & Dastan, T. (2017). The determination of different effective concentration of ethanolic extract of bee pollen on biochemical analysis in liver, spleen and heart tissues of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 16(1), 326–340.
- Defoirdt, T., et al. (2011). Alternatives to antibiotics. *Trends in Biotechnology*, 29(2), 55–62.
- FAO. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture*.
- Fang, Y. Z., et al. (2002). Antioxidant mechanisms. *Nutrition*, 18(10), 872–879.
- Molan, P. (1992). The antibacterial activity of honey. *Bee World*, 73(1), 5–28.

- Nya, E. J., & Austin, B. (2009). Probiotics and fish growth. *Fish & Shellfish Immunology*, 27(2), 172–178.
- Orun, I., Selamoglu, Z., Gulhan, M. F., & Erdogan, K. (2014). Role of propolis on biochemical and hematological parameters of *Oncorhynchus mykiss* exposed to cypermethrin. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 1(1), 21-35.
- Ramadan, M. F., & Al-Ghamdi, A. (2012). Royal jelly properties. *Journal of Functional Foods*, 4(1), 39–52.
- Selamoglu, Z., Duran, A., Gulhan, M. F., & Erdemli, M. E. (2015). Effects of propolis on biochemical and microbiological parameters in carp (*Cyprinus carpio*) fillets exposed to arsenic. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*.
- Selamoglu, Z., Akgul, H., & Dogan, H. (2016). Environmental effects on biologic activities of pollen samples obtained from different phytogeographical regions in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25, 2484-2489.
- Sforcin, J. M. (2016). Biological properties of propolis. *Journal of Apicultural Research*, 55(3), 1–20.
- Turan, F., & Yilmaz, S. (2019). Bee pollen in aquaculture. *Aquaculture Nutrition*, 25(5), 1234–1245.
- Zhang, X., et al. (2014). Propolis in shrimp health. *Aquaculture*, 432, 1–7.
- Xue, M., et al. (2019). Immune signaling pathways in fish. *Developmental & Comparative Immunology*, 93, 1–10.

The Environmental Importance of Bee Products and Bee Health Within the Scope of One Health

Zeliha Selamoglu^{1,2*}

¹*Department Of Medical Biology, Faculty Of Medicine, Nigde Ömer Halisdemir University, Nigde, Türkiye*

²*Department Of Biology, Faculty Of Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

**Email: zselamoglu@ohu.edu.tr*

Abstract

The Concept Of “One Health” Emphasizes The Interconnectedness Of Human, Animal, And Environmental Health. Within This Context, Bees And Bee-Derived Products Play A Critical Yet Often Underappreciated Role In Maintaining Ecological Balance, Ensuring Food Security, And Supporting Public Health. This Work Examines The Environmental Importance Of Bee Health And Bee Products Through The Lens Of The One Health Concept. It Explores The Ecological Functions Of Bees, The Impact Of Environmental Stressors On Bee Populations, And The Broader Implications For Ecosystem Sustainability And Human Well-Being. The Data Highlight That Protecting Bee Health Is Not Only Essential For Biodiversity But Also For The Stability Of Global Food Systems And Diseases Management. The Integration Of Apicultural Applications Into “One Health” Strategies Is Therefore Crucial For Sustainable Development.

Keywords: Apiculture, Biodiversity, Ecosystem Health, Environmental Sustainability, Honey Bees, One Health

Introduction

The One Health Scope Has Emerged As A Holistic Approach That Recognizes The Intrinsic Link Between Human Health, Animal Health, And The Environment. This Interdisciplinary Framework Is Increasingly Important In Addressing Global Challenges Such As Climate Change, Biodiversity Loss, Food Insecurity, And Emerging Infectious Diseases (Destoumieux-Garzón Et Al., 2018). The Holistic Perspective Known As “One Health” Can Be Described As The Interdisciplinary Interconnectedness Of Human And Animal Health Together With The Environmental Well-Being. Within This Context, Bees Represent A Keystone Species Whose Ecological And Economic Importance Extends Far Beyond Honey Production.

Bees Are Essential Pollinators, Contributing To The Reproduction Of Approximately 75% Of Global Food Crops And Nearly 90% Of Wild Flowering Plants (Klein Et Al., 2007). Their Role In Maintaining Biodiversity And Ecosystem Services Places Them At The Center Of The One Health Paradigm. However, Global Bee Populations Are Facing Significant Declines Due To Multiple Stressors, Including Habitat Loss, Pesticide Exposure, Climate Change, Pathogens, And Nutritional Deficiencies

(Goulson Et Al., 2015). Worldwide Decline In Colonies And Global Decline In Honey Bee Populations Are The Results Of Intricate Relationship Of Components Of Modern World That Stand Opposite Of The Principles Of One Health, Which Eagerly Demonstrates The Adoption Of Holistic Tendency And Policies In Sustainability Of Apiculture In Today's World.

Environmental Conditions Are Posing Yet Other Challenges Within The Context Of "One Health" As Recent Years Have Seen Significant Increases In Land Transformation For Industrial Agriculture, Where Previously Wild-Life Regions Altered For Agricultural Crops That Lead To Deforestation And Reduction In Overall Humidity In Climatic Conditions. These Declines Have Profound Implications Not Only For Ecosystems But Also For Human Health And Food Security.

Ecological Role Of Bees In Environmental Health

Bees Play A Fundamental Role In Maintaining Ecosystem Stability Through Pollination, Which Is A Critical Ecological Process For Plant Reproduction. Pollination By Bees Ensures Genetic Diversity In Plant Populations, Supports The Regeneration Of Ecosystems, And Contributes To The Resilience Of Natural Habitats.

The Ecological Services Provided By Bees Extend To Both Agricultural And Natural Systems. In Agricultural Landscapes, Bee Pollination Enhances Crop Yield, Quality, And Nutritional Value. Crops Such As Fruits, Vegetables, Nuts, And Oilseeds Depend Heavily On Bee Pollination, Making Bees Indispensable For Global Food Production (Potts Et Al., 2010).

In Natural Ecosystems, Bees Facilitate The Reproduction Of Wild Plant Species, Which In Turn Support Other Organisms Within The Food Web. This Interconnectedness Highlights The Importance Of Bees In Sustaining Biodiversity. The Decline Of Bee Populations Can Lead To Cascading Effects, Disrupting Ecological Balance And Reducing Ecosystem Resilience (Selamoglu Et Al., 2025). Moreover, Bees Contribute To Soil Health And Carbon Cycling Indirectly By Supporting Vegetation Growth. Healthy Plant Communities Enhance Soil Stability, Prevent Erosion, And Promote Carbon Sequestration, Thereby Mitigating Climate Change.

Bee Health As An Indicator Of Environmental Quality

Bee Health Is Increasingly Recognized As A Sensitive Indicator Of Environmental Conditions. Due To Their Foraging Behavior And Wide Geographical Range, Bees Are Exposed To Various Environmental Stressors, Making Them Effective Bioindicators Of Ecosystem Health. Exposure To Pesticides, Particularly Neonicotinoids, Has Been Linked To Impaired Navigation, Reduced Foraging Efficiency, And Increased Mortality In Bees (Ayan Et Al., 2017; Woodcock Et Al., 2017). It Can State That Honey Bees Could Not Detect Ecotoxicological Risks And Therefore, Exposed To Gradual Exposure Leading To Sublethal Accumulation And Colony Declines. Additionally, Environmental Pollutants Such As Heavy Metals And Air Contaminants Accumulate In Bee Products, Reflecting Environmental Contamination Levels.

Pathogens And Parasites, Including *Varroa Destructor* Mites And Viral Infections, Further Compromise Bee Health. These Biological Stressors Often Interact With

Environmental Factors, Leading To Synergistic Effects That Exacerbate Colony Losses (Nazzi & Le Conte, 2016; Ayan Et Al., 2017).

Climate Change Also Plays A Significant Role By Altering Flowering Patterns, Disrupting Plant-Pollinator Interactions, And Increasing The Frequency Of Extreme Weather Events. These Changes Affect The Availability Of Food Resources For Bees And Reduce Their Ability To Adapt To Environmental Fluctuations.

Environmental And Health Significance Of Bee Products

Bee Products Such As Honey, Propolis, Royal Jelly, And Bee Pollen Are Not Only Valuable For Their Nutritional And Medicinal Properties But Also Serve As Indicators Of Environmental Health. Honey, For Instance, Can Reflect Environmental Contamination Due To Its Composition, Which Includes Nectar Collected From Various Plants (Selamoglu Et Al., 2017). The Presence Of Pesticides, Heavy Metals, And Other Contaminants In Honey Can Provide Insights Into Environmental Pollution Levels (Bogdanov, 2006).

Propolis, Known For Its Antimicrobial And Antioxidant Properties, Also Contains Plant-Derived Compounds That Vary Depending On Local Flora. This Makes It A Useful Indicator Of Biodiversity And Environmental Conditions. From A One Health Perspective, Bee Products Contribute To Human Health By Providing Natural Alternatives To Synthetic Drugs. Their Antimicrobial, Anti-Inflammatory, And Antioxidant Properties Support Disease Prevention And Overall Well-Being. Additionally, Bee Products Play A Role In Animal Health, Particularly In Veterinary Applications, Where They Are Used To Enhance Immunity And Treat Infections. This Demonstrates The Interconnected Benefits Of Bee Products Across Human And Animal Health Domains (Akyol Et Al., 2015).

Interconnections Between Bee Health, Human Health, And Ecosystems

The Decline In Bee Populations Has Far-Reaching Consequences For Human Health And Ecosystem Stability. Reduced Pollination Leads To Decreased Crop Yields And Lower Availability Of Nutrient-Rich Foods Such As Fruits, Vegetables, And Nuts. This Can Contribute To Nutritional Deficiencies And Increased Risk Of Chronic Diseases In Human Populations (Smith Et Al., 2015). Furthermore, The Loss Of Biodiversity Associated With Declining Bee Populations Can Disrupt Ecosystem Services, Including Water Regulation, Soil Fertility, And Disease Control. These Disruptions Can Indirectly Affect Human Health By Increasing Vulnerability To Environmental Hazards. Apart From Chemicals, Changes In Land-Use And Habitat Degradation Reported To Have Far Reaching Consequences In Apiculture, Which Include Agricultural Intensification Leading To Biodiversity Losses.

Apiculture Has Its Reaches In Animal Health, Agricultural Management, Food Science, Human Health, Environmental And Biodiversity Preservation (Ravichandran And Selamoglu, 2023). Thus The Global Increase In Colony Declines And Global Reduction In Honey Bee Populations Are Primarily “One Health” Problems, Which Requires System-Wide Holistic Concept To Provide Effective Measures.

The One Health Framework Emphasizes The Need To Address These Interconnected Challenges Through Integrated Approaches. Protecting Bee Health Requires Coordinated Efforts Across Disciplines, Including Agriculture, Environmental Science, Public Health, And Policy-Making (Selamoglu, 2018). In Addition To, Apiculture Is Well-Established In Example Within The One Health Strategy By The Mutualistic Relationship Between Deep Interconnectivity Of Agricultural Production And Sustainability Of Beekeeping Through Ecological Balance, Which Ultimately Contributes To Human Health.

Environmental Threats To Bee Health

Multiple Interacting Factors Contribute To The Decline Of Bee Populations. Habitat Loss Due To Urbanization And Agricultural Intensification Reduces The Availability Of Foraging Resources. Monoculture Farming Practices Further Limit Floral Diversity, Leading To Nutritional Stress In Honey Bees. The Most Serious Threat Is Actually Lying-In Environmental Degradation Since Honey Bees Are Directly Affected By Environmental And Climate Changes, Which Make Honey Bees Particularly Vulnerable To Worsening Environmental Conditions. Similarly, Pesticides, The Increased And Unregulated Use Of Antibiotics In Beekeeping Is Reported To Have Contributions To Overall Increase In Antibiotic Resistance In Colonies, And Residues Of Veterinary Drugs Are Implied For Health Concerns.

The Widespread Use Of Pesticides Poses A Significant Threat, As Sublethal Exposure Can Impair Cognitive And Behavioral Functions In Bees. Additionally, Climate Change Alters Ecological Dynamics, Affecting The Synchronization Between Bees And Flowering Plants.

Pathogens And Parasites Continue To Be Major Contributors To Colony Losses, Particularly When Combined With Environmental Stressors. These Complex Interactions Make It Difficult To Identify Single Causes, Highlighting The Need For Comprehensive Research And Management Strategies (Selamoğlu And Naeem, 2024).

Future Approches Within The One Health Framework

Future Efforts To Protect Bee Health Should Be Aligned With The One Health Perspective, Emphasizing Sustainability And Interdisciplinary Collaboration. Strategies Should Include The Reduction Of Pesticide Use, Promotion Of Biodiversity-Friendly Agricultural Practices, And Conservation Of Natural Habitats. Research Should Focus On Understanding The Molecular And Ecological Mechanisms Underlying Bee Health And Resilience.

The Development Of Innovative Technologies, Such As Environmental Monitoring Using Bee Products, Can Enhance Our Ability To Assess Ecosystem Health. Public Awareness And Policy Interventions Are Also Critical In Promoting Sustainable Practices And Protecting Pollinator Populations. Integrating Apiculture Into Environmental And Public Health Policies Can Provide Significant Benefits Across Multiple Sectors.

Conclusions

Bees And Bee-Derived Products Play A Vital Role In Maintaining Environmental Health, Supporting Biodiversity, And Ensuring Food Security Within The One Health Framework. The Decline Of Bee Populations Represents A Significant Threat To Ecological Balance And Human Well-Being. Therefore, Protecting Bee Health Is Not Only An Environmental Priority But Also A Critical Component Of Global Health Strategies. Sustainable Management Practices And Interdisciplinary Collaboration Are Essential To Ensure The Long-Term Survival Of Bee Populations And The Ecosystems They Support.

References

- Akyol, E., Selamoglu, Z., Dogan, H., Akgul, H., & Unalan, A. (2015). Determining The Total Antioxidant Status And Oxidative Stress Indexes Of Honey Samples Obtained From Different Phytogeographical Regions In Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(4), 1204-1208.
- Ayan, A., Aldemir, O. S., & Selamoğlu, Z. (2017). Analysis Of COI Gene Region Of Varroa Destructor In Honey Bees (*Apis Mellifera*) In Province Of Siirt. *Turkish Journal Of Veterinary Research*, 1(1), 20-23.
- Bogdanov, S. (2006). Contaminants In Bee Products. *Apidologie*, 37(1), 1-18.
- Destoumieux-Garzón, D., Et Al. (2018). The One Health Concept. *Infection Ecology & Epidemiology*, 8(1), 1-13.
- Goulson, D., Et Al. (2015). Bee Declines Driven By Multiple Stressors. *Science*, 347(6229).
- Klein, A. M., Et Al. (2007). Importance Of Pollinators In Global Agriculture. *Proceedings Of The Royal Society B*, 274(1608), 303-313.
- Nazzi, F., & Le Conte, Y. (2016). Varroa Destructor And Bee Health. *Current Opinion In Insect Science*, 16, 1-5.
- Potts, S. G., Et Al. (2010). Global Pollinator Declines. *Trends In Ecology & Evolution*, 25(6), 345-353.
- Ravichandran, S., & Selamoglu, Z. (2023). Anti-Inflammatory Influences Of Royal Jelly And Melittin And Their Effectiveness On Wound Healing. *Central Asian J. Med. Pharm. Sci. Innovation*, 3, 38-47.
- Smith, M. R., Et Al. (2015). Pollinator Declines And Human Nutrition. *The Lancet*, 386(10007), 1964-1972.
- Selamoglu, Z., Aldemir, O. S., & Ayan, A. (2017). Traditional Approaches In The Using Of Hayit Honey In The Support Therapy Of Some Gynecological Problems In Women. *Research & Reviews: Research Journal Of Biology*, 5(1).
- Selamoglu, Z. (2018). The Using Of Honeybee Products In Fishery And Apitherapy: A Mini Review. *Iranian Journal Of Aquatic Animal Health*, 4(1), 124-128.

Selamoğlu, Z., & Naeem, M. Y. (2024). From Flower To Food: Honey Bees And Their Role In Crop Production. *Arı Ve Arıcılık Teknolojileri Dergisi*, 3(2), 56-63.

Selamoglu, Z., Naeem, M. Y., Ubaev, F., & Salybekova, N. (2025). Beekeeping In Kazakhstan: Production, Practice And Prospects For Sustainable Development. *Eurasian Journal Of Medical And Biological Sciences*, 5(2).

Woodcock, B. A., Et Al. (2017). Impacts Of Neonicotinoids On Bees. *Science*, 356(6345), 1393–1395.

Basel Sözleşmesi Çerçevesinde Elektronik Atık Ticareti ve Lojistik Yönetimi

Trade and Logistics Management of Electronic Waste Under the Basel Convention

Mesut Selamoğlu

Öğretim Görevlisi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Osmaniye, Türkiye.

Özet

Elektronik atıklar (e-atıklar), teknolojik gelişmeler ve tüketim alışkanlıklarındaki değişimlere bağlı olarak günümüzde en hızlı artan atık türlerinden biri haline gelmiştir. Küresel ölçekte elektronik cihaz kullanımının yaygınlaşması, e-atık miktarının her geçen yıl artmasına neden olmakta ve bu durum çevresel ve sağlık açısından önemli riskler doğurmaktadır. E-atıkların içerdiği kurşun, cıva ve bromlu alev geciktiriciler gibi zararlı maddeler, özellikle geri dönüşüm süreçlerinin yetersiz olduğu bölgelerde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bununla birlikte, e-atıklar altın, bakır ve nikel gibi değerli metallerin yanı sıra stratejik öneme sahip nadir elementleri de barındırmakta ve bu yönüyle önemli bir ikincil hammadde kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Uluslararası ticaret ve lojistik açısından bakıldığında, e-atıkların sınır ötesi hareketleri giderek artmakta ve bu durum küresel tedarik zincirlerinin önemli bir parçası haline gelmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelere gelişmekte olan ülkelere yönelen e-atık akışları, çoğu zaman çevreye duyarlı yönetim ilkelerine uygun şekilde gerçekleşmemekte ve bu da çevresel eşitsizlikleri derinleştirmektedir. Bu süreçte lojistik faaliyetler, e-atıkların toplanması, taşınması, izlenmesi ve geri kazanımı gibi aşamalarda kritik bir rol üstlenmektedir. Tersine lojistik uygulamaları ise ürünlerin yeniden değerlendirilmesi ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. E-atıkların uluslararası düzeyde düzenlenmesinde Basel Sözleşmesi temel bir çerçeve sunmakta olup, sözleşme kapsamında geliştirilen politikalar ve uygulamalar, e-atıkların çevreye duyarlı yönetimini sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, elektronik atıkların küresel boyutunu, uluslararası ticaret ve lojistik süreçlerindeki yerini ve mevcut düzenleyici çerçeveyi bütüncül bir bakış açısıyla ele alarak literatüre katkı sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: Elektronik atık, Uluslararası ticaret, Lojistik, Tersine lojistik, Basel Sözleşmesi

Abstract

Electronic waste (e-waste) has become one of the fastest-growing types of waste today, driven by technological advancements and changes in consumption habits. The widespread use of electronic devices globally is causing the amount of e-waste to increase every year, creating significant environmental and health risks. Harmful substances in e-waste, such as lead, mercury, and brominated flame retardants, pose serious threats, especially in regions where recycling processes are inadequate.

However, e-waste also contains valuable metals such as gold, copper, and nickel, as well as strategically important rare earth elements, and is therefore considered an important source of secondary raw materials. From an international trade and logistics perspective, the cross-border movement of e-waste is increasing, becoming a significant part of global supply chains. E-waste flows, particularly from developed to developing countries, often do not comply with environmentally sound management principles, deepening environmental inequalities. In this process, logistics activities play a critical role in stages such as the collection, transportation, tracking, and recycling of e-waste. Reverse logistics applications offer significant opportunities for product recycling and increased resource efficiency. The Basel Convention provides a fundamental framework for the international regulation of e-waste, and the policies and practices developed under the convention aim to ensure environmentally sound management of e-waste. This study aims to contribute to the literature by addressing the global dimension of electronic waste, its place in international trade and logistics processes, and the existing regulatory framework from a holistic perspective.

Keywords: Electronic waste, International trade, Logistics, Reverse logistics, Basel Convention

Giriş

Elektronik atık (E-Atık), atılmış elektrikli veya elektronik cihazları tanımlamaktadır. Yaygın olarak atık elektrikli ve elektronik ekipman veya kullanım ömrünü tamamlamış elektronikler olarak da adlandırılmaktadır. Elektronik atık, hızlı teknolojik gelişmeler ve elektronik cihaz tüketiminin artmasıyla birlikte küresel olarak en hızlı büyüyen atık akışlarından biri olarak kabul edilmektedir (Kiddee vd., 2013). 2022 yılında dünya genelinde yaklaşık 62 milyon ton elektronik atık üretilmiştir ve bu durum onu en hızlı büyüyen atık akışlarından biri haline getirmektedir; ancak bunun yalnızca %22,3'ü resmi olarak toplanmakta ve geri dönüştürülmektedir. Küresel e-atık üretiminin 2030 yılına kadar 82 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Yenileme, yeniden kullanım, yeniden satış, malzeme geri kazanımı yoluyla geri dönüşüm veya bertaraf amacıyla ayrılmış kullanılmış elektronikler de e-atık olarak kabul edilmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde e-atıkların gayri resmi şekilde işlenmesi, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere ve çevresel kirliliğe yol açabilmektedir (Hajalilou vd., 2026). Dijital Devrim ve bitcoin gibi bilim ve teknoloji alanındaki yenilikler nedeniyle elektronik ürün tüketiminin artması, küresel bir e-atık sorununa ve riskine neden olmaktadır. E-atık miktarındaki hızlı üstel artış; sık sık yeni modellerin piyasaya sürülmesi, gereksiz elektrikli ve elektronik ekipman alımları, kısa inovasyon döngüleri, düşük geri dönüşüm oranları ve bilgisayarların ortalama kullanım ömrünün azalmasından kaynaklanmaktadır. CPU gibi elektronik hurda bileşenleri, kurşun, kadmiyum, berilyum veya bromlu alev geciktiriciler gibi potansiyel olarak zararlı maddeler içermektedir. E-atıkların geri dönüşümü ve bertarafı, çalışanların ve bulundukları toplulukların sağlığı açısından önemli riskler barındırmaktadır. Bu bağlamda, elektronik atıkların artan hacmi yalnızca çevresel bir sorun olmayıp, aynı zamanda uluslararası ticaretin ve lojistik süreçlerin önemli bir parçası haline gelmiş; özellikle sınır ötesi taşımalar, tersine lojistik faaliyetleri ve

küresel tedarik zinciri yönetimi açısından kritik bir alan olarak öne çıkmıştır (Lu vd., 2026).

Elektrikli ve elektronik atıklar (e-atıklar), cıva, kurşun ve bromlu alev geciktiriciler gibi toksik maddeler içermeleri nedeniyle Basel Sözleşmesi kapsamında tehlikeli atık olarak sınıflandırılmaktadır. E-atıklar ayrıca altın, bakır ve nikel gibi değerli metaller ile indiyum ve paladyum gibi stratejik öneme sahip nadir materyalleri de içerebilmektedir. Bu değerli ve ağır metaller geri kazanılabilmekte, geri dönüştürülebilmekte ve ikincil hammadde kaynağı olarak kullanılabilmektedir. E-atıkların gelişmekte olan ülkelere gönderildiği ve bu ülkelerde çoğu zaman çevreye duyarlı bir şekilde yönetilmediği belgelenmiştir; bu durum hem insan sağlığı hem de çevre açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Basel Sözleşmesi'nin etkinliğinin artırılmasına yönelik Endonezya-İsviçre öncülüğündeki girişimin takibine ilişkin BC-11/1 sayılı kararın kabulü ile Taraflar Konferansı, sözleşmenin etkili uygulanması ve yürütülmesini sağlamak amacıyla kesitsel (bütüncül) bir yaklaşımın benimsenmesini öngörmektedir. Söz konusu yaklaşım; diğer hususların yanı sıra, atıkların çevreye duyarlı yönetimine ilişkin rehberlik sağlanmasını ve sözleşmede kullanılan bazı terimlere ilişkin hukuki açıklığın temin edilmesini de kapsamaktadır (van Der Marel, 2022; Korcheva, 2023).

Elektronik Atıklar

Bir elektronik ürün kullanım ömrünü tamamladıktan sonra atıldığında, elektronik atık (e-atık) oluşmaktadır. Yeni elektronik ürün modellerinin piyasaya sürülmesiyle birlikte, eski ürünler kullanım dışı kalmakta ve çoğunlukla bertaraf edilmektedir. Tüketim odaklı toplum yapısı ve teknolojinin hızlı gelişimi sonucunda e-atık büyük miktarlarda üretilmektedir (Liu vd., 2023). Amerika Birleşik Devletleri'nde, Çevre Koruma Ajansı e-atıkları on kategori altında sınıflandırmaktadır:

- Soğutma ve dondurma cihazları dâhil büyük ev aletleri
- Küçük ev aletleri
- Monitörler dâhil bilgi teknolojisi ekipmanları
- Televizyonlar dâhil tüketici elektroniği
- Lambalar ve aydınlatma ekipmanları
- Oyuncaklar
- Aletler
- Tıbbi cihazlar
- İzleme ve kontrol cihazları
- Otomatik dağıtım makineleri

Bu kategoriler; yeniden kullanım, yeniden satış, geri kazanım, geri dönüşüm veya bertaraf amacıyla ayrılmış kullanılmış elektroniklerin yanı sıra yeniden kullanılabilir (çalışır veya onarılabilir) ürünleri ve bakır, çelik, plastik gibi ikincil hammaddeleri de kapsamaktadır. “Atık” terimi ise geri dönüştürülmeyen ve kullanıcı tarafından

bertaraf edilen kalıntı veya materyaller için kullanılmaktadır. Fazla elektronik yüklerinin çoğunlukla karışık (yeniden kullanılabilir, geri dönüştürülebilir ve dönüştürülemeyen) olması nedeniyle bu ayırım önem arz etmektedir (Tansel, 2022). Bazı kamu politikası savunucuları, “e-atık” ve “elektronik hurda” terimlerini tüm fazla elektronik ürünleri kapsayacak şekilde geniş anlamda kullanmaktadır. Katot ışıın tüpleri (CRT’ler), geri dönüştürülmesi en zor atık türlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Ahmad vd., 2025). Farklı bir sınıflandırmaya göre, Kalkınma için BİT Ölçümü Ortaklığı e-atıkları altı kategori altında tanımlamaktadır:

- Sıcaklık değişim ekipmanları (klimalar, dondurucular vb.)
- Ekranlar ve monitörler (televizyonlar, dizüstü bilgisayarlar)
- Lambalar (örneğin LED lambalar)
- Büyük ekipmanlar (çamaşır makineleri, elektrikli ocaklar)
- Küçük ekipmanlar (mikrodalga fırınlar, elektrikli tıraş makineleri)
- Küçük bilgi teknolojisi ve telekomünikasyon ekipmanları (cep telefonları, yazıcılar vb.)

Her kategori, kullanım ömrü, çevresel etkiler ve toplama yöntemleri açısından farklılık göstermektedir. Düzenli depolama alanlarındaki atıkların yalnızca %3’ünü e-atıklar oluşturmaya rağmen, toksik atıkların yaklaşık %70’i elektronik atıklardan kaynaklanmaktadır. CRT’ler, ekran işlevi için gerekli olan kurşun ve fosfor gibi maddeleri yüksek oranda içermektedir. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), atılmış CRT monitörleri “tehlikeli evsel atık” kategorisine dâhil etmektedir; ancak belirli koşullar altında geri dönüştürülmek veya ihraç edilmek üzere ayrılmış CRT’leri ticari ürün olarak değerlendirebilmektedir. Bu cihazlar, farklı malzeme yapıları nedeniyle geri dönüşüm süreçleri farklı olan DLP arka projeksiyon televizyonları ile sıklıkla karıştırılmaktadır (Srivastava vd., 2025).

Avrupa Birliği ve üye devletleri, Avrupa Atık Kataloğu (EWC) aracılığıyla bir sistem uygulamaktadır. Bu sistem, Avrupa Konseyi Direktifi’ne dayanmakta ve üye ülke mevzuatlarına uyarlanarak uygulanmaktadır. Ancak EWC, tehlikeli elektronik atıklar için geniş bir tanım sunmakta ve atık operatörlerinin daha ayrıntılı sınıflandırma yapabilmesi için ilgili düzenlemelere başvurmasını gerektirmektedir. Bazı ihracatçıların, geri dönüştürülmesi zor, eski veya onarılamaz ekipmanları, çalışır durumdaki ürünlerle karıştırarak sevk ettiği iddia edilmektedir. Koruyucu politika savunucuları ise yerel pazarları korumak amacıyla “atık elektronik” tanımını daha geniş şekilde yorumlayabilmektedir (Sileryte vd., 2022).

Uluslararası Ticaret ve Lojistikte Elektronik Atığın Yeri

Lojistik şirketleri, e-atık döngüsel ekonomisinin her aşamasında yer alarak elektronik ürünlere yeni bir yaşam kazandırılmasına katkı sağlamaktadır. Yeni malzeme döngülerinin geliştirilmesi yoluyla lojistik sağlayıcılar, farklı aktörlerin iş birliği içinde çalışmasına imkân tanımakta ve elektronik bileşenlerin mümkün olan en düşük düzeyde israf edilmesini sağlayacak altyapının oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır (Wang vd., 2022).

Lojistik şirketleri, ters değer zincirleri söz konusu olduğunda da kritik bir rol oynamaktadır. Ters değer zincirleri (ters tedarik zincirleri olarak da adlandırılmaktadır), Harvard Business Review tarafından “kullanılmış bir ürünün müşteriden geri alınması ve ya bertaraf edilmesi ya da yeniden kullanılması için gerekli faaliyetler dizisi” olarak tanımlanmaktadır. Lojistik, ürün iadelerinin yönetilmesi, fazla veya kullanılmayan malzemelerin elden çıkarılması ve atık veya yan ürünlerin bertaraf edilmesi süreçlerini üstlenerek ters değer zincirlerinde önemli bir işlev görmektedir (Sharmili vd., 2023).

Özellikle lojistik sağlayıcılar aşağıdaki faaliyetlerin yürütülmesinde uzmanlaşmış durumdadır:

Toplama ve taşıma: Elektronik atıkların bulunduğu yerden toplanması ve geri dönüşüm veya yenileme merkezleri gibi belirlenmiş tesislere taşınması sağlanmaktadır (Rajesh vd., 2022).

Takip ve raporlama: Elektronik atıkların taşınma ve işlenme süreçleri boyunca izlenmesi ve takibi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca uyumluluk, denetim ve raporlama süreçleri için gerekli belgeler (örneğin “İmha Sertifikası” veya “Onaylı Veri Silme Raporu”) sağlanmaktadır (Azman vd., 2024).

Uyumluluk: Lojistik sağlayıcılar, faaliyet gösterdikleri tüm bölgelerde yürürlükte bulunan yasal düzenlemelere, sözleşmesel yükümlülöklere, sektör standartlarına ve iç prosedürlere uymakla yükümlüdür. Bu sayede müşteriler, e-atık süreçlerinin aynı sıkı standartlara uygun şekilde yürütüldüğünden emin olabilmektedir (Vazquez., 2016).

Güvenlik ve izlenebilirlik: Veri hırsızlığı veya yetkisiz erişimin önlenmesi amacıyla, veri silme sürecinin başlangıcından nihai bertarafa kadar ürünlerin tanımlanması, etiketlenmesi ve izlenmesi gibi sıkı güvenlik önlemleri uygulanmaktadır (Roychowdhury vd., 2018).

Varlık geri kazanımı: Kullanılmış veya bertaraf edilmiş elektronik ürünlerden değer elde edilmesine yönelik süreçler sürekli olarak izlenmekte ve analiz edilmektedir. Lojistik sağlayıcılar, değer geri kazanımını maksimize edecek yöntemleri geliştirmeye odaklanmaktadır (Ylä-Mella vd., 2015).

Bertaraf sürecindeki paydaşlarla koordinasyon: Elektronik geri dönüşüm değer zincirinde yer alan farklı paydaşlar (taşıma ve depolama hizmet sağlayıcıları, geri dönüşüm tesisleri, yenileme merkezleri, ikinci el pazar platformları ve araçlar gibi) arasında koordinasyon sağlanarak sürecin kesintisiz ve verimli bir şekilde yürütülmesi temin edilmektedir (Lucier vd., 2019).

Özetle, tedarik zinciri yönetimi konusundaki uzmanlıkları sayesinde lojistik sağlayıcılar, şirketlerin e-atık bertaraf süreçlerini etkin bir şekilde yönetmelerine yardımcı olmakta ve farklı bölge ve ölkelerde değişkenlik gösteren karmaşık düzenleyici çerçevelere uyumu sağlamaktadır. Ölkelere özgü düzenleyici gerekliliklere dayalı çözümler geliştirerek, gümrük işlemleri, ithalat/ihracat düzenlemeleri ve atık yönetimi mevzuatına ilişkin süreçlerde firmalara rehberlik etmektedirler (Jain vd., 2023).

Yasal Çerçeve (Basel Sözleşmesi)

Basel Sözleşmesi, e-atık konularını 2002 yılından itibaren ele almaya başlamış olup, bu kapsamda Basel Sözleşmesi Taraflar Konferansı'nın altıncı toplantısında Mobil Telefon Ortaklık Girişimi (MPPI) kabul edilmiştir. Elektrikli ve elektronik atıkların çevreye duyarlı yönetimine (ESM) ilişkin Nairobi Deklarasyonu, 2006 yılında Taraflar Konferansı'nın sekizinci toplantısında kabul edilmiştir. Bu kapsamda Taraflar; e-atıkların çevreye duyarlı şekilde toplanması, evsel atıklardan ayrıştırılması, onarımı, geri dönüşümü ve nihai bertarafının geliştirilmesi ile yasa dışı e-atık taşınımının önlenmesi amacıyla politika ve stratejiler geliştirmek üzere iş birliği yapmayı kabul etmiştir (Krueger, 2013).

Taraflar Konferansı'nın dokuzuncu toplantısında (COP9) kabul edilen IX/6 sayılı karar ile Sekretarya'ya, gelişmekte olan ülkelerde ve geçiş ekonomisine sahip ülkelerde e-atıkların çevreye duyarlı yönetimini geliştirmeye yönelik teknik yardım çalışma planını uygulama yetkisi verilmiştir. Bu tarihten itibaren, e-atıkların çevreye duyarlı yönetiminin güçlendirilmesine yönelik teknik destek, Taraflar arasındaki teknik iş birliğinin öncelikli alanlarından biri olmaya devam etmektedir (Khan, 2016).

Ayrıca COP9'da, Bilgisayar Ekipmanları için Eylem Ortaklığı (PACE) adıyla yeni bir ortaklık kurulmuştur. Bu ortaklık, COP13'e kadar faaliyet göstermiş ve bu toplantıda çalışmalarını tamamlamıştır. Ardından, 2019 yılında COP14'te, PACE'in devamı niteliğinde yeni bir ortaklık olan "PACE Sonrası Ortaklık" oluşturulmuştur. Bu ortaklığa, e-atık konusunda farkındalık artırma faaliyetlerini sürdürme ve mobil telefonlar ile bilgisayar ekipmanlarının çevreye duyarlı yönetimi konusunda iş birliğini devam ettirme görevi verilmiştir. 2022 yılında gerçekleştirilen COP15 toplantısında, PACE Sonrası Ortaklığın yetki alanı mobil telefonlar ve bilgisayar ekipmanlarına ek olarak televizyon ekranları, video ve ses ekipmanları ile soğutma ve ısıtma cihazlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu kapsamda ortaklığın adı "E-Atıklarla İlgili Zorluklara Yönelik Eylem Ortaklığı" olarak değiştirilmiş ve PACE II olarak adlandırılmıştır (Ogunseitan, 2013).

Aynı toplantıda, Basel Sözleşmesi'nin II, VIII ve IX numaralı eklerinde değişiklikler kabul edilmiştir. Bu değişikliklerle birlikte hem tehlikeli hem de tehlikesiz e-atıklar sözleşme eklerinde listelenmiştir. Tehlikesiz e-atıklar Ek II'de Y49 kodu ile, tehlikeli e-atıklar ise Ek VIII'de yeni bir kod olan A1181 ile tanımlanmıştır. Ayrıca B1110 ve B4030 kodları ile A1180 kodu kaldırılmış ve A1180 kodunun yerine A1181 kodu getirilmiştir. Söz konusu değişikliklerin 1 Ocak 2025 tarihinde yürürlüğe girmesi öngörülmektedir. Bu tarihten itibaren hem tehlikeli hem de tehlikesiz e-atıkların sınır ötesi taşınimleri, Basel Sözleşmesi kapsamında Önceden Bilgilendirilmiş Onay (PIC) prosedürüne tabi olacaktır (Haddad & Nezar, 2025).

Tartışma ve Sonuç

Elektronik atıklar, günümüzün hızla dijitalleşen dünyasında hem çevresel hem de ekonomik açıdan giderek daha önemli bir konu haline gelmiştir. Artan elektronik ürün tüketimi ve kısa ürün yaşam döngüleri, e-atık miktarının sürekli olarak artmasına neden olmakta ve bu durum özellikle atık yönetim sistemlerinin yetersiz olduğu bölgelerde ciddi sorunlar yaratmaktadır. E-atıkların içerdiği tehlikeli maddeler, insan

sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkiler doğururken, aynı zamanda içerdiği değerli metaller nedeniyle önemli bir kaynak potansiyeli de sunmaktadır.

Uluslararası ticaret ve lojistik perspektifinden değerlendirildiğinde, e-atıkların sınır ötesi hareketleri küresel tedarik zincirlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ancak bu hareketlerin büyük bir kısmının gelişmekte olan ülkelere yönelmesi ve çoğu zaman çevreye duyarlı yönetim ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmemesi, küresel ölçekte çevresel ve sosyal eşitsizlikleri artırmaktadır. Bu noktada lojistik süreçlerin etkin yönetimi, tersine lojistik uygulamalarının geliştirilmesi ve izlenebilirlik mekanizmalarının güçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Basel Sözleşmesi, e-atıkların uluslararası taşınımını düzenleyen temel hukuki çerçeveyi sunmakta ve çevreye duyarlı yönetim ilkelerinin uygulanmasını teşvik etmektedir. Bununla birlikte, mevcut düzenlemelerin etkinliğinin artırılması, uluslararası iş birliğinin güçlendirilmesi ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde teknik ve kurumsal kapasitenin geliştirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, elektronik atıkların sürdürülebilir yönetimi; çevresel koruma, ekonomik değer yaratımı ve etkin lojistik süreçlerin entegrasyonu ile mümkün olabilecektir.

Kaynaklar

Ahmad, F., Qureshi, M. I., Rawat, S., Alkharisi, M. K., & Alturki, M. (2025). E-waste in concrete construction: recycling, applications, and impact on mechanical, durability, and thermal properties – a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(6), 246.

Azman, N. A. N. N., Salleh, S. M., Hanafi, W. N. W., Ya'acob, N. S., Alrazi, B., & Yusoff, H. (2024). An exploratory study on e-waste reporting: a review of annual reports from Malaysian public listed companies. *European Journal of Sustainable Development*, 13(3), 504-504.

Haddad, E., & Nezar, B. (2025). Transboundary Movement of Electronic Waste Under the Basel Convention: Between.

Hajalilou, A., Parvini, E., & Majidi, C. (2026). Sustainable Liquid Metal Composites for Soft Electronics and E-Waste Reduction. *Advanced Materials*, 38(5), e12968.

Jain, M., Kumar, D., Chaudhary, J., Kumar, S., Sharma, S., & Verma, A. S. (2023). Review on E-waste management and its impact on the environment and society. *Waste Management Bulletin*, 1(3), 34-44.

Khan, S. A. (2016). E-products, E-waste and the Basel Convention: regulatory challenges and impossibilities of international environmental law. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 25(2), 248-260.

Kiddee, P., Naidu, R., & Wong, M. H. (2013). Electronic waste management approaches: An overview. *Waste management*, 33(5), 1237-1250.

Korcheva, A. (2023). Basel convention on the control of hazardous wastes. In *Encyclopedia of sustainable management* (pp. 235-239). Cham: Springer International Publishing.

- Krueger, J. (2013). The Basel Convention and the international trade in hazardous wastes. In *Yearbook of International Cooperation on Environment and Development 2001-02* (pp. 43-51). Routledge.
- Liu, K., Tan, Q., Yu, J., & Wang, M. (2023). A global perspective on e-waste recycling. *Circular Economy*, 2(1), 100028.
- Lu, J., Song, Z., Troise, C., & Bresciani, S. (2026). Is circular economy a success factor for electronic waste management projects? Investigating consumer behavior in the context of crowdfunding. *Business Strategy and the Environment*, 35(1), 415-423.
- Lucier, C. A., & Gareau, B. J. (2019). Electronic waste recycling and disposal: an overview. *Assessment and management of radioactive and electronic wastes*, 1-12.
- Ogunseitan, O. A. (2013). The Basel Convention and e-waste: translation of scientific uncertainty to protective policy. *The lancet global health*, 1(6), e313-e314.
- Rajesh, R., Kanakadhurga, D., & Prabakaran, N. (2022). Electronic waste: A critical assessment on the unimaginable growing pollutant, legislations and environmental impacts. *Environmental Challenges*, 7, 100507.
- Roychowdhury, P., Alghazo, J. M., Debnath, B., Chatterjee, S., & Ouda, O. K. M. (2018). Security threat analysis and prevention techniques in electronic waste. In *Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016* (pp. 853-866). Singapore: Springer Singapore.
- Sharmili, N., Nagi, R., & Wang, P. (2023). A review of research in the Li-ion battery production and reverse supply chains. *Journal of energy storage*, 68, 107622.
- Sileryte, R., Wandl, A., & van Timmeren, A. (2022). The responsibility of waste production: Comparison of European waste statistics regulation and Dutch National Waste Registry. *Waste Management*, 151, 171-180.
- Srivastava, S., Firmansyah, F., Thyberg, K. L., Tonjes, D. J., & Hewitt, E. (2025). EPA model estimates and waste characterization studies: US paper disposal dynamics. *Waste Management*, 206, 115074.
- Tansel, B. (2022). PFAS use in electronic products and exposure risks during handling and processing of e-waste: A review. *Journal of Environmental Management*, 316, 115291.
- van Der Marel, E. R. (2022). Trading plastic waste in a global economy: soundly regulated by the Basel Convention?. *Journal of Environmental Law*, 34(3), 477-497.
- Vazquez, Y. V., & Barbosa, S. E. (2016). Recycling of mixed plastic waste from electrical and electronic equipment. Added value by compatibilization. *Waste Management*, 53, 196-203.
- Wang, E., Miao, C., & Chen, X. (2022). Circular economy and the changing geography of international trade in plastic waste. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 15020.
- Ylä-Mella, J., Keiski, R. L., & Pongrácz, E. (2015). Electronic waste recovery in Finland: Consumers' perceptions towards recycling and re-use of mobile phones. *Waste management*, 45, 374-384.

Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Atık Lojistiği: Kavramsal Bir Değerlendirme

Waste Logistics from A Circular Economy Perspective: A Conceptual Evaluation

Mesut Selamoğlu

Öğretim Görevlisi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Osmaniye, Türkiye.

Özet

Bu çalışmada, döngüsel ekonomi perspektifinden atık lojistiği kavramsal olarak ele alınmakta ve atık yönetimi ile lojistik süreçler arasındaki ilişki bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmektedir. Geleneksel doğrusal ekonomik modelin sınırlı kaynak tüketimine dayalı yapısı, artan atık miktarı ve çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Bu durum, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve atık oluşumunun en aza indirilmesini hedefleyen döngüsel ekonomi yaklaşımını ön plana çıkarmaktadır. Döngüsel ekonomi; ürün ve malzemelerin mümkün olduğunca uzun süre sistem içerisinde tutulmasını, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve yeniden üretim süreçleriyle ekonomik değer yaratılmasını amaçlamaktadır. Bu çerçevede atık yönetimi, atığın oluşumundan bertarafına kadar uzanan çok aşamalı bir süreç olarak ele alınmakta ve insan sağlığı ile çevresel etkilerin azaltılmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Atıkların etkin şekilde yönetilmesi, yalnızca teknik süreçlerle değil, aynı zamanda bu süreçleri destekleyen lojistik faaliyetlerin etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Atık lojistiği; atıkların toplanması, taşınması, işlenmesi ve uygun tesislere ulaştırılması gibi faaliyetleri kapsayan yapılandırılmış bir sistem olarak öne çıkmaktadır. Çalışmada ayrıca tersine lojistik kavramı üzerinde durularak, ürünlerin yaşam döngüsü sonunda yeniden ekonomik sisteme kazandırılmasına yönelik süreçler incelenmiştir. Döngüsel ekonomi ile lojistik arasındaki ilişki, özellikle kapalı döngü tedarik zincirleri bağlamında ele alınmakta ve lojistik faaliyetlerin bu sistemdeki kritik rolü vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, döngüsel ekonominin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için atık yönetimi ve lojistik süreçlerin entegre bir yapı içerisinde ele alınmasının gerekliliği ortaya konulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Döngüsel ekonomi, atık lojistiği, tersine lojistik

Abstract

This study conceptually addresses waste logistics from a circular economy perspective and evaluates the relationship between waste management and logistics processes from a holistic point of view. The traditional linear economic model's structure, based on limited resource consumption, leads to increasing waste amounts and environmental problems. This situation highlights the circular economy approach, which aims for more efficient use of resources and minimizing waste generation. The circular economy aims to keep products and materials within the system for as long as possible, creating economic value through reuse, recycling, and re-production processes. In this context, waste management is considered a multi-stage process

extending from waste generation to disposal and plays an important role in reducing human health and environmental impacts. The effective management of waste is directly related not only to technical processes but also to the efficiency of logistics activities supporting these processes. Waste logistics stands out as a structured system encompassing activities such as the collection, transportation, processing, and delivery of waste to appropriate facilities. The study also focuses on the concept of reverse logistics, examining the processes aimed at reintroducing products into the economic system at the end of their life cycle. The relationship between the circular economy and logistics is examined, particularly in the context of closed-loop supply chains, and the critical role of logistics activities in this system is emphasized. Consequently, it is revealed that waste management and logistics processes need to be addressed within an integrated structure for the effective implementation of the circular economy.

Keywords: Circular economy, waste logistics, reverse logistics

Giriş

Döngüsel ekonomi, ürünlerin hiçbir zaman atık haline dönüşmediği ve doğanın kendini yenileyebildiği bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Bu modelde ürünler ve malzemeler; bakım, yeniden kullanım, yenileme, yeniden üretim, geri dönüşüm ve kompostlama gibi süreçler aracılığıyla dolaşımda tutulur. Döngüsel ekonomi, ekonomik faaliyetleri sınırlı kaynakların tüketiminden bağımsız hale getirerek; iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, atık oluşumu ve kirlilik gibi küresel sorunlarla mücadele etmeyi amaçlamaktadır (Kopnina & Poldner, 2021).

Bu yaklaşım üç temel ilkeye dayanmaktadır: atık ve kirliliğin ortadan kaldırılması, ürünlerin dolaşımda tutulması ve doğanın korunması. Uygulamada bu, atık miktarının en aza indirilmesi anlamına gelir. Bir ürün kullanım ömrünü tamamladığında, içerdiği malzemeler geri dönüşüm yoluyla mümkün olduğunca ekonomik sistem içinde tutulmaya devam eder. Bu sayede söz konusu malzemeler defalarca verimli biçimde kullanılabilir ve ek değer oluşturur. Böyle bir yaklaşım, “al-yap-tüket-at” anlayışına dayanan geleneksel doğrusal ekonomi modelinden farklılaşmaktadır. Söz konusu model ise büyük ölçüde ucuz ve kolay erişilebilir malzeme ile enerjiye dayanır. Bu çerçevede, döngüsel ekonomi anlayışının hayata geçirilebilmesi için atıkların etkili biçimde yönetilmesi kritik bir öneme sahiptir (Mulder vd., 2021).

Atık yönetimi ya da bertarafı, atığın oluşum aşamasından nihai yok edilmesine kadar geçen süreci kapsayan tüm faaliyetleri içerir. Bu kapsamda; atığın toplanması, taşınması, işlenmesi ve bertaraf edilmesinin yanı sıra sürecin izlenmesi, düzenlenmesi ve atıkla ilgili yasal düzenlemeler, teknolojiler ile ekonomik araçlar da yer alır. Atık; katı, sıvı ya da gaz formunda olabilir ve her bir tür için farklı yönetim ve bertaraf yöntemleri uygulanır. Atık yönetimi; endüstriyel, kimyasal, kentsel, organik, biyomedikal ve radyoaktif atıklar da dahil olmak üzere geniş bir alanı kapsar (Demirbas, 2011). Atıklar çoğunlukla hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesi gibi insan faaliyetleri sonucunda ortaya çıkar. Atık yönetiminin önemli bir bölümü ise sanayi, ticaret ve hane halkı faaliyetlerinden kaynaklanan kentsel katı atıklarla ilgilidir. Bazı durumlarda atıklar insan sağlığı açısından risk oluşturabilir. Bu sağlık

sorunları, atık yönetim sürecinin tamamıyla bağlantılı olup doğrudan ya da dolaylı şekilde ortaya çıkabilir. Doğrudan etkiler katı atıkların elleçlenmesi sırasında görülürken, dolaylı etkiler su, toprak ve gıda yoluyla ortaya çıkmaktadır. Atık yönetiminin temel amacı; atıkların insan sağlığı, çevre, doğal kaynaklar ve estetik üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmektir. Bu noktada, atık yönetimi süreçlerinin başarısı büyük ölçüde bu süreçleri destekleyen lojistik faaliyetlerin etkinliğine bağlıdır (Seadon, 2010).

Atık lojistiği, atık ve geri dönüştürülebilir malzemelerin oluşum noktasından geri kazanım veya bertarafına kadar yapılandırılmış hareketidir. Taşımacılık, uyumluluk, ticari karar alma ve çevresel sorumluluğun kesiştiği noktada yer almaktadır. Atık lojistiği kötü yönetildiğinde, işletmeler daha yüksek maliyetler, düzenleyici riskler ve kaçırılan geri dönüşüm fırsatlarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Doğru yönetildiğinde ise atık, bir yükümlülük olmaktan ziyade kontrollü ve izlenebilir bir malzeme akışı haline gelmektedir. Bu çerçevede, atık lojistiği uygulamalarının kapsamı yalnızca taşıma faaliyetleriyle sınırlı değildir (Gonul Kochan vd., 2016).

Pratikte, atık lojistiği toplama işleminden çok daha fazlasını içerir. Konsolidasyon, transfer, nakliye, dokümantasyon, yetkili teslimatlar ve onaylı tesislere teslimatı kapsamaktadır. Her hareket, doğru taraflarca, doğru güzergahlar kullanılarak ve doğru kayıtlarla desteklenerek gerçekleştirilmelidir (Liljestrand, 2017).

Döngüsel Ekonomi

Döngüsel ekonomi, atığı ortadan kaldırmayı ve yeniden kullanım ile kaynak verimliliği yoluyla sürdürülebilirliği teşvik etmeyi amaçlayan bir ekonomik modeldir. Paylaşım, onarım, yenileme, yeniden üretim ve geri dönüşüm yoluyla bu model, kullanılan kaynak miktarını en aza indiren kapalı döngü bir sistem oluşturur. Aynı zamanda atık oluşumunu, kirliliği ve iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri olan karbon emisyonlarını azaltmaktadır (Corvellec vd., 2021).

Geleneksel doğrusal ekonomide ise hammaddeler doğal çevreden çıkarılır, ürünlere dönüştürülür, kullanılır ve ardından atık olarak atılır. Bu model, sınırlı kaynakların sürekli çıkarılmasına dayanmaktadır ve bu durum çevresel bozulmaya ve kaynakların tükenmesine yol açmaktadır. Döngüsel ekonomi, bu “al-yap-at” modelini, atığı en aza indiren ve ürünler ile kaynakları mümkün olduğunca uzun süre kullanımda tutan daha sürdürülebilir bir ekonomik sistemle değiştirmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım; yenilenebilir enerjiye geçiş, doğal kaynakların yenilenmesi, çevrenin korunması ve insan sağlığı ile refahının desteklenmesi çabalarına dayanmaktadır (Geng vd., 2019).

Döngüsel ekonomi, sürdürülebilirliğin temel itici güçlerinden biridir. Birleşmiş Milletler, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına ulaşmada döngüsellüğün rolünü vurgulamaktadır. Dünya genelinde birçok hükümet, politika yapıcı ve kuruluş; iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı, kaynak çıkarımından kaynaklanan bozulmalar ve diğer çevresel sorunlar gibi küresel zorluklarla başa çıkmak için bu modelin potansiyelini araştırmaktadır (Mies & Gold, 2021).

Örneğin, araştırmalar doğal kaynakların çıkarılması ve işlenmesinin, dünya genelindeki toplam sera gazı emisyonlarının yarısına ve biyolojik çeşitlilik kaybı ile su

stresinin %90'ından fazlasına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Kaynakları daha uzun süre kullanımda tutarak döngüsel ekonomi, yeni kaynak çıkarımına olan ihtiyacı azaltmaktadır; bu da doğal kaynakların korunmasına ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Bu doğrultuda, döngüsel ekonominin önde gelen savunucularından Ellen MacArthur Vakfı'nın bir çalışması, bu alternatif ekonomik modelin benimsenmesinin Avrupa'nın karbondioksit emisyonlarını yarıya indirebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu model ekonomik fırsatlar yaratabilmekte ve işletmeler ile toplum için değer üretebilmektedir. Araştırmalar, döngüsel ekonominin 4,5 trilyon ABD doları tutarında yeni ekonomik çıktı oluşturabileceğini göstermektedir (Stahel & MacArthur, 2019).

Atık Yönetimi

Atık yönetimi, atık malzemelerin oluştuğu noktadan nihai bertarafına kadar düzenli bir şekilde ele alınması sürecidir. Atığın toplanması, taşınması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi gibi geniş bir faaliyet yelpazesini kapsamaktadır. Ayrıca, bu süreçlerin çevre dostu ve verimli bir şekilde yürütülmesini sağlamak amacıyla izlenmesi ve düzenlenmesini de içermektedir (Reno, 2015).

Temel olarak atık yönetimi, atığın insan sağlığı, çevre ve estetik üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç; atık oluşumunun azaltılması, malzemelerin geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması ile geri dönüştürülemeyen atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi gibi çeşitli stratejilerle gerçekleştirilmektedir (Czekala vd., 2023).

Atık yönetiminin temel bileşenleri şunlardır:

Toplama: Konut, ticari ve endüstriyel kaynaklardan atıkların toplanmasını içermektedir. Etkili toplama sistemleri, atığın doğru şekilde yönetilmesini sağlamak ve halk sağlığı açısından risk oluşturmamasını temin etmek açısından büyük önem taşımaktadır (Chow et al., 2017).

Taşıma: Toplanan atıkların işleme veya bertaraf tesislerine taşınmasını kapsamaktadır. Bu süreçte, taşıma sırasında sızıntı veya kirlenmeyi önlemek için iyi organize edilmiş bir lojistik sistem gerekmektedir (Chisholm vd., 2021).

İşleme: Bu aşamada atıklar ayrıştırılmakta ve kullanılabilir malzemelerin geri kazanılması veya bertarafa hazırlanması amacıyla işlem görmektedir. İşleme süreci; geri dönüşüm, kompostlama ve atıktan enerji üretimi gibi yöntemleri içerebilmektedir (Zaman & Lehmann, 2011).

Geri Dönüşüm ve Yeniden Kullanım: Geri dönüşüm, atık malzemelerin yeni ürünlere dönüştürülerek ham madde tüketiminin azaltılmasını sağlamaktadır. Yeniden kullanım ise ürünlerin atılmadan önce birden fazla kez kullanılmasını ifade etmektedir (Zorpas, 2020).

Bertaraf: Atık yönetiminin son aşaması, geri dönüştürülemeyen veya yeniden kullanılamayan atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesidir. Bu genellikle düzenli depolama veya yakma yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir; ancak modern

yaklaşımlar, depolama alanı kullanımını azaltmayı ve atıktan enerji üretim teknolojilerinin verimliliğini artırmayı hedeflemektedir (Choe & Fraser, 1999).

Etkili atık yönetimi uygulamalarının benimsenmesiyle işletmeler, çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltabilmekte, maliyet tasarrufu sağlayabilmekte ve geri dönüşüm programları aracılığıyla gelir elde edebilmektedir. Ayrıca güçlü bir atık yönetimi stratejisi; çevresel düzenlemelere uyumu sağlamakta, kurumsal sosyal sorumluluğu güçlendirmekte ve sürdürülebilirliğe yönelik küresel çabaları desteklemektedir (Kumar vd., 2017).

Atık Lojistiği ve Tersine Lojistik

Tersine lojistik, şirketlerin geri dönüşüm, yeniden kullanım ve kullanılan malzeme miktarını azaltma yoluyla çevresel açıdan daha verimli hale gelmesini sağlayan bir süreçtir. Tersine lojistiğe daha bütüncül bir bakış, ileri akış sisteminde malzeme kullanımının azaltılmasını, böylece daha az malzemenin geri dönmesini, malzemelerin yeniden kullanılabilmesini ve geri dönüşümün kolaylaştırılmasını kapsamaktadır. Atığı azaltmaya yönelik önlemler, ürün tasarım aşamasında başlamaktadır ve taşımacılık ile nihai bertaraf dahil olmak üzere ürünün tüm yaşam döngüsünü kapsamaktadır. Bu yaklaşım, aşağı akışta oluşan atığın en aza indirilmesini sağlamakta ve ürünlerin yeniden üretim, yeniden kullanım, geri dönüşüm veya ikincil pazarda yeniden satış için tedarik zincirinde geriye doğru hareket etmesine olanak tanımaktadır (Ichinose vd., 2013).

Tersine lojistik, atık yönetiminden farklıdır; çünkü geri kazanılacak ürüne değer katmaya odaklanmaktadır. Buna karşılık, atık yönetimi daha çok yeniden kullanımı olmayan atıkların toplanması ve işlenmesini içermektedir (Yang, 2022).

Tersine tedarik zinciri, ürünlerin ve bunlara ait bileşenler ile malzemelerin yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve nihai bertarafını içeren faaliyetler ağını ifade etmektedir. Kamuoyu ise genellikle ürünlerin kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan çevresel etkilerle ilgilenmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi, tersine lojistikte önemli bir araçtır ve geliştirme sürecinin başlangıcından itibaren alternatif malzeme ve bileşen seçeneklerinin değerlendirilmesini içermektedir. Bu değerlendirme, hammaddelerin elde edilmesinden kullanım aşamasına ve geri kazanıma kadar ürünün tüm yaşam döngüsünü kapsamaktadır (Gobbi, 2011).

Döngüsel Ekonomi ve Lojistik İlişkisi

Döngüsel ekonomide lojistik, günümüzde atık yönetimi ve geri dönüşüm sektörlerinde uygulanan lojistikten farklı bir yaklaşım izlemek zorundadır; görevlerini yerine getirebilmek için süreçler ve kullanılan teknolojiler açısından gelişim göstermesi gerekmektedir. Döngüsel ekonomide lojistik, yalnızca klasik geri alma ve bertaraf faaliyetleriyle sınırlı kalmamakta, bundan daha fazlasını yerine getirmektedir. Bilgi ve iletişim teknolojileri, değer zinciri boyunca tüm aktörlerin entegrasyonunu mümkün kılmakta ve yeni iş modellerinin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır (Seroka-Stolka & Ociepa-Kubicka, 2019).

Bugüne kadar lojistik değer yaratma ağları, malzemelerin doğrusal akışıyla karakterize edilmiştir ve bu akış, önemli miktarda malzeme ve kaynak kaybına yol açan bertaraf süreçleriyle sonuçlanmaktadır. Bu uygulama, tüm ekonomik sistem boyunca yüksek düzeyde malzeme ve değer kaybı yaratmaktadır (Van Buren vd., 2016). Bu sistem içerisinde lojistik ikiye ayrılmaktadır:

“Klasik” lojistik fonksiyonları; tedarik, üretim lojistiği ve yeni parça ile ürünlerin dağıtımını desteklemektedir. Buna karşılık, atık bertaraf lojistiği ürünlerin yaşam sonu aşamasındaki süreçlere odaklanmaktadır. Tüketici ve endüstriyel ürünlerin üretimi ile atık yönetimi süreçleri arasındaki kullanım aşaması ise, ürün yaşam döngüsü boyunca mülkiyet değişimlerine ve bilgi akışlarında kesintilere neden olan bir ara aşama niteliğindedir. Yaşam sonu ürünler; içerdikleri bilgi, bileşenler ve hammaddelerle birlikte, etkili bir döngüsel ekonomi içinde mümkün olabileceği kadar verimli şekilde geri dönüştürülememektedir (Beames vd., 2021).

Buna ek olarak, tedarik zincirleri çoğunlukla dayanıklı olmayan ürünlerin üretimi ve dağıtımına odaklanmakta ve ürünlerin onarımı yoluyla döngülerin kapatılmasını nadiren hedeflemektedir. Ancak döngüsel ekonomiye geçişteki en önemli zorluklardan biri; bir yandan geri dönüştürücülerin yüksek kaliteli ikincil ürünler, bileşenler ve hammaddeler sağlayan tedarikçiler olarak sisteme entegre edilmesi, diğer yandan bu malzemeleri satın alan ve onarım hizmetleri sunan üreticilerle bütünleşmenin sağlanmasıdır. Bu bağlamda lojistik, başarının en önemli unsurlarından biri, hatta belki de en kritik faktörüdür (Dzwigol vd., 2021).

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, döngüsel ekonomi yaklaşımının etkinliğinde atık yönetimi ve lojistik süreçlerin belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Geleneksel doğrusal sistemlerin aksine, döngüsel ekonomide atıkların yeniden sisteme kazandırılması ancak iyi planlanmış ve koordineli lojistik faaliyetler ile mümkün olmaktadır. Bu doğrultuda, atık lojistiğinin yalnızca taşıma faaliyetleriyle sınırlı görülmemesi, aksine bütüncül bir sistem yaklaşımıyla ele alınması gerekmektedir. Özellikle tersine lojistik uygulamalarının yaygınlaştırılması, ürünlerin yaşam döngüsünün uzatılması ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte, bilgi ve iletişim teknolojilerinin lojistik süreçlere entegrasyonu, atık akışlarının izlenebilirliğini artırarak sistemin etkinliğine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, kamu politikaları ve yasal düzenlemelerin döngüsel ekonomi uygulamalarını destekleyecek şekilde geliştirilmesi, bu dönüşüm sürecinin hızlanmasına yardımcı olacaktır. Gelecek çalışmalarda, bu kavramsal çerçevenin uygulama örnekleriyle desteklenmesi ve farklı sektörler özelinde değerlendirilmesi önerilmektedir.

Kaynaklar

Beames, A., Claassen, G. D. H., & Akkerman, R. (2021). Logistics in the circular economy: challenges and opportunities. *Strategic decision making for sustainable management of industrial networks*, 1-14.

- Chisholm, J. M., Zamani, R., Negm, A. M., Said, N., Abdel daiem, M. M., Dibaj, M., & Akrami, M. (2021). Sustainable waste management of medical waste in African developing countries: A narrative review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 0734242X2110291. <https://doi.org/10.1177/0734242x211029175>
- Choe, C., & Fraser, I. (1999). An Economic Analysis of Household Waste Management. *Journal of Environmental Economics and Management*, 38(2), 234–246. <https://doi.org/10.1006/jeem.1998.1079>
- Chow, C.-F., So, W.-M. W., Cheung, T.-Y., & Yeung, S.-K. D. (2017). Plastic Waste Problem and Education for Plastic Waste Management. In *Emerging Practices in Scholarship of Learning and Teaching in a Digital Era* (pp. 125–140). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3344-5_8
- Corvellec, H., Stowell, A. F., & Johansson, N. (2021). Critiques of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>
- Czekała, W., Drozdowski, J., & Łabiak, P. (2023). Modern Technologies for Waste Management: A Review. *Applied Sciences*, 13(15), 8847. <https://doi.org/10.3390/app13158847>
- Demirbas, A. (2011). Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1280–1287. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.025>
- Dzwigol, H., Trushkina, N., & Kwilinski, A. (2021). Green logistics as a sustainable development concept of logistics systems in a circular economy.
- Geng, Y., Sarkis, J., & Bleischwitz, R. (2019). How to globalize the circular economy. *Nature*, 565(7738), 153–155. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00017-z>
- Gobbi, C. (2011). Designing the reverse supply chain: the impact of the product residual value. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(8), 768–796.
- Gonul Kochan, C., Pourreza, S., Tran, H., & Prybutok, V. R. (2016). Determinants and logistics of e-waste recycling. *The International Journal of Logistics Management*, 27(1), 52–70. <https://doi.org/10.1108/ijlm-02-2014-0021>
- Ichinose, D., Yamamoto, M., & Yoshida, Y. (2013). Productive efficiency of public and private solid waste logistics and its implications for waste management policy. *IATSS Research*, 36(2), 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2013.01.002>
- Kopnina, H., & Poldner, K. (2021). Introduction. In *Circular Economy* (pp. 1–16). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367816650-1>
- Kumar, S., Smith, S. R., Fowler, G., Velis, C., Kumar, S. J., Arya, S., Rena, Kumar, R., & Cheeseman, C. (2017). Challenges and opportunities associated with waste management in India. *Royal Society Open Science*, 4(3), 160764. <https://doi.org/10.1098/rsos.160764>

- Liljestrand, K. (2017). Logistics solutions for reducing food waste. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(4), 318–339. <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-03-2016-0085>
- Mies, A., & Gold, S. (2021). Mapping the social dimension of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128960>
- Mulder, B., Poldner, K., & Vellema, S. (2021). Organizing the emergence of circular technologies. In *Circular Economy* (pp. 199–219). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367816650-13>
- Reno, J. (2015). Waste and Waste Management. *Annual Review of Anthropology*, 44(1), 557–572. <https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-102214-014146>
- Seadon, J. K. (2010). Sustainable waste management systems. *Journal of Cleaner Production*, 18(16-17), 1639–1651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.009>
- Seroka-Stolka, O., & Ociepa-Kubicka, A. (2019). Green logistics and circular economy. *Transportation Research Procedia*, 39, 471–479.
- Stahel, W. R., & MacArthur, E. (2019). *The Circular Economy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429259203>
- Van Buren, N., Demmers, M., Van der Heijden, R., & Witlox, F. (2016). Towards a circular economy: The role of Dutch logistics industries and governments. *Sustainability*, 8(7), 647.
- Yang, J. (2022). Reverse Logistics. In *From Zero Waste to Material Closed Loop* (pp. 175–183). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7683-3_10
- Zaman, A. U., & Lehmann, S. (2011). Urban growth and waste management optimization towards 'zero waste city'. *City, Culture and Society*, 2(4), 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2011.11.007>
- Zorpas, A. A. (2020). Strategy development in the framework of waste management. *Science of The Total Environment*, 716, 137088. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137088>

Endüstriyel ve Evsel Atıkların Geri Dönüşümü ve Bertarafında Döngüsel Ekonomi Yaklaşımı: Sürdürülebilir Atık Yönetimi İçin Bütüncül Bir Model

A Circular Economy Approach to the Recycling and Disposal of Industrial and Household Waste: A Holistic Model for Sustainable Waste Management

Fatma Burcu Karakoç

Öğretim Görevlisi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Osmaniye, Türkiye.

Özet

Artan nüfus, hızlı kentleşme, sanayileşme ve değişen tüketim alışkanlıkları, hem endüstriyel hem de evsel atık miktarlarında önemli ve sürekli bir artışa neden olmaktadır. Bu artış, yalnızca atık hacminin yükselmesiyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda doğal kaynakların hızlı tükenmesi, çevresel kirlenmenin yaygınlaşması, sera gazı emisyonlarının artması ve insan sağlığı üzerinde ciddi risklerin ortaya çıkması gibi çok boyutlu çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde atık yönetim sistemlerinin yetersizliği, bu sorunların daha belirgin hale gelmesine yol açmaktadır.

Bu çalışmada, endüstriyel ve evsel atıkların geri dönüşümü ve bertarafı süreçleri döngüsel ekonomi yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır. Döngüsel ekonomi modeli, kaynakların mümkün olduğunca uzun süre kullanımda kalmasını, atık oluşumunun en aza indirilmesini ve mevcut kaynakların yeniden üretim döngüsüne kazandırılmasını hedeflemektedir. Bu bağlamda çalışmanın ilk bölümünde, atık türleri, oluşum kaynakları ve bu atıkların çevre üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

İkinci bölümde ise geri dönüşüm, yeniden kullanım, geri kazanım ve enerji üretimi gibi modern atık yönetimi yöntemleri ele alınmıştır. Bu süreçlerde kullanılan teknolojiler, uygulama alanları ve elde edilen çevresel kazanımlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Özellikle mekanik ve kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin yanı sıra, atıktan enerji elde etme (waste-to-energy) sistemlerinin sürdürülebilir atık yönetimindeki rolü vurgulanmıştır.

Son bölümde ise sürdürülebilir atık yönetiminin sağlanabilmesi için politika geliştirme, ileri teknoloji kullanımı ve paydaşlar arası iş birliği temelli stratejik öneriler sunulmuştur. Yerel yönetimler, sanayi kuruluşları ve toplumun aktif katılımının önemine dikkat çekilmiştir. Elde edilen bulgular, döngüsel ekonomi yaklaşımının atık miktarını azaltmada, doğal kaynak kullanımını optimize etmede ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemede etkili ve uygulanabilir bir model sunduğunu göstermektedir. Özellikle sanayi atıklarının ikincil hammadde olarak üretim süreçlerine yeniden kazandırılması ve evsel atıklarda kaynaktan ayrıştırma sistemlerinin yaygınlaştırılması, atık yönetiminde hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atık, bertaraf, döngüsel ekonomi, geri dönüşüm, sürdürülebilirlik

Abstract

A growing population, rapid urbanisation, industrialisation and changing consumption patterns are leading to a significant and sustained increase in both industrial and domestic waste volumes. This increase is not limited to a rise in waste volume alone; it also brings with it multi-faceted environmental problems such as the rapid depletion of natural resources, the spread of environmental pollution, rising greenhouse gas emissions and the emergence of serious risks to human health. In particular, the inadequacy of waste management systems in developing countries is causing these problems to become more pronounced.

In this study, the processes of recycling and disposal of industrial and domestic waste are examined within the framework of the circular economy approach. The circular economy model aims to keep resources in use for as long as possible, minimise waste generation, and reintegrate existing resources into the production cycle. In this context, the first section of the study evaluates waste types, their sources of generation, and their environmental impacts.

The second section examines modern waste management methods such as recycling, reuse, recovery and energy production. The technologies used in these processes; their application areas and the resulting environmental benefits have been analysed comparatively. In particular, the role of waste-to-energy systems, alongside mechanical and chemical recycling methods, in sustainable waste management has been emphasised.

In the final section, strategic recommendations based on policy development, the use of advanced technology and collaboration among stakeholders were presented to ensure sustainable waste management. Attention has been drawn to the importance of the active participation of local authorities, industrial organisations and the public. The findings demonstrate that the circular economy approach offers an effective and feasible model for reducing waste volumes, optimising the use of natural resources and supporting environmental sustainability. In particular, the reintroduction of industrial waste into production processes as secondary raw materials and the widespread adoption of source separation systems for household waste provide significant economic and environmental benefits in waste management.

Keywords: Waste, disposal, circular economy, recycling, sustainability

Giriş

Küresel ölçekte artan üretim ve tüketim faaliyetleri, atık yönetimini çevresel sürdürülebilirliğin temel konularından biri hâline getirmiştir. Özellikle sanayi tesislerinden kaynaklanan kimyasal, metalik ve tehlikeli atıklar ile hanelerden çıkan organik, plastik, cam ve ambalaj atıkları çevresel baskıyı artırmaktadır.

Geleneksel doğrusal ekonomi modeli olan “al-kullan-at” yaklaşımı, atık oluşumunu hızlandırmakta ve doğal kaynaklar üzerinde ciddi baskı oluşturmaktadır. Buna karşılık döngüsel ekonomi yaklaşımı; azaltma, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım ilkeleriyle atıkların ekonomik sisteme yeniden kazandırılmasını

hedeflemektedir. Bu yaklaşım, özellikle endüstriyel simbiyoz, enerji geri kazanımı ve kaynak verimliliği açısından sürdürülebilir çözümler sunmaktadır (Zaman, 2026).

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel ve evsel atıkların geri dönüşüm ve bertaraf süreçlerini akademik literatür çerçevesinde değerlendirerek sürdürülebilir bir model önermektir.

Endüstriyel ve Evsel Atık Kaynakları ile Çevresel Etkileri

Endüstriyel ve evsel atıkların çevresel etkileri, yalnızca atık miktarıyla sınırlı olmayıp; atığın bileşimi, bertaraf yöntemi ve geri kazanım potansiyeli ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle sanayi kaynaklı katı atıklar; metal işleme, kimya, tekstil, gıda işleme, enerji üretimi ve inşaat sektörlerinde yoğun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar çoğu zaman ağır metal, toksik kimyasal bileşenler, organik kirleticiler ve proses çamurları içermektedir. Uygun yönetim stratejileri geliştirilmediğinde toprak, yeraltı suyu ve atmosfer üzerinde ciddi çevresel baskılar oluşturmaktadır (Chen ve ark., 2025).

Tablo 1. Başlıca Atık Türleri ve Etkileri

Atık Türü	Kaynak	Çevresel Etki
Organik atık	Haneler, gıda işletmeleri	Metan emisyonu, koku
Plastik atık	Ambalaj, tüketim ürünleri	Mikroplastik kirliliği
Ağır metal atıkları	Sanayi üretimi	Toprak ve su toksisitesi
Elektronik atık	Evsel kullanım	Tehlikeli kimyasal salımı

Özellikle tehlikeli endüstriyel atıkların kontrolsüz biçimde çevreye bırakılması; kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg) ve arsenik (As) gibi toksik elementlerin ekosistemlere taşınmasına neden olmaktadır. Bu durum, hem insan sağlığı hem de biyolojik çeşitlilik açısından önemli riskler doğurmaktadır. Literatürde endüstriyel tehlikeli atık miktarının küresel ölçekte yıllık yaklaşık 400 milyon ton düzeyine ulaştığı belirtilmektedir.

Evsel atıklar ise organik atıklar, ambalaj atıkları, plastikler, cam, metal, kağıt-karton ve elektronik atıklardan oluşmaktadır. Özellikle plastik atıkların düzensiz depolama alanlarında birikmesi mikroplastik kirliliğini artırmakta; sucul ve karasal ekosistemlerde kalıcı çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bunun yanında evsel organik atıkların anaerobik ayrışması sonucu ortaya çıkan metan (CH_4), küresel ısınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kalkanis ve ark., 2022).

Artan kentleşme ile belediye kaynaklı katı atık miktarındaki yükseliş, özellikle gelişmekte olan ülkelerde atık yönetim altyapılarının kapasitesini zorlamaktadır. Bu nedenle atıkların kaynağında ayrıştırılması, geri dönüştürülebilir bileşenlerin ekonomiye yeniden kazandırılması ve düzenli depolama alanlarının mühendislik esaslarına göre planlanması kritik öneme sahiptir.

Geri Dönüşüm ve Geri Kazanım Yöntemleri

Geri dönüşüm ve geri kazanım süreçleri, sürdürülebilir atık yönetiminin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu süreçler yalnızca atık miktarını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda doğal kaynak tüketimini ve enerji kullanımını da azaltmaktadır. Döngüsel ekonomi yaklaşımına göre atık, bertaraf edilmesi gereken bir unsurdan ziyade yeniden ekonomik değere dönüştürülebilecek ikincil bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Kalkanis ve ark., 2022).

Mekanik Geri Dönüşüm

Mekanik geri dönüşüm, özellikle kağıt, cam, metal ve plastik atıkların fiziksel işlemlerden geçirilerek yeniden üretim süreçlerine kazandırılmasını kapsamaktadır. Bu yöntem belediye kaynaklı evsel atıklarda en yaygın kullanılan geri dönüşüm modelidir. Özellikle plastik ambalaj atıklarının ayrıştırılması, kırılması, yıkanması ve granül hâline getirilmesi ile yeniden üretime dahil edilmesi yaygın bir uygulamadır.

Kimyasal Geri Dönüşüm

Kimyasal geri dönüşüm özellikle plastik, polimer ve bazı endüstriyel atıklarda önemli bir yöntemdir. Atıkların monomerlerine ayrılması veya yakıt hammadmesine dönüştürülmesi esasına dayanır. Son yıllarda endüstriyel katı atıkların enerji hammadmesine dönüştürülmesinde bu yöntemlerin etkinliği artmıştır (Liu ve ark., 2024; Chen ve ark., 2025).

Enerji Geri Kazanımı

Geri dönüştürülemeyen atıkların kontrollü yakma, biyogaz üretimi ve atıktan türetilmiş yakıt (RDF) sistemleri ile enerjiye dönüştürülmesi sürdürülebilir atık yönetiminde önemli bir yöntemdir. Özellikle organik evsel atıkların anaerobik fermantasyon yoluyla biyometan üretiminde kullanılması, hem atık miktarını azaltmakta hem de yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır.

Kompostlama

Evsel organik atıkların biyolojik ayrışma yoluyla gübreye dönüştürülmesidir. Bu yöntem hem atık hacmini azaltmakta hem de tarımsal üretimde kullanılabilecek organik materyal sağlamaktadır.

Endüstriyel Simbiyoz ve Yeniden Kullanım

Sanayi bölgelerinde bir işletmenin atığının başka bir işletme için ham madde olarak kullanılması, döngüsel ekonomi açısından oldukça etkili bir modeldir. Bu yaklaşım kaynak verimliliğini artırmakta ve bertaraf maliyetlerini düşürmektedir. Güncel çalışmalar endüstriyel ekoloji temelli kaynak paylaşım modellerinin geri dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Geetha, 2025).

Bertaraf Süreçleri ve Yönetim Yaklaşımları

Geri dönüşüm sürecine dahil edilemeyen atıkların bertarafı kontrollü yöntemlerle gerçekleştirilmelidir.

Başlıca bertaraf yöntemleri:

- düzenli depolama

- yakma
- inertleştirme
- tehlikeli atık stabilizasyonu
- biyolojik arıtma

Tehlikeli endüstriyel atıkların bertarafında özellikle sızıntı kontrolü, yeraltı suyu koruması ve emisyon denetimi kritik öneme sahiptir (Kumar ve ark., 2023).

Düzenli depolama alanlarının mühendislik esaslarına göre planlanması; sızıntı suyu toplama sistemleri, gaz geri kazanımı ve zemin izolasyonu gibi bileşenleri içermelidir.

Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Atık Yönetimi

Döngüsel ekonomi modeli, atığın “çöp” değil, yeniden değerlendirilebilir bir kaynak olduğunu savunmaktadır.

Bu yaklaşımın temel ilkeleri şunlardır:

1. atık oluşumunun önlenmesi
2. yeniden kullanım
3. geri dönüşüm
4. enerji geri kazanımı
5. endüstriyel simbiyoz

Özellikle endüstriyel tesislerde bir işletmenin atığının başka bir işletme için ham madde olarak kullanılması, kaynak verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Zaman, 2026).

Evsel atıklarda ise kaynakta ayrıştırma sistemleri, belediye geri dönüşüm altyapısı ve tüketici farkındalığı kritik rol oynamaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, endüstriyel ve evsel atıkların yönetiminde geri dönüşüm ve bertaraf süreçlerinin sürdürülebilir kalkınma açısından kritik önemde olduğunu ortaya koymaktadır. Küresel ölçekte katı atık miktarının 2050 yılına kadar önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir; bu durum geri dönüşüm ve sürdürülebilir bertaraf sistemlerinin stratejik önemini artırmaktadır.

Elde edilen değerlendirmeler doğrultusunda şu öneriler sunulmaktadır:

- kaynakta ayrıştırma sistemleri yaygınlaştırılmalıdır
- sanayi bölgelerinde endüstriyel simbiyoz modelleri geliştirilmelidir
- kimyasal geri dönüşüm teknolojilerine yatırım artırılmalıdır
- belediye atık yönetim altyapıları güçlendirilmelidir
- toplumda çevresel farkındalık artırılmalıdır

Döngüsel ekonomi ilkelerine dayalı bütüncül atık yönetimi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Қайнаққа

Chen, B., Liu, M., Wang, Q., Wang, L., Guo, Q., & Zhou, S. (2025). Analysis of industrial solid waste and the possibility of recycling and utilization. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 18(1), 2493155.

Geetha, R. (2025). Circular economy through integrated industrial ecology: Innovations in resource recovery and process re-design. *Biotechnology Notes*.

Kalkanis, K., Alexakis, D. E., Kyriakis, E., Kiskira, K., Lorenzo-Llanes, J., Themelis, N. J., & Psomopoulos, C. S. (2022). Transforming waste to wealth, achieving circular economy. *Circular economy and sustainability*, 2(4), 1541-1559.

Kumar, A., Thakur, A. K., Gaurav, G. K., Klemeš, J. J., Sandhwar, V. K., Pant, K. K., & Kumar, R. (2023). A critical review on sustainable hazardous waste management strategies: a step towards a circular economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(48), 105030-105055.

Liu, Q., Martinez-Villarreal, S., Wang, S., Tien, N. N. T., Kammoun, M., De Roover, Q., ... & Richel, A. (2024). The role of plastic chemical recycling processes in a circular economy context. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155227.

Zaman, A. (2026). Are Industrial Ecology, Circular Economy and Zero Waste Converging or Diverging Frameworks for Sustainable Resource and Waste Management?. *Circular Economy and Sustainability*, 6(2), 192.

İkincil Hammadde Ticareti Olarak Atık: Uluslararası Ticaretin Dönüşen Yapısı Üzerine Bir Derleme

Waste As a Form of Secondary Raw Material Trade: A Review on the Transforming Structure of International Trade

Mesut Selamoğlu

Öğretim Görevlisi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Osmaniye, Türkiye.

Özet

Bu çalışma, uluslararası ticaret ile çevre arasındaki ilişkiyi, küresel atık ticareti ve ikincil hammaddeler çerçevesinde ele almayı amaçlamaktadır. Küreselleşme süreciyle birlikte ticaret hacminde yaşanan artış, ekonomik büyüme, gelir artışı ve refah düzeyinde iyileşme gibi olumlu sonuçlar doğururken, çevresel etkiler bakımından da yeni tartışma alanlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, geleneksel doğrusal üretim ve tüketim modelinin yol açtığı kaynak israfı ve atık birikimi, sürdürülebilir alternatif yaklaşımlara olan ihtiyacı artırmıştır. Döngüsel ekonomi yaklaşımı, bu noktada, kaynakların daha verimli kullanılması ve atıkların yeniden üretim süreçlerine kazandırılması açısından önemli bir çözüm çerçevesi sunmaktadır. İkincil hammaddeler, söz konusu yaklaşımın temel bileşenlerinden biri olarak, doğal kaynaklara olan bağımlılığın azaltılmasına ve üretim süreçlerinde sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Öte yandan, ikincil hammaddelerin üretimi ve dolaşımı giderek uluslararası bir boyut kazanmakta ve bu durum atıkların sınır ötesi hareketliliğini artırmaktadır. Küresel atık ticareti, özellikle gelişmiş ülkelere gelişmekte olan ülkelere yönelen atık akışları ile dikkat çekmekte; bu süreç ekonomik faydalar ile çevresel ve sosyal maliyetler arasında önemli bir dengesizlik yaratmaktadır. Düşük iş gücü maliyetleri ve daha esnek çevresel düzenlemeler, gelişmekte olan ülkeleri atık ithalatı açısından cazip hale getirirken, bu durum çevresel risklerin ve sağlık sorunlarının bu ülkelere kaymasına yol açabilmektedir. Özellikle plastik ve elektronik atıkların uygunsuz bertarafı, uzun vadeli çevresel sorunları derinleştirmektedir. Son yıllarda yaşanan gelişmeler, küresel atık ticaretinin yapısında önemli değişimlere işaret etmektedir. Çin'in 2017 yılında plastik atık ithalatını durdurma kararı, atık akışlarının yönünü değiştirmiş ve yeni ticaret rotalarının oluşmasına neden olmuştur. Bu dönüşüm, bazı bölgelerde yasa dışı atık dökümünün artmasına ve atık yönetimi sorunlarının daha karmaşık hale gelmesine yol açmıştır. Bu çalışma, küresel atık ticaretinin uluslararası ticaret sistemi içerisindeki yerini değerlendirerek, ekonomik etkinlik ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin çok boyutlu yapısını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uluslararası Ticaret, Küresel Atık Ticareti, İkincil Hammaddeler, Döngüsel Ekonomi, Çevresel Sürdürülebilirlik

Abstract

This study aims to examine the relationship between international trade and the environment within the framework of global waste trade and secondary raw materials. While the increase in trade volume during the globalization process has led to positive outcomes such as economic growth, increased income, and improved living standards, it has also given rise to new areas of debate regarding environmental impacts. In this context, the resource waste and waste accumulation caused by the traditional linear production and consumption model have increased the need for sustainable alternative approaches. The circular economy approach offers an important solution framework in this regard, focusing on more efficient use of resources and the reintegration of waste into production processes. Secondary raw materials, as a fundamental component of this approach, contribute to reducing dependence on natural resources and ensuring sustainability in production processes. On the other hand, the production and circulation of secondary raw materials are increasingly gaining an international dimension, increasing the cross-border movement of waste. Global waste trade is particularly noteworthy for the flow of waste from developed to developing countries; this process creates a significant imbalance between economic benefits and environmental and social costs. Low labor costs and more flexible environmental regulations make developing countries attractive for waste imports, but this can lead to the shift of environmental risks and health problems to these countries. In particular, the improper disposal of plastic and electronic waste exacerbates long-term environmental problems. Recent developments indicate significant changes in the structure of global waste trade. China's decision in 2017 to halt imports of plastic waste redirected waste flows and created new trade routes. This shift led to an increase in illegal waste dumping in some regions and made waste management problems more complex. This study evaluates the place of global waste trade within the international trading system, revealing the multifaceted relationship between economic efficiency and environmental sustainability.

Keywords: International Trade, Global Waste Trade, Secondary Raw Materials, Circular Economy, Environmental Sustainability

Giriş

Ticaret ve çevre tartışması günümüzde tanıdık bir nitelik kazanmış bulunmaktadır. Bu tartışma, giderek serbestleşen uluslararası ticaret ile çevrenin korunması için gerekli koşulların uzlaştırılması gerekliliğine ve bu sürecin beraberinde getirdiği zorluklara işaret etmektedir. Tartışmanın kökeni, iki temel varsayım arasındaki görünürdeki çelişkiye dayanmaktadır. Bir görüşe göre, serbest uluslararası ticaret, çevresel koruma ve sosyal ilerlemenin sağlanabilmesi için bir ön koşul olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşıma göre, serbest ticaretin temel ekonomik ilkesi olan karşılaştırmalı üstünlükler doktrini sayesinde elde edilen kazanımlar, sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için gerekli kaynakların ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır.

Bu çerçevede, uluslararası ticaretin çevresel etkilerinin daha somut biçimde gözlemlendiği alanlardan biri, kaynak kullanımı ve özellikle ikincil hammaddelerin ekonomik sistem içindeki rolüdür (Hoernig, 2022).

İkincil hammaddeler, geri dönüşüm teknolojilerinin malzemelerin üretim sürecine etkin bir şekilde yeniden entegre edilmesini sağladığı döngüsel ekonominin temel unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu durum, çoğunlukla yenilenemeyen nitelikte olan birincil kaynaklara olan bağımlılığın azaltılması sonucunu doğurmaktadır. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü'ne göre, döngüsel ekonomi ile ilişkilendirilen beş iş modelinden ikisi doğrudan ikincil hammaddeler ile ilişkilendirilmektedir. Bu modeller, yenilenebilir malzemelerin ve sürdürülebilir şekilde temin edilen biyolojik kaynakların kullanımını teşvik ederek, kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin ikincil hammaddelere dönüştürülmesini öngörmektedir. Bununla birlikte, ikincil hammaddelerin üretimi ve dolaşımı yalnızca yerel ölçekte değil, aynı zamanda uluslararası ticaret ağları aracılığıyla küresel ölçekte gerçekleşmekte ve bu durum atıkların sınır ötesi hareketliliğini gündeme getirmektedir (Lingaitiene & Burinskiene, 2024).

Küresel atık ticareti, atıkların bertarafı ve geri dönüşümü amacıyla, çoğunlukla zengin ülkelerden gelişmekte olan ülkelere aktarılması uygulamasını ifade etmektedir. Bu sistem, özellikle 1980'li ve 1990'lı yıllarda ekonomik teşviklerin etkisiyle önemli ölçüde gelişmiştir; zira gelişmekte olan ülkeler, daha esnek düzenlemeler ve düşük iş gücü maliyetleri nedeniyle daha ucuz bertaraf seçenekleri sunmaktadır. Bu atıkların önemli bir kısmını plastikler ve elektronik atıklar oluşturmaktadır ve bu atıklar çoğunlukla düzenli depolama alanlarına gönderilmekte ya da uygun olmayan şekilde bertaraf edilmekte, bu durum ise ciddi çevresel ve sağlık risklerine yol açmaktadır (Gregson & Crang, 2015). Başlangıçta hem ihracatçı hem de ithalatçı ülkeler açısından ekonomik olarak faydalı bir uygulama olarak değerlendirilmiş olsa da, küresel atık ticareti özellikle tehlikeli atıkların yükünü çoğunlukla daha yoksul ülkelerin üstlenmesi nedeniyle çevresel adalet ve halk sağlığı açısından süregelen tartışmalara neden olmaktadır. Küresel atık ticareti, değişen dinamiklerle birlikte zaman içerisinde dönüşüm geçirmiştir. Özellikle Çin'in 2017 yılında plastik atık ithalatını durduracağını açıklaması, yeni bertaraf alternatiflerinin aranmasına yol açmıştır. Bu durum, farklı bölgelerde yasa dışı atık dökümünün artmasına neden olarak atık yönetiminin karmaşıklığını daha da gözler önüne sermektedir (Kellenberg, 2015).

Uluslararası Ticaret ve Çevre

Uluslararası ticaret, kalkınmanın desteklenmesi, gelir ve istihdam oluşturulması ile yoksulluğun azaltılması açısından temel bir itici güç olarak değerlendirilmektedir. Daha dışa açık ekonomilerin çoğunlukla daha hızlı büyüme gösterdiği; rekabet güçlerinin ve yenilik kapasitelerinin arttığı, bununla birlikte daha nitelikli istihdam imkânları sunduğu belirtilmektedir. Araştırmalar, ticaretin özellikle düşük gelir düzeyine sahip ülkelerde gelir artışı üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya

koymakta; ihracat yapan işletmelerin ise verimlilik, çalışma ortamı ve iş gücü hakları bakımından daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir (Khan vd., 2020).

Ticaret; üretkenliğin yükseltilmesi, gelir seviyelerinin artırılması ve istihdam olanaklarının genişletilmesi yoluyla yoksulluğun azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, daha geniş ürün ve hizmet çeşitliliğine erişim imkânı sunması da bu süreci destekleyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır. 1990–2017 yılları arasında, büyük ölçüde uluslararası ticaretin desteklediği ekonomik büyümenin etkisiyle, dünya genelinde aşırı yoksulluk içinde yaşayan nüfus oranında %75’lik bir azalma kaydedilmiştir (Sorroche-del-Rey vd., 2023).

Birleşmiş Milletler 2030 Gündemi çerçevesinde ticaret, kapsayıcı ve sürdürülebilir ekonomik büyümenin teşvik edilmesinde, yeni istihdam alanlarının oluşturulmasında, gelirlerin artırılmasında ve toplumsal refahın geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca uluslararası ticaret, gümrük vergileri ve diğer mali araçlar aracılığıyla ulusal kaynakların harekete geçirilmesine katkıda bulunmakta; bu durum eğitim ve sosyal koruma gibi alanlarda yeniden dağıtım politikalarının uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte ticaret, daha çevreci ve sürdürülebilir ekonomik modellere geçiş sürecinde de önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır (Bressan & Garcia, 2023).

İkincil Hammaddeler ve Döngüsel Ekonomi

İkincil hammaddeler ve döngüsel ekonomi kavramı, son yıllarda kaynak kullanımı ile üretim-tüketim ilişkilerine yönelik tartışmaların merkezinde yer almaktadır. Geleneksel doğrusal ekonomik modelde (“al-üret-tüket-at”), kaynaklar üretim sürecine dahil edildikten sonra büyük ölçüde atık haline dönüşmekte ve ekonomik döngü dışında kalmaktadır. Buna karşılık döngüsel ekonomi yaklaşımı, malzemelerin sistem içerisinde mümkün olan en uzun süre tutulmasını ve kullanım ömrünü tamamlayan ürünlerin yeniden üretim süreçlerine entegre edilmesini temel almaktadır. Bu bağlamda ikincil hammaddeler, geri kazanılmış ve yeniden işlenmiş malzemeler olarak, ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilirliğinin sağlanmasında kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Rotilio vd., 2022).

İkincil hammaddelerin kullanımının yaygınlaşması, bir yandan doğal kaynaklar üzerindeki baskının azaltılmasına katkı sağlarken, diğer yandan üretim süreçlerinde maliyet etkinliği yaratabilmektedir. Özellikle metal, plastik ve kâğıt gibi geri dönüştürülebilir malzemeler, uygun teknolojik süreçler aracılığıyla yeniden işlenerek ekonomik değeri olan üretim girdilerine dönüştürülebilmektedir. Bu durum, çevresel kazanımların ötesinde, yeni istihdam alanlarının ortaya çıkmasına ve atık yönetimi sektörünün gelişmesine de katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu sürecin etkinliği büyük ölçüde geri dönüşüm altyapısının gelişmişlik düzeyine ve uygulanan politika araçlarının bütüncüllüğüne bağlıdır (Hoernig, 2022).

Öte yandan, ikincil hammaddelerin üretimi ve dolaşımı giderek uluslararası bir nitelik kazanmaktadır. Ülkeler arasındaki maliyet farklılıkları, düzenleyici çerçevelerdeki çeşitlilik ve teknolojik kapasite düzeylerindeki eşitsizlikler, bu malzemelerin sınır ötesi hareketliliğini teşvik etmektedir. Bu gelişme, döngüsel ekonomi hedeflerinin küresel ölçekte nasıl hayata geçirileceği sorusunu da gündeme getirmektedir. Dolayısıyla ikincil hammaddeler, yalnızca çevresel bir mesele olarak değil, aynı zamanda uluslararası ticaretin dönüşen yapısı içerisinde ele alınması gereken çok boyutlu bir olgu olarak değerlendirilmektedir (Scarano, 2022).

Küresel Atık Ticareti

Son on yıllık süreç, artan küresel tüketim düzeyi ve etkin atık yönetimine duyulan gereksinimin etkisiyle küresel atık ticaretinde benzeri görülmemiş bir genişlemeye tanıklık etmektedir. Dünya nüfusunun sürekli artış göstermesi, buna paralel olarak tüketim miktarlarının ve ortaya çıkan atık hacminin yükselmesine neden olmaktadır. Ürünlerin menşesine bakılmaksızın daha fazlasını talep etmeye dayalı kesintisiz tüketim eğilimleri, üretimin artmasına ve dolayısıyla daha fazla atık oluşmasına yol açmaktadır. Bu süreklilik arz eden döngü, ürünlerin ve atıkların küresel ölçekte dolaşımını beraberinde getirmiş; küreselleşme süreci ise atık hareketliliğini, yerel ürün dolaşımı kadar önemli bir unsur haline dönüştürmektedir (Liu vd., 2022).

Atık materyallerin uluslararası ticareti, son on yılda hızla büyüyen bir alan olarak öne çıkmaktadır. Bu süreç, ülkelerin atıklarını kendi sınırları içerisinde işleyebilmelerine veya bu işlemleri gerçekleştirme kapasitesine sahip diğer ülkelere gönderebilmelerine imkân sağlamaktadır. Bu yönüyle atık ticareti, küresel ekonomi içinde önemli bir bileşen haline gelmektedir. Söz konusu büyüme; atık yönetimi çözümlerine yönelik artan ihtiyaç, atık akışlarının düzenlenmesi gerekliliği, çevrenin korunması ve atık yönetimi sorumluluklarının daha dengeli biçimde paylaşılmasının sağlanması gibi unsurlar tarafından desteklenmektedir (Martínez vd., 2022).

Tartışma ve Sonuç

Uluslararası ticaretin ekonomik büyüme, gelir artışı ve refah üzerindeki olumlu etkileri geniş ölçüde kabul görmektedir. Bununla birlikte, ticaretin çevresel boyutu, özellikle atık üretimi ve yönetimi söz konusu olduğunda, giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışma, ikincil hammaddelerin ve döngüsel ekonomi yaklaşımının, söz konusu gerilimi azaltma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Atıkların yeniden ekonomik değere dönüştürülmesi, hem kaynak verimliliğini artırmakta hem de çevresel baskıları hafifletmektedir.

Ancak küresel atık ticaretinin mevcut yapısı, ekonomik faydaların ve çevresel maliyetlerin eşit olmayan bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerin, düşük maliyet avantajları nedeniyle atık ithalatında yoğunlaşması,

çevresel adalet ve halk sağlığı açısından önemli sorunlar doğurmaktadır. Son yıllarda yaşanan politika değişiklikleri ve ticaret akışlarındaki dönüşüm, atık yönetiminin küresel ölçekte daha bütüncül ve dengeli bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede, uluslararası ticaret politikalarının çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu hale getirilmesi, döngüsel ekonomi uygulamalarının yaygınlaştırılması ve atık ticaretine ilişkin düzenleyici mekanizmaların güçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Aksi takdirde, ekonomik kazanımların çevresel maliyetleri gölgelemesi kaçınılmaz hale gelecektir.

Kaynaklar

Bressan, R. N., & Garcia, T. D. S. L. (2023). Mercosur and Environment: progress in promoting the Sustainable Development Goals and the 2030 Agenda. *Revista Brasileira de Política Internacional*, 66(2), e017.

Gregson, N., & Crang, M. (2015). From waste to resource: The trade in wastes and global recycling economies. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 151-176.

Hoernig, J. (2022). Towards 'secondary raw material' as a legal category. *Environmental Law Review*, 24(2), 111-127.

Kellenberg, D. (2015). The economics of the international trade of waste. *Annu. Rev. Resour. Econ.*, 7(1), 109-125.

Khan, S. A. R., Yu, Z., Belhadi, A., & Mardani, A. (2020). Investigating the effects of renewable energy on international trade and environmental quality. *Journal of Environmental management*, 272, 111089.

Lingaitiene, O., & Burinskiene, A. (2024). Development of trade in recyclable raw materials: Transition to a circular economy. *Economies*, 12(2), 48.

Liu, X., Lei, T., Boré, A., Lou, Z., Abdouraman, B., & Ma, W. (2022). Evolution of global plastic waste trade flows from 2000 to 2020 and its predicted trade sinks in 2030. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134373.

Martínez, J. H., Romero, S., Ramasco, J. J., & Estrada, E. (2022). The world-wide waste web. *Nature communications*, 13(1), 1615.

Rotilio, M., Cucchiella, F., & Annibaldi, V. (2022). Secondary Raw Materials for Circular Economy in Construction Sector: A Review. *Key Engineering Materials*, 919, 260-269.

Scarano, P., Sciarrillo, R., Tartaglia, M., Zuzolo, D., & Guarino, C. (2022). Circular economy and secondary raw materials from fruits as sustainable source for recovery and reuse. A review. *Trends in Food Science & Technology*, 122, 157-170.

Sorroche-del-Rey, Y., Piedra-Muñoz, L., & Galdeano-Gómez, E. (2023). Interrelationship between international trade and environmental performance: Theoretical approaches and indicators for sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, 32(6), 2789-2805.

**Глауконит және вермикомпост негізіндегі органо-минералды тыңайтқыш:
әзірлеу және қолдану мүмкіндіктері**

**Glauconite and Vermicompost-Based Organomineral Fertilizer: Development and
Application Potential**

**Маханбетов Арман¹, Юлдашбек Давлат¹, Гаипов Тулкинжон², Адылов
Айдарбек¹, Сатанов Якубжан¹, Ахметов Нурлан¹**

¹«Экология» ғылыми-зерттеу институты, Түркістан, Қазақстан

²Тұрақты даму ғылыми-зерттеу орталығы, Түркістан, Қазақстан

Аңдатпа

Мақалада глауконит пен вермикомпост негізінде органо-минералды тыңайтқыш алу және оның агрономиялық қасиеттерін зерттеу нәтижелері қарастырылған. Зерттеу жұмысының мақсаты – табиғи минерал мен органикалық компонентті біріктіру арқылы топырақ құнарлылығын арттыруға арналған экологиялық қауіпсіз композиция әзірлеу. Бастапқы шикізат ретінде калий, темір, магний және микроэлементтерге бай глауконит пен құрамында гумус, азот, фосфор және калий бар вермикомпост пайдаланылды. Компоненттердің химиялық құрамы ICP-AES әдісі арқылы анықталды. Органо-минералды композицияны алу барысында глауконит ұсақталып, вермикомпостпен әртүрлі қатынаста араластырылып, түйіршіктеу және кептіру процестерінен өткізілді. Зерттеу нәтижелері глаукониттің ылғал мен қоректік элементтердің сақталуын қамтамасыз ететінін, ал вермикомпосттың топырақтың биологиялық белсенділігі мен құрылымын жақсартатынын көрсетті. Екі компоненттің синергетикалық әсері нәтижесінде алынған композиция қоректік заттардың біртіндеп босап шығуын қамтамасыз етіп, топырақтың ылғал сақтау қабілетін арттыруға және өсімдіктердің стресс факторларға төзімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді. Ұсынылған органо-минералды тыңайтқыш Қазақстанның құрғақ климаттық жағдайларында ауыл шаруашылығында қолдануға перспективалы өнім болып табылады.

Кілт сөздер: глауконит, вермикомпост, органо-минералды тыңайтқыш, топырақ құнарлылығы, экологиялық қауіпсіз технология, ауыл шаруашылығы.

Abstract

The article presents the results of the development and study of an organo-mineral fertilizer based on glauconite and vermicompost. The aim of the research was to develop an environmentally safe composition for improving soil fertility by combining a natural mineral component with organic material. Glauconite rich in potassium, iron, magnesium, and trace elements, as well as vermicompost containing humus, nitrogen, phosphorus, and potassium, were used as raw materials. The chemical composition of the components was determined using the ICP-AES method. During the preparation of the organo-mineral composition, glauconite was

ground, mixed with vermicompost in different ratios, and subjected to granulation and drying processes. The results showed that glauconite promotes the retention of moisture and nutrients in the soil, while vermicompost improves soil structure and biological activity. The synergistic effect of the two components ensures the gradual release of nutrients, enhances the water-holding capacity of the soil, and increases plant resistance to stress factors. The proposed organo-mineral fertilizer is considered a promising product for agricultural application under the arid climatic conditions of Kazakhstan.

Keywords: glauconite, vermicompost, organo-mineral fertilizer, soil fertility, environmentally friendly technology, agriculture.

Кіріспе

Қазіргі таңда ауыл шаруашылығында топырақ құнарлылығын сақтау және өнімділікті арттыру мақсатында экологиялық қауіпсіз органикалық және минералдық тыңайтқыштарды пайдалану мәселесіне ерекше назар аударылуда. Әсіресе органикалық қалдықтарды қайта өңдеу арқылы алынатын вермикомпост тұрақты ауыл шаруашылығында кеңінен қолданылатын тиімді органикалық тыңайтқыштардың бірі болып саналады. Әдеби деректер бойынша вермикомпост топырақ құрылымын жақсартып, оның микробиологиялық және ферментативтік белсенділігін арттырады, ылғал ұстау қабілетін жоғарылатады және өсімдіктердің қоректік элементтермен қамтамасыз етілуін жақсартады. Сонымен қатар вермикомпост құрамында гумин және фульвоқышқылдар, азот, фосфор, калий, кальций, магний, темір, мырыш сияқты макро- және микроэлементтер кездеседі [1, 2].

Минералдық компоненттер ішінде соңғы жылдары табиғи алюмосиликаттарға, әсіресе глауконитке қызығушылық артып келеді. Глауконит құрамындағы калий, темір, магний және басқа микроэлементтер оны ауыл шаруашылығында перспективалы минерал ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Әдеби мәліметтер бойынша глауконит топырақтың катионалмасу сыйымдылығын арттырып, ылғал мен қоректік элементтердің топырақта сақталуына ықпал етеді, сондай-ақ олардың біртіндеп босап шығуын қамтамасыз етеді. Сонымен қатар глауконитті пайдалану өсімдіктердің құрғақшылыққа төзімділігін арттырып, қоректік элементтердің шайылуын төмендетуге мүмкіндік береді [3, 4].

Вермикомпост пен глауконитті бірге пайдалану органикалық және минералдық компоненттердің артықшылықтарын біріктіруге мүмкіндік береді. Вермикомпост топырақтың биологиялық белсенділігін арттырып, өсімдіктерді жеңіл сіңірілетін қоректік заттармен қамтамасыз етсе, глауконит ылғал мен қоректік элементтердің ұсталуын және олардың біртіндеп босап шығуын қамтамасыз етеді. Нәтижесінде мұндай органо-минералды композиция топырақ құрылымын жақсартып, ылғал сақтау қабілетін арттыруға және өсімдіктердің стресс факторларға төзімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді [5].

Зерттеу бөлімі

Жұмыста органо-минералды тыңайтқыш алу үшін бастапқы материал ретінде глауконит пен вермикомпост пайдаланылды. Глауконит жасыл-сұр түсті ұсақ дисперсті минерал түрінде, ал вермикомпост қара-қоңыр түсті органикалық материал түрінде қолданылды. Компоненттердің химиялық құрамы ICP-AES әдісі арқылы анықталды. Зерттеу нәтижелері бойынша глауконит құрамында калий (K_2O - 1,79 %), темір (Fe - 8,72 %), магний (Mg - 1,64 %), кремний (Si - 3,13 %), кальций (Ca - 0,845 %) және натрий (Na - 0,12 %) сияқты макроэлементтердің, сондай-ақ Zn, Cu, Co, Ni, Mn, B, Mo, Sr, V және Cr тәрізді микроэлементтердің бар екендігі анықталды. Вермикомпост құрамында органикалық заттардың мөлшері 19,2 %, гумус 13,48 % құрады, сондай-ақ өсімдікке қажетті азот (0,58 %), фосфор (0,89 %) және калий (1,95 %) элементтерінің болуы анықталды. Органо-минералды композиция алу барысында глауконит алдын ала 0,1-1,0 мм өлшемге дейін ұсақталды. Кейін компоненттер әртүрлі қатынаста араластырылып, түйіршіктеу және кептіру процестерінен өткізілді (сурет 1).

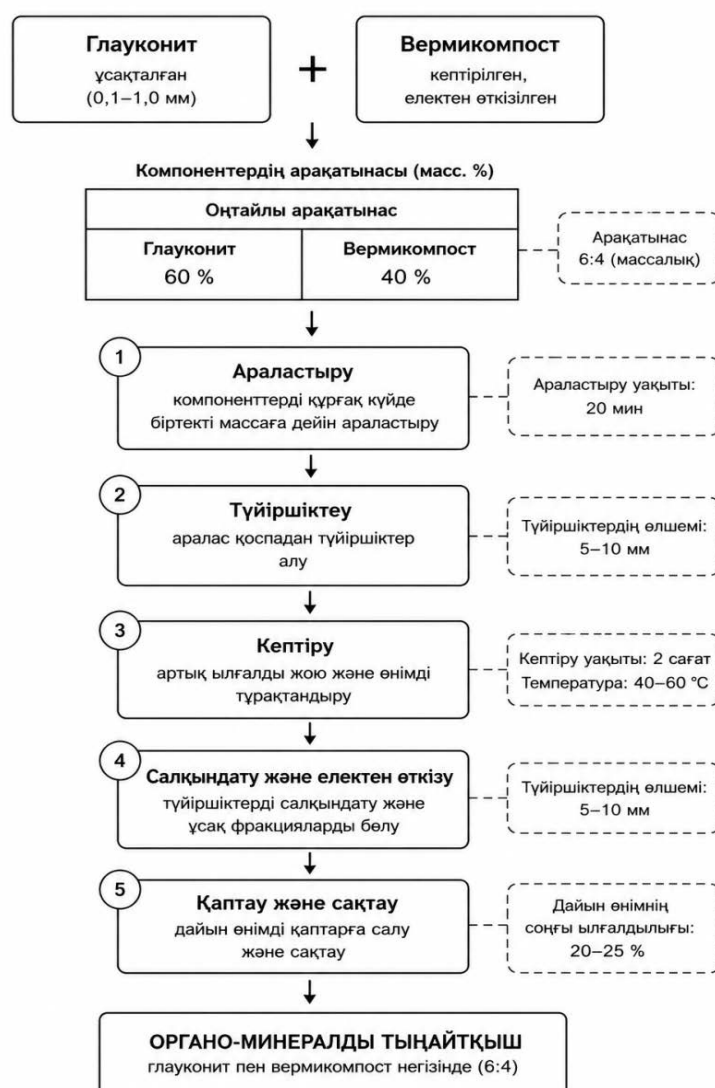
Глауконит, вермикомпост және олардың негізінде алынған органо-минералды композицияның негізгі функциялары мен агрономиялық әсерлері 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1. Глауконит пен вермикомпост негізіндегі органо-минералды композицияның негізгі функциялары мен агрономиялық әсері

Компонент / көрсеткіш	Негізгі функциясы	Агрономиялық әсері
Глауконит	Ылғал мен қоректік элементтерді ұстап тұру	Қоректік заттардың шайылуын төмендетеді
	Калий және микроэлементтер көзі	Өсімдіктердің стресс факторларға төзімділігін арттырады
	Катионалмасу қасиетін арттыру	Топырақтың сорбциялық қабілетін жоғарылатады
Вермикомпост	Органикалық заттар мен гумус көзі	Топырақ құрылымын жақсартады
	Микробиологиялық белсенділікті арттыру	Пайдалы микроорганизмдердің дамуын күшейтеді
	Өсімдіктерді қолжетімді қоректік элементтермен қамтамасыз ету	Өсімдіктің өсуі мен дамуын жақсартады
Органо-минералды композиция	Органикалық және минералдық компоненттердің синергетикалық әсері	Топырақ құнарлылығын кешенді түрде арттырады
	Қоректік заттардың біртіндеп босап шығуы	Ұзақ мерзімді әсер береді

	Ылғал сақтау қабілетін жоғарылату	Құрғақшылық жағдайында тиімділікті арттырады
	Биологиялық белсенділікті тұрақтандыру	Топырақтың экологиялық жағдайын жақсартады

Зерттеу нәтижелері бойынша глаукониттің ылғал мен қоректік элементтердің сақталуына ықпал ететіні, ал вермикомпосттың топырақтың биологиялық белсенділігі мен құрылымын жақсартатыны анықталды. Сонымен қатар екі компонентті бірге пайдалану нәтижесінде алынған органо-минералды композиция қоректік заттардың біртіндеп босап шығуын қамтамасыз етіп, топырақ құнарлылығын кешенді түрде арттыруға мүмкіндік береді.



Сурет 1. Органо-минералды тыңайтқыш алу схемасы

Алынған органо-минералды композицияны қолдану топырақтың ылғал сақтау қабілетін арттыруға, қоректік элементтердің шайылуын төмендетуге және өсімдіктердің стресс факторларға төзімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді. Ұсынылған композиция Қазақстанның құрғақ климаттық жағдайларында топырақ құнарлылығын арттыруға арналған перспективалы органо-минералды тыңайтқыш ретінде қарастырылады.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде глауконит пен вермикомпост негізінде экологиялық қауіпсіз органо-минералды тыңайтқыш алу мүмкіндігі көрсетілді. Глаукониттің ылғал мен қоректік элементтерді ұстап тұру қасиеті мен вермикомпосттың топырақтың биологиялық белсенділігін және құрылымын жақсарту қабілеті бір композицияда тиімді үйлесетіні анықталды.

Зерттеу барысында глауконит құрамында калий, темір, магний және басқа микроэлементтердің, ал вермикомпост құрамында гумус пен өсімдікке қажетті негізгі қоректік элементтердің мол екендігі анықталды. Екі компоненттің синергетикалық әсері нәтижесінде алынған органо-минералды композиция қоректік заттардың біртіндеп босап шығуын қамтамасыз етіп, топырақтың ылғал сақтау қабілетін арттыруға және қоректік элементтердің шайылуын төмендетуге мүмкіндік береді.

Ұсынылған органо-минералды тыңайтқыш топырақ құнарлылығын кешенді түрде жақсартуға, өсімдіктердің стресс факторларға төзімділігін арттыруға және ауыл шаруашылығында экологиялық тұрақты технологияларды дамытуға перспективалы өнім ретінде қарастырылады. Алынған нәтижелер Қазақстанның құрғақ климаттық жағдайларында бұл композицияны ауыл шаруашылығында тиімді қолдануға мүмкіндік бар екенін көрсетеді.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

Nieto-Cantero, J., García-López, A.M., Recena, R. & Quintero J.M. & Delgado A. (2025). Recycling Manure as Vermicompost: Assessing Phosphorus Fertilizer Efficiency and Effects on Soil Health Under Different Soil Management. *J. Soil Sci. Plant. Nutr.* 25, 5046-5061. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02446-4>

Maffia, A., Marra, F. A., Battaglia, S., Mallamaci, C., & Muscolo, A. (2026). Enhancing Soil Functionality Through Circular Fertilizers Derived from Agro-Industrial Wastes: Insights into Microbiological and Biochemical Dynamics. *Environments*, 13(2), 93. <https://doi.org/10.3390/environments13020093>

Dasi E., Rudmin M., & Banerjee S. (2024). Glauconite applications in agriculture: A review of recent advances. *Applied Clay Science*, 253, 107368. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107368>

Sande T.J., Tindwa H.J., Alovishi A.M.T., & Semoka J.M. (2024). Enhancing sustainable crop production through integrated nutrient management: a focus on vermicompost,

bio-enriched rock phosphate, and inorganic fertilisers – a systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1422876. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1422876>

Rudmin, M., Abdullayev, E., Ruban, A., Buyakov, A., & Soktoev, B. (2019). Mechanochemical Preparation of Slow Release Fertilizer Based on Glaucanite-Urea Complexes. *Minerals*, 9(9), 507. <https://doi.org/10.3390/min9090507>

Вермикомпост негізіндегі органикалық тыңайтқыштың топырақ құнарлылығы мен көкөніс дақылдарының өнімділігіне әсері

The Effect of Vermicompost-Based Organic Fertilizer on Soil Fertility and Vegetable Crop Productivity

Юлдашбек Давлат¹, Нарзулла Тоғжан², Тайметова Индира², Жаңабекқызы Ақерке², Акайчикова Мадина², Серікова Элнара², Ахметов Нурлан^{1,2}

¹ Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, «Экология» ғылыми-зерттеу институты, Түркістан, Қазақстан

² Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, Биология кафедрасы, Түркістан, Қазақстан

Аңдатпа

Мақалада Түркістан өңірінің жылыжай жағдайында қияр (*Cucumis sativus*) мен қызанақ (*Solanum lycopersicum*) өсіру кезінде вермикомпосттың агрохимиялық қасиеттері мен өнімділікке әсері зерттелді. Зерттеу жұмысының мақсаты – вермикомпосттың химиялық құрамын анықтап, оның топырақтың физика-химиялық қасиеттеріне және өсімдік өнімділігіне ықпалын бағалау. Вермикомпост қызыл калифорниялық құрттар (*Eisenia fetida*) арқылы органикалық қалдықтарды биоконверсиялау нәтижесінде алынды. Оның құрамында органикалық заттар (34,2 %), гумус (23,19 %), азот (1,58 %), фосфор (1,19 %) және калий (1,95 %) мөлшерінің жоғары екендігі анықталды. Тәжірибе барысында вермикомпост топыраққа 10 % және 20 % мөлшерде енгізіліп, қияр мен қызанақтың өсу динамикасы мен өнімділігі зерттелді. Нәтижелер бойынша вермикомпост қолдану топырақтың құрылымын жақсартып, ылғал сақтау қабілетін арттырды, қоректік элементтердің қолжетімділігін жоғарылатты және микробиологиялық белсенділікті күшейтті. Сонымен қатар өсімдіктердің өсуі жеделдеп, тамыр жүйесінің дамуы жақсарды. Қияр үшін ең жоғары өнімділік 20 % вермикомпост енгізілген нұсқада байқалды. Ал қызанақ үшін 10 % мөлшер оңтайлы нәтиже көрсетіп, қоректік орта мен аэрация арасындағы тиімді тепе-теңдікті қамтамасыз етті. Зерттеу нәтижелері вермикомпосттың Түркістан өңірінің құрғақ климаттық жағдайында жылыжай топырағының құнарлылығын арттыруға және экологиялық қауіпсіз органикалық тыңайтқыш ретінде тиімді пайдалануға болатынын көрсетті.

Кілт сөздер: вермикомпост, *Eisenia fetida*, қияр, қызанақ, органикалық тыңайтқыш, топырақ құнарлылығы.

Abstract

The article investigates the agrochemical properties of vermicompost and its effect on the productivity of cucumber (*Cucumis sativus*) and tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivated under greenhouse conditions in the Turkestan region. The aim of the

study was to determine the chemical composition of vermicompost and evaluate its influence on the physicochemical properties of soil and crop productivity. Vermicompost was obtained through the bioconversion of organic waste using red Californian earthworms (*Eisenia fetida*). The analysis revealed high contents of organic matter (34.2%), humus (23.19%), nitrogen (1.58%), phosphorus (1.19%), and potassium (1.95%). During the experiment, vermicompost was applied to the soil at rates of 10% and 20%, and the growth dynamics and yield of cucumber and tomato plants were studied. The results showed that vermicompost improved soil structure, increased moisture retention capacity, enhanced nutrient availability, and stimulated microbiological activity. In addition, plant growth accelerated and root system development improved. The highest cucumber yield was observed with the 20% vermicompost application rate. For tomato, the 10% application rate produced the optimal result by providing an effective balance between nutrient availability and soil aeration. The findings demonstrate that vermicompost can be effectively used as an environmentally friendly organic fertilizer to improve greenhouse soil fertility under the arid climatic conditions of the Turkestan region.

Keywords: vermicompost, *Eisenia fetida*, cucumber, tomato, organic fertilizer, soil fertility.

Кіріспе

Әлемдік ауыл шаруашылығы тұрақты даму бағытында дамып жатқандықтан, топырақ құнарлылығын арттырудың органикалық және биотехнологиялық әдістеріне қызығушылық артуда. Вермикомпосттау – органикалық қалдықтарды жауынқұрттар арқылы ыдырату үдерісі – топырақтың физика-химиялық және микробиологиялық қасиеттерін жақсартып, ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігін арттыратын экологиялық тиімді әдіс болып табылады [1, 2]. Зерттеулер вермикомпосттың гумусты заттардың мөлшерін көбейтіп, қоректік элементтерді тұрақтандырып, микробиологиялық белсенділікті арттыратынын көрсетеді [3, 4].

Қазақстанның оңтүстігіндегі Түркістан өңірі құрғақ континенттік климатымен, топырақтағы органикалық заттардың аздығымен және ылғал сақтау қабілетінің төмендігімен ерекшеленеді. Сондықтан вермикомпост сияқты органикалық тыңайтқыштар топырақ құрылымын, ылғал сақталуын және қоректік заттардың қолжетімділігін жақсартуда маңызды рөл атқарады [5, 6].

Бұл зерттеуде жергілікті органикалық қалдықтардан *Eisenia fetida* жауынқұрттары көмегімен алынған вермикомпост қолданылды. Оның 0%, 10% және 20% мөлшерлері қияр (*Cedrik F1*) мен қызанақ (*Gamze F1*) өсімдіктерінің өсуі мен өнімділігіне жылыжай жағдайында әсері зерттелді. Сонымен қатар топырақтың агрохимиялық қасиеттері мен өнімділік көрсеткіштері бағаланып, аймақ үшін оңтайлы қолдану мөлшері анықталды.

Зерттеу әдістері мен материалдар

Зерттеу жұмыстары Қазақстанның Түркістан өңіріндегі жылыжай топырағында қияр (*Cucumis sativus*) және қызанақ (*Solanum lycopersicum*) өсіру бойынша жүргізілді. Бұл аймақ топырағының органикалық заттары аз, ылғал сақтау қабілеті төмен және құрылымы тығыз болғандықтан, олардың құнарлылығы шектеулі және органикалық тыңайтқыштарды қажет етеді.

Органикалық тыңайтқыш ретінде қызыл калифорниялық құрттар (*Eisenia fetida*) көмегімен алынған вермикомпост пайдаланылды. Ол топырақ құрылымын жақсартып, қоректік заттардың қолжетімділігін арттырады және микробиологиялық белсенділікті күшейтеді.

Вермикомпост ірі қара және ешкі көңін (3:1) ағаш үгіндісімен араластырып дайындалды. Ылғалдылығы 70-80% деңгейінде ұсталды. Сапасын тексеру үшін 250-300 г субстратқа 10-12 *Eisenia fetida* салынып, 24 сағат бойы бақыланды. Өлім жағдайы тіркелмеген соң материал жарамды деп танылды. Үдеріс барысында температура (15-25°C), ылғалдылық (60-80%) және рН (6,5-7,7) тұрақты сақталды. Дайын өнім барабанды сепаратор арқылы бөлініп алынды.

Жылыжайда жүргізілген тәжірибелік жұмыстарда вермикомпост 0% (бақылау), 10% (500 г/м²) және 20% (1000 г/м²) мөлшерінде енгізілді. Ол топырақтың жоғарғы 10-12 см қабатымен араластырылып, кейін ылғалдандырылды.

Топырақ пен вермикомпосттың химиялық құрамы стандартты әдістермен (ГОСТ, СТ РК) анықталды.

Тәжірибе жұмыстары 2025 жылы Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, “Экология” ғылыми-зерттеу институтының жылыжайында жүргізілді. Қияр (*Cedrik F1*) және қызанақ (*Gamze F1*) көшеттері 20-25°C күндіз, 15-20°C түнде, 50-60% ылғалдылық және 12-14 сағат жарық жағдайында өсірілді. 30 күннен кейін көшеттер тәжірибе алаңдарына отырғызылды (Сурет 1).



Сурет 1. Көшеттер: (а) Қияр (*Cedrik F1*); (б) Қызанақ (*Gamze F1*).

Нәтижелер және талқылау

Түркістан өңірі топырағының сипаттамасы

Түркістан облысының топырағы құрғақ континенттік климат жағдайында қалыптасқан. Бұл аймақтағы қара-қоңыр және сұр топырақтар органикалық заттың төмендігімен, гумустың аз мөлшерімен және карбонаттардың жоғары болуымен ерекшеленеді. Топырақтың реакциялық ортасы негізінен сілтілі (рН 8,6), бұл микроэлементтердің сіңірілуін шектеуі мүмкін.

Анализ нәтижелері топырақта фосфордың жоғары (185,6 мг/кг), ал калийдің өте төмен (3,85 мг/кг) екенін көрсетті. Сонымен қатар аммонийлі азоттың мөлшері де төмен. Бұл өсімдіктердің қоректенуін шектейтін негізгі факторлар болып табылады. Сондықтан органикалық тыңайтқыштарды қолдану қажеттілігі жоғары.

Вермикомпосттың құрамы

Вермикомпост құрамында жоғары мөлшерде органикалық заттар (34,2%), гумус (23,19%), азот (1,58%), фосфор (1,19%) және калий (1,95%) бар. Оның рН мәні 7,7, яғни әлсіз сілтілі.

Бұл көрсеткіштер вермикомпосттың толық жетілген, қоректік заттарға бай және топырақ құнарлылығын арттыруға қабілетті органикалық тыңайтқыш екенін дәлелдейді. Ол топырақ құрылымын жақсартып, ылғал сақтауды және микробиологиялық белсенділікті күшейтеді.

Қияр өсімдігінің өсуі

Жылыжай жағдайында вермикомпост қияр өсімдігінің өсіміне оң әсер көрсетті. Бақылау нұсқасымен салыстырғанда 10% және 20% мөлшерлері өсімдіктің биіктігін және биомассасын арттырды.

Ең жоғары нәтиже 20% мөлшерде байқалды, бұл бақылаумен салыстырғанда 20-35% жоғары өсім көрсетті. Бұл топырақтағы қоректік заттардың артуымен және микробиологиялық белсенділіктің күшеюімен түсіндіріледі.

Қызанақ өсімдігінің өсуі

Қызанақта да ұқсас заңдылық байқалды. Вермикомпост енгізілген нұсқаларда өсім қарқыны бақылауға қарағанда жоғары болды.

20% мөлшер өсімдіктің ең жоғары биіктігін қамтамасыз етті (15-30% артық), ал 10% мөлшер де айтарлықтай оң нәтиже көрсетті. Қызанақтың органикалық қоректік ортаға сезімталдығы жоғары екені анықталды.

Өнімділік нәтижелері

Қияр өнімділігі вермикомпост қолданылған барлық нұсқаларда бақылауға қарағанда жоғары болды. Ең жоғары өнім 20% мөлшерде тіркелді және ол бақылаудан 1,5-3,5 есе артық болды.

Дегенмен қызанақта ең жоғары өнім кейбір кезеңдерде 10% мөлшерде байқалды. Бұл вермикомпосттың мөлшеріне байланысты әсердің біркелкі емес екенін көрсетеді (Сурет 2).



Сурет 2. Қияр (*Cedrik F1*) және қызанақ (*Gamze F1*) дақылдарының әртүрлі вермикомпостты әртүрлі концентрацияда енгізу кезіндегі өнімділігінің сыртқы көріністері

Жалпы талқылау

Зерттеу нәтижелері вермикомпосттың топырақтың құрылымын жақсартып, азот, фосфор және калийдің қолжетімділігін арттыратынын көрсетті. Сонымен қатар оның құрамындағы гумин қышқылдары мен биологиялық белсенді заттар өсімдіктердің өсуін ынталандырады.

Түркістан өңірінің топырағында калий мен азоттың мөлшері төмен болғандықтан, вермикомпостты тыңайтқыш ретінде қолдану қияр мен қызанақ өнімділігін айтарлықтай арттырды. Жалпы алғанда, вермикомпосттың 10-20% мөлшерінде қолдану ауылшаруашылық тұрғыдан тиімді деп бағаланды.

Қорытынды

Түркістан өңірі жылыжай жағдайында қияр мен қызанақ өсіруде вермикомпост қолдану өсімдіктердің өсуі мен өнімділігіне айтарлықтай оң әсер етеді. Ол өсімдіктің тамыр жүйесі мен жерүсті бөліктерінің дамуын күшейтіп, физиологиялық үдерістерді жақсартады және өсімдіктің жалпы тіршілік ету деңгейін арттырады.

Ең жоғары нәтижелер 20% мөлшерде байқалды, бұл өсім мен өнімділіктің максималды деңгейін қамтамасыз етті. 10% мөлшері де бақылаумен салыстырғанда айтарлықтай тиімді болып, экономикалық тұрғыдан қолайлы нұсқа ретінде бағаланады.

Вермикомпост топырақтың агрохимиялық қасиеттерін жақсартады: гумус пен органикалық көміртекті арттырады, азот, фосфор және калийдің қолжетімділігін жоғарылатады, рН деңгейін тұрақтандырады және микробиологиялық белсенділікті күшейтеді. Бұл ерте және тұрақты жеміс салуға қолайлы жағдай жасайды.

Жалпы алғанда, вермикомпост Түркістан өңірінде жылыжай дақылдарын өсіру үшін тиімді органикалық тыңайтқыш болып табылады және топырақ құнарлылығын, өнімділікті және өсімдіктің төзімділігін арттырады.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Ganapathy, N. R. V., Elango, A. C., Balaji, G., Sankaranarayanan, M., Sharma, M. (2025). A comprehensive review of earthworm-derived vermiproducs and their role in sustainable agriculture. *Discover Applied Sciences*, Vol. 7, pp. 995. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07614-w>
2. Elissen, H., van der Weide, R., Gollenbeek, L. (2023). Effects of vermicompost on plant and soil characteristics – A literature overview (Report No. WPR-995). Wageningen Plant Research. <https://doi.org/10.18174/587210>
3. Mustafayeva, N. B., Mustafayev, B. A., Kobzhassarov, T., Omarov, M. M., Miciński, J., Orzechowski, B., Sobotka, W. (2022). Use of vermicompost for recovery of soil fertility and increase of field crop capacity under conditions of the dry-steppe zone. *Journal of Elementology*, Vol. 27(3), pp. 679-693. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.2.2287>
4. Zazouli, M. A., Hezarjaribi, H. Z., Charati, J. Y., Ahmadnezhad, A., Mahvi, A. H., Asgharnia, H. (2021). Investigating the effects of vermicomposting process using *Eisenia fetida* earthworms on the reduction of parasite populations. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, Vol. 19(2), pp. 1623-1633. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00718-6>
5. Büyükarıslan, D., Demir, H. (2024). Effects of vermicompost as an alternative substrate on yield and quality of cauliflower and pepper seedlings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, Vol. 52(2), pp. 13587. <https://doi.org/10.15835/nbha52213587>
6. Terefe, Z., Feyisa, T., Molla, E., Ejigu, W. (2024). Effects of vermicompost and mineral fertilizers on soil properties, malt barley (*Hordeum distichum* L.) yield, and economic benefits. *Agrosystems Geosciences & Environment*, Vol. 7(3), pp. e20550. <https://doi.org/10.1002/agg2.20550>

**Электрохимиялық әдіспен алынған ультрадисперсті мыс ұнтақтарының
түзілу ерекшеліктері және олардың трибологиялық қолданылу
перспективалары**

Formation Features of Ultrafine Copper Powders Obtained by Electrochemical
Method and Their Prospects for Tribological Applications

Арман Маханбетов¹, Тулкинжон Гаипов¹, Мырзабеков Бегзат¹

¹Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

Аңдатпа

Бұл жұмыста ультрадисперсті мыс ұнтақтарын электрохимиялық әдіспен алу және олардың түзілу ерекшеліктері зерттелді. Зерттеу барысында металл иондарының тотықсыздану процесін катод бетінде емес, катод маңындағы кеңістікте негізделген тәсіл қолданылды. Электролит құрамында Ti^{4+}/Ti^{3+} тотығу-тотықсыздану жүйесі пайдаланылып, Ti^{3+} иондарының мыс иондарын химиялық тотықсыздандыру механизмі қарастырылды. Нәтижесінде субмикронды диапазондағы ультрадисперсті мыс бөлшектері алынды.

Алынған мыс ұнтақтарының морфологиясы электрондық микроскопия әдісімен зерттелді. Біркелкі құрылым мен жоғары ток бойынша шығым H_2SO_4 концентрациясы 100 г/л, ток тығыздығы 200 А/м² және $Ti(IV)$ иондарының концентрациясы 10 г/л болған жағдайда байқалды. Ток бойынша шығым 92 %-ды көрсетті.

Жұмыста ультрадисперсті металл ұнтақтарының трибологиялық қасиеттері де қарастырылды. Трибологиялық сынақтар EMMW-1 Friction and Wear Testing Machine қондырғысында жүргізілді. Алынған нәтижелер ультрадисперсті металл бөлшектерінің майлау материалдарының антифрикциялық және тозуға қарсы қасиеттерін жақсартатынын көрсетті. Ультрадисперсті мыс ұнтақтарының қолжетімді шикізат негізінде электрохимиялық жолмен алынуы оларды майлау материалдарына арналған тиімді модификациялаушы қоспа ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: ультрадисперсті мыс ұнтағы, электрохимиялық синтез, Ti^{4+}/Ti^{3+} тотығу-тотықсыздану жүйесі, мыс бөлшектері, электролиз, катодтық тотықсыздану, трибологиялық қасиеттер, антифрикциялық қоспа, майлау материалдары, тозуға төзімділік.

Abstract

In this work, the electrochemical synthesis of ultrafine copper powders and the features of their formation were investigated. The study employed an approach based on the reduction of metal ions not directly on the cathode surface but within the near-cathode region. A Ti^{4+}/Ti^{3+} redox system was used in the electrolyte, and

the mechanism of chemical reduction of copper ions by Ti^{3+} ions was considered. As a result, ultrafine copper particles in the submicron size range were obtained.

The morphology of the obtained copper powders was studied by electron microscopy. A uniform structure and high current efficiency were observed at an H_2SO_4 concentration of 100 g/L, a current density of 200 A/m², and a Ti(IV) ion concentration of 10 g/L. The current efficiency reached 92%.

The tribological properties of ultrafine metal powders were also investigated. Tribological tests were carried out using an EMMW-1 Friction and Wear Testing Machine. The obtained results showed that ultrafine metal particles improve the antifriction and antiwear properties of lubricating materials. The electrochemical production of ultrafine copper powders from accessible raw materials makes it possible to use them as effective modifying additives for lubricants.

Keywords: ultrafine copper powder, electrochemical synthesis, $\text{Ti}^{4+}/\text{Ti}^{3+}$ redox system, copper particles, electrolysis, cathodic reduction, tribological properties, antifriction additive, lubricants, wear resistance.

Кіріспе

Бұрын электрохимиялық әдістер арқылы металдардың ультрадисперсті бөлшектерін алу қиын деп есептелген, себебі катод бетінде түзілетін металл ұрықтары жылдам өсіп, ірі кристалдық құрылымдарға айналады. Соның нәтижесінде жоғары дисперсті және субмикронды металл бөлшектерін тұрақты түрде алу мүмкіндігі шектеулі болды [1, 2, 6].

Соңғы жылдары ультрадисперсті металл ұнтақтарына деген қызығушылық айтарлықтай артты, себебі мұндай материалдар жоғары химиялық белсенділігімен, дамыған меншікті бетімен және ерекше физика-химиялық қасиеттерімен ерекшеленеді [3, 4]. Ультрадисперсті металл бөлшектері катализде, электроникада, қорғаныш жабындарда, трибологиялық материалдарда және майлау материалдарына арналған антифрикциялық қоспалар ретінде кеңінен қолданылуда [2-5]. Әсіресе мыс негізіндегі ультрадисперсті ұнтақтар жақсы электрөткізгіштігімен, жоғары реакциялық қабілетімен және үйкеліс пен тозуды төмендету қасиеттерімен маңызды орын алады.

Ультрадисперсті мыс бөлшектері майлау материалдарына қоспа ретінде қолданылып, үйкеліс пен тозуды төмендететін антифрикциялық әсер көрсетеді [5]. Май құрамында ультрадисперсті мыс ұнтақтарының болуы үйкелетін беттердің тозуын едәуір азайтып, бөлшектер мен механизмдердің қызмет ету мерзімін ұзартады. Мұндай қоспаларды пайдалану жабдықтардың эксплуатациялық сенімділігін арттырып, айтарлықтай экономикалық тиімділікке қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Осыған байланысты ультрадисперсті мыс ұнтақтарын электрохимиялық әдіспен алу, олардың түзілу механизмін зерттеу және практикалық қолдану мүмкіндіктерін анықтау ғылыми және қолданбалы тұрғыдан өзекті мәселе болып табылады.

Зерттеу бөлімі

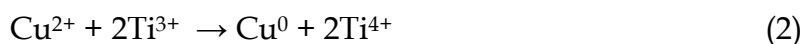
Ұсынылған тәсілдің негізгі идеясы металл иондарының тотықсыздану процесін тікелей катод бетінде емес, катод маңындағы кеңістікте жүзеге асыру болып табылады. Мұндай процесс ерітінді құрамындағы айнымалы валентті иондардың қатысуымен іске асады. Бұл иондар катод пен металл иондары арасында электрон тасымалдаушы қызметін атқарады. Мұндай тәсіл Ti^{4+}/Ti^{3+} жүйесі үшін бұрын жүргізілген зерттеулерде де қарастырылған [7].

Ультрадисперсті металл бөлшектерінің түзілу механизмі келесідей: катодта Ti^{4+} иондары Ti^{3+} күйіне дейін тотықсызданады. Бұл кезде Ti^{4+}/Ti^{3+} жүйесінің тотығу-тотықсыздану потенциалы металл иондарының тотықсыздану потенциалымен салыстырғанда анағұрлым теріс мәнге ие болуы қажет. Нәтижесінде Ti^{3+} иондары катод маңындағы кеңістікте металл иондарын химиялық жолмен тотықсыздандырып, ультрадисперсті бөлшектердің түзілуіне алып келеді.

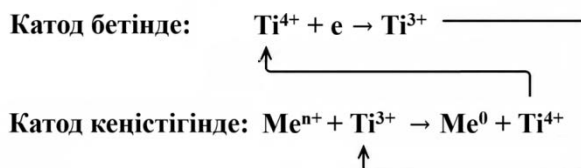
Мысалы, ультрадисперсті мыс ұнтақтарының түзілуі кезінде процестер келесі түрде жүреді. Құрамында төрт валентті титан иондары бар күкіртқышқылды мыс(II) ерітіндісінде катодта Ti^{4+} иондары Ti^{3+} күйіне дейін тотықсызданады:



Катод бетінде түзілген үш валентті титан иондары катод маңындағы кеңістікте мыс(II) иондарымен химиялық әрекеттесіп, ультрадисперсті мыс бөлшектері мен Ti^{4+} иондарын түзеді:



Ерітіндіде түзілген Ti^{4+} иондары қайтадан катодта Ti^{3+} күйіне дейін тотықсызданады, нәтижесінде процесс циклдік сипатқа ие болады. Металл бөлшектерінің түзілуі мен өсуі негізінен катод бетінде емес, катод маңындағы кеңістікте жүретіндіктен, олардың әрі қарай іріленуі шектеледі. Соның нәтижесінде ультрадисперсті металл бөлшектері түзіледі. Аталған процестердің сызбанұсқасы 1-суретте көрсетілген.

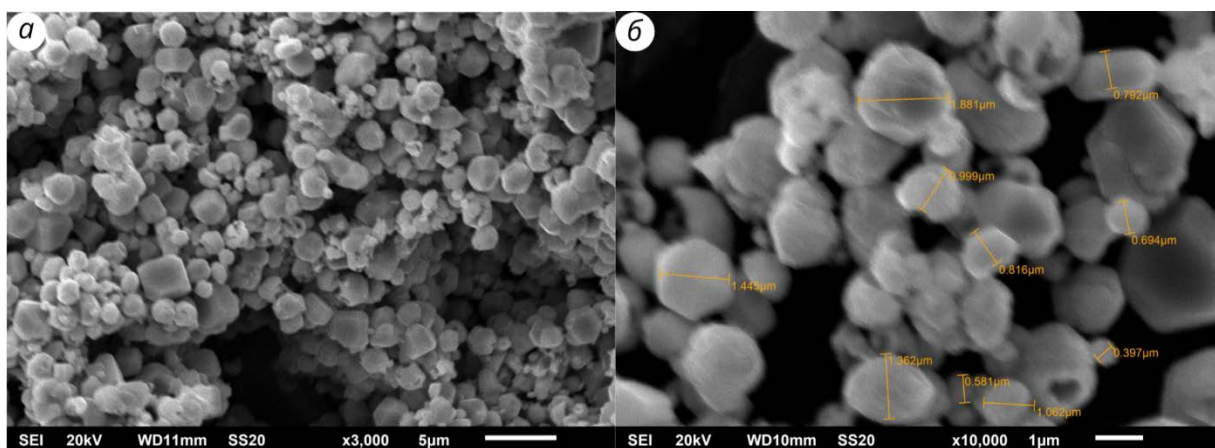


Сурет 1. Ti^{4+}/Ti^{3+} тотығу-тотықсыздану жүйесі арқылы металл ұнтағының түзілу схемасы

Көрсетілгендей, екінші сатыда мыс атомдары (Cu^0) және титанның төрт валентті иондары (Ti^{4+}) түзіледі. Кейін Ti^{4+} иондары катодта қайтадан Ti^{3+} күйіне дейін тотықсызданып, катод маңындағы қабатта мыс иондарын қайтадан металдық күйге дейін тотықсыздандыру процесіне қатысады. Осылайша процесс циклдік сипатқа ие болады.

Алынған мыс ұнтақтарының морфологиясын электрондық микроскопия әдісімен зерттеу төмен ток тығыздықтарында субмикронды біркелкі таралған ультрадисперсті мыс бөлшектерінің түзілетінін көрсетті (сурет 2).

Зерттеу нәтижелері күкірт қышқылының концентрациясы 100 г/л, ток тығыздығы 200 А/м² және Ti(IV) иондарының концентрациясы 10 г/л мөлшерінде ультрадисперсті бөлшектердің тұрақты түзілуі байқалатынын көрсетті. Көрсетілген электролиз параметрлерінде мыс ұнтақтарының ток бойынша шығымы 92 %-ды көрсетті.



Сурет 2. $\text{Ti}^{4+}/\text{Ti}^{3+}$ иондары қатысында электролиз әдісімен алынған ультрадисперсті мыс ұнтақтарының электрондық микрофотосуреттері

2-суреттен көрінгендей, $\times 3000$ үлкейту кезінде (а) алынған мыс ұнтақтарының біркелкі таралған агломерацияланған ультрадисперсті құрылым түзетіні байқалады. $\times 10000$ үлкейту кезінде (б) бөлшектердің негізінен сферикалық және жартылай сферикалық морфологияға ие екені анықталды. Бөлшектердің өлшемдері шамамен 0,4-1,9 мкм аралығында өзгередіні байқалды.

Зерттеудің келесі кезеңінде ультрадисперсті металл ұнтақтарының майлау материалдарының трибологиялық қасиеттеріне әсері зерттелді. Металл ұнтағы ретінде квазикристалдық ұнтақтар, ал майлау материалы ретінде 5W-30 мотор майы пайдаланылды. Трибологиялық сынақтар EMMW-1 Friction and Wear Testing Machine қондырғысында 100 Н жүктеме, 100 rpm айналу жылдамдығы және 1800 с сынақ уақыты жағдайында жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері бойынша 12X18H10T болат негізі үшін таза май қолданылған кездегі үйкеліс коэффициенті 0,387 болса, май құрамына 0,035 г ультрадисперсті квазикристалдық ұнтақ енгізілген кезде бұл көрсеткіш 0,341-ге

дейін төмендегені анықталды. Бұл ультрадисперсті бөлшектердің үйкелісті азайтып, тозуға қарсы қасиет көрсететінін дәлелдейді.

Осыған байланысты келесі зерттеу кезеңінде квазикристалдық ұнтақтардың орнына электрохимиялық әдіспен алынған ультрадисперсті мыс ұнтақтарын пайдалану көзделеді. Мыс ұнтақтарын алу технологиясының салыстырмалы түрде қарапайым болуы, шикізаттың қолжетімділігі және жоғары антифрикциялық қасиеттері оларды майлау материалдарына тиімді модификациялаушы қоспа ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Жұмыс барысында Ti^{4+}/Ti^{3+} тотығу-тотықсыздану жүйесі қатысында ультрадисперсті мыс ұнтақтарын электрохимиялық әдіспен алу мүмкіндігі көрсетілді. Металл иондарының тотықсыздану процесін катод бетінде емес, катод маңындағы кеңістікте жүзеге асыру бөлшектердің іріленуін шектеп, субмикронды диапазондағы ультрадисперсті мыс бөлшектерін алуға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері бойынша H_2SO_4 концентрациясы 100 г/л, ток тығыздығы 200 А/м² және Ti(IV) концентрациясы 10 г/л болған жағдайда біркелкі морфология мен жоғары ток бойынша шығым байқалды.

Бұл алынған ультрадисперсті мыс ұнтақтарының майлау материалдарына арналған тиімді антифрикциялық қоспа ретінде қолдану перспективасының жоғары екенін көрсетеді.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

Nekouei R.K., Rashchi F., Amadeh A.A. Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis // Powder Technology. – 2013. – Vol. 237. – P. 165-171. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.01.032

Wojtaszek K., Cebula F., Partyka B., Deszcz P., Włoch G., Socha R.P., Woźny K., Żabiński P., Wojnicki M. Electrochemical Method of Copper Powder Synthesis on Rotating Electrode in the Presence of Surfactants // Archives of Metallurgy and Materials. – 2023. – Vol. 68, No. 1. – P. 375-386. DOI: 10.24425/amm.2023.141514

Yuan Q. Preparation and Application of Ultrafine Copper Powder // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 29. – P. 83-92. DOI: 10.54097/hset.v29i.4227

Li S., Pang J., Han W., Luo L., Cheng X., Zhao Z., Lv C., Liu J. The Preparation of an Ultrafine Copper Powder by the Hydrogen Reduction of an Ultrafine Copper Oxide Powder and Reduction Kinetics // Materials. – 2024. – Vol. 17, No. 7. – Article 1613. DOI: 10.3390/ma17071613

Totten G.E., Liang H. (Eds.). Mechanical Tribology: Materials, Characterization, and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 508 p. DOI: 10.1201/9780203970911.

Schlesinger M., Paunovic M. (Eds.). Modern Electroplating. – 5th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. – 752 p. DOI: 10.1002/9780470602638

Баешов А., Гаипов Т.Е., Баешова А.К., Колесников А.В. Мыс (II) иондарын үш валентті титан иондарымен цементациялау арқылы нано- және ультрадисперсті мыс ұнтақтарын алу // ҚР ҰҒА Хабарлары. Химия және технология сериясы. – 2018. – №6. – Б. 87–95. DOI: 10.32014/2018.2518-1491.30.

Çevre Mikrobiyolojisi Perspektifinden Bal Arılarının (*Apis mellifera*) Biyolojik İndikatör Olarak Kullanımı

Honey Bees (*Apis mellifera*) As Biological Indicators: An Environmental Microbiology Perspective

Yaşar Erdoğan

Prof. Dr., Bayburt University, Demirözü Vocational School, Department of Veterinary Medicine, Bayburt, Türkiye.

Ümmügülsüm Erdoğan

Prof. Dr., Bayburt University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Bayburt, Türkiye.

Veli Acar

Lecturer, Bayburt University, Demirözü Vocational School, Department of Veterinary Medicine, Bayburt, Türkiye.

Özet

Çevresel kirlilik, iklim değişikliği ve ekosistem bozulması, biyolojik sistemlerin işleyişini çok boyutlu şekilde etkileyen başlıca küresel çevresel sorunlar arasında yer almaktadır. Bu süreçte mikroorganizmalar, ekosistem fonksiyonlarının sürdürülebilirliği, besin döngüleri ve biyolojik denge mekanizmalarında kritik rol oynarken, çevresel değişimlere karşı oldukça hassas biyolojik tepkiler vermektedir. Son yıllarda çevre mikrobiyolojisi alanında yapılan çalışmalar, çevresel stres faktörlerinin yalnızca makroorganizma topluluklarını değil, aynı zamanda mikrobiyal topluluk yapısını ve mikrobiyota-konak etkileşimlerini de önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Bal arıları (*Apis mellifera*), geniş foraging alanları, hava, su, toprak ve bitki bileşenleri ile sürekli temas halinde olmaları nedeniyle çevresel kirleticilere doğrudan maruz kalmakta ve bu kirleticileri biyolojik sistemlerinde biriktirebilmektedir. Ayrıca arı vücudu, bağırsak mikrobiyotası ve arı ürünlerinde tespit edilen mikrobiyal ve kimyasal bileşenler, çevresel kalite ve ekosistem sağlığı hakkında önemli biyolojik bilgiler sunmaktadır. Özellikle son yıllarda gelişen 16S rRNA dizileme, metagenomik, metatranskriptomik ve yüksek verimli dizileme teknolojileri, arı mikrobiyotasının çevresel stres faktörlerine verdiği biyolojik yanıtların daha hassas şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu derleme çalışmasında, bal arılarının çevre mikrobiyolojisi perspektifinden biyolojik indikatör olarak kullanım potansiyeli güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. Arıların ağır metal, pestisit ve mikrobiyal yük gibi çevresel parametrelerin izlenmesindeki rolü ile arı-mikrobiyota-çevre etkileşimleri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Ayrıca biyoteknolojik analiz yöntemlerinin arı temelli çevresel izleme sistemlerine sağladığı katkılar tartışılmıştır.

Sonuç olarak, bal arılarının yalnızca kimyasal kirleticilerin değil, aynı zamanda çevresel mikrobiyal değişimlerin ve ekolojik stres faktörlerinin de bütüncül biyolojik göstergeleri olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Bu yönüyle bal arıları, çevre

mikrobiyolojisi, ekoloji ve biyoteknoloji alanlarının kesişim noktasında yer alan stratejik biyolojik model organizmalar arasında değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: *Apis mellifera*, çevre mikrobiyolojisi, biyolojik indikatör, mikrobiyota, çevresel kirlilik, metagenomics

Abstract

Environmental pollution, climate change, and ecosystem degradation are among the major global environmental challenges affecting the functioning of biological systems at multiple levels. In this context, microorganisms play critical roles in ecosystem sustainability, nutrient cycling, and biological balance mechanisms, while also exhibiting highly sensitive responses to environmental changes. Recent studies in environmental microbiology have demonstrated that environmental stress factors affect not only macroorganism communities but also microbial community structure and microbiota-host interactions.

Honey bees (*Apis mellifera*) are directly exposed to environmental pollutants due to their wide foraging ranges and continuous interactions with air, water, soil, and plant components. These organisms are capable of accumulating chemical and microbial contaminants within their biological systems. Moreover, the honey bee body, gut microbiota, and bee products provide important biological information regarding environmental quality and ecosystem health. In recent years, advances in molecular biology and high-throughput sequencing technologies, including 16S rRNA sequencing, metagenomics, metatranscriptomics, and next-generation sequencing approaches, have enabled more sensitive evaluation of the biological responses of honey bee microbiota to environmental stress factors.

In this review study, the potential use of honey bees as biological indicators from an environmental microbiology perspective was evaluated based on current scientific literature. The role of honey bees in monitoring environmental parameters such as heavy metals, pesticides, and microbial loads, as well as honey bee-microbiota-environment interactions, was discussed within an integrated ecological framework. Furthermore, the contributions of biotechnological analytical approaches to bee-based environmental monitoring systems were examined.

As a result, honey bees can be considered comprehensive biological indicators not only for chemical pollutants but also for environmental microbial changes and ecological stress factors. In this respect, honey bees represent strategic biological model organisms at the intersection of environmental microbiology, ecology, and biotechnology.

Keywords: *Apis mellifera*, environmental microbiology, biological indicator, microbiota, environmental pollution, metagenomics

Giriş

Çevresel kirlilik, iklim değişikliği ve ekosistem bozulması, son yıllarda artan antropojenik faaliyetlerin etkisiyle küresel ölçekte ekolojik sürdürülebilirliği tehdit

eden başlıca çevresel sorunlar arasında yer almaktadır (Goulson ve ark., 2015). Endüstriyel üretim, yoğun tarımsal uygulamalar, kentleşme ve kimyasal kirleticilerin yaygın kullanımı; hava, su ve toprak sistemlerinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik dengenin bozulmasına yol açmaktadır. Bu süreçler yalnızca makroorganizma topluluklarını değil, aynı zamanda ekosistem işleyişinin temel bileşenleri arasında yer alan mikrobiyal toplulukları da doğrudan etkilemektedir (Engel ve Moran, 2013).

Çevre mikrobiyolojisi, mikroorganizmaların çevresel süreçlerdeki işlevlerini ve çevresel değişimlere verdikleri biyolojik tepkileri inceleyen disiplinler arası bir bilim alanıdır. Mikroorganizmalar; besin döngüleri, organik madde ayrışması, toksik bileşiklerin dönüşümü, biyolojik detoksifikasyon süreçleri ve ekolojik denge mekanizmalarında kritik rol oynamaktadır. Mikrobiyal topluluklar arasındaki simbiyotik ve antagonistik ilişkiler, çevresel stres koşullarına bağlı olarak dinamik şekilde değişebilmektedir (Drew et al., 2020). Bu nedenle mikrobiyal topluluk yapısında meydana gelen değişimler, çevresel stresin erken biyolojik göstergeleri arasında değerlendirilmektedir (Kwong ve Moran, 2016). Özellikle son yıllarda gelişen moleküler mikrobiyoloji ve yüksek verimli dizileme teknolojileri, çevresel stres faktörlerinin mikrobiyal topluluklar üzerindeki etkilerinin daha hassas şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu teknolojiler, bakteriyel toplulukların yanı sıra fungal mikrobiyal çeşitliliğin de yüksek hassasiyetle analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Bokulich ve Mills, 2013).

Çevresel kalite ve ekosistem sağlığının değerlendirilmesinde biyolojik indikatör organizmaların kullanımı, modern çevresel izleme çalışmalarının temel yaklaşımlarından biri haline gelmiştir. Biyolojik indikatör organizmalar, çevresel değişimlere karşı verdikleri fizyolojik, davranışsal veya mikrobiyal tepkiler aracılığıyla çevresel stres faktörlerinin biyolojik etkilerini ortaya koyabilmektedir. Bu bağlamda bal arıları (*Apis mellifera*), geniş uçuş alanları, farklı bitki türleri ile etkileşimleri ve çevresel bileşenlerle sürekli temas halinde olmaları nedeniyle çevresel kalite değerlendirmelerinde önemli biyolojik model organizmalar arasında yer almaktadır. Bal arıları; nektar, polen ve su toplama faaliyetleri sırasında hava, su, toprak ve bitki kaynaklı çok sayıda kimyasal ve mikrobiyal bileşene maruz kalmaktadır. Bu organizmalar, çevresel kirleticileri vücutlarında ve arı ürünlerinde biriktirebilmekte, böylece çevresel kalite hakkında bütüncül biyolojik bilgi sunabilmektedir (Conti ve Botrè, 2001). Özellikle bal, polen, propolis ve balmumu gibi arı ürünleri; ağır metal, pestisit kalıntıları ve mikrobiyal yük açısından çevresel maruziyetin biyolojik göstergeleri olarak değerlendirilmektedir.

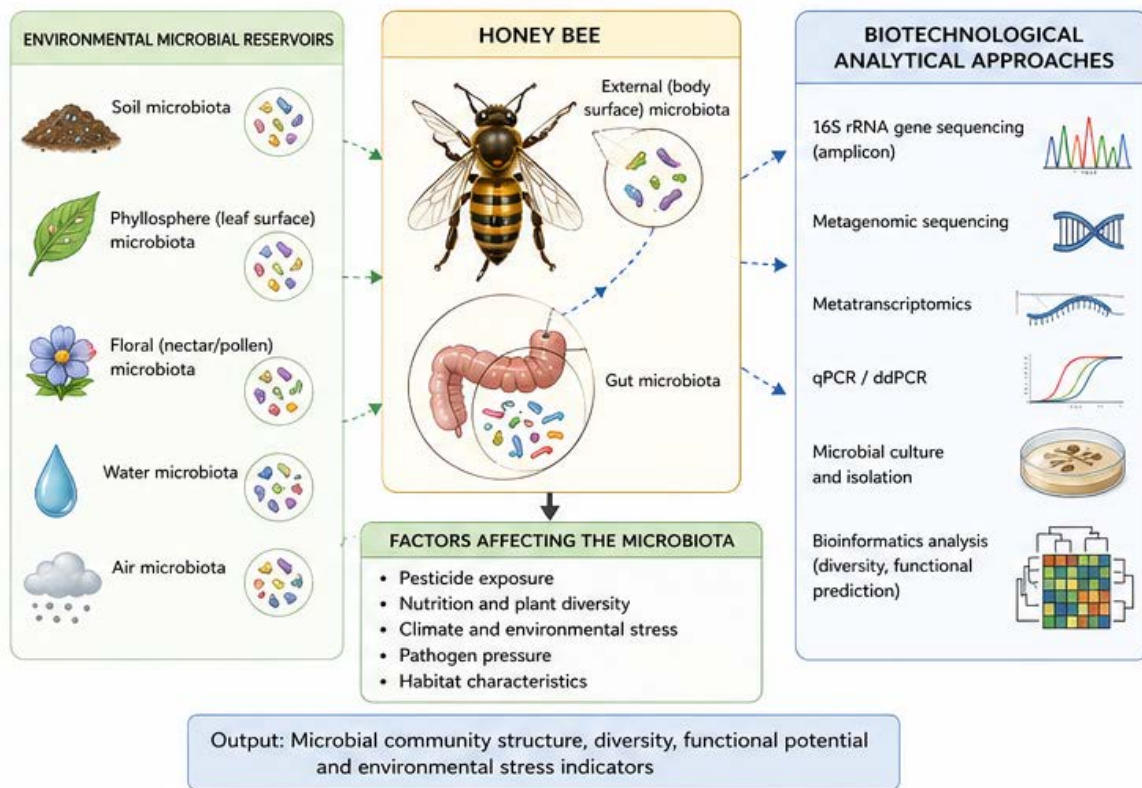
Son yıllarda arı mikrobiyotası üzerine yapılan çalışmalar, çevresel stres faktörlerinin arı bağırsak mikrobiyal topluluk yapısını önemli ölçüde değiştirebildiğini ortaya koymuştur (Engel ve Moran, 2013; Jones ve ark., 2018). Özellikle 16S rRNA dizileme, metagenomik, metatranskriptomik ve yüksek verimli dizileme yaklaşımları sayesinde arı mikrobiyotasının çevresel değişimlere verdiği biyolojik yanıtlar daha ayrıntılı şekilde analiz edilebilmektedir. Bu gelişmeler, bal arılarının yalnızca kimyasal kirleticilerin değil, aynı zamanda çevresel mikrobiyal değişimlerin de biyolojik göstergeleri olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca bal arıları, bağırsak mikrobiyotası araştırmalarında önemli model organizmalar arasında değerlendirilmektedir (Zheng et al., 2018).

Bununla birlikte mevcut literatürde, bal arılarının çevre mikrobiyolojisi perspektifinden biyolojik indikatör olarak kullanımını bütüncül şekilde değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle arı-mikrobiyota-çevre etkileşimlerinin ekosistem sağlığı bağlamında entegre biçimde ele alındığı derleme çalışmalarının yetersiz olması, bu alanda önemli bir bilgi boşluğu oluşturmaktadır.

Bu derleme çalışmasında, bal arılarının çevre mikrobiyolojisi perspektifinden biyolojik indikatör olarak kullanım potansiyeli güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. Ayrıca arıların kimyasal ve mikrobiyal çevresel değişimlerin izlenmesindeki rolü, biyoteknolojik analiz yöntemleri ve arı-mikrobiyota-çevre ilişkileri bütüncül bir yaklaşımla tartışılmıştır.

Bal Arılarının Çevresel Maruziyet Özellikleri

Bal arıları (*Apis mellifera*), geniş foraging alanları ve farklı çevresel bileşenlerle sürekli etkileşim halinde olmaları nedeniyle çevresel değişimlere karşı oldukça hassas biyolojik organizmalar arasında yer almaktadır. Bir bal arısı kolonisinin besin toplama faaliyetleri genellikle birkaç kilometrelik alanı kapsamakta olup, bu süreçte arılar hava, su, toprak ve bitki kaynaklı çok sayıda kimyasal ve biyolojik faktöre eş zamanlı olarak maruz kalmaktadır. Bu çok yönlü çevresel temas, bal arılarını ekosistem düzeyindeki çevresel değişimlerin bütüncül biyolojik göstergeleri haline getirmektedir. Bal arılarının çevresel bileşenlerle kurduğu çok yönlü etkileşim ağı Şekil 1’de özetlenmiştir.



Şekil 1. Bal arılarının hava, su, toprak, bitki yüzeyleri ve floral kaynaklar aracılığıyla çevresel kirleticilere ve mikrobiyal bileşenlere maruziyet yollarını gösteren kavramsal model.

Аrıların nektar ve polen toplama davranışı, bu organizmaların bitki yüzeyleri ve floral yapılar ile doğrudan temas kurmasına neden olmaktadır. Bu süreçte arılar, bitki yüzeyi (phyllosphere) ve floral mikrobiyota içerisinde bulunan çok sayıda mikroorganizma ile etkileşim haline geçmektedir. Bitki yüzeyi ve  i ek mikrobiyotası; çevresel koşullar, pestisit uygulamaları, atmosferik kirleticiler ve iklimsel stres faktörlerinden doğrudan etkilenen dinamik mikrobiyal sistemlerdir (Nicolson ve Thornburg, 2007). Dolayısıyla arıların maruz kaldığı mikrobiyal yük ve mikrobiyal çeşitlilik, çevresel kalite değişimlerinin dolaylı biyolojik göstergeleri olarak değerlendirilebilir.

Bunun yanı sıra bal arıları, uçuş faaliyetleri sırasında atmosferik partiküller, ağır metaller, pestisit kalıntıları, poliaromatik hidrokarbonlar ve çeşitli çevresel toksik bileşiklerle temas etmektedir. Bu kirleticiler arıların vücut yüzeylerinde, sindirim sistemlerinde ve arı ürünlerinde birikebilmektedir (Conti ve Botr , 2001). Özellikle bal, polen, propolis ve balmumu gibi arı ürünleri, çevresel kirleticilerin zamansal ve mekânsal birikimini yansıtabilen biyolojik matriksler olarak önemli avantajlar sunmaktadır. Balmumu gibi lipofilik yapıya sahip biyolojik materyaller, pestisit kalıntılarının uzun dönemli birikimini gösterebilmesi açısından çevresel izleme çalışmalarında özel önem taşımaktadır.

Çevresel stres faktörleri yalnızca kimyasal kirletici birikimi ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda arı mikrobiyotasının yapısı üzerinde de önemli değişimlere neden olabilmektedir. Arı bağırsak mikrobiyotası; besin sindirimi, bağışıklık sistemi düzenlenmesi, detoksifikasyon mekanizmaları ve patojen baskılanması gibi temel fizyolojik süreçlerde kritik rol oynamaktadır (Engel ve Moran, 2013). Pestisit maruziyeti, habitat kaybı, yetersiz beslenme ve iklimsel stres gibi çevresel faktörler, arı mikrobiyal topluluk yapısında disbiyotik değişimlere yol açarak koloni sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir.

Son yıllarda moleküler biyoloji ve yüksek verimli dizileme teknolojilerindeki gelişmeler, arıların çevresel maruziyet süreçlerinin daha ayrıntılı şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Özellikle 16S rRNA gen dizileme, metagenomik ve metatranskriptomik yaklaşımlar sayesinde arı mikrobiyotasındaki yapısal ve fonksiyonel değişimler yüksek hassasiyetle analiz edilebilmektedir (Jones ve ark., 2018). Bu biyoteknolojik yöntemler, arıların çevresel stres faktörlerine verdiği biyolojik yanıtların erken dönemde belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Bu bağlamda bal arıları, çevresel kirleticiler ile biyolojik sistemler arasındaki etkileşimlerin değerlendirilmesinde çok boyutlu biyolojik model organizmalar olarak değerlendirilebilir. Arıların farklı çevresel bileşenlerle kurduğu kompleks etkileşim ağı, hem kimyasal hem de mikrobiyal çevresel değişimlerin entegre biçimde izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Arıların Kimyasal ve Mikrobiyal İndikatör Olarak Kullanımı

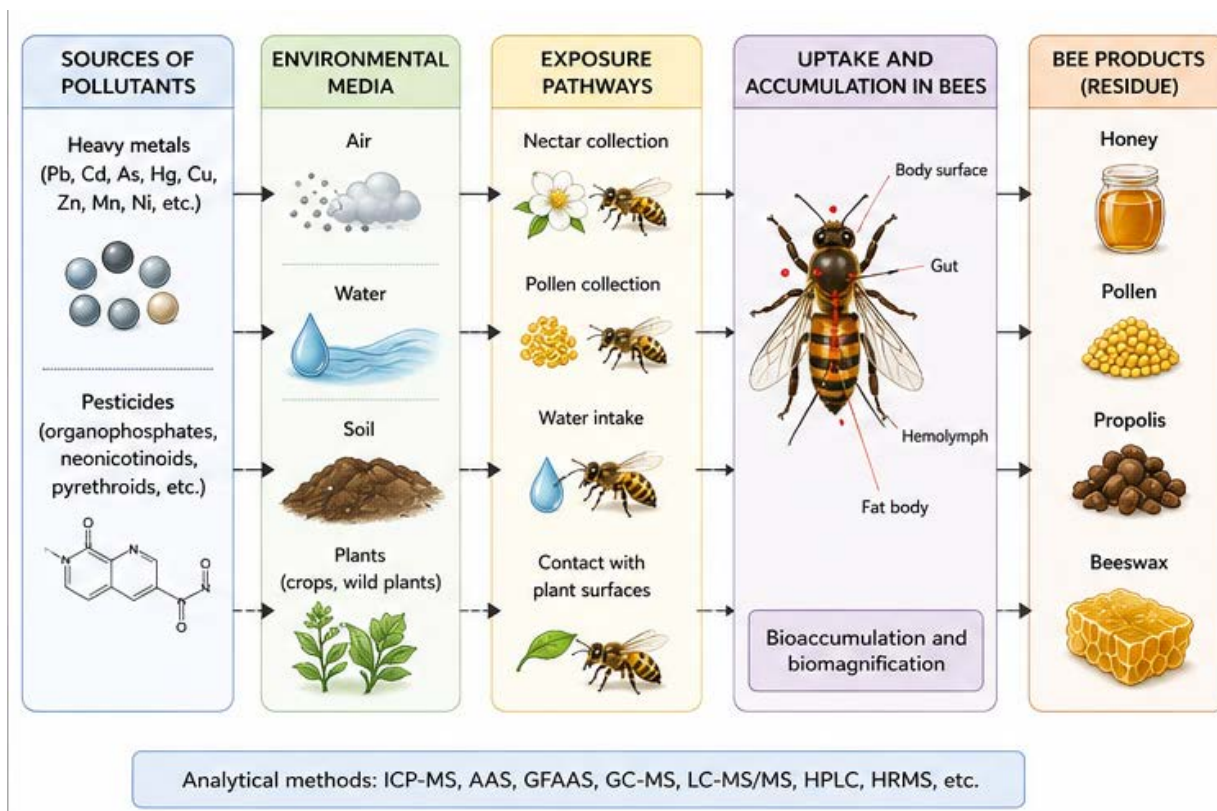
Bal arıları (*Apis mellifera*), çevresel kirleticilere geniş ölçekte maruz kalmaları ve bu kirleticileri biyolojik sistemlerinde biriktirebilmeleri nedeniyle çevresel kalite değerlendirmelerinde önemli biyolojik indikatör organizmalar arasında yer almaktadır. Arıların besin toplama faaliyetleri sırasında hava, su, toprak ve bitki

үзейлері іле сүреклі темас халінде олмаары; севреде булунан кимyasал ве микробиал кирлетікелерін колони дүзейінде ташінмасына ве биологик системлерде бирикмесіне оланак сағламaktadır (Conti ve Botrè, 2001). Бу сөк йөnlү севресел марузіyet yapısı, араларын севресел ізлеме сәлішмаларында бүтүнцүл биологик модел организмалар оларак кулланылмасын мүмкүн кылмаaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Bal arılarının севресел биологик индикатör оларак кулланым аланлары, анализ еділен биологик матрикслер ве севресел аналмалары

Севресел Parametre	Анализ Еділен Ары Матрикси	Кулланылан Анализ Yöntemleri	Севресел/Биологик Аналі
Ағыр металлер (Pb, Cd, Hg, Cr)	Bal, polen, balmumu, arı vücudu	ICP-MS, AAS	Endüstriyel ve atmosferik kirliliğin belirlenmesi
Pestisit kalıntıları	Polen, balmumu, propolis, bal	GC-MS, LC-MS/MS	Tarımsal kimyasal maruziyetin izlenmesi
Mikrobiyal yük	Arı bağırsak mikrobiyotası, bal, polen	Kültür bazlı analizler, qPCR	Севресел микробиал деғішімлерін беліренмесі
Mikrobiyal çeşitlilik	Bağırsak mikrobiyotası	16S rRNA dizileme, metagenomik analizler	Севресел стресін микробиал топлулук yapısına etkisi
Atmosferik partiküller	Arı vücut yüzeyi, polen	SEM, kimyasal analizler	Hava kirliliği ve partikül taşınımının değerlendirilmesi
Floral mikrobiyota	Polen, nektar, arı yüzeyi	Metagenomik ve mikrobiyolojik analizler	Bitki-mikrobiyota-arı etkileşimlerinin değerlendirilmesi
Patojen yükü	Arı bağırsak sistemi, koloni materyali	qPCR, moleküler tanımlama yöntemleri	Koloni sağlığı ve севресел стрес ilişkisi
Pestisit kaynaklı disbiyozis	Arı bağırsak mikrobiyotası	Metatranskriptomik analizler	Pestisitlerin микробиал деңге üzerindeki etkileri

Bal arılarında севресел кирлетікелерін ташінымı ве биологик бириким механизмалары Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Bal arılarında ağır metal, pestisit ve atmosferik kirleticilerin taşınımı, biyolojik birikimi ve arı ürünlerine aktarım mekanizmalarını gösteren şematik model.

Kimyasal indikatörlük açısından değerlendirildiğinde, arılar ve arı ürünleri (bal, polen, propolis ve balmumu), ağır metal ve pestisit kalıntılarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan biyolojik matrisler arasında yer almaktadır (Conti ve Botrè, 2001). Özellikle kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg) ve krom (Cr) gibi toksik ağır metallerin arı ürünlerinde birikebildiği ve bu birikimin çevresel kirlilik düzeyi ile ilişkili olduğu bildirilmektedir. Benzer şekilde tarımsal üretimde yaygın olarak kullanılan insektisit, fungusit ve herbisit kalıntıları da arı ürünlerinde tespit edilebilmekte ve çevresel maruziyetin biyolojik göstergeleri olarak değerlendirilebilmektedir.

Özellikle balmumu ve polen, lipofilik pestisitlerin uzun süreli birikimini yansıtabilen önemli biyolojik örnekler olarak öne çıkmaktadır. Balmumunun koloni içerisinde uzun süre kalabilmesi, çevresel kirleticilerin zamansal birikiminin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellik, arı temelli biyolojik izleme çalışmalarının klasik çevresel örnekleme yöntemlerine kıyasla daha bütüncül veri sunmasına katkı sağlamaktadır.

Mikrobiyal indikatörlük açısından değerlendirildiğinde ise bal arıları, hem kendi bağırsak mikrobiyotası hem de çevreden taşıdıkları mikroorganizmalar aracılığıyla çevresel mikrobiyal dinamiklerin değerlendirilmesinde önemli biyolojik araçlar olarak kabul edilmektedir. Arı mikrobiyotası; besin kaynaklarının kalitesi, pestisit maruziyeti, habitat yapısı, mevsimsel değişimler ve iklimsel stres faktörlerine bağlı

olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Engel ve Moran, 2013; Kwong ve Moran, 2016). Bu nedenle mikrobiyal topluluk yapısında meydana gelen değişimler, çevresel stresin biyolojik yansımaları olarak değerlendirilebilir.

Arılar tarafından taşınan floral mikrobiyota ve çevresel mikroorganizmalar da ekosistem sağlığı açısından önemli biyolojik bilgiler sunmaktadır. Çiçekler, bitki yüzeyleri ve su kaynaklarından taşınan mikroorganizmalar arı ürünlerinde ve koloni ortamında tespit edilebilmekte, böylece çevresel mikrobiyal yük hakkında dolaylı bilgi elde edilebilmektedir. Özellikle çevresel stres faktörlerine bağlı olarak mikrobiyal çeşitlilikte meydana gelen değişimler, habitat kalitesi ve ekolojik denge hakkında önemli göstergeler sunmaktadır.

Son yıllarda moleküler biyoloji ve yüksek verimli dizileme tekniklerindeki gelişmeler, arı mikrobiyotasının çevresel stres faktörlerine verdiği biyolojik tepkilerin daha ayrıntılı şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır. Özellikle 16S rRNA gen dizileme, metagenomik, metatranskriptomik ve qPCR temelli yaklaşımlar; mikrobiyal topluluk yapısı, fonksiyonel çeşitlilik ve çevresel stres yanıtlarının yüksek hassasiyetle değerlendirilmesini mümkün hale getirmiştir (Jones ve ark., 2018). Bu biyoteknolojik yöntemler sayesinde arıların yalnızca kimyasal kirleticilerin değil, aynı zamanda çevresel mikrobiyal değişimlerin de hassas biyolojik göstergeleri olduğu ortaya konulmuştur.

Bununla birlikte arı temelli biyolojik indikatörlük çalışmalarında standart örneklem protokollerinin ve analiz metodolojilerinin sınırlı olması, farklı çalışmalar arasında karşılaştırılabilirlik açısından önemli bir problem oluşturmaktadır. Özellikle örneklem zamanı, koloni yapısı, çevresel koşullar ve analiz yöntemlerindeki farklılıklar, elde edilen sonuçların yorumlanmasını zorlaştırabilmektedir. Bu durum, gelecekte yapılacak çalışmalarda metodolojik standardizasyon ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak bal arıları, çevresel kalite değerlendirmelerinde çok boyutlu biyolojik indikatörler olarak değerlendirilebilir. Kimyasal analizler aracılığıyla kirletici birikimi belirlenirken, mikrobiyal analizler sayesinde çevresel stres faktörlerinin biyolojik etkileri ortaya konulabilmektedir. Bu çift yönlü yaklaşım, bal arılarının çevre mikrobiyolojisi ve biyoteknoloji temelli entegre çevresel izleme sistemlerinde stratejik biyolojik model organizmalar olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Arılar ve Ekosistem Sağlığı Arasındaki İlişki

Bal arıları (*Apis mellifera*), yalnızca tarımsal üretim açısından değil, doğal ekosistemlerin sürdürülebilirliği açısından da kritik öneme sahip polinatör organizmalar arasında yer almaktadır. Dünya genelindeki birçok yabani ve kültür bitkisi türü, başarılı tozlaşma süreçleri için polinatörlere bağımlıdır (Klein ve ark., 2007). Bu nedenle arı popülasyonlarında meydana gelen değişimler, bitki çoğalması, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem işleyişi üzerinde doğrudan etkiler oluşturabilmektedir.

Ekosistem sağlığının önemli bileşenlerinden biri, bitki-mikrobiyota etkileşimleridir. Toprak ve bitki yüzeyinde bulunan mikrobiyal topluluklar; bitkilerin besin elementi

алымы, büyümesi, stres toleransı ve sekonder metabolit üretimi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu durum özellikle nektar ve polen kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Nektar şeker kompozisyonu, amino asit profili, uçucu organik bileşikler ve fenolik bileşikler gibi parametreler hem çevresel stres faktörlerinden hem de mikrobiyal süreçlerden etkilenmektedir (Nicolson ve Thornburg, 2007; Alvarez-Suarez ve ark., 2013).

Bitki kaynaklı bu değişimler, bal arılarının beslenme davranışları ve foraging tercihleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Arılar, nektar ve polen kalitesindeki değişimlere oldukça duyarlı organizmalardır. Besin kalitesinde meydana gelen değişimler; koloni gelişimi, bağışıklık sistemi fonksiyonları, antioksidan kapasite, larval gelişim ve genel koloni sağlığı üzerinde belirleyici rol oynayabilmektedir (Goulson ve ark., 2015). Dolayısıyla arı davranışlarında ve koloni performansında gözlenen değişimler, çevresel kalite ve ekosistem sağlığındaki değişimlerin biyolojik yansımaları olarak değerlendirilebilir.

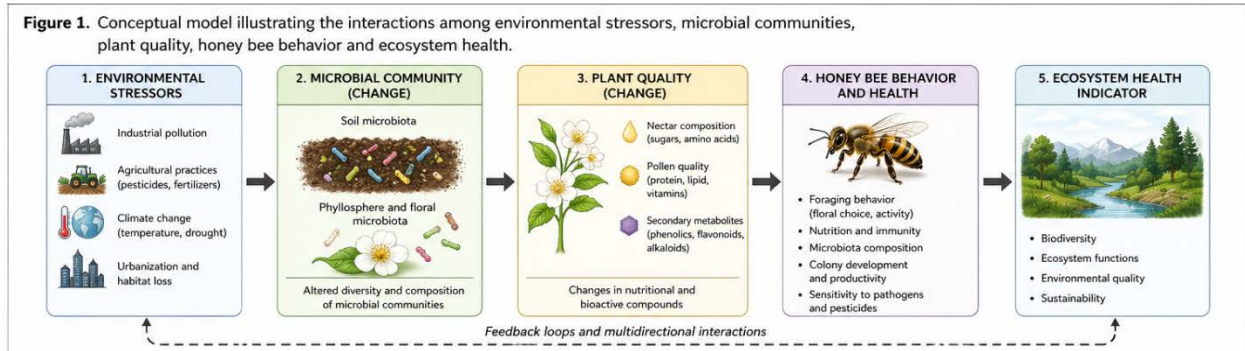
Bunun yanı sıra çevresel stres faktörlerinin arı bağırsak mikrobiyotası üzerinde de önemli etkiler oluşturduğu bildirilmektedir. Arı mikrobiyotası; besin sindirimi, bağışıklık sistemi düzenlenmesi, detoksifikasyon mekanizmaları ve patojen baskılanması gibi temel fizyolojik süreçlerde kritik rol oynamaktadır (Engel ve Moran, 2013). Özellikle antibiyotik maruziyetinin bağırsak mikrobiyotasını bozarak Nosema enfeksiyonlarına duyarlılığı artırabildiği bildirilmektedir (Li et al., 2017). Pestisit maruziyeti, habitat kaybı, monokültür tarım uygulamaları ve iklim değişikliği gibi çevresel baskılar, arı mikrobiyotasında disbiyotik değişimlere yol açabilmekte ve koloni dayanıklılığını azaltabilmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Bal arısı mikrobiyotasını etkileyen başlıca çevresel stres faktörleri ve olası biyolojik etkileri

Çevresel Stres Faktörü	Mikrobiyota Üzerindeki Olası Etkiler	Koloni/Fizyolojik Sonuçlar	İlgili Literatür
Pestisit maruziyeti	Mikrobiyal çeşitlilikte azalma, disbiyozis	Bağışıklık baskılanması, koloni zayıflaması	Motta ve ark., 2018
Ağır metal birikimi	Mikrobiyal topluluk yapısında değişim	Detoksifikasyon stresinde artış	Conti ve Botrè, 2001
Antibiyotik kullanımı	Yararlı bağırsak bakterilerinin azalması	Patojenlere duyarlılıkta artış	Raymann ve ark., 2017
Monokültür tarım sistemleri	Mikrobiyal çeşitlilikte azalma	Beslenme yetersizliği ve stres	Goulson ve ark., 2015
Habitat kaybı	Mikrobiyal kaynak çeşitliliğinde azalma	Foraging davranışında bozulma	Potts ve ark., 2010
İklim değişikliği ve sıcaklık stresi	Mikrobiyal stabilitede bozulma	Koloni dayanıklılığında azalma	Traynor ve ark., 2020

Yetersiz polen çeşitliliği	Bağırsak mikrobiyotasında fonksiyonel zayıflama	Larval gelişimde gerileme	Anderson ve Ricigliano, 2017
Patojen ve parazit baskısı	Mikrobiyal denge bozukluğu	Koloni kayıplarında artış	Hamdi ve ark., 2011
Glyphosate maruziyeti	Çekirdek bağırsak bakterilerinde azalma	Enfeksiyonlara duyarlılık artışı	Motta ve ark., 2018
Çevresel mikrobiyal kirlilik	Çevresel mikroorganizma taşınımında artış	Ekosistem-koloni etkileşimlerinde değişim	Engel ve Moran (2013)

Bu durum, yalnızca bireysel arı sağlığını değil, aynı zamanda ekosistem düzeyindeki polinasyon süreçlerini de olumsuz etkileyebilmektedir. Çevresel stres faktörleri ile mikrobiyal ve ekolojik süreçler arasındaki etkileşim ağı Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Çevresel stres faktörleri, mikrobiyal topluluk yapısı, bitki kalitesi, arı davranışı ve ekosistem sağlığı arasındaki çok katmanlı biyolojik etkileşimleri gösteren kavramsal model.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, polinatör popülasyonlarındaki küresel azalmanın ekosistem hizmetleri üzerinde ciddi riskler oluşturduğunu göstermektedir (Potts ve ark., 2010). Polinatör kayıpları; bitki çoğalmasında azalma, genetik çeşitlilik kaybı, trofik etkileşim ağlarında bozulma ve ekosistem dayanıklılığında azalma gibi zincirleme ekolojik sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle bal arılarının korunması yalnızca ekonomik açıdan değil, aynı zamanda ekolojik sürdürülebilirlik açısından da stratejik önem taşımaktadır.

Çevresel stres faktörleri, mikrobiyal yapı, bitki kalitesi ve arı davranışı arasında çok katmanlı bir etkileşim ağı bulunmaktadır. Çevresel kirleticiler ve iklimsel stres faktörleri, mikrobiyal topluluk yapısını değiştirerek bitki fizyolojisi ve floral kalite üzerinde etkiler oluşturmaktadır; bu değişimler ise dolaylı olarak arı davranışları ve koloni sağlığına yansımaktadır. Böylece arılar, yalnızca çevresel kirleticilerin değil, aynı zamanda mikrobiyal ve ekolojik süreçlerin de bütüncül biyolojik göstergeleri haline gelmektedir.

Bu bağlamda bal arıları, çevresel kalite değerlendirmelerinde pasif biyolojik indikatörlerin ötesinde, ekosistem düzeyindeki biyolojik değişimlerin aktif yansıtıcıları olarak değerlendirilebilir. Arıların çevresel stres faktörlerine verdiği fizyolojik, davranışsal ve mikrobiyal yanıtlar; ekosistem dayanıklılığı, çevresel sürdürülebilirlik ve biyolojik çeşitlilik açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Sonuç olarak bal arıları, çevresel stres faktörleri ile mikrobiyal ve ekolojik süreçler arasındaki çok boyutlu ilişkilerin değerlendirilmesinde stratejik biyolojik model organizmalar arasında yer almaktadır. Bu yönüyle arılar, çevre mikrobiyolojisi, ekoloji, biyoteknoloji ve One Health yaklaşımının kesişim noktasında yer alan entegre çevresel izleme sistemlerinin temel bileşenleri arasında değerlendirilebilir.

Sonuç

Bal arıları (*Apis mellifera*), çevresel kirleticilere geniş ölçekte maruz kalmaları ve farklı ekolojik bileşenlerle sürekli etkileşim halinde olmaları nedeniyle çevresel kalite değerlendirmelerinde önemli biyolojik indikatör organizmalar arasında yer almaktadır. Arılar; hava, su, toprak ve bitki kaynaklı kimyasal ve mikrobiyal bileşenleri biyolojik sistemlerine taşıyabilmekte ve bu yönüyle çevresel değişimlerin bütüncül biyolojik yansımalarını ortaya koyabilmektedir.

Son yıllarda gelişen moleküler biyoloji ve yüksek verimli dizileme teknolojileri, arı mikrobiyotasının çevresel stres faktörlerine verdiği biyolojik yanıtların daha hassas şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Özellikle 16S rRNA dizileme, metagenomik, metatranskriptomik ve yüksek verimli dizileme yaklaşımları; arıların yalnızca kimyasal kirleticilerin değil, aynı zamanda çevresel mikrobiyal değişimlerin de biyolojik göstergeleri olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu gelişmeler, arı temelli çevresel izleme çalışmalarının kapsamını önemli ölçüde genişletmiştir.

Bal arılarının geniş foraging alanları ve farklı çevresel bileşenlerle kurdukları yoğun etkileşimler, bu organizmaların çevresel kirleticilere eş zamanlı maruziyetini mümkün kılmaktadır. Özellikle bal, polen, propolis ve balmumu gibi arı ürünlerinde biriken ağır metal ve pestisit kalıntıları, çevresel kirliliğin zamansal ve mekânsal dağılımının belirlenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bunun yanında arı mikrobiyotası ve arıların taşıdığı çevresel mikroorganizmalar, ekosistem düzeyindeki mikrobiyal değişimlerin izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Çevresel stres faktörlerinin mikrobiyal yapı, bitki kalitesi ve arı davranışı üzerindeki etkileri birlikte değerlendirildiğinde, bal arılarının ekosistem sağlığını yansıtan entegre biyolojik indikatörler olduğu açıkça görülmektedir. Arıların çevresel stres faktörlerine verdiği fizyolojik, davranışsal ve mikrobiyal yanıtlar; yalnızca çevresel kirlilik düzeylerini değil, aynı zamanda ekosistem fonksiyonlarındaki değişimleri de ortaya koyabilmektedir. Bu durum, bal arılarının klasik biyolojik indikatör organizmalara kıyasla daha kapsamlı çevresel bilgi sağlayabildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte arı temelli çevresel izleme çalışmalarında standart örnekleme protokollerinin ve metodolojik yaklaşımların sınırlı olması, farklı çalışmalar arasında karşılaştırılabilirlik açısından önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu nedenle gelecekte yapılacak araştırmalarda standart analiz yöntemlerinin geliştirilmesi ve

uzun dönemli saha çalışmalarının artırılması önem taşımaktadır. Ayrıca çoklu omik yaklaşımlar, yapay zekâ destekli veri analizi sistemleri ve yeni nesil biyoteknolojik yöntemlerin arı temelli çevresel izleme çalışmalarına entegre edilmesi, bu alandaki bilimsel hassasiyeti önemli ölçüde artıracaktır.

Sonuç olarak bal arıları, yalnızca çevresel kirleticilerin pasif biyolojik göstergeleri değil, aynı zamanda ekosistem düzeyindeki kimyasal, mikrobiyal ve ekolojik değişimlerin bütüncül biyolojik sensörleri olarak değerlendirilebilir. Bu yönüyle arılar, çevre mikrobiyolojisi, ekoloji, biyoteknoloji ve One Health yaklaşımı kapsamında geleceğin entegre çevresel izleme sistemleri için stratejik model organizmalar arasında yer almaktadır.

Kaynakça

- Alvarez-Suarez JM, Giampieri F, Battino M (2013). Honey as a source of dietary antioxidants: structures, bioavailability and evidence of protective effects against human chronic diseases. *Current Medicinal Chemistry* 20(5): 621–638.
- Anderson KE, Ricigliano VA (2017). Honey bee gut dysbiosis: a novel context of disease ecology. *Current Opinion in Insect Science* 22: 125–132.
- Bokulich NA, Mills DA (2013). Improved selection of internal transcribed spacer-specific primers enables quantitative, ultra-high-throughput profiling of fungal communities. *Applied and Environmental Microbiology* 79(8): 2519–2526.
- Conti ME, Botrè F (2001). Honeybees and their products as potential bioindicators of heavy metals contamination. *Environmental Monitoring and Assessment* 69: 267–282.
- Drew GC, Stevens EJ, King KC (2020). Microbial evolution and transitions along the parasite–mutualist continuum. *Nature Reviews Microbiology* 19: 623–638.
- Engel P, Moran NA (2013). The gut microbiota of insects – diversity in structure and function. *FEMS Microbiology Reviews* 37(5): 699–735.
- Goulson D, Nicholls E, Botías C, Rotheray EL (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347(6229): 1255957.
- Hamdi C, Balloi A, Essanaa J, Crotti E, Gonella E, Raddadi N, Ricci I, Baffoni L, Borin S, Manino A ve ark. (2011). Gut microbiome dysbiosis and honeybee health. *Journal of Applied Entomology* 135(7): 524–533.
- Jones JC, Fruciano C, Hildebrand F, Al Toufalilia H, Balfour NJ, Bork P, Engel P, Ratnieks FLW, Hughes WOH (2018). Gut microbiota composition is associated with environmental landscape in honey bees. *Ecology and Evolution* 8(1): 441–451.
- Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B* 274: 303–313.
- Kwong WK, Moran NA (2016). Gut microbial communities of social bees. *Nature Reviews Microbiology* 14: 374–384.

- Li JH, Evans JD, Li WF, Zhao YZ, DeGrandi-Hoffman G, Huang SK, Li ZG, Hamilton M, Chen YP (2017). New evidence showing that the destruction of gut bacteria by antibiotic treatment could increase the honey bee's vulnerability to *Nosema* infection. *PLoS ONE* 12(11): e0187505.
- Motta EVS, Raymann K, Moran NA (2018). Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 115(41): 10305–10310.
- Nicolson SW, Thornburg RW (2007). Nectar chemistry. In: Nicolson SW, Nepi M, Pacini E (eds), *Nectaries and Nectar*. Springer, Dordrecht, pp. 215–264.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 25(6): 345–353.
- Raymann K, Shaffer Z, Moran NA (2017). Antibiotic exposure perturbs the gut microbiota and elevates mortality in honeybees. *PLoS Biology* 15(3): e2001861.
- Traynor KS, Mondet F, de Miranda JR, Techer M, Kowallik V, Oddie MAY, Chantawannakul P, McAfee A (2020). *Varroa destructor*: A complex parasite, crippling honey bees worldwide. *Trends in Parasitology* 36(7): 592–606.
- Zheng H, Steele MI, Leonard SP, Motta EVS, Moran NA (2018). Honey bees as models for gut microbiota research. *Lab Animal* 47(11): 317–325.

Mikrobiyal Biyogübrelerin Bitki Kalitesi ve Polinatör Çekiciliği Üzerindeki Etkileri: Ekosistem Etkileşimleri

Microbial Biofertilizers, Plant Quality and Pollinator Interactions: A Multitrophic Perspective

Ümmügülsüm Erdoğan

Prof. Dr., Bayburt University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Bayburt, Türkiye.

Yaşar Erdoğan

Prof. Dr., Bayburt University, Demirözü Vocational School, Department of Veterinary Medicine, Bayburt, Türkiye.

Özet

Mikrobiyal biyogübreler, özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve arbusküler mikorizal funguslar (AMF), sürdürülebilir tarım sistemlerinde sentetik gübrelere alternatif olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu mikroorganizmaların bitki büyümesi, besin elementi alımı ve stres toleransı üzerindeki etkileri iyi bilinmekle birlikte, bitki kalitesi ve polinatör çekiciliği üzerindeki dolaylı etkileri henüz bütüncül bir çerçevede yeterince değerlendirilmemiştir. Bu nedenle bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinin ekosistem düzeyinde daha bütüncül şekilde değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu derlemede, mikrobiyal biyogübrelerin nektar ve polen bileşimi, sekonder metabolit üretimi ve uçucu organik bileşikler (VOC) üzerindeki etkileri ile bu değişimlerin polinatör davranışı üzerindeki yansımaları incelenmiştir. Mevcut bulgular, mikrobiyal uygulamaların bitki metabolizmasını değiştirerek nektar şeker profili, amino asit içeriği ve sekonder bileşiklerin kompozisyonunu etkileyebildiğini ve bunun da polinatör tercihleri ile foraging davranışlarında değişimlere yol açabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu etkilerin çevresel koşullara, bitki türüne ve mikrobiyal konsorsiyum yapısına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük ölçüde kontrollü koşullarda yürütüldüğü ve saha koşullarında koloni düzeyinde etkilerin yeterince test edilmediği dikkat çekmektedir. Bu durum, elde edilen bulguların arıcılık uygulamalarına doğrudan aktarılmasını sınırlamaktadır. Bu çerçevede, mikrobiyal biyogübre uygulamalarının yalnızca bitki verimliliği açısından değil, aynı zamanda polinatör davranışı, koloni gelişimi ve bal verimi üzerindeki potansiyel etkileri açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, mikrobiyal biyogübrelerin tarımsal üretim ile polinatör ekolojisi arasındaki etkileşimleri şekillendiren önemli bir faktör olduğu ve bu sistemlerin sürdürülebilir yönetiminde çok trofik düzeyde ele alınması gerektiği dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, özellikle nektar ve polen kalitesindeki değişimlerin arı beslenmesi ve koloni sağlığı üzerindeki etkileri daha ayrıntılı olarak ele alınmalıdır. Gelecek çalışmaların, bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerini iklimsel değişkenleri de içerecek şekilde saha koşullarında ve uzun dönemli olarak incelemesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: AMF, Biyogübre, nektar kalitesi, PGPR, polinatör çekiciliği

Abstract

Microbial biofertilizers, particularly plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), are increasingly gaining importance as sustainable alternatives to synthetic fertilizers. Although their effects on plant growth, nutrient uptake, and stress tolerance are well established, their indirect impacts on plant quality and pollinator attractiveness have not yet been sufficiently evaluated within a comprehensive framework. This highlights the need to better understand plant-microbe-pollinator interactions at the ecosystem level. This review examines the effects of microbial biofertilizers on nectar and pollen composition, secondary metabolite production, and volatile organic compounds (VOCs), as well as the implications of these changes for pollinator behavior. Current findings indicate that microbial applications can alter plant metabolism, influencing nectar sugar profiles, amino acid composition, and secondary metabolites, which in turn may affect pollinator preferences and foraging behavior. However, these effects are highly variable depending on environmental conditions, plant species, and the structure of microbial consortia. Moreover, most existing studies have been conducted under controlled conditions, and the effects at the colony level under field conditions remain insufficiently tested. This limitation restricts the direct application of findings to practical beekeeping systems. Therefore, microbial biofertilizer applications should be evaluated not only in terms of plant productivity but also regarding their potential effects on pollinator behavior, colony development, and honey production. In conclusion, microbial biofertilizers play a significant role in shaping interactions between agricultural production and pollinator ecology and should be considered within a multitrophic framework for sustainable management. Future studies should investigate plant-microbe-pollinator interactions under field conditions while incorporating climatic variables in long-term assessments.

Keywords: AMF, Biofertilizer, nectar quality, PGPR, pollinator attractiveness

Giriş

Tarımsal üretimde yoğun kimyasal gübre kullanımının neden olduğu çevresel sorunlar, sürdürülebilir ve ekolojik temelli alternatif üretim sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle toprak verimliliğinin korunması, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi ve agroekosistem dayanıklılığının artırılması açısından mikrobiyal biyogübreler önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Vessey, 2003; Bashan et al., 2014). Bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (Plant Growth Promoting Rhizobacteria; PGPR) ile arbusküler mikorizal funguslar (AMF), sürdürülebilir tarım uygulamalarında en yaygın kullanılan mikrobiyal biyogübre grupları arasında yer almaktadır.

PGPR ve AMF uygulamalarının bitki büyümesi, kök gelişimi, besin elementi alımı, stres toleransı ve verim üzerindeki olumlu etkileri çok sayıda çalışmada tespit edilmiştir (Smith & Read, 2010; Glick, 2012). Özellikle azot fiksasyonu, fosfor çözünürlüğünün artırılması, fitohormon üretimi ve rizosfer mikrobiyal aktivitesinin düzenlenmesi gibi mekanizmalar sayesinde bu mikroorganizmalar bitki gelişimini doğrudan desteklemektedir (Richardson et al., 2009). Ayrıca kuraklık, tuzluluk ve

сıcaklık stresi gibi abiyotik stres koşullarında bitki dayanıklılığını artırarak sürdürülebilir üretime katkı sağlamaktadırlar (Ngumbi & Kloepper, 2016). Son yıllarda yapılan çalışmalar, mikrobiyal biyogübrelerin yalnızca bitki büyümesini değil, aynı zamanda bitki kalite parametrelerini de etkileyebildiğini göstermektedir. Özellikle nektar şeker kompozisyonu, polen besin içeriği, amino asit profili, sekonder metabolit üretimi ve uçucu organik bileşiklerin (VOC) sentezi üzerinde önemli değişimler meydana gelebilmektedir (Pineda et al., 2010). Bu değişimler, polinatör böceklerin bitki tercihlerini ve foraging davranışlarını doğrudan etkileyebilecek potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, bu ilişkilerin çoğu dolaylı mekanistik çıkarımlara dayanmakta olup farklı ekosistemlerde elde edilen sonuçlar her zaman birbiriyle uyumlu değildir. Özellikle kontrollü koşullarda elde edilen bulguların doğal agroekosistemlere ne ölçüde yansıtılabileceği hâlen tartışmalıdır.

Polinatörler, doğal ekosistemlerin devamlılığı ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Dünya genelindeki çiçekli bitki türlerinin yaklaşık %75'i hayvanlarla gerçekleşen polinasyona bağımlıdır (Klein et al., 2007). Bal arıları (*Apis mellifera*), yabani arılar, kelebekler ve diğer polinatörler, hem doğal bitki topluluklarının devamlılığında hem de tarımsal ürün veriminde temel rol oynamaktadır (Potts et al., 2010). Bununla birlikte habitat kaybı, pestisit kullanımı, iklim değişikliği ve beslenme yetersizlikleri polinatör popülasyonları üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bitki-mikrop-polinatör ilişkileri, son yıllarda giderek önem kazanan çok trofik ekolojik etkileşimler arasında değerlendirilmektedir (Schiestl & Johnson, 2013). Mikrobiyal biyogübre uygulamaları sonucunda bitki metabolizmasında meydana gelen değişimlerin, polinatör davranışları ve koloni performansı üzerinde dolaylı etkiler oluşturabileceği ortaya konmuştur. Özellikle nektar ve polen kalitesindeki değişimlerin arı beslenmesi, bağışıklık sistemi, larva gelişimi ve bal üretimi üzerinde etkili olabileceği rapor edilmiştir (Alaux et al., 2010; Brodschneider & Crailsheim, 2010).

Bununla birlikte mevcut literatür incelendiğinde, çalışmaların büyük çoğunluğunun kontrollü sera koşullarında yürütüldüğü ve saha koşullarında koloni düzeyindeki etkilerin sınırlı ölçüde araştırıldığı görülmektedir. Ayrıca çevresel değişkenler, bitki türleri, mikrobiyal konsorsiyum yapıları ve polinatör çeşitliliği arasındaki karmaşık ilişkiler henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır.

Bu derlemenin amacı, mikrobiyal biyogübrelerin bitki kalitesi, floral kaynak özellikleri ve polinatör davranışları üzerindeki etkilerini çok trofik ekosistem perspektifinde değerlendirmek ve mevcut bilgi boşluklarını ortaya koymaktır.

Mikrobiyal Biyogübreler ve Temel Etki Mekanizmaları

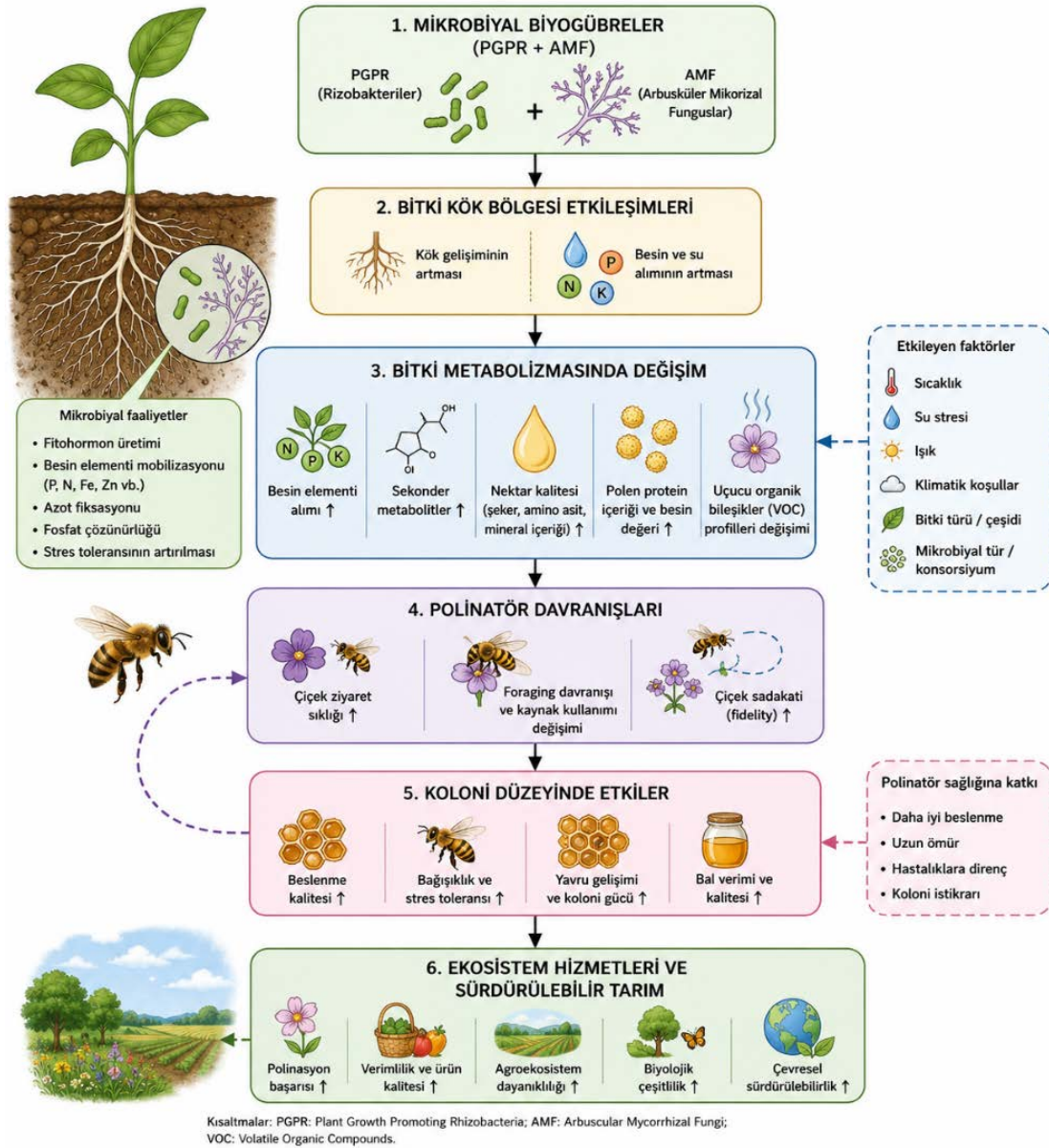
Mikrobiyal biyogübreler, bitki gelişimini destekleyen faydalı mikroorganizmaları içeren biyolojik preparatlar olarak tanımlanmaktadır (Vessey, 2003). Bu mikroorganizmalar, bitki kök bölgesinde kolonize olarak bitki büyümesini doğrudan veya dolaylı mekanizmalarla teşvik etmektedir. Tarımsal sistemlerde en yaygın kullanılan mikrobiyal biyogübre grupları arasında PGPR, arbusküler mikorizal funguslar (AMF), azot fikse eden bakteriler ve fosfat çözücü mikroorganizmalar yer almaktadır (Bashan et al., 2014).

PGPR grubu içerisinde özellikle *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum* ve *Rhizobium* türleri yaygın olarak çalışılmaktadır. Bu bakterilerin azot fiksasyonu, fosfor çözünürlüğünün artırılması, siderofor üretimi ve çeşitli fitohormonların sentezi yoluyla bitki gelişimini destekleyebildiği öne sürülmektedir (Glick, 2012). Ayrıca bazı PGPR türlerinin bitki patojenlerine karşı biyolojik kontrol mekanizmalarında rol oynayabildiği de belirtilmektedir (Lugtenberg & Kamilova, 2009).

AMF ise bitki kökleriyle simbiyotik ilişki kurarak özellikle fosfor ve su alım kapasitesini artırabileceği öne sürülmektedir. Mikorizal hif ağları sayesinde kök yüzey alanı genişlemekte ve bitkilerin kuraklık ile besin yetersizliği gibi stres koşullarına dayanıklılığı artmaktadır (Smith & Read, 2010). Bunun yanında AMF uygulamalarının bitki sekonder metabolizması üzerinde etkili olduğu ve fenolik bileşikler ile antioksidan kapasiteyi değiştirebildiği rapor edilmiştir (Begum et al., 2019).

Bu mikroorganizmaların etkileri yalnızca bitki büyümesiyle sınırlı değildir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, mikrobiyal biyogübrelerin bitkilerde karbon metabolizması, şeker taşınımı, amino asit sentezi ve uçucu organik bileşik üretimi üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir (Pineda et al., 2010). Özellikle çiçekli bitkilerde nektar ve polen kalitesinde meydana gelen değişimler, polinatör çekiciliği açısından önemli sonuçlar doğurabilmektedir. Bitki kök bölgesindeki mikrobiyal topluluklar, bitki savunma mekanizmalarının düzenlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. PGPR ve AMF uygulamaları sonucunda jasmonat, salisilik asit ve etilen gibi sinyal yolları aktive olmakta ve bitkilerin biyotik streslere karşı dayanıklılığı artabilmektedir (Pieterse et al., 2014). Bu durum, yalnızca bitki sağlığı açısından değil, aynı zamanda çiçek özellikleri ve polinatör etkileşimleri bakımından da önem taşımaktadır. Bazı çalışmalar, mikrobiyal biyogübre uygulamalarının bitki gelişimi, verim ve besin içeriği üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceğini göstermektedir (Begum et al., 2019). Çiçeklenme dinamiklerindeki bu değişimler, polinatör ziyaret sıklığını ve dolayısıyla polinasyon başarısını etkileyebilmektedir. Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının bitki metabolizması, polinatör davranışları ve ekosistem hizmetleri üzerindeki çok trofik etkileri Şekil 1’de özetlenmiştir.

Mikrobiyal biyogübrelerin etkileri; bitki türü, mikrobiyal konsorsiyum yapısı, toprak özellikleri ve çevresel koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle farklı agroekolojik koşullarda gerçekleştirilecek uzun dönemli saha çalışmaları, bu etkileşimlerin daha iyi anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. Mikrobiyal biyogübrelerin bitki metabolizması, polinatör davranışları ve ekosistem hizmetleri üzerindeki çok trofik etkilerinin kavramsal gösterimi

PGPR = Plant Growth Promoting Rhizobacteria; AMF = Arbuscular Mycorrhizal Fungi; VOC = Volatile Organic Compounds.

Şekil 1’de özetlenen bu çok trofik etkileşimler, mikrobiyal biyogübre uygulamalarının yalnızca bitki fizyolojisini değil, aynı zamanda polinatör davranışları ve ekosistem hizmetlerini de etkileyebileceğini göstermektedir.

Mikrobiyal Biyogübrelerin Nektar ve Polen Kalitesi Üzerindeki Etkileri

Nektar ve polen, polinatörler için temel besin kaynaklarıdır. Nektarın şeker kompozisyonu ile polenin protein, lipid, vitamin ve amino asit içeriği, polinatörlerin bitki tercihlerini ve beslenme davranışlarını doğrudan etkileyebilmektedir (Nicolson

& Thornburg, 2007). Bu nedenle bitki metabolizmasında meydana gelen değişimler, yalnızca bitki fizyolojisini değil, aynı zamanda polinatör ekolojisini de şekillendirebilmektedir. Mikrobiyal biyogübre gruplarının bitki kalitesi ve polinatör etkileşimleri üzerindeki temel etkileri Tablo 1’de özetlenmiştir.

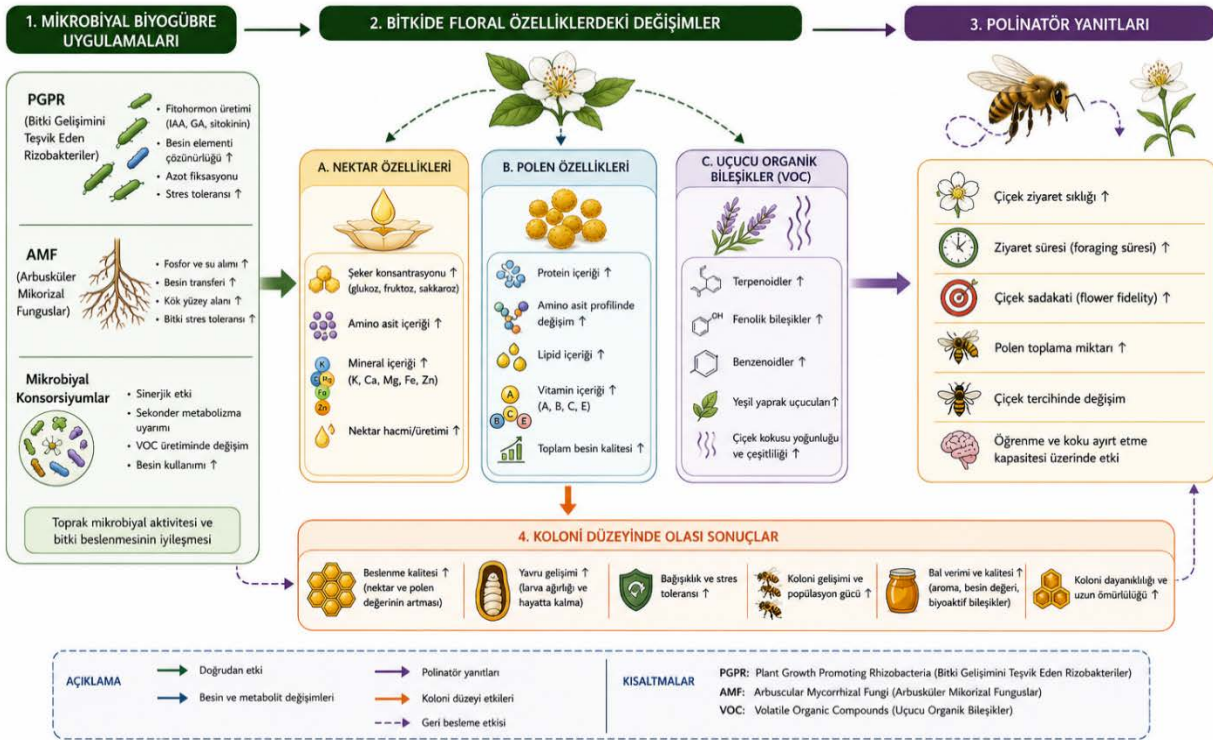
Tablo 1. Mikrobiyal biyogübrelerin bitki kalitesi ve polinatör etkileşimleri üzerindeki potansiyel etkileri

Mikrobiyal Grup	Temel Mekanizma	Bitki Üzerindeki Etkiler	Polinatörler Üzerindeki Olası Etkiler	Temel Kaynaklar
PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)	Fitohormon üretimi, fosfor çözünürlüğü, azot fiksasyonu	Bitki büyümesi ↑, çiçeklenme ↑, nektar üretimi ↑	Polinatör ziyaret sıklığında artış, foraging davranışında değişim	Glick (2012); Pineda et al. (2010)
AMF (Arbusküler mikorizal funguslar)	Fosfor ve su alımının artırılması	Polen protein kalitesi ↑, stres toleransı ↑	Polen besin değerinin artmasına bağlı beslenme kalitesinde iyileşme	Smith & Read (2010)
Fosfat çözücü bakteriler	Fosfor biyoyararlanımının artırılması	Çiçek gelişimi ve metabolizma aktivitesi ↑	Floral kaynak çekiciliğinde artış potansiyeli	Richardson et al. (2009)
Azot fikse eden bakteriler	Atmosferik azotun bitkiye kazandırılması	Protein sentezi ve vegetatif gelişim ↑	Polen amino asit kompozisyonunda değişim	Vessey (2003)
Mikrobiyal konsorsiyumlar	Çoklu mikrobiyal sinerji	Sekonder metabolit ve VOC üretiminde değişim	Çiçek tercihi ve ziyaret davranışlarında değişim	Compant et al. (2019); Raguso (2008)

PGPR = Plant Growth Promoting Rhizobacteria; AMF = Arbuscular Mycorrhizal Fungi; VOC = Volatile Organic Compounds.

Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının nektar bileşimini etkileyebildiği birçok çalışmada bildirilmiştir. Özellikle PGPR uygulamalarının nektardaki sakkaroz, glukoz ve fruktoz oranlarında değişiklik oluşturabildiği ve bazı durumlarda toplam nektar üretimini arttırabildiği belirtilmektedir (Vannette et al., 2013). Bu durumun, bitki karbon metabolizmasının mikrobiyal aktivite tarafından düzenlenmesiyle ilişkili olduğu bazı çalışmalar tarafından gösterilmektedir. Bal arıları ve diğer polinatörler, nektarın şeker konsantrasyonu ve amino asit profiline karşı oldukça duyarlıdır. Özellikle prolin, fenilalanin ve bazı esansiyel amino asitlerin polinatör tercihlerini

etkileyebildiği literatürde belirtilmektedir (Petanidou et al., 2006). Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının amino asit sentezi ve taşınımı üzerinde oluşturduğu değişimler, dolaylı olarak polinatör ziyaret davranışlarını değiştirebilir. Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının nektar, polen ve VOC profilleri üzerindeki etkileri ile bunların polinatör davranışlarına olası yansımaları Şekil 2’de kavramsal olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının nektar, polen ve uçucu organik bileşik (VOC) profilleri üzerindeki etkileri ile bunun polinatör davranışları ve koloni düzeyindeki olası sonuçlarına ilişkin kavramsal gösterim

PGPR = Plant Growth Promoting Rhizobacteria; AMF = Arbuscular Mycorrhizal Fungi; VOC = Volatile Organic Compounds.

AMF uygulamalarının polen kalitesi üzerinde de önemli etkiler oluşturduğu ortaya konmuştur. Mikorizal simbiyoz sayesinde bitkilerde fosfor ve mineral madde alımının artması, polen protein içeriğinin yükselmesine katkı sağlayabilmektedir. Polen protein kalitesi, özellikle bal arılarında larva gelişimi, hipofaringeal bez gelişimi ve bağışıklık sistemi açısından kritik öneme sahiptir (Brodschneider & Crailsheim, 2010). Bazı çalışmalar, mikrobiyal biyogübre uygulamalarının çiçeklenme süresini ve çiçek yoğunluğunu artırarak polinatör çekiciliğini dolaylı olarak güçlendirebildiğini göstermektedir (Smith & Read, 2010). Çiçek sayısındaki artış, polinatör ziyaret sıklığını artırabilirken; nektar ve polen kalitesindeki iyileşmeler polinatörlerin aynı bitkide daha uzun süre foraging yapmasına neden olabilmektedir.

Микробиал биогүб्रेлерін секондер метаболит үетімі үетіндегі еткілері де полінатör давраңшлары ачısından өнем таşıмактады. Өзеліле флавоноидлер, фенолік білесіклер ве алкалоидлер гібі секондер метаболитлер, һем біткі савунма меканізмаларында һем де полінатör терчіһнде рол ойнайабілмектеді (Schiestl & Johnson, 2013). PGPR ве AMF уығуламаларының бу білесіклерін синтезіне деғіштребілдігі базі чалышмалар таравында гөстерілміштір. Аңақ фаркы біткі түрлері ве чевресел кошулар алтында герчеклештірілен чалышмаларың соңулары һер заман тутарлы деғілдір ве базі микробиал уығуламаларың полінатör давраңшлары үетінде сыңрлы еткілер олустурдуғу да деғерлендірілмектеді.

Бунуңла бірлікте, микробиал биогүб्रेлерін нектар ве полен калітесі үетіндегі еткілерінің олдуқа деғішкен олдуғу гөрүлмектеді. Біткі түрү, топрак ыапысы, іклім кошулары, микробиал консорсіуым өзеліклері ве чевресел стрес фактörлері бу соңулары өнемлі өлчуде еткілейбілмектеді (Compant et al., 2019). Бу неденле меваут булгуларың фаркы екосістемлерде доғруланması герекмектеді.

Аырыа меваут чалышмаларың бүүк бөлүмү контроллу сера кошуларында герчеклештірілміштір. Саһа кошуларында үүрүтүлен узун дөнемлі чалышмаларың ыетерсіз олması, елде еділен булгуларың доғрудан арычылык уығуламаларына актарылmasını сыңрландырмактады. Өзеліле колоні дүзеындегі еткілерің ве бал веріміне оланы ыансымаларың даһа аырыңтылы шекілде араштырылması герекмектеді.

Учүцу Органік Білесіклер (VOC) ве Полінатör Давраңшлары

Біткілер таравында синтезленен учүцу органік білесіклер (Volatile Organic Compounds; VOC), полінатörлерің чічеклері таңымасында, үөнемлі давраңшларының шекілленмесінде ве бесін каянағы сежімінде темел рол ойнайаны кымысал сыңаллерді (Dudareva & Pichersky, 2006). Чічек кокулары, өзеліле бал арылары ве дігер бөчек полінатörлер ічін чічеклерің булуңmasını колаылаштыран өнемлі бір ілетішім меканізмасыдыр. Чічеклерден салыңан VOC профіллері; терпенонідлер, бензенонідлер, ыағ асіді түревлері ве чешітлі ароматік білесіклерден олустмактады. Бу білесіклерің мыктары ве копозісыюну, біткі түрүне, чевресел кошулара ве фізыоложік дүрүме бағлы оларақ деғішкылык гөстерібілмектеді (Raguso, 2008). Соң ыыларда ыапыланы чалышмалар, ризосфер микробиотасының ве микробиал биогүбре уығуламаларының бу кымысал сыңал сістемлеріне еткілейбілегеіні гөстермектеді.

PGPR уығуламаларының біткілерде учүцу терпенонід үетіміне атырабілдігі ве бунуң полінатör зіярет үөғуңлуғу үетінде еткілі олбілегеі ілері сүрүлмектеді (Pineda et al., 2010). Өзеліле Bacillus ве Pseudomonas түрлерінің біткі савунма ыолларың актыве едерек VOC синтезіне рол ойнайаны метаболік ыоллары еткілейбілдігі дүшүнүлмектеді. Бу дүрүм, ыалыңза полінатör давраңшларың деғіл, аыңы заманда һербівор бөчеклерле оланы еткілесімлері де деғіштребілмектеді.

AMF уығуламаларының да чічек кокусы профіллері үетінде еткілі олдуғу чалышмаларла дестекленмектеді. Микоризал сімбіюз соңуанда біткілерде карбон акышы ве секондер метаболізма деғішебілмекте; бу дүрүм чічеклерден ыапыланы ароматік білесіклерің мыктарың еткілейбілмектеді (Becklin et al., 2011). Базі чалышмаларда AMF колонізасыюнуң чічек кокуларың гүчлендіререк полінатör зіяретлеріне атырдығы беліртілміштір.

Bal arıları, çiçek kokularına karşı oldukça gelişmiş bir duyuusal algıya sahiptir. Arılar, nektar kalitesi ile ilişkili kokusal sinyalleri öğrenebilmekte ve bu sinyalleri foraging sırasında kullanabilmektedir (Wright et al., 2013). Bu nedenle mikrobiyal biyogübrelerin VOC profilleri üzerindeki etkileri, arıların çiçek tercihleri ve ziyaret süreleri üzerinde doğrudan sonuçlar doğurabilir. Ayrıca çiçek nektarında bulunan mikroorganizmaların da VOC oluşumuna katkı sağlayabildiği öne sürülmektedir. Özellikle bazı maya ve bakterilerin nektar fermantasyonu yoluyla çiçek kokularını değiştirdiği ve bunun polinatör davranışlarını etkileyebildiği gösterilmiştir (Vannette et al., 2013). Bu durum, bitki-mikrop-polinatör ilişkilerinin yalnızca kök bölgesinde değil, çiçek mikroekosistemlerinde de şekillendiğini ortaya koymaktadır.

VOC profillerindeki değişimlerin her zaman olumlu sonuçlar doğurmadığı da dikkat çekmektedir. Bazı mikrobiyal uygulamalar, belirli polinatör grupları için çekiciliği artırırken diğer gruplar için azaltabilmektedir. Bu nedenle mikrobiyal biyogübrelerin ekosistem düzeyindeki etkileri tür-spesifik olarak değerlendirilmelidir. Bitki-mikrop-polinatör ilişkilerinin ekosistem düzeyindeki çok yönlü etkileşim ağı Şekil 3'te özetlenmiştir. Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının nektar, polen ve polinatör davranışları üzerindeki bildirilen etkilerine ilişkin bazı örnek çalışmalar Tablo 2'de sunulmuştur.

İklim değişikliği, sıcaklık artışı ve kuraklık gibi çevresel stres faktörlerinin de VOC üretimini etkilediği bilinmektedir.

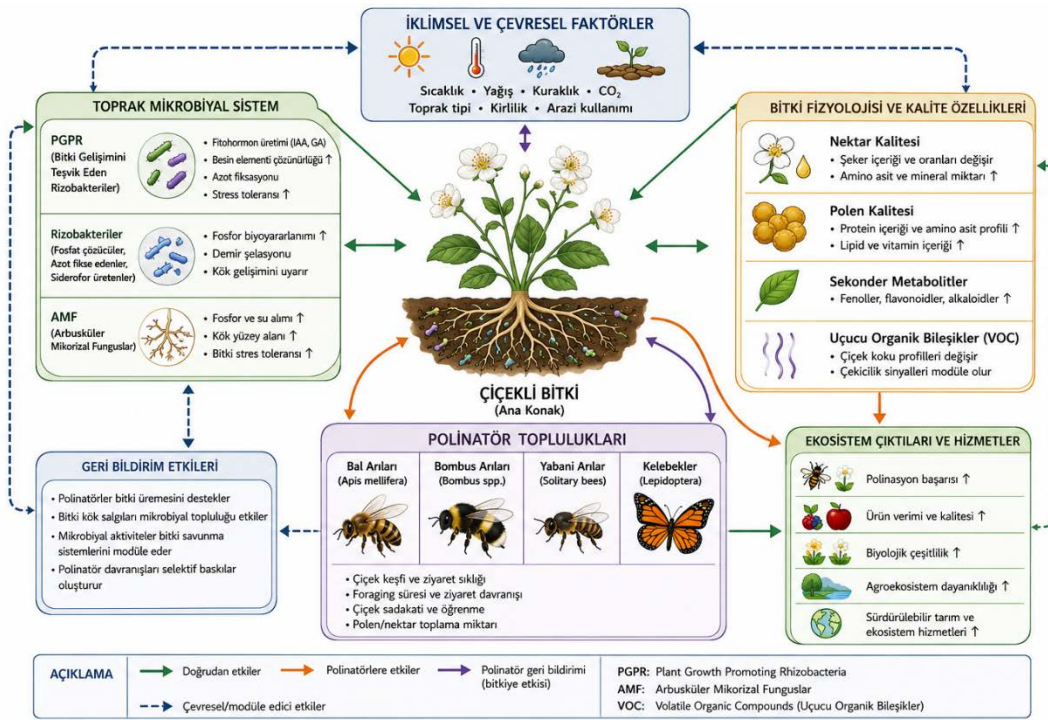
Tablo 2. Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının nektar, polen ve polinatör davranışları üzerine bildirilen etkileri

Çalışma	Bitki Türü / Sistem	Mikrobiyal Uygulama	Bildirilen Etki	Polinatörle İlişkili Sonuç
Becklin et al. (2011)	Alpine pollination web	Toprak fungal toplulukları	Floral sinyal ve ödüllerde değişim	Polinatör ziyaret davranışlarında değişim gözlemlendi
Pineda et al. (2010)	Çeşitli tarımsal bitkiler	PGPR	Sekonder metabolizma ve VOC değişimi	Böcek davranışlarının etkilenebileceği bildirildi
Vannette et al. (2013)	Nektar mikrobiyotası	Nektar bakterileri ve mayalar	Floral VOC profili değişimi	Polinatör tercihinde değişim
Alaux et al. (2010)	Bal arısı kolonileri	Beslenme kalitesi çalışması	İmmün yanıt ↑	Yüksek kaliteli beslenmenin koloni sağlığını desteklediği bildirildi
Di Pasquale et al. (2013)	Bal arısı Kolonileri	Polen kalite çalışması	Koloni gelişimi ↑	Polen çeşitliliğinin arı sağlığı için kritik olduğu bildirildi

Vaudo et al. (2015)	Çeşitli polinatör sistemleri	Floral kaynak değerlendirmesi	Beslenme kalitesi ↑	Polinatör restorasyonu açısından önemli sonuçlar
---------------------	------------------------------	-------------------------------	---------------------	--

PGPR = Plant Growth Promoting Rhizobacteria; AMF = Arbuscular Mycorrhizal Fungi; VOC = Volatile Organic Compounds.

Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmaların, mikrobiyal biyogübre uygulamaları ile iklimsel değişkenlerin ortak etkilerini değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3. Bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinin ekosistem düzeyindeki çok yönlü ilişkilerinin kavramsal ağı

PGPR = Plant Growth Promoting Rhizobacteria; AMF = Arbuscular Mycorrhizal Fungi; VOC = Volatile Organic Compounds.

Polinatör Sağlığı ve Koloni Düzeyinde Olası Etkiler

Polinatörler, doğal ekosistemlerin sürdürülebilirliği ve tarımsal üretimin devamlılığı açısından temel ekosistem hizmetleri sunmaktadır. Özellikle bal arıları (*Apis mellifera*), küresel ölçekte ekonomik değeri yüksek birçok tarımsal ürünün polinasyonunda kritik rol oynamaktadır (Klein et al., 2007). Bununla birlikte son yıllarda polinatör popülasyonlarında meydana gelen azalmalar, habitat kaybı, pestisit kullanımı, iklim değişikliği, hastalıklar ve beslenme yetersizlikleri ile ilişkilendirilmektedir (Potts et al., 2010). Bal arılarında koloni sağlığı ve üretim performansı büyük ölçüde beslenme kalitesine bağlıdır. Polen, işçi arılar için temel protein, lipid, vitamin ve mineral

kaynağıdır. Nektar ise enerji metabolizmasının temel karbonhidrat kaynağını oluşturmaktadır (Brodschneider & Crailsheim, 2010). Bu nedenle nektar ve polen kalitesinde meydana gelen değişimler, koloni gelişimi üzerinde doğrudan etkiler oluşturabilmektedir.

Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının polen protein içeriği ve amino asit kompozisyonu üzerinde oluşturduğu değişimlerin, arı beslenmesini olumlu yönde etkileyebileceği belirtilmektedir. Özellikle yüksek kaliteli polen kaynaklarının hipofaringeal bez gelişimi, yavru besleme kapasitesi ve bağışıklık sistemi üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır (Alaux et al., 2010). Bu nedenle mikrobiyal biyogübre uygulamalarının dolaylı olarak koloni dayanıklılığını artırabileceği öne sürülmektedir. Bununla birlikte, bu etkilerin büyük ölçüde dolaylı çıkarımlara dayandığı ve saha koşullarında gerçekleştirilen koloni ölçekli çalışmaların hâlen sınırlı olduğu unutulmamalıdır.

Bazı çalışmalar, bitki besin kalitesindeki iyileşmenin arıların foraging davranışlarını da etkileyebildiğini göstermektedir. Polen ve nektar kalitesindeki artış, işçi arıların aynı bitki türüne daha yüksek ziyaret sıklığı göstermesine neden olabilmektedir. Bu durum, hem polinasyon başarısını hem de koloniye taşınan besin miktarını artırabilir (Vaudo et al., 2015). Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının sekonder metabolit üretimi üzerindeki etkileri de arı sağlığı açısından önem taşımaktadır. Özellikle flavonoidler ve fenolik bileşikler gibi bazı bitkisel metabolitlerin antioksidan ve antimikrobiyal özellikleri sayesinde arı bağışıklık sistemi üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceği öne sürülmektedir (Simone-Finstrom & Spivak, 2012). Bununla birlikte bazı sekonder bileşiklerin yüksek konsantrasyonlarda toksik etkiler oluşturabileceği de unutulmamalıdır. Koloni düzeyinde değerlendirildiğinde, yüksek kaliteli besin kaynaklarının yavru gelişimi, işçi arı ömrü, koloni popülasyonu ve bal verimi üzerinde belirgin etkileri bulunmaktadır. Özellikle protein bakımından zengin polen kaynaklarının erken ilkbahar döneminde koloni gelişimini hızlandırabildiği bilinmektedir (Di Pasquale et al., 2013). Bu bağlamda mikrobiyal biyogübre uygulamalarının tarımsal alanlardaki floral kaynak kalitesini artırması, arıcılık açısından önemli avantajlar sağlayabilir. Bununla birlikte mevcut literatürde doğrudan mikrobiyal biyogübre uygulamaları ile koloni performansı arasındaki ilişkileri inceleyen saha çalışmalarının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Çalışmaların büyük bölümü bitki fizyolojisi veya laboratuvar düzeyindeki polinatör davranışlarına odaklanmıştır. Gerçek agroekosistem koşullarında gerçekleştirilecek uzun dönemli koloni çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca mikrobiyal biyogübrelerin etkileri çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Toprak özellikleri, iklim koşulları, bitki türü, mikrobiyal çeşitlilik ve tarımsal yönetim uygulamaları bu süreçlerde belirleyici rol oynayabilmektedir. Bu nedenle gelecekte gerçekleştirilecek çalışmaların çok disiplinli bir yaklaşımla planlanması önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, mikrobiyal biyogübrelerin yalnızca bitki verimliliği açısından değil; polinatör sağlığı, koloni gelişimi ve agroekosistem sürdürülebilirliği açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinin çok trofik düzeyde ele alınması, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesinde önemli katkılar sağlayacaktır.

Gelecek Perspektifler ve Araştırma İhtiyaçları

Bitki-mikrop-polinatör etkileşimleri, sürdürülebilir tarım ve ekosistem yönetimi açısından giderek daha önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bununla birlikte mevcut literatür incelendiğinde, mikrobiyal biyogübrelerin polinatör ekolojisi üzerindeki etkilerine ilişkin önemli bilgi boşluklarının bulunduğu görülmektedir. Özellikle kontrollü koşullarda elde edilen bulguların saha ekosistemlerine ne ölçüde yansıtılabileceği henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Ayrıca mevcut çalışmaların yöntemsel farklılıklar içermesi, elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. Mevcut bilgi boşlukları ve gelecekte öncelik verilmesi gereken araştırma alanları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerinde mevcut bilgi boşlukları ve gelecekteki araştırma öncelikleri

Araştırma Alanı	Mevcut Durum	Temel Eksiklik	Gelecekteki Araştırma İhtiyacı
Nektar bileşimi	Kontrollü koşullarda sınırlı veri mevcut	Saha koşullarında uzun dönemli veri eksikliği	Farklı iklim koşullarında nektar metabolom analizleri
Polen kalitesi	Polen protein içeriği üzerine çalışmalar mevcut	Koloni düzeyindeki etkiler yetersiz	Arı fizyolojisi ve yavru gelişimi ile ilişkili çalışmalar
VOC profilleri	Floral VOC değişimleri gösterildi	Tür-spesifik polinatör yanıtları belirsiz	Gerçek agroekosistemlerde davranış analizleri
PGPR-AMF etkileşimleri	Tekli uygulamalar daha yaygın	Mikrobiyal konsorsiyum etkileri sınırlı	Çoklu mikrobiyal uygulama çalışmaları
Polinatör davranışı	Ziyaret sıklığı verileri mevcut	Öğrenme ve çiçek sadakati çalışmaları az	Davranışsal ve nöroekolojik araştırmalar
Koloni performansı	Dolaylı çıkarımlar mevcut	Uzun dönem saha çalışmaları yetersiz	Bal verimi ve koloni sağlığı odaklı çalışmalar
İklim değişikliği etkileri	Teorik değerlendirmeler mevcut	Çok faktörlü deney eksikliği	İklim senaryoları ile entegre çalışmalar
Yabani polinatörler	Çalışmalar çoğunlukla bal arılarına odaklı	Tür çeşitliliği yeterince değerlendirilmedi	Bombus, solitary bees ve kelebek çalışmaları

PGPR = Plant Growth Promoting Rhizobacteria; AMF = Arbuscular Mycorrhizal Fungi; VOC = Volatile Organic Compounds.

Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu sera veya laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ancak doğal agroekosistemlerde bitki-mikrop-polinatör ilişkileri çok daha karmaşık dinamikler içermektedir. Toprak özellikleri, sıcaklık, nem, yağış rejimi, bitki çeşitliliği ve çevresel stres faktörleri bu etkileşimleri doğrudan etkileyebilmektedir (Compant et al., 2019). Bu nedenle gelecekte gerçekleştirilecek çalışmaların uzun dönemli saha deneylerine dayandırılması büyük önem taşımaktadır. Özellikle farklı mikrobiyal konsorsiyumların nektar ve polen kalitesi üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı şekilde araştırılması gerekmektedir. PGPR ve AMF uygulamalarının birlikte kullanıldığı sistemlerde sinerjik etkilerin ortaya çıkabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında farklı bitki türlerinin mikrobiyal uygulamalara verdiği fizyolojik yanıtların da önemli ölçüde değişebileceği bilinmektedir (Smith & Read, 2010). Polinatör davranışlarının değerlendirilmesinde yalnızca ziyaret sıklığının incelenmesi yeterli değildir. Gelecek çalışmalarda; foraging süresi, çiçek sadakati, öğrenme ve yönelim davranışları, polen toplama kapasitesi, koloni gelişimi, bal verimi ve bağışıklık parametreleri gibi daha kapsamlı biyolojik göstergelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca nektar ve polen metabolomunun ileri analitik yöntemlerle incelenmesi, mikrobiyal biyogübre uygulamalarının bitki besin kalitesi üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı şekilde ortaya koyabilir. Özellikle LC-MS/MS ve GC-MS tabanlı metabolomik analizlerin gelecekte bu alanda önemli katkılar sağlayacağı ortaya konmaktadır (Raguso, 2008). İklim değişikliği de bitki-mikrop-polinatör etkileşimlerini şekillendiren temel faktörlerden biridir. Artan sıcaklıklar, kuraklık stresleri ve değişen yağış rejimleri hem bitki metabolizmasını hem de polinatör davranışlarını etkileyebilmektedir (Ngumbi & Kloepper, 2016). Bu nedenle gelecekteki çalışmaların iklim değişkenlerini de içeren çok faktörlü deneysel tasarımlarla yürütülmesi gerekmektedir.

Mikrobiyal biyogübrelerin sürdürülebilir arıcılık açısından potansiyel katkıları da dikkat çekmektedir. Özellikle floral kaynak kalitesinin artırılması yoluyla koloni gelişiminin desteklenmesi ve polinatör beslenmesinin iyileştirilmesi mümkün olabilir. Bununla birlikte, bazı mikrobiyal uygulamaların beklenmeyen ekolojik sonuçlar doğurabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle uygulamaların ekosistem düzeyinde dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca mevcut çalışmaların büyük bölümü bal arıları üzerine yoğunlaşmıştır. Oysa yabani arılar, bombus arıları, kelebekler ve diğer polinatör grupları ekosistem fonksiyonları açısından büyük önem taşımaktadır. Gelecek araştırmalarda farklı polinatör topluluklarının mikrobiyal biyogübre uygulamalarına verdiği yanıtların karşılaştırmalı olarak incelenmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, mikrobiyal biyogübrelerin bitki-mikrop-polinatör ilişkileri üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması, sürdürülebilir tarım sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Özellikle ekosistem temelli ve çok disiplinli araştırma yaklaşımlarının benimsenmesi, gelecekte bu alanın gelişimi açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç

Mikrobiyal biyogübreler, sürdürülebilir tarım uygulamalarında sentetik gübrelere alternatif olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve arbusküler mikorizal funguslar (AMF), bitki büyümesi, besin elementi alımı ve stres toleransı üzerinde önemli olumlu etkiler oluşturmaktadır (Vessey, 2003; Glick, 2012). Bununla birlikte son yıllarda yapılan çalışmalar, bu mikroorganizmaların yalnızca bitki verimliliğini değil, aynı zamanda bitki kalite parametrelerini ve polinatör çekiciliğini de etkileyebildiğini ortaya koymaktadır. Mikrobiyal biyogübre uygulamalarının nektar şeker profili, polen protein içeriği, amino asit kompozisyonu, sekonder metabolit üretimi ve uçucu organik bileşikler üzerinde değişimler oluşturabildiği görülmektedir. Bu değişimlerin polinatör davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğu ve ziyaret sıklığı, foraging davranışı ile çiçek tercihlerini değiştirebildiği bildirilmektedir (Raguso, 2008; Vannette et al., 2013).

Özellikle nektar ve polen kalitesindeki iyileşmelerin bal arılarında beslenme kalitesini artırabileceği, bunun da koloni gelişimi, bağışıklık sistemi ve bal verimi üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceği öne sürülmektedir (Brodshneider & Crailsheim, 2010). Ancak mevcut çalışmaların büyük bölümünün kontrollü koşullarda yürütülmüş olması nedeniyle, bu etkilerin doğal saha koşullarındaki yansımaları henüz yeterince açıklığa kavuşturulamamıştır. Ayrıca mevcut literatürde farklı bitki türleri, mikrobiyal konsorsiyumlar ve çevresel koşullar arasında önemli değişkenlikler bulunduğu dikkate alınmalıdır. Ayrıca mevcut çalışmaların önemli bir bölümü kontrollü koşullarda yürütülmüş olup, gerçek agroekosistemlerdeki uzun dönemli etkiler henüz yeterince net değildir. Bitki-mikrop-polinatör etkileşimleri, çok trofik düzeyde karmaşık ekolojik süreçleri içermektedir. Bu nedenle mikrobiyal biyogübre uygulamalarının etkileri yalnızca bitki verimliliği açısından değil; polinatör sağlığı, ekosistem hizmetleri, biyolojik çeşitlilik ve sürdürülebilir agroekosistem yönetimi açısından da değerlendirilmelidir.

İklim değişikliği, habitat kaybı ve polinatör popülasyonlarındaki azalmalar göz önüne alındığında, mikrobiyal biyogübrelerin sürdürülebilir tarım sistemlerine entegrasyonu gelecekte daha da önemli hâle gelecektir. Özellikle floral kaynak kalitesinin artırılması yoluyla polinatör beslenmesinin desteklenmesi, arıcılık faaliyetleri açısından önemli fırsatlar sunabilir. Bununla birlikte mevcut bilgi birikimi hâlen sınırlıdır. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmaların; uzun dönemli saha deneyleri, farklı iklim senaryoları, çoklu polinatör toplulukları, koloni düzeyindeki biyolojik parametreler ile metabolomik ve mikrobiyom tabanlı analizleri bütüncül şekilde içeren çok disiplinli araştırma tasarımlarına dayandırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, mikrobiyal biyogübreler tarımsal üretim ile polinatör ekolojisi arasındaki ilişkileri şekillendiren önemli biyolojik araçlar arasında yer almaktadır. Bu sistemlerin ekosistem temelli ve çok disiplinli yaklaşımlarla değerlendirilmesi, geleceğin sürdürülebilir tarım stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Alaux, C., Ducloz, F., Crauser, D., & Le Conte, Y. (2010). Diet effects on honeybee immunocompetence. *Biology Letters*, 6, 562–565.
- Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J. P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology. *Plant and Soil*, 378, 1–33.
- Becklin, K. M., Gamez, G., Uelk, B., Raguso, R. A., & Galen, C. (2011). Soil fungal effects on floral signals, rewards, and aboveground interactions in an alpine pollination web. *American Journal of Botany*, 98, 1299–1308.
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068.
- Brodschneider, R., & Crailsheim, K. (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41, 278–294.
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 19, 29–37.
- Di Pasquale, G., Salignon, M., Le Conte, Y., Belzunces, L. P., Decourtye, A., Kretzschmar, A., Suchail, S., Brunet, J. L., & Alaux, C. (2013). Influence of pollen nutrition on honey bee health: do pollen quality and diversity matter? *PLoS ONE*, 8, e72016.
- Dudareva, N., Negre, F., Nagegowda, D. A., & Orlova, I. (2006). Plant volatiles: recent advances and future perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25, 417–440.
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 1–15.
- Helletsgruber, C., Dötterl, S., Ruprecht, U., & Junker, R. R. (2017). Epiphytic bacteria alter floral scent emissions. *Journal of Chemical Ecology*, 43, 1073–1077.
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B*, 274, 303–313.
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541–556.
- Ngumbi, E., & Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. *Applied Soil Ecology*, 105, 109–125.
- Nicolson, S. W., & Thornburg, R. W. (2007). Nectar chemistry. In *Nectaries and Nectar* (pp. 215–264). Dordrecht: Springer.
- Peñuelas, J., & Llusà, J. (2004). Plant VOC emissions: making use of the unavoidable. *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 402–404.
- Petanidou, T., Van Laere, A., Ellis, W. N., & Smets, E. (2006). What shapes amino acid and sugar composition in Mediterranean floral nectars? *Oikos*, 115, 155–169.

- Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347–375.
- Pineda, A., Zheng, S. J., van Loon, J. J. A., Pieterse, C. M. J., & Dicke, M. (2010). Helping plants to deal with insects: the role of beneficial soil-borne microbes. *Trends in Plant Science*, 15, 507–514.
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 345–353.
- Raguso, R. A. (2008). Wake up and smell the roses: the ecology and evolution of floral scent. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 549–569.
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321, 305–339.
- Schiestl, F. P., & Johnson, S. D. (2013). Pollinator-mediated evolution of floral signals. *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 307–315.
- Simone-Finstrom, M., & Spivak, M. (2012). Increased resin collection after parasite challenge: a case of self-medication in honey bees? *PLoS ONE*, 7, e34601.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2010). *Mycorrhizal symbiosis*. London: Academic Press.
- Vannette, R. L., Gauthier, M. P. L., & Fukami, T. (2013). Nectar bacteria, but not yeast, weaken a plant–pollinator mutualism. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280, 20122601.
- Vaudo, A. D., Tooker, J. F., Patch, H. M., Biddinger, D. J., Coccia, M., Crone, M. K., Fiely, M., Francis, J. S., Hines, H. M., Hodges, M., et al. (2015). Bee nutrition and floral resource restoration. *Current Opinion in Insect Science*, 10, 133–141.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255, 571–586.
- Wright, G. A., Schiestl, F. P., et al. (2013). The evolution of floral scent: the influence of olfactory learning by insect pollinators on the honest signalling of floral rewards. *Functional Ecology*, 27, 841–851.

Sürdürülebilir Gelecek İçin Enerji Vatandaşlığı ve Sosyal Bilgiler Eğitimi

Elvan Yalçınkaya

Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Türkçe ve Sosyal Bilimler Eğitimi Bölümü, Kayseri, Türkiye.

Özet

Bu çalışmada sosyal bilgiler eğitimi açısından çok önemli bir yer sahip olan ve vatandaşlık eğitimi bağlamında düşünülen enerji vatandaşlığı kavramı üzerinde durulmaktadır. Bununla birlikte enerji vatandaşlığı ile sosyal bilgiler eğitimi arasındaki ilişki ele alınmaktadır. Günümüzde enerji kaynaklarının bilinçsizce kullanımı ve giderek artan çevre sorunları sebebiyle, sürdürülebilir enerji kaynaklarının bilinçli ve sorumlu kullanımı konusu gündeme gelmiştir. Küçük yaşlardan itibaren çevre konusunda çocukların bilinçli hale gelmeleri ve yeşil enerji gibi konularda farkındalık kazanmaları tüm ülkelerin eğitim amaçları arasında yer almaktadır. Ülkeler eğitim programlarını hazırlarken çevre ve enerji konusunu dikkate almak durumundadırlar. Derslerin öğretim programlarında da etkili bir enerji vatandaşlığı kazandırmak amaçlanmaktadır. Sosyal bilgiler ise enerji vatandaşlığı bilincinin kazandırılmasında önemli bir ders olarak görülmektedir. Sosyal bilgiler, doğrudan vatandaşlık eğitimine odaklanan bir ders olarak, çocukların etkin ve üretken bireyler olarak yetişmelerini amaçlar. Bu açıdan sosyal bilgiler eğitiminde enerji vatandaşlığı, bilinçli, sorumlu ve üretken bireyler olarak hareket etmelerini içermektedir. Enerji vatandaşlığı, bireylerin enerji üretim ve tüketim süreçlerinde bilinçli ve sorumlu hareket etmelerini, üretken olmalarını, katılım göstermelerini ve çevresel sorumluluk almalarını ifade etmektedir. Sosyal bilgiler derslerinde öğrencilerin enerji vatandaşlığı konusunda aktif rol almalarını sağlamak amacıyla bilgi, beceri, değer ve tutumların kazandırılması amaçlanmaktadır. Ders kapsamında çevre, toplum, bilim, teknoloji, ekonomi gibi konular ele alınarak etkili vatandaşlar yetiştirilmeye çalışılmaktadır. Geçmişten günümüze sosyal bilgiler öğretim programlarında çevre konusuna yer verildiği görülmektedir. Günümüzdeki programların ise enerji vatandaşlığı açısından sınırlı kaldığı görülmektedir. Enerji konuları daha çok çevre sorunları bağlamında ele alınmaktadır. Sosyal bilgiler derslerinde enerji konusunun çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarının daha kapsamlı ortaya konmasına fırsat sunacak şekilde yapılandırılması gerekmektedir. Sosyal bilgiler derslerinin disiplinler arası özelliği, enerji vatandaşlığının çok boyutlu ele alınması için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bununla birlikte enerji vatandaşlığı kazanmaları amacıyla sosyal bilgiler derslerinde öğrencilerin aktif olmalarını sağlayacak öğrenme ortamları tasarlanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Çevre, Enerji, Enerji Vatandaşlığı, Sosyal Bilgiler, Sürdürülebilirlik.

Abstract

This study focuses on the concept of energy citizenship, which holds a very important place in social studies education and is considered within the context of civic education. Furthermore, it examines the relationship between energy citizenship and social studies education. Today, due to the unconscious use of energy resources and the increasing environmental problems, the issue of the conscious and responsible use of sustainable energy sources has come to the forefront. Raising children's awareness of environmental issues and green energy from a young age is among the educational goals of all countries. Countries must consider environmental and energy issues when preparing their educational programs. The curriculum should also aim to instill effective energy citizenship. Social studies is seen as an important subject in instilling energy citizenship awareness. As a subject directly focused on civic education, social studies aims to raise children as active and productive individuals. In this respect, energy citizenship in social studies education involves individuals acting as conscious, responsible, and productive individuals. Energy citizenship refers to individuals acting consciously and responsibly in energy production and consumption processes, being productive, participating, and taking environmental responsibility. Social studies lessons aim to equip students with the knowledge, skills, values, and attitudes necessary to actively participate in energy citizenship. The curriculum covers topics such as the environment, society, science, technology, and economics, striving to cultivate effective citizens. While environmental issues have been included in social studies curricula throughout history, current programs appear to be limited in their focus on energy citizenship. Energy topics are primarily addressed within the context of environmental problems. Social studies lessons need to be structured to provide opportunities for a more comprehensive examination of the environmental, economic, and social dimensions of energy. The interdisciplinary nature of social studies lessons offers a significant opportunity for a multi-faceted approach to energy citizenship. Furthermore, learning environments that encourage student activity are crucial for fostering energy citizenship in social studies lessons.

Keywords: Environment, Energy, Energy Citizenship, Social Studies, Sustainability.

Giriş

Son yıllarda yaşanan savaşlar, dünyada enerji ihtiyacını daha fazla gündeme getirmiştir. Savaşlar sebebiyle petrol ve doğalgazın kesilmesi hem ülkemizde hem de dünya genelinde ciddi tedirginlikler yaratmıştır. Bununla birlikte, mevcut enerji kaynaklarına alternatifler düşünülmüştür. Enerjide ortaya çıkan yoksulluk ve adaletsizliklerin ortadan kaldırılması amacıyla birtakım arayışlar da bulunmaktadır. Enerji konusu küresel ölçekte ele alınması gereken ciddi bir konu olarak kabul edilmektedir. Dünya ölçeğinde enerjiyi sadece tüketen değil aynı zamanda bilinçli kullanan ve enerjisini üretebilen vatandaşlar yetiştirmek amaçlanmaktadır. Enerji kavramının son yıllarda sosyal ve siyasi yönlerinin de dikkate alındığı enerji vatandaşlığı kavramı ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada enerji vatandaşlığı kavramı ele alınarak sürdürülebilir gelecek inşası açısından enerji vatandaşlığının sosyal bilgiler eğitimindeki yeri ve önemi ortaya konmaya çalışılacaktır.

Enerji ve Enerji Kaynakları

Enerji genellikle gelişimin katalizörü olarak bilinir. Küresel olarak, kişi başına enerji tüketimi, genellikle belirli bir ülkedeki ekonomik gelişme düzeyini ölçmek için bir barometre olarak kullanılır (Mohamed & Lee, 2006). Sever (2005, s.139)'e göre enerji kullanımı gelişmişliğin bir göstergesidir ve bu alanda büyük yatırımlar yapılması gerekmektedir. Gelecekte ciddi bir enerji krizi yaşamamak için ülkeler, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmelidir. Enerji bakımından dışa bağımlılığı minimum düzeye indirmek için yenilenebilir kaynaklarımızı en verimli şekilde değerlendirmemiz gerekmektedir (Sever, 2005, s.139).

Türk Dil Kurumu (2003) Türkçe Sözlüğünde enerji “maddede var olan ve ısı, ışık biçiminde ortaya çıkan güç, erke” olarak tanımlanmaktadır. Silvest ve Valkenburg (2023, s.2) ‘a göre ise enerji, hem piyasa kurallarının geçerli olduğu bir meta, hem de günlük hayatın işleyişini sağlayan yaşamsal bir sistemdir. Doğanay ve Coşkun (2023, s.1) ise fiziksel anlamda enerjiyi, “hareket ettirici güç” olarak tanımlamaktadırlar. İş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan enerji, mekanik (potansiyel ve kinetik), ısı, elektrik, kimyasal ve nükleer gibi değişik türlerde bulunabilmekte, uygun yöntemlerle bir türden diğerine dönüşebilmekte olup, farklı şekillerde sınıflandırılabilir (Koç ve Kaya, 2015, s.37).

Enerji kaynakları, “değişik yöntem ve teknikler kullanılarak, ekonomik amaçlarla enerji elde edilen kaynaklar” olarak tanımlanmaktadır (Doğanay ve Coşkun, 2023, s.2). Enerji kaynakları özellikle Sanayi İnkılabı sonrasında ekonomik açıdan önemli hale gelmiştir. İnsan gücünün yerini makinelerin alması ve fabrikalarda seri üretime geçilmesiyle birlikte enerji kaynaklarına daha fazla ihtiyaç duyulmuştur. İngiltere’de buharlı makinelerin icadı ve sonrasında sanayi alanında ortaya çıkan gelişmeler enerji kaynaklarına çok fazla ihtiyaç duyulmasına sebebiyet vermiştir. Sanayi İnkılabı sonrasında kömür kullanımı yaygınlaşmış sonraki yıllarda petrol ve doğalgaz da yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, 1973 Petrol Krizi’nin ortaya çıkmasıyla beraber fosil yakıtlara karşı bir güven sorunu oluşmuştur (Ürün ve Soy, 2016, s.32). Günümüzde ise Rusya-Ukrayna Savaşı, sonrasında İsrail, ABD ve İran Savaşı ile birlikte bu yakıtlara ülkelerin güven duymamasına daha fazla sebebiyet vermiş, ülkelerin ekonomileri bu durumdan etkilenmiştir. Aynı zamanda günümüz dünyasında ise enerji kaynaklarının sadece ekonomik değil sosyal, kültürel ve siyasi etkileri görülmüştür.

Koç ve Kaya (2025) enerji kaynaklarını genel olarak kullanılışlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırmışlardır. Kullanılışlarına göre yapılan sınıflandırmaya göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez; dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır. Enerji kaynakları kullanılışlarına göre yenilenemez ve yenilenebilir olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Petrol, doğalgaz, kömür ve linyit yenilenemez fosil yakıtları oluştururken uranyum ve toryum ise çekirdek kaynaklı yenilenemez enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Herhangi bir değişim veya dönüşüme uğramayan enerji kaynaklarına birincil kaynaklar; birincil enerjinin dönüştürülmesi neticesinde ortaya çıkarılan enerji kaynaklarına ise ikincil enerji olarak sınıflandırılmaktadır. Petrol, doğalgaz, kömür, güneş ve rüzgâr enerjisi birincil

енерjiе өрнек оларак верилебилр. Електрлк, бензн, мазот, petrol газы исе икнцл енерji kaynakлары араcында yer almaktadır.

Doğanay ve Coşkun (2023, s.2) енерji kaynaklarını; yeraltı ve yerüstü kaynakları olup olmayışlarına (yeraltı ve yer üstü) ve tükenir kaynaklar olup olmayışlarına (tükenir ve yenilenebilir) göre iki farklı kategoriye ayırmışlardır. Yeraltı енерji kaynakları; çeşitli kömürler, petrol, doğal gaz, termo-nükleer petrol, jeotermal kaynaklar, şistler, nükleer енерji kaynakları olarak nispeten çeşitlidir. Yerüstü енерji kaynakları; ormanlardan sağlanan yakacak odun, biyomas kaynakları, tezek, kültürel bitkilerin çeşitli atıkları ve benzerleri olarak sayabiliriz. Ama en önemlileri, hidrolik kaynaklar olup, bunlar; tükenmez kaynaklar olarak, ayrıca büyük önem taşırlar.

Sanayi inkılabının ilk dönemlerinden günümüze en çok ihtiyaç duyulan енерji kaynakları kömür, petrol, doğalgaz, hidroelektrik kaynaklarıyken daha sonraki yıllarda bu енерji kaynaklarına; nükleer енерji santrallerinin kurulmasıyla birlikte uranyum ve toryum da ilave edilmiştir. Aynı zamanda biyomas, jeotermal, rüzgâr, med-cezir, güneş енерji kaynakları исе gelecek yüzyıl için alternatif kaynaklar arasında yer almaktadır (Özey, 2001, s.226).

Eнерji Vatandaşlığı

Eнерji ihtiyacının arttığı ve енерji tüketiminin çevre koşullarını olumsuz etkilediği bir ortamda, енерji kaynaklarının bilinçli biçimde seçilip kullanılması için nitelikli ve bilinçli bireylerden oluşan toplumlara gereksinim duyulmaktadır (Ezer ve Aksüt, 2024, s.323). Eнерji kaynaklarının yoksunluğu, adaletsiz paylaşımı ve kaynakların giderek azalması ile birlikte ortaya çıkan ekonomik, sosyal, siyasi ve kültürel sorunlar, енерji vatandaşlığı kavramını ortaya çıkarmıştır. Ülkeler fosil kaynakların giderek azalması neticesinde yenilenebilir ve alternatif енерji kaynakları arayışına girmişlerdir. Bununla birlikte yalnızca енерjiyi tüketen değil aynı zamanda енерji üreten ve mevcut енерji kaynaklarını bilinçli tüketen vatandaşlar yetiştirmeyi amaçlamaktadırlar.

Son yıllarda her ne kadar енерji vatandaşlığı konusundaki bilimsel çalışmalar artmaya devam ediyor olsa da, енерji vatandaşlığı kavramının tanımı ve kapsamı yeterince belirlenememiştir (Silvast & Valkenburg, 2023, s.2). Ringholm (2022), енерji vatandaşlığı kavramının fosil yakıtların azaltılmasına yönelik politikaların bir sonucu olarak ortaya çıktığını ve vatandaş katılımının yeni biçimlerini içeren bu kavramın göreceli yeni bir olgu olduğunu vurgulamaktadır. Campos & Marin-Gonzalez, (2020, s.1), енерji vatandaşlığı kavramını “İklim değişikliği bağlamında eşitlik ve adalet için sorumluluk bilincini öne çıkaran ve ortak енерji eylemlerinin potansiyeline dikkat çeken bir toplumsal bakış açısı” olarak tanımlamaktadırlar.

Eнерji vatandaşlığı kavramı, енерjiye ilişkin süreçlerin çeşitli kritik boyutlarını değerlendirmeye imkân tanıyan önemli bir çerçeve sunmakta ve bireylerle içinde yer aldıkları topluluklar arasındaki ilişkileri açıklamaya yönelik kuramsal bir zemin oluşturmaktadır (Silvast & Valkenburg, 2023, s.2). Eнерji vatandaşlığı, “iklim değişikliğine yönelik sorumluluk bilinci ve farkındalığı, enerjide eşitlik ve adalet ilkeleri ile енерji yoksulluğu gibi konuları kapsayan; aynı zamanda tüketim davranışları ve енерji kooperatifleri gibi girişimler aracılığıyla toplumun yenilenebilir енерjiye dayalı kolektif eylem potansiyelini öne çıkaran bir kamuoyu anlayışı” olarak tanımlanabilir (Devine-Wright, 2007, s.71-72). Avrupa Birliği Horizon 2020 Fonundan

destek alan, altı AB ülkesinden sekiz ortağın yer aldığı ve aktif enerji vatandaşlığına ve topluluklarına giden yolu açmayı amaçlayan Green Energy Transition Actions (GRETA, 2023)-Yeşil Enerji Geçiş Eylemleri isimli projede ise enerji vatandaşlığı kavramı, “her birimizin enerjiyi sürdürülebilir bir şekilde kullanabilmesi ve enerji dönüşümüne katılabilmesi” olarak tanımlanmaktadır (Yalçınkaya, 2023, s.181). Enerji vatandaşlığı, bireylerin enerjiye ilişkin sosyo-teknik ve politik çevreleriyle etkileşimleri bağlamında sahip oldukları etkin rol ve aracılık kapasitesini ifade etmektedir (Jansma, Long & Lee, 2023).

Jansma, Long ve Lee (2023, s.1), vatandaşların enerjiyle kurdukları ilişkiyi, maddi ve iletişimsel enerji vatandaşlığı olarak iki temel eylem biçimi üzerinden derinleştirdiklerini belirtmektedir. Araştırmacılar özellikle vatandaşlığın iletişimsel boyutuna odaklanmakta ve bu boyutu, bireylerin protestolar ya da imza kampanyaları gibi siyasi eylemler yoluyla seslerini duyurmaları; bu sayede hem bireylerin hem de toplumların politika oluşturma ve uygulama süreçlerinde tanınma ve dikkate alınma talebiyle resmi siyasi kurumlar üzerinde hak iddia edebilmeleri şeklinde tanımlamaktadırlar.

Stern ve Aronson (1984, s.15), “Toplum genelinde ortaklaşa kabul edilmiş tek bir enerji kavramının bulunmadığını” öne sürerek enerjiyi anlamının dört temel yolu olduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 1) (Akt. Devine-Wright, 2007, s.66)



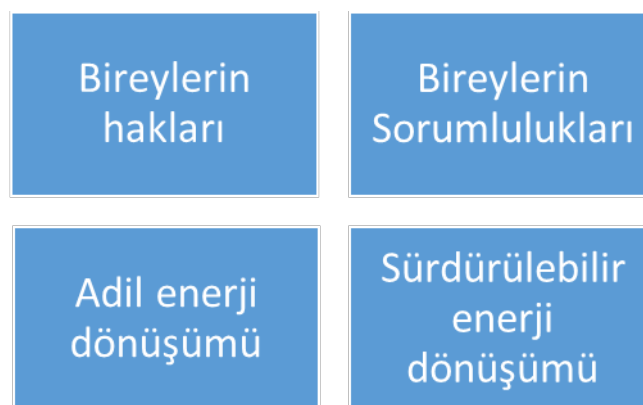
Şekil 1. Enerjinin Anlamanın Dört Temel Yolu (Stern & Aronson, 1984, s.15)

Enerji kavramına sadece teknik bir kavram olarak bakmamak gerekmektedir. Enerjinin özellikle günümüz dünyasında neredeyse her alanı etkileyen ve etkilenen bir kavram olduğunu kabul etmek gerekmektedir. Dolayısıyla enerji ekonomik, toplumsal, çevresel ve siyasal boyutları olan çok yönlü ve disiplinler arası bir olgudur (Şekil 1).

Enerji vatandaşlığını disiplinlerarası bir kavram olarak belirleyen Hamann ve diğerleri (2023) çalışmalarında öncelikle enerji vatandaşlığına ilişkin kavramları derlemiş,

ardından ortak bir çerçeve oluşturmak amacıyla disiplinler arası tartışmalar yürütmüşlerdir. Bu süreçte, merkeze dört temel kavram yerleştirmişlerdir (Şekil 2):

- Bireylerin hakları (enerji hizmetlerine erişim ve enerji dönüşüm süreçlerine katılma imkânları)
- Bireylerin sorumlulukları (enerji dönüşümünü destekleme ve bu sürece aktif olarak katkı sunma yükümlülüğü)
- Adil bir enerji dönüşümünün hedefi (yapısal ve kurumsal engellerin aşılması, fayda ve yüklerin adaletli biçimde paylaşılması, temsil gücü yüksek ve kapsayıcı bir karar alma sürecinin oluşturulması)
- Sürdürülebilir bir enerji dönüşümünün hedefi (karar alma süreçlerinde çevresel, sosyal ve ekonomik boyutların bütünleştirilerek uzun vadeli ekolojik ve ekonomik istikrarın sağlanması)
-



Şekil 2. Enerji Vatandaşlığına Disiplinlerarası Bakış Açısı (Hamann ve diğerleri, 2023, s.1).

Enerji Vatandaşlığı ve Sosyal Bilgiler Eğitimi

Sosyal bilgiler eğitimi bireylerin toplumsal yaşamda etkin, üretken, bilinçli ve sorumluluk sahibi vatandaşlar olarak yetişmelerini hedefler. Disiplinler arası bir çalışma alanı olan sosyal bilgiler eğitimi; temel eğitimde öğrencilerin toplumla, devletle, çevreyle ve küresel dünyayla olan ilişkilerini anlamalarını ve kavramalarını sağlayan bir ders olarak tanımlanabilir. Aynı zamanda vatandaşlık eğitimi kapsamından öğrencilerin hak ve sorumluluklarını öğrendiği, demokratik yaşam kültürü kazandıkları temel eğitim dersidir. Bu derste öğrencilerin problem çözme, karar verme, eleştirel düşünme, iletişim, empati, sosyal katılım gibi becerilerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Günümüz dünyasından yaşanan çevre sorunları, dijital vatandaşlık, enerji kaynaklarının hızla tüketilmesi, kaynakların eşit kullanılmaması gibi sorunlar, vatandaşlık ve sosyal bilgiler eğitiminin kapsamını da değiştirmiştir. Bu doğrultuda sosyal bilgiler eğitiminin önemli konuları arasında yer alan enerji konusunun bu ders kapsamında sosyal, ekonomik, çevresel ve siyasi yönlerinin ele alınması, sürdürülebilir yaşam anlayışının geliştirilmesine katkı sunacaktır.

Энергия ватандашлығы, çağdaş ватандашлық еғитиминин өнөмли бир билешени haline gelmiştir. Энергия ватандашлығы; bireylerin çevreyle, toplumla, devletle ve küresel dünyayla olan ilişkilerini enerji ekseninde ele almaktadır. Энергия ватандашлығынын temel özellikleri arasında gösterebileceğimiz; enerjiyi bilinçli kullanma ve dönüştürebilme, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanma, enerji tasarrufu yapma, enerji tüketim alışkanlıklarını sorgulama ve değerlendirme gibi kazanımlar sosyal bilgiler eғitiminin amaçları arasında yer almaktadır. Sosyal bilgiler eғitimi kapsamında öğrencilerin yalnızca enerji ve kullanımı konusunda bilgi kazanmaları değil aynı zamanda enerjiye yönelik beceri ve değer kazanmaları da amaçlanmaktadır. Sosyal bilgiler derslerinde enerji olgusunun çevresel, ekonomik, siyasi ve sosyal yönlerini eleştirel bir bakış açısıyla değerlendirebilmelerine imkân sunacak öğrenme ortamları oluşturularak aktif vatandaşlar olarak yetiştirilmeleri sağlanmalıdır.

Sonuç ve Öneriler

Günümüzde enerji konusu çok yönlü bir alan haline gelmiştir. Sürdürülebilirlik, yeşil enerji, yenilenebilir enerji, enerji tasarrufu, enerjide toplumsal adalet, enerji kullanımında sorumluluk gibi değerler ön plana çıkmıştır. Bunun doğal bir sonucu olarak enerji vatandaşlığı kavramı ortaya çıkmıştır. Энергия ватандашлығы ile sosyal bilgiler eғitiminin amaçlarının bir anlamda örtüştüğü görülmektedir. Энергия ватандашлығынын kazandırılmasında sosyal bilgiler dersi önemli bir role sahiptir. Öğrencilerin enerji vatandaşlığını geliştirilmesi sosyal bilgiler dersinin amaçları arasında yer almaktadır. Bu amaç doğrultusunda öğrencilerin enerji konusunda farkındalık kazanmaları ve bilinçli vatandaş olmalarını sağlamak amacıyla enerjinin disiplinler arası bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir.

Sosyal bilgiler derslerinde öğrencilerin enerji tüketim alışkanlıkları sorgulanmalı, çevresel kaynaklar ele alınmalı, sürdürülebilir tüketim anlayışı oluşturulmalı, enerjiye yönelik ülkelerin politika anlayışları sorgulanmalı, eleştirel bir bakış açısı geliştirmeleri sağlanmalıdır. Sosyal bilgiler öğretim programları ve ders kitaplarında enerji vatandaşлығынын temel özellikleri dikkate alınmalıdır. Öğrencilerin yalnızca bilgi değil bunun yanında beceri, tutum ve değer kazanmalarına yönelik öğrenme ortamları hazırlanmalıdır. Энергия ватандашлығынын gelişimine yönelik okul dışı öğrenme ortamlarından yararlanılmalıdır. Okul dışı saha gezileri ve proje çalışmaları ile öğrencilerin aktif öğrenmeleri sağlanabilir.

Kaynakça

Campos, I., & Marin-Gonzalez, E. (2020). People in transitions: Energy citizenship, prosumerism and social movements in Europe. *Energy Research & Social Science*, 69, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101718>

Doğanay, H., & Coşkun, O. (2023). *Энергия kaynakları* (5.Baskı). Pegem Akademi.

Devine-Wright, P (2007). Energy citizenship: psychological aspects of evolution in sustainable energy technologies, in: *Energy Citizenship: Psychological Aspects of Evolution in Sustainable Energy Technologies*, Earthscan, London; Sterling.

- Ezer, F., & Aksüt, S. (2024). Sosyal bilgiler öğretmen adaylarının enerji vatandaşlığı kavramına ilişkin metaforik algıları. *Trakya Eğitim Dergisi*, 14(Özel Sayı), 320-332.
- GRETA (2003). <https://projectgreta.eu/energy-citizenship/#introduction>
- Hamann, K. R., Bertel, M. P., Ryszawska, B., Lurger, B., Szymański, P., Rozwadowska, M., ... & Corcoran, K. (2023). An interdisciplinary understanding of energy citizenship: Integrating psychological, legal, and economic perspectives on a citizen-centred sustainable energy transition. *Energy Research & Social Science*, 97, 102959. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.102959>
- Jansma, S. R., Long, L. A. N., & Lee, D. (2023). Understanding energy citizenship: How cultural capital shapes the energy transition. *Energies*, 16(5), 1-19. <https://doi.org/10.3390/en16052106>
- Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- Mohamed, A. R., & Lee, K. T. (2006). Energy for sustainable development in Malaysia: Energy policy and alternative energy. *Energy Policy*, 34(15), 2388-2397. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.04.003>
- Özey, R. (2001). *Günümüz dünya sorunları*. Aktif Yayınevi.
- Ringholm, T. (2022). Energy citizens-Conveyors of changing democratic institutions?. *Cities*, 126, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103678>
- Sever, R. (2005). *Coğrafi açıdan bir araştırma: Çoruh havzası enerji yatırım projeleri ve çevresel etkileri*. Çizgi Kitabevi.
- Silvast, A., & Valkenburg, G. (2023). Energy citizenship: A critical perspective. *Energy Research & Social Science*, 98, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.102995>
- Stern, P. C. & Aronson, E. (Eds.). (1984). *Energy Use: The Human Dimension*. W.H. Freeman.
- Türk Dil Kurumu (2003) *Türkçe Sözlüğü*. <https://sozluk.gov.tr/> adresinden erişilmiştir.
- Ürün, E., & Soyu, E. (2016). Türkiye'nin enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları üzerine bir değerlendirme. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Özel Sayı, 31-45.
- Yalçinkaya, E. (2023). Enerji vatandaşlığı ve eğitim. B. Bulut (Ed.), *Yeni vatandaşlık yaklaşımları ve eğitimi içinde* (1. baskı, s. 177-192). Pegem Akademi.

Yeşil Ekstraksiyonla Elde Edilen Fındık Zurufu ve Biberiye Uçucu Yağının Sinerjik Etkisi: Üzüm Çekirdeği Ekstresinin Raf Ömrünün Uzatılması ve Kinetik Modellemesi

Synergistic Effect of Hazelnut Husk Obtained by Green Extraction and Rosemary Essential Oil: Extending the Shelf Life of Grape Seed Extract and its Kinetic Modeling

İrem Can

Lisans Öğrencisi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Osama Qandeel

Doktora öğrencisi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Levent Nuralın

Dr. Öğr. Üyesi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

Sorumlu Yazar E-posta: iremcan806@gmail.com

Özet

Gıda, kozmetik ve ilaç endüstrilerinde sentetik antioksidanların yerini alabilecek doğal, güvenilir ve yüksek performanslı alternatiflerin geliştirilmesi sürdürülebilirlik ilkeleri açısından büyük önem arz etmektedir. Bu araştırmanın temel amacı; endüstriyel potansiyeli yüksek olan ancak termal operasyonlara ve uzun süreli depolama koşullarına karşı kararsız yapı gösteren Üzüm Çekirdeği Ekstresinin (ÜÇE) biyolojik raf ömrünü, doğal ve sinerjik koruyucu sistemler geliştirerek uzatmaktır. Sürdürülebilir gıda ve kimya mühendisliği prensipleri doğrultusunda, Karadeniz bölgesinde yoğun bir tarımsal atık hacmine sahip olan fındık zurufu, Ultrasonik Destekli Ekstraksiyon (UAE) teknolojisi kullanılarak işlenmiştir. Akustik kavitasyon mekanizması sayesinde, fındık zurufunda yer alan fonksiyonel polifenoller maksimum verimle izole edilmiştir. Elde edilen fındık zurufu (FZ) ekstresi ve biberiye uçucu yağı (BY), sistemdeki toplam koruyucu madde konsantrasyonu sabit tutulacak şekilde farklı kombinasyonlarda (Koruyucusuz Kontrol, %0.2 FZ + %99.8 ÜÇE, %0.2 BY + %99.8 ÜÇE ve %0.05 FZ + %0.15 BY + %99.8 ÜÇE) matrisle entegre edilmiştir. Formülasyonu tamamlanan örneklerin oksidatif bozunma davranışlarını simüle edebilmek amacıyla Hızlandırılmış Raf Ömrü Testi (ASLT) protokolleri uygulanmış, periyodik zaman aralıklarında (07.05.2026 ve 11.05.2026) numunelerin antioksidan kapasite kayıpları DPPH radikali süpürme aktivitesi üzerinden spektrofotometrik yöntemlerle izlenmiştir. Sistemin birinci merteye reaksiyon kinetiğine uyumu doğrulanmış ve Arrhenius denklemi ile reaksiyon hız sabitleri hesaplanmıştır. Kinetik bulgular; biberiye uçucu yağının tek başına beklenen koruyucu etkiyi gösteremediğini (%7.75 inhibisyon), %0.2 FZ ilavesinin orta düzeyde koruma sağladığını (%13.07 inhibisyon), buna karşılık %0.05 FZ + %0.15 BY kombinasyonunun güçlü bir sinerjik etki yaratarak serbest radikal

süpürme aktivitesindeki azalışı en yüksek oranda yavaşlattığını (%19.45 inhibisyon ve 1.479 ppm GAE) ortaya koymuştur. Bu çalışma, endüstriyel bir atığın katma değerli bir ürüne dönüştürülmesine öncülük etmekte ve biyoaktif bileşenlerin korunmasında kullanılacak sinerjik bir koruma stratejisinin mühendislik temellerini literatüre sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fındık Zurufu, Yeşil Ekstraksiyon, Kinetik Modelleme, Sinerjik Antioksidan, Raf Ömrü.

Abstract

Developing natural and high-performance alternatives to synthetic antioxidants in the food, cosmetics, and pharmaceutical industries is of great importance for sustainability principles. The primary objective of this study is to extend the biological shelf life of Grape Seed Extract (GSE), which has high industrial potential but exhibits instability against thermal operations and long-term storage, by developing natural and synergistic preservative systems. In alignment with sustainable chemical engineering principles, hazelnut husk, a major agricultural waste in the Black Sea region, was processed using Ultrasound-Assisted Extraction (UAE). Through the acoustic cavitation mechanism, functional polyphenols within the hazelnut husk were isolated with maximum yield. The obtained hazelnut husk (FZ) extract and rosemary essential oil (BY) were integrated into the matrix in various combinations (Preservative-free Control, 0.2% FZ + 99.8% GSE, 0.2% BY + 99.8% GSE, and 0.05% FZ + 0.15% BY + 99.8% GSE) while keeping the total preservative concentration constant. To simulate oxidative degradation behavior, Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) protocols were applied, and antioxidant capacity losses of the samples were monitored by spectrophotometric methods based on DPPH radical scavenging activity at periodic intervals (05/07/2026 and 05/11/2026). The system's compliance with first-order reaction kinetics was confirmed, and reaction rate constants were calculated using the Arrhenius equation. Kinetic findings revealed that rosemary essential oil alone could not demonstrate the expected protective effect (7.75% inhibition), and 0.2% FZ addition provided moderate protection (13.07% inhibition). In contrast, the 0.05% FZ + 0.15% BY combination created a strong synergistic effect, slowing down the decrease in free radical scavenging activity to the highest degree (19.45% inhibition and 1.479 ppm GAE). This study pioneers the transformation of an industrial waste into a value-added product and presents the engineering foundations of a synergistic preservation strategy for bioactive components.

Keywords: Hazelnut Husk, Green Extraction, Kinetic Modeling, Synergistic Antioxidant, Shelf Life.

Giriş

Endüstriyel ölçekte üretilen fonksiyonel gıdalar ve nutrasötiklerde en sık karşılaşılan bozunma mekanizmalarından biri polifenol oksidasyonudur. Oksidasyon reaksiyonları, serbest radikallerin zincirleme mekanizmaları üzerinden ilerleyerek

biyoaktif bileşenlerin yapısını bozmakta ve ürünlerin biyolojik etkinliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu süreçlerin engellenmesi amacıyla endüstride BHT ve BHA gibi sentetik antioksidanlar kullanılsa da, günümüzde toksikolojik kaygılar tamamen doğal koruyucu ajanların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Üzüm çekirdeği (*Vitis vinifera* L.), oligomerik proantosiyanidinler (OPC), kateşin ve trans-resveratrol gibi polifenolik bileşikler ile demir mineralleri açısından son derece zengin bir kaynaktır. Ancak bu üstün antioksidan kalkan, endüstriyel üretim aşamalarında maruz kaldığı termal operasyonlara ve depolama şartlarına karşı oldukça duyarlıdır. Termodinamik açıdan kararsız olan bu yapı, ısı, ışık ve oksijen etkisiyle hızla bozunmaktadır.

Sürdürülebilirlik prensipleri çerçevesinde, tarımsal atıkların katma değerli fonksiyonel ürünlere dönüştürülmesi döngüsel ekonominin temelidir. Türkiye'nin Karadeniz bölgesinde yoğun olarak açığa çıkan fındık zurufu, yapısında saklı olan kondanse tanenler ve fenolik asitler sayesinde çok güçlü bir doğal antioksidan deposudur. Bu çalışmada, fındık zurufunun işlenmesinde modern yeşil ekstraksiyon teknolojileri arasında yer alan Ultrasonik Destekli Ekstraksiyon (UAE) yöntemi tercih edilmiştir. Akustik kavitasyon mekanizması ile çalışan bu sistem, bitki hücre çeperlerinde lokalize mikro jet akımları yaratarak minimum solvent kullanımıyla maksimum verim elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu araştırmanın amacı; yeşil ekstraksiyonla elde edilen fındık zurufu (FZ) ekstresi ile biberiye uçucu yağının (BY), ticari bir Üzüm Çekirdeği Ekstresinin (ÜÇE) raf ömrü üzerindeki etkilerini "zamana karşı antioksidan azalması" metodolojisiyle incelemektir. Elde edilen nicel verilerin birinci mertebe bozunma kinetiğine göre modellenmesi, Arrhenius denklemi vasıtasıyla mühendislik parametrelerinin hesaplanması ve endüstriye yenilikçi bir sinerjik koruma stratejisinin kazandırılması hedeflenmektedir.

Materyal ve Yöntem

Fındık Zurufunun Ultrasonik Destekli Yeşil Ekstraksiyonu (UAE)

Öğütülerek homojenize edilen fındık zurufu örnekleri, çevre dostu yeşil kimya ilkelerine uygun solvent sistemleri içerisinde karıştırılmıştır. Ekstraksiyon işlemi, sıcaklık kontrollü bir ultrasonik sıvı işlemci içerisinde gerçekleştirilmiştir. Akustik kavitasyon etkisinin tamamlanmasının ardından elde edilen ekstrakt filtre edilmiş ve saf fındık zurufu ekstresi elde edilmiştir.

Deney Gruplarının Hazırlanması ve ASLT Protokolü

Doğal koruyucu ajanların ÜÇE üzerindeki performansını ve sinerjik etkilerini izlemek amacıyla toplam konsantrasyon sabit tutularak dört deney grubu oluşturulmuştur:

1. Koruyucusuz Kontrol Grubu (%100 ÜÇE)
2. %0.2 FZ + %99.8 ÜÇE
3. %0.2 BY + %99.8 ÜÇE

4. %0.05 FZ + %0.15 BY + %99.8 ÜÇE (Sinerji Grubu)

Numuneler, uzun dönemli oksidatif bozunma davranışlarını kısa sürede tespit edebilmek amacıyla Hızlandırılmış Raf Ömrü Testleri (ASLT) kapsamında ısı strese tabi tutulmuştur. Deneysel izleme periyodu olarak 07.05.2026 (Başlangıç) ve 11.05.2026 (Bitiş) tarihleri seçilmiş, numuneler spektrofotometrik ölçüm öncesinde yüksek hızlı santrifüj cihazında işleme alınmıştır.

1.2. Spektrofotometrik Analiz ve Kinetik Modelleme

Zamana bağlı antioksidan azalması profilleri, DPPH serbest radikalinin renk değiştirme esasına dayanan spektrofotometrik metotla ölçülmüş ve yüzde inhibisyon hesaplanmıştır. Antioksidan güç, Gallik Asit Eşdeğerliği (GAE) cinsinden ifade edilmiştir. Sistemin Birinci Mertebe (First-Order) reaksiyon kinetiğine uyumu test edilmiş ve entegre hız denklemi uygulanmıştır:

$$\ln(C_t) = \ln(C_0) - kt$$

Sıcaklığın bozunma hız sabitleri (k) üzerindeki etkisi ve termodinamik parametrelerin tayini için evrensel Arrhenius Denklemi kullanılmıştır:

$$k = A \cdot e^{\{-E_a\}/R \cdot T\}}$$

Bulgular ve Tartışma

Zamana Bağlı Absorbans ve İnhibisyon Değişimleri

DPPH radikal çözeltisinin absorbans değerindeki kararlı yüksek seyrin düşmesi antioksidan varlığına işaret ederken; numunelerin absorbans değerlerinde zamanla meydana gelen artışlar, yapılarındaki polifenollerin oksitlendiğini ve koruyuculuk güçlerinin azaldığını kanıtlamaktadır. Deney gruplarından elde edilen veriler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Formülasyonların Absorbans, İnhibisyon ve GAE Değerleri

Deney (Formülasyon)	Grubu	Absorbans (07.05)	Absorbans (11.05)	İnhibisyon (%)	GAE (ppm)
Koruyucusuz Kontrol Grubu		0.152	0.560	14.89	1.015
%0.2 FZ + %99.8 ÜÇE		0.572	0.572	13.07	0.829
%0.2 BY + %99.8 ÜÇE		0.607	0.607	7.75	0.287
%0.05 FZ + %0.15 BY + %99.8 ÜÇE		0.530	0.530	19.45	1.479

Tablo 1 verileri detaylıca analiz edildiğinde, koruyucusuz kontrol grubunun yüksek bir başlangıç aktivitesi sergilemesine rağmen hızla oksitlendiği (14.89% inhibisyon) görülmektedir. Güçlü bir doğal koruyucu olarak bilinen biberiye uçucu yağının (%0.2 BY) ise ÜÇЕ matrisinde beklenen performansı sergileyemediği ve inhibisyon değerinin %7.75 (0.287 ppm GAE) seviyesine kadar gerilediği saptanmıştır. Bu durum, hidrofobik karakterli uçucu yağ ile hidrofilik polifenolik matris arasındaki faz uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır.

Fındık zurufunun tek başına kullanımı (%0.2 FZ) orta düzeyde bir koruma (%13.07) sağlamıştır.

Araştırmanın en dikkat çekici bulgusu sinerji grubunda elde edilmiştir. %0.05 Fındık Zurufu ve %0.15 Biberiye Yağı kombinasyonunun sisteme entegre edilmesi, bileşenler arasında güçlü bir intermoleküler sinerji yaratarak inhibisyon değerini %**19.45** (1.479 ppm GAE) seviyesine ulaştırmış ve oksidatif stabilizasyonu maksimize etmiştir.

Kinetik Modelleme ve Raf Ömrü Ekstrapolasyonu

DPPH inhibisyon azalış verilerinin matematiksel analizleri, sistemdeki kapasite kaybının Birinci Mertebe Reaksiyon Kinetiğine tam uyum sağladığını kanıtlamıştır. ASLT koşullarında elde edilen hız sabitleri (k), Arrhenius denkleminde uygulanarak ürünlerin tahmini raf ömürleri hesaplanmıştır. Sinerji grubunda (%0.05 FZ + %0.15 BY) elde edilen yüksek aktivasyon enerjisi (E_a), serbest radikal zincir reaksiyonlarına karşı güçlü bir kinetik bariyer oluşturulduğunu ispatlamaktadır.

Sonuç

Bu araştırma, gıda, farmasötik ve kozmetik endüstrilerinde oksidatif bozulmaya karşı yaygın olarak kullanılan BHA ve BHT gibi sentetik antioksidanların yerine, doğal ve sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesi noktasında önemli bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır.

Çalışma kapsamında, yüksek fenolik içeriğiyle bilinen ancak termal prosesler ve depolama koşullarında kararsız bir yapı sergileyen Üzüm Çekirdeği Ekstresinin (ÜÇЕ) stabilitesi başarılı bir şekilde artırılmıştır. Özellikle Karadeniz bölgesinin majör tarımsal atıklarından biri olan fındık zurufunun, çevreci bir yaklaşım olan Ultrasonik Destekli Yeşil Ekstraksiyon (UAE) teknolojisi ile işlenerek yüksek katma değerli bir antioksidana dönüştürülmesi, döngüsel ekonomi ve yeşil kimya prensiplerinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.

Elde edilen spektrofotometrik bulgular, raf ömrü stabilizasyonunda tekil koruyucu ajan kullanımının sınırlamalarını açıkça ortaya koyarken, uygun ajan kombinasyonlarının intermoleküler etkileşimler sayesinde nasıl hayati bir rol oynadığını göstermiştir. Endüstride oldukça popüler bir doğal koruyucu olan biberiye uçucu yağının tek başına ÜÇЕ matrisinde yetersiz kaldığı ve %7.75 gibi kısıtlı bir inhibisyon değeri sergilediği saptanmıştır. Bu durum, hidrofobik karakterli uçucu yağların hidrofilik polifenolik matrislerle gösterdiği faz uyumsuzluğunun bir

sonucudur. Ancak formülasyona sadece %0.05 oranında fındık zurufu ekstresi ve %0.15 oranında biberiye uçucu yağı entegre edildiğinde, bileşenler arası muazzam bir sinerjik etki tetiklenmiş ve serbest radikal süpürme aktivitesi en yüksek koruma değerine (%19.45 inhibisyon ve 1.479 ppm GAE) ulaşmıştır. Fındık zurufu ekstresi, bu kompleks matraste yalnızca bir serbest radikal süpürücü olarak değil, aynı zamanda bileşenler arası uyumu artıran sinerjik bir destekleyici olarak görev yapmıştır.

Sistemin oksidasyon kinetiğinin incelenmesi, bu sinerjik koruma stratejisinin matematiksel altyapısını da sağlamlaştırmıştır. Hızlandırılmış Raf Ömrü Testi (ASLT) koşulları altında elde edilen verilerin **Birinci Mertebe Reaksiyon Kinetiğine** tam uyum sağlaması ve Arrhenius denklemi üzerinden modellenmesi sonucunda, sinerji grubunda radikalik bozunma reaksiyonlarının aktivasyon enerjisinin (E_a) belirgin şekilde yükseltildiği tespit edilmiştir.

Yükselen aktivasyon enerjisi, oksidasyon zincir reaksiyonlarına karşı sisteme termodinamik ve kinetik bir bariyer kazandırıldığını ispatlamaktadır. Bu güçlü bariyer sayesinde, termal hassasiyeti yüksek olan ÜÇE bazlı ürünlerin biyolojik raf ömrü uzatılmış ve endüstriyel proses şartlarına (sıcaklık, oksijen vb.) karşı direnci maksimize edilmiştir. Özetle bu çalışma, sentetik koruyucuların yerini alabilecek, kimyasal kinetik temellerle matematiksel olarak ispatlanmış ve yüksek performanslı bir doğal koruma stratejisini literatüre kazandırmaktadır. Fındık zurufu ve biberiye yağının bu optimize edilmiş sinerjik kombinasyonu; katma değeri yüksek tarımsal atıkların değerlendirilmesine öncülük etmekle kalmayıp, gelecekte fonksiyonel gıda takviyelerinden dermokozmetik ürünlere ve kontrollü salım sistemlerine kadar geniş bir yelpazede güvenle kullanılabilecek yenilikçi bir biyo-koruma standardı olma potansiyeli taşımaktadır.

Kaynaklar

1. Alasalvar, C., Karamač, M., Amarowicz, R., & Shahidi, F. (2006). Antioxidant and antiradical activities in extracts of hazelnut kernel (*Corylus avellana* L.) and hazelnut green leafy cover. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(13), 4826-4832.
2. Gómez-Estaca, J., Bravo, L., Gómez-Guillén, M. C., & Montero, P. (2009). Antioxidant properties of tuna-skin and bovine-hide gelatin films induced by the addition of oregano and rosemary extracts. *Food Chemistry*, 112(1), 18-25.
3. Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560.

Механикалық түрде белсендірілген Pd-Ti-Mg жүйесінің құрылымдық-фазалық күй-күйін зерттеу

Pd-Ti-Mg Sisteminin Yapısal Faz Durumunun İncelenmesi

Mechanical Activated Pd-Ti-Mg System Structural - Phase Morning Research

Эртаев Нұрсұлтан

*Магистрант, Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан, Қазақстан*

Курбанбеков Шерзод

*PhD докторы, доцент, Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік
университеті, Түркістан, Қазақстан*

Амангельдиева Юлдуз

*Магистрант, Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан, Қазақстан*

Токежанов Азамат

*Докторант, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ.,
Қазақстан*

Аңдатпа

Бұл жұмыс механикалық белсендірілген үштік Pd-Ti-Mg ұнтақтарының қатты денелі сутегін сақтауға арналған кандидат материалдар ретіндегі құрылымдық-фазалық күйін және микроқұрылымдық ұйымын зерттейді. Элементтік ұнтақтар Ar-да жоғары энергиялы планетарлық фрезерлеу (Pulverisette 7, 500 айн/мин; BPR=10:1) арқылы өңделді. Рентгендік дифракция (CuK α) fcc-Pd (Fm-3m, a=3.887 Å), α -Ti (hcp, P6₃/mmc, a=2.950 Å, c=4.681 Å), метастабильді fcc-Ti фракциясын (Fm-3m, a=4.060 Å) және кіші hcp-Mg (P6₃/mmc, a=3.209 Å, c=5.211 Å) көрсетеді; көлемдік деңгейде айқын аралық металл шыңдары анықталмаған. Лазерлік дифракция Mg-ге жатқызылған D10 $\approx$ 5 мкм, D50 $\approx$ 20 мкм, D90 $\approx$ 50 мкм (аралық $\approx$ 2.25), ұсақ 5 мкм-ден кіші режим және ірі 300-600 мкм құйрықпен мультимодальды өлшемді таралуды көрсетеді. SEM-EDS картаға түсіру мозаикалық микроқұрылымды дәлелдейді: изометриялық Pd-бай домендер (~10-60 мкм), платина Ti-бай фрагменттер (~20-80 мкм), интерфейстердегі жергілікті Pd-Ti колокализациясы (Pd-Ti интерметаллдары үшін алдын ала реакция күйі ретінде түсіндіріледі) және негізінен аралық дисперсті Mg. Біріктірілген деректер механикалық активация арқылы жасалған мол жоғары энергиялы интерфейстер мен қысқартылған диффузия жолдарын көрсетеді, олар көп мөлшердегі интерметаллдардың мезгілсіз түзілуін болдырмай, гидрогенизацияны жеделдетуге (дегидрацияға) қолайлы. Нәтижелер бақыланатын фрезерлеу параметрлері және Mg сегрегациясы мен тотығуын шектей отырып, пайдалы Pd $\leftrightarrow$ Ti интерфейстік реакцияларын ынталандыратын мақсатты термиялық кестелер арқылы сыйымдылықты,

кинетиканы және циклдік тұрақтылықты реттеуге арналған микроқұрылымға бағытталған жолды ұсынады.

Кілт сөздер: Pd-Ti-Mg, механикалық активтендіру, рентгендік резонанс; SEM-EDS, гранулометрия, фазааралық шекаралар, сутегін сақтау.

Özet

Bu çalışma, katı faz hidrojen depolama adayları olarak mekanik aktivasyondan sonra üçlü Pd-Ti-Mg tozlarının yapısal faz durumunu ve mikro yapısını incelemektedir. Başlangıç malzemeleri, argon atmosferinde yüksek enerjili planet öğütme (Pulverisette 7, 500 rpm; BPR=10:1) işlemine tabi tutulmuştur. X-ışını faz analizine (CuK α) göre, aşağıdaki fazlar tespit edilmiştir: fcc-Pd (Fm-3m, $a=3,887 \text{ \AA}$), α -Ti (hcp, P63/mmc, $a=2,950 \text{ \AA}$, $c=4,681 \text{ \AA}$), kararsız bir fcc-Ti fraksiyonu (Fm-3m, $a=4,060 \text{ \AA}$) ve az miktarda hcp-Mg (P63/mmc, $a=3,209 \text{ \AA}$, $c=5,211 \text{ \AA}$); kütlede belirgin intermetalik hatlar tespit edilmemiştir. Lazer kırınımı, $D_{10} \approx 5 \text{ \mu m}$, $D_{50} \approx 20 \text{ \mu m}$, $D_{90} \approx 50 \text{ \mu m}$ ($\text{span} \approx 2,25$) ile çok modlu bir boyut dağılımı, $<5 \text{ \mu m}$ 'lik ince bir mod ve Mg'ye atfedilen 300-600 μm 'lik kaba taneli bir "kuyruk" gösterdi. SEM-EDS haritalaması, izometrik bir mozaik mikro yapı ortaya koymaktadır. Pd ile zenginleştirilmiş alanlar ($\approx 10\text{-}60 \text{ \mu m}$), plaka benzeri Ti ile zenginleştirilmiş parçalar ($\approx 20\text{-}80 \text{ \mu m}$), yerel eş konumlanma Arayüzlerde Pd-Ti (Pd-Ti intermetalik bileşiklerinin ön reaksiyon durumu) ve ağırlıklı olarak taneler arası dağılmış Mg lokalizasyonu gözlemlenmiştir. Veriler, mevcut aşamada büyük miktarda intermetalik oluşumu olmaksızın, (de)hidrojenasyonu hızlandırmak için elverişli olan kısaltılmış difüzyon yollarının ve yüksek enerjili sınırların oluşumunu topluca göstermektedir. Öğütme parametrelerinin kontrol edilmesinin, Mg segregasyonunu ve oksidasyonunu sınırlarken aynı zamanda kapasitif-kinetik özellikleri ve döngüsel kararlılığı ayarlayarak, faydalı Pd $\leftrightarrow$ Ti arayüz reaksiyonlarının hedeflenen şekilde artırılmasına olanak sağladığı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Pd-Ti-Mg; mekanik aktivasyon; XRD; SEM-EDS; granülometri; ara faz sınırları; hidrojen depolama.

Abstract

In this work, the structural-phase state and microstructure of ternary Pd-Ti-Mg powders after mechanical activation as candidates for solid-phase hydrogen storage were investigated. The starting elements were subjected to high-energy planetary milling (Pulverisette 7, 500 rpm; BPR=10:1) in an argon atmosphere. According to the X-ray phase analysis (CuK α), the phases fcc-Pd (Fm-3m, $a=3.887 \text{ \AA}$), α -Ti (hcp, P63/mmc, $a=2.950 \text{ \AA}$, $c=4.681 \text{ \AA}$), metastable fraction of fcc-Ti (Fm-3m, $a=4.060 \text{ \AA}$) and minor hcp-Mg (P63/mmc, $a=3.209 \text{ \AA}$, $c=5.211 \text{ \AA}$) are detected; No distinct intermetallic lines were detected in the bulk. Laser diffraction revealed a multimodal size distribution with $D_{10} \approx 5 \text{ \mu m}$, $D_{50} \approx 20 \text{ \mu m}$, $D_{90} \approx 50 \text{ \mu m}$ ($\text{span} \approx 2.25$), a fine mode $<5 \text{ \mu m}$ and a coarse-grained "tail" of 300-600 μm attributed to Mg. SEM-EDS mapping reveals a mosaic microstructure: isometric Pd-rich domains ($\approx 10\text{-}60 \text{ \mu m}$), lamellar Ti-rich fragments ($\approx 20\text{-}80 \text{ \mu m}$), local Pd-Ti colocalization at interfaces (pre-reaction state).

for Pd-Ti intermetallic compounds) and predominantly intergranular dispersed localization of Mg. The data collectively indicate the formation of shortened diffusion paths and high-energy boundaries favorable for accelerating (de)hydrogenation in the absence of massive intermetallic formation at the initial stage. It is shown that controlling milling parameters allows for targeted enhancement of beneficial Pd $\leftrightarrow$ Ti interface reactions while simultaneously limiting Mg segregation and oxidation, tuning the capacitive-kinetic characteristics and cyclic stability.

Knot Keywords: Pd-Ti-Mg, mechanical activation, X-ray diffraction, SEM-EDS; granulometry, interfacial boundaries, hydrogen save.

Кіріспе

Белгілі болғандай, сутегі энергиясы саласындағы заманауи зерттеулер сутегін тиімді қатты күйде сақтауды және тасымалдауды қамтамасыз ететін материалдарды жасауға бағытталған. Интерметаллдық және наноқұрылымды жүйелер циклдік сіңіру/десорбция процестеріндегі жоғары сыйымдылығы мен тұрақтылығына байланысты назар аудартады [1-3]. Атап айтқанда, сирек кездесетін жер металдары, титан және алюминий қосылыстары, сондай-ақ көміртекті наноматериалдары бар қорытпалар көңіл көншітетін нәтижелер көрсетеді. Мақсатты сипаттамаларға қол жеткізу мұндай материалдардың құрылымдық-фазалық күйін және физика-химиялық қасиеттерін терең түсінуді, сондай-ақ меншікті сыйымдылықты, (де)гидрлеу кинетикасын және беріктікті жақсарту үшін синтез және кейінгі өңдеу әдістерін оңтайландыруды талап етеді [4,5].

Сутегін сақтауға арналған материалды таңдаған кезде әдетте келесі негізгі параметрлер ескеріледі: жұмыс температурасы мен қысымы, реакция жылдамдығы және сорбциялық сыйымдылық [6-10]. Осыған байланысты, жоғарыда айтылғандай, сутегі энергиясы үшін жаңа материалдарды жасау физикалық және механикалық қасиеттерді, сондай-ақ материалдың негізгі бөлігінде де, оның бетінде де жүретін күрделі процестерді микроскопиялық зерттеуді қажет етеді. Көптеген эксперименттік зерттеулер болғанымен, қорытпалардағы сутегін сіңіру процесіне қорытпа қоспаларының әсерін теориялық тұрғыдан түсіну әлі де жеткіліксіз дамыған [11-14]. Осыған байланысты палладий және оның қорытпалары дәстүрлі түрде жоғары сутегі өткізгіштігі мен айқын каталитикалық қасиеттеріне байланысты эталондық материалдар болып саналды. Палладий әртүрлі сутегі технологияларына интеграциялануға мүмкіндік беретін бірнеше ерекше қасиеттерге ие. Pd каталитикалық және сутегін сіңіру қасиеттеріне байланысты сутегіге күшті аффинділігі бар бірегей материал болып саналады [15] және ол сутегі экономикасында маңызды рөл атқарады [16]. Сутегі энергиясында қолдануға арналған перспективалы аралық металл жүйелерінің бірі - үштік Pd-Ti-Mg жүйесі. Бұл материалдарға деген қызығушылық олардың бірегей сутегін сіңіру қасиеттерімен, сондай-ақ оларды сутегін сақтау үшін және отын элементтерінде пайдалану мүмкіндігімен байланысты. Pd гидридтерін қарқынды зерттеу іргелі ғылым мен инженерияның әртүрлі салаларында

жүргізілді. Палладийдің маңызды сипаттамасы - PdH_x құрамы бар гидридтерді түзу қабілеті (мұндағы $0 < x < 1$), бұл оны сутегін сақтау құрылғыларын әзірлеудің негізгі кандидаттарының біріне айналдырады. Көлемдік аналогтарынан айырмашылығы, наноқұрылымды материалдар жылдам зарядтау және разрядтау кинетикасын, ұзақ қызмет ету мерзімін және өлшемін реттейтін термодинамиканы көрсетеді [17]. Сондай-ақ, Mg негізіндегі материалдар, жоғары теориялық сыйымдылығына (MgH_2 үшін 7,6 салмақтық%) байланысты, сутегін сақтау үшін перспективалы кандидаттар болып саналады [18]. Сонымен қатар, олар масса тасымалын жеделдету және гидридтің ыдырау температурасын төмендету үшін кристалдық химия мен ақау құрылымын өзгертуді қажет етеді. Магний гидридін жақтайтын қосымша дәлелдерге Mg-нің көптігі мен төмен құны, оның уытты еместігі және төмен атомдық және молярлық массасы жатады [19]. Титан MgH_2 негізіндегі жүйелерге тиімді каталитикалық қоспа ретінде кеңінен зерттелген [20-26]. $Mg_xTi_yH_z$ типті көпкомпонентті жүйелерде Mg және Ti жеке гидридтерімен салыстырғанда (де)гидрлеу термодинамикалық және кинетикалық параметрлерінің жақсарғанына қол жеткізілетіні белгілі: бірқатар құрамдар үшін қатты фазадан төмен десорбция температураларында сутегінің бөлінуі байқалады [27,28]. Бұл жағдайда титан тек бетіндегі молекулалық сутегі диссоциациясының активаторы ретінде ғана емес, сонымен қатар жоғары температурада да Pd және Mg-ге қатысты төмен реактивтілігіне байланысты қолайлы элемент болып табылады; ол екінші реттік интерметаллдардың шамадан тыс түзілуінсіз пайдалы интерфейстердің түзілуіне ықпал етеді және H атомдары үшін диффузиялық «көпір» ретінде қызмет ете алады [29-31].

Механистік тұрғыдан алғанда, үштік Pd-Ti-Mg жүйелерінде фазааралық шекаралар мен ақаулық күйлерін жобалау маңызды рөл атқарады. Палладий молекулалық сутегінің беттік диссоциациясын және атомдық H_2 -нің шекараларға жеткізілуін қамтамасыз етеді; Mg және Pd-ге қатысты төмен химиялық белсенділікке ие титан «тұйық» фазалардың пайда болуына жол бермейді, сонымен бірге H_2 үшін тұзақ және гидридтер үшін ядролану орталықтары ретінде әрекет етеді. Магний негізгі көлемдік резервуар ретінде қызмет етеді, мұнда сутегі диффузиясы дислокация тығыздығымен, түйіршік өлшемімен, микроқұрылымдық гетерогенділік дәрежесімен және серпімді тор деформацияларының болуымен реттеледі. Механикалық активация ұсақ ұсақталудың, жоғары бұрыштық бағдарланудың, қатты ерітінділердің асқын қанығуының және метастабильді интерметаллдардың тіркесімін жасайды; бұл жалпы алғанда диффузия жолдарын азайтады, жоғары энергиялы түйіршік шекараларының үлесін арттырады және (де)гидрлеу үшін қажетті өтпелі күйлерді жеңілдетеді [32]. Екілік Mg-Pd ішкі жүйесі үшін сутегін сіңіру қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететін интерметаллдық фазалардың (Mg_6Pd , $Mg_{0.9}Pd_{1.1}$ т.б.) түзілу мүмкіндігі көрсетілген; рентгендік резонанс деректері бойынша механикалық қорытпалау кезеңінде тұрақты фазалар байқалады [33]. Ti қосу сутегі диффузиясының энергетикалық кедергісін одан әрі төмендетеді және гидридтің түзілуін жеделдетеді; MgH_2 жүйелеріндегі Ti құрамындағы қоспалар кинетиканы жақсартады және циклдік тұрақтылықты арттырады. Ұнтақталған үштік жүйеде бұл келесілердің тіркесімі ретінде көрінеді: (i) H_2

диссоциациясы үшін каталитикалық Pd түйіндері; (ii) H тасымалын жеңілдететін және оттегін ішінара алатын Ti-мен байытылған интерфейстер; (iii) негізгі көлемдік резервуар ретінде Mg матрицасы, онда қысқартылған диффузия жолдары және жоғары ақау фракциясы (дегидрогенизацияны) жеделдетеді.

Осыған байланысты, Pd-Ti-Mg механикалық активтендіруі ерекше тартымды болып көрінеді: ол орташа өңдеу шығындарымен және ұзақ уақыт бойы жоғары температуралық өңдеусіз ұсақ дисперстілікпен (ондағаннан жүздеген нанометрге дейін), жоғары ақау фракциясымен және дамыған фазааралық байланыс $Pd \leftrightarrow Ti \leftrightarrow Mg$ бар тепе-теңдіктен алыс күйлерді қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, өңдеу параметрлерін (диірмен жылдамдығы мен энергиясы, уақыт, BPR, атмосфера, интервал/үзіліс фрезерлеу) дәл реттеу фрагментация мен суық дәнекерлеу арасындағы бәсекелестікті бақылауға, Mg-Pd интерметаллдарының түзілу жылдамдығын және Ti таралуын реттеуге мүмкіндік береді.

Жоғарыда аталған алғышарттарға сүйене отырып, осы жұмыстың мақсаты - қатты денелі сутекті сақтау және тасымалдау үшін кандидат материал ретінде Pd-Ti-Mg жүйелік ұнтақтарының құрылымдық-фазалық күйін және механикалық белсендірілгеннен кейінгі эволюциясын зерттеу. Негізгі назар Pd/Ti/Mg интерфаза шекараларының рөліне, интерметаллдық құрамдас бөліктердің түзілуіне және олардың (де)гидрлеу термодинамикасы мен кинетикасына қосқан үлесіне, сондай-ақ қуаттың, жылдамдық сипаттамаларының және ұзақ мерзімді тұрақтылықтың қажетті тепе-теңдігіне қол жеткізу үшін синтез және өңдеу режимдерін кейіннен оңтайландыру әлеуетіне аударылады.

Материалдар мен тәсілдер

Бұл жұмыста зерттелген ұнтақ қоспалары Қытайдың Хэбэй провинциясындағы Hebei Suoyi New Material Technology компаниясынан алынған бөлшектердің өлшемдері <50 мкм және тазалығы 99% болатын Pd, Ti және Mg элементтік ұнтақтарынан жасалған. Өндірушінің техникалық деректер парағына сәйкес, бастапқы ұнтақтардың бөлшектердің өлшемі 30 мкм-ден аз болды. Микрон өлшемді вольфрам карбид ұнтақтарын пайдалану нәтижесінде алынған қатты қорытпалардың беріктік сипаттамаларын жақсартуға қабілетті ұсақ түйіршікті құрылымды қалыптастыру қажеттілігіне байланысты болды.

Механикалық белсендіру үшін алдын ала дайындалған шихтаның шамамен 9 г 45 мл тот баспайтын болаттан жасалған фрезерлік шарлары (диаметрі 10 мм) бар, шар мен ұнтақ массасының қатынасы 10:1 болатын 45 мл тот баспайтын болаттан жасалған ыдысқа салынды. Тотығуды болдырмау үшін тиеу VGB-3C аргон қолғап қорабында жүргізілді. Ыдыс тығыздалып, Fritsch GmbH, Германиядағы Pulverisette 7 Premium Line планеталық микродиірменіне орнатылды. Ұнтақтау 500 айн/мин айналу жылдамдығымен жүргізілді. Әдебиеттерге сәйкес, бұл жылдамдық шамадан тыс суық дәнекерлеусіз немесе тұтану қаупінсіз тиімді механикалық қорытпалау үшін оңтайлы болып

табылады, бұл бөлшектердің фрагментациясы мен бақыланатын температурада қорытпалау үшін жеткілікті жоғары энергиялы соққы режимін қамтамасыз етеді.

Беттік морфология жоғары ажыратымдылықтағы сканерлеуші электронды микроскопия (SEM, Tescan Mira) көмегімен зерттелді. Алынған микрографтар бөлшектердің агрегациясы мен пішін сипаттамаларын визуализациялауға мүмкіндік берді. Механохимиялық белсендіруден кейін Pd-Ti-Mg ұнтақ қоспаларының фазалық құрамын анықтау үшін бөлме температурасында 20°-тан 90°-қа дейінгі 2 θ диапазонында (Cu) K α сәулелену көзі (λ = 1.5406 Å) бар XpERT-PRO Panalytcs дифрактометрін пайдаланып рентгендік фазалық талдау жүргізілді. Ұнтақтардың бөлшектердің өлшемдік таралуы әртүрлі диаметрлі бөлшектер тудыратын шашыраңқы сәулеленудің қарқындылығын өлшеу принциптеріне негізделген автоматтандырылған бөлшектердің өлшемдік анализаторымен (Analysette-22 NeXT Nano, Fritsch, Германия) лазерлік дифракцияны қолдану арқылы өлшенді. Өлшеулер агломераттарды ыдырату және репрезентативті таралуды алу үшін ультрадыбыстық өңдеумен сұйық дисперсиялық ортада жүргізілді.

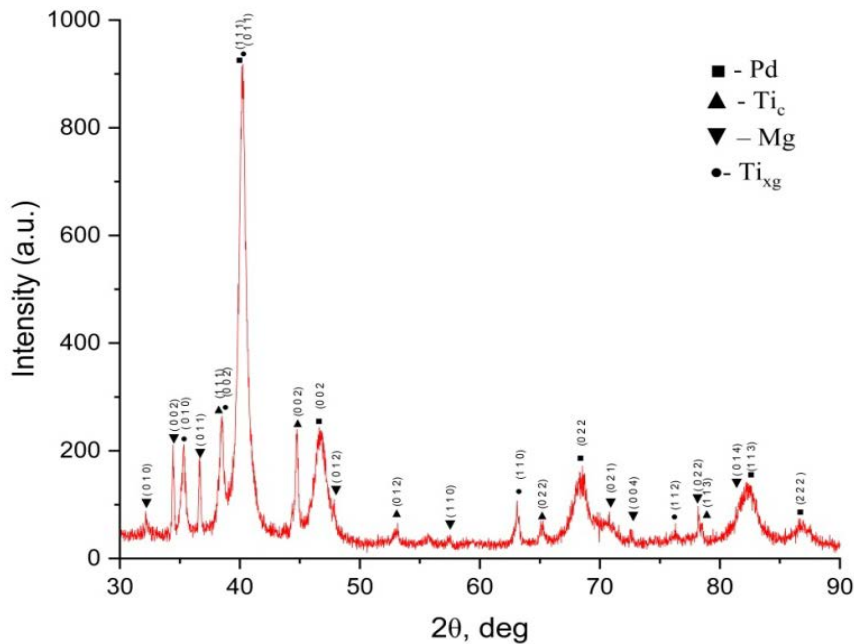
Нәтижелер мен пікірталас

Алынған дифракциялық үлгіде (CuK α , 2 θ ≈30-90°) Pd-Ti-Mg жүйесінің элементтік металл фазаларына сенімді түрде индекстелетін шағылысулар жиынтығы жазылады. Ең жоғары қарқындылық 2 θ ≈40° аймағындағы шыңмен (тар, сигнал-фон қатынасы жоғары) көрсетілген, бұл fcc палладийдің (Fm-3m, a =3.887 Å) (111) шағылысуына сәйкес келеді. Қосымша палладий шағылысулары 2 θ ≈46-47° ((200)), 67-69° ((220)), 81-83° ((311)), 85-87° ((222)) аймақтарында бақыланады, бұл fcc-Pd үшін JCPDS анықтамалық карталарына сәйкес келеді. Pd шағылысуларының қарқындылық қатынастары кестелік мәндерге жақын және айқын текстураның белгілері жоқ (артықшылықты бағдар).

Титан екі модификацияда болады. Біріншіден, кубтық Ti фазасы анықталады (Ti_c деп белгіленеді), ол метастабильді fcc модификациясы (Fm-3m, a =4.060 Å) ретінде түсіндіріледі, оның түзілуі жоғары энергиялы механикалық активтендіру/механикалық қорытпалау нәтижесінде мүмкін болады. Оның шағылысулары 2 θ ≈41-42° ((200)), ≈70° ((220)) және ≈82° ((311)) аймақтарымен қабаттасады, Pd шыңдарына ішінара қабаттасады және байқалған иықтарға/профильдердің асимметриясына ықпал етеді. Екіншіден, титанның алтыбұрышты α -формасы бар (Mg типті құрылым, P6₃/mmc, a =2.950 Å, c =4.681 Å): сипаттамалық шағылысулар 2 θ ≈35-36° ((100)), 38-39° ((002)) және 40-41° ((101)) аймақтарында тіркеледі, мұнда олар күшті (111) Pd-мен ішінара сәйкес келеді. Бұл қабаттасу негізгі шыңның ~40°-тағы аздаған асимметриясын және әлсіз серіктік максимумдардың болуын түсіндіреді.

Магний алтыбұрышты фаза ретінде анықталады (Mg типті құрылым, P6₃/mmc, a =3.209 Å, c =5.211 Å). Ол үшін (100) шағылысу 2 θ ≈32-33°, (002) ~34-35°, (101) ~36-37° аймағында, сондай-ақ жоғары бұрышты (102), (110), (103) және

басқаларында күтіледі. Жұмыс сканерлеу диапазонында төмен бұрышты жиекте (шамамен 32-33°-тан бастап) әлсіз Mg шыңдары және 58-75° аралығында бірнеше төмен қарқынды максимумдар көрінеді, бұл магнийдің аз үлесімен және жеңіл элемент үшін салыстырмалы түрде төмен шашырау коэффициентімен сәйкес келеді.

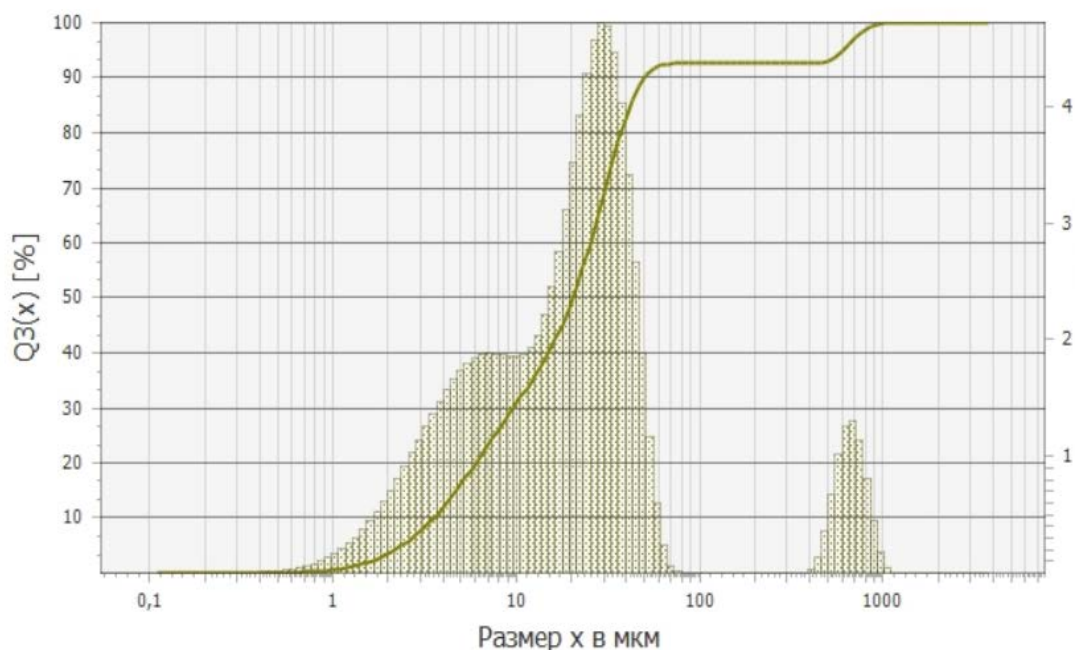


1-сурет. Pd-Ti-Mg жүйесінің рентгендік ұнтақ дифракциялық үлгісі

Q3(x) қисығынан сипаттамалық квантил диаметрлері анықталады: $D_{10} \approx 5$ мкм, $D_{50} \approx 20$ мкм, $D_{90} \approx 50$ мкм, бұл $span = (D_{90} - D_{10}) / D_{50} \approx 2.25$ болатын кең, полидисперсті жүйеге сәйкес келеді. Көлемге негізгі үлес ($\approx 70-80\%$) орташа өлшемді 10-40 мкм бөлшектерден түзіледі; бұл аймақтағы гистограмма логарифмдік нормаға жақын және 15-25 мкм шамасында айқын максимумды көрсетеді. Бұл аралық бастапқы Pd және Ti ұнтақтарына тән және көлемдік тығыздық пен меншікті беттік аудан арасында қолайлы ымыраға келуді қамтамасыз етеді. 0,8-5 мкм аймағында ұсақ, төмен қарқындылық режимі тіркеледі. Оның шығу тегі елеу, тасымалдау немесе бастапқы механикалық өңдеу кезінде пайда болған ұсақ дисперсті Pd/Ti фрагменттерімен, сондай-ақ анализатордың дисперсті ортасындағы агрегаттардың ішінара ыдырауымен байланысты болуы мүмкін. Белгіленген ұсақ фракция қоспаның меншікті беткі ауданын және реактивтілігін арттырады; дегенмен, ол реологияны нашарлатуы (тұйықталуы, шаңдануы) және белсенді компоненттердің тотығуын жеделдетуі мүмкін. Шкаланың қарама-қарсы жағында $\sim 300-600$ мкм тар ірі түйіршікті режим байқалады (жинақталған өсім $\approx 5-10\%$). Бөлшектердің морфологиясы мен тығыздығын ескере отырып, оны бастапқы Mg ұнтағына жатқызу орынды. Мұндай «құйрықтың» болуы қоспаның екі/көпмодальдылығына және сақтау және беру кезінде (фракциялар мен тығыздық бойынша бөлу) ықтимал

сегрегацияға, ал механикалық белсендіру процестерінде соққы энергиясының біркелкі емес берілуіне әкеледі: ірі Mg бөлшектері «қатты қосындылар» ретінде әрекет етеді, жергілікті түрде ұсақталуды күшейтеді, бірақ сонымен бірге қайталануды нашарлатады және суық дәнекерлеу қаупін арттырады.

$Q3(x)$ қисығы шамамен 50 мкм (көлемнің $\approx 90-95\%$) «платоға» жетеді, содан кейін 300-600 мкм аймағында екінші қадам жасайды, бұл визуалды мультимодальды гистограммамен жақсы үйлеседі. 1 мм-ден асатын үлкен бөлшектердің айтарлықтай белгілері іс жүзінде жоқ; жоғарғы құйрық 1-1,5 мм-ге жуық жерде кесілген.



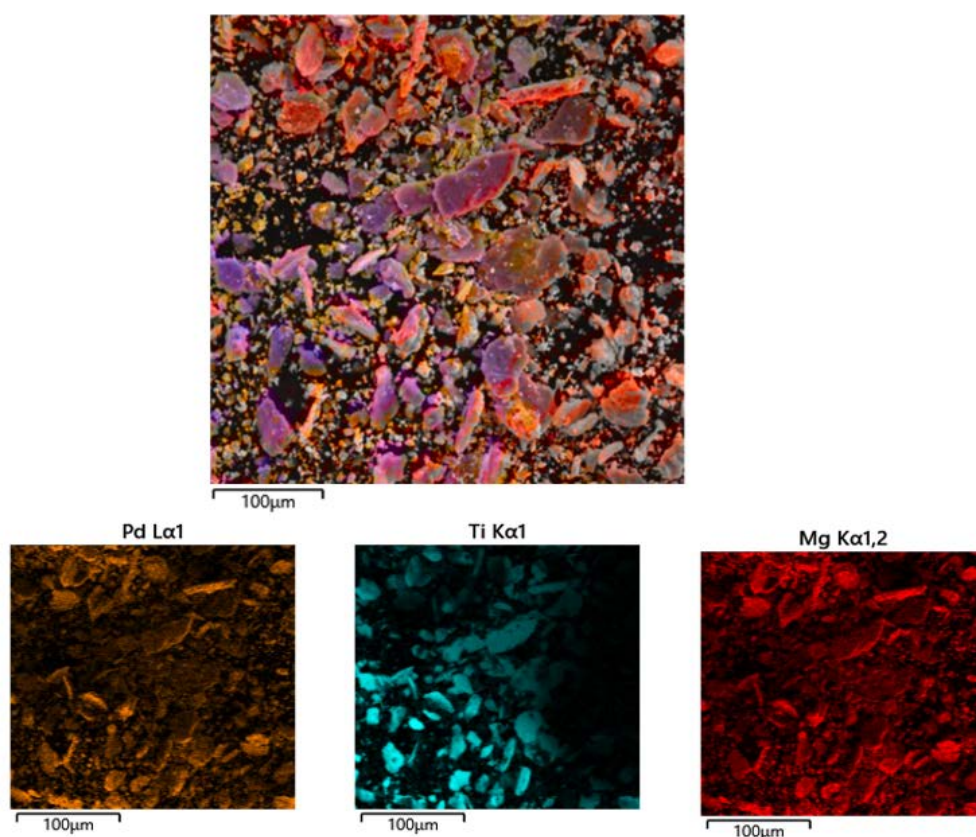
2-сурет. Pd-Ti-Mg жүйесінің бөлшектер мөлшерінің таралуы

SEM-EDS картаға түсіру (3-сурет) бастапқы қоспаның айқын фазалық гетерогенділігін көрсетеді, бұл рентгендік фазалық талдау нәтижелеріне сәйкес келеді. Палладий Pd L α 1 қарқындылығының тегіс шекаралары мен шектеулі доменішілік өзгергіштігі бар шамамен 10-60 мкм өлшемді ықшам изометриялық домендерді құрайды, бұл осы аймақтардың бір фазалы сипатын көрсетеді. Керісінше, титан 20-80 мкм пластина тәрізді қабыршақты фрагменттермен ұсынылған, көбінесе механикалық деформацияланған hcp-Ti бөлшектеріне тән ішінара өзара қабаттасуы бар пакеттерді құрайды. Pd және Ti арналарын салыстыру сигналдардың кеңістіктік қабаттасуы аймақтарын көрсетеді, олар тығыз бетаралық жанасу аймақтары ретінде түсіндіріледі. Pd-Ti интерметаллдарының (PdTi, Pd₂Ti, Pd₃Ti) термодинамикалық тұрақтылығын ескере отырып, мұндай колокализацияны реакция алдындағы күй деп санауға болады, мұнда реттелген қосылыстардың ядролануы шағын өлшемдермен

және көлемдік үлеспен шектеледі және сондықтан ұнтақ рентгенограммасында бөлек сызықтар ретінде көрінбейді.

Магнийдің таралуы сапалық тұрғыдан әртүрлі. Mg K α 1,2 қарқындылығы төмен және фрагменттелген; сигнал түйіршікаралық аймақтар мен кеуектер бойымен күшейеді, бұл Pd және Ti-дегі Mg-нің өте төмен өзара ерігіштігімен және бетаралық сегрегацияға бейімділігімен сәйкес келеді. Көру аймағында үлкен «таза» Mg қосындыларының болмауы рентгендік резонанспен сәйкес келеді, мұнда магний әлсіз шағылысулары бар кіші фаза ретінде көрінеді. Аналитикалық шектеулерді ескеру қажет: төмен энергиялы Mg сызығы матрицада және оксид пленкаларында сіңуге ұшырайды, сондықтан ЭДС арқылы Mg-нің сандық үлесі бағаланбаған болуы мүмкін; дегенмен, таралу топологиясы негізінен түйіршікаралық локализацияны біржақты көрсетеді.

ЭДС карталарымен көрінетін морфологиялық белгілер гранулометриямен жақсы сәйкес келеді (D10 $\approx$ 5 мкм, D50 $\approx$ 20 мкм, D90 $\approx$ 50 мкм): 10-40 мкм класының басымдығы Pd/Ti бөлшектерінің көлемдік үлесіне сәйкес келеді, ал ұсақ дисперсті фрагменттер <5 мкм түйіршікаралық «қабат» түзеді, бұл Pd $\leftrightarrow$ Ti жанасу аймағын арттырады. Мұндай архитектура кейінгі термомеханикалық өңдеу кезінде қатты дене өзара әрекеттесуіне қолайлы: іріленген домендер тұрақты жылу беруді қамтамасыз етеді, ал ұсақ фракция қысқа диффузия жолдарын және белсенді шекаралардың тығыздығының артуын қамтамасыз етеді.



3-сурет. Pd-Ti-Mg ұнтағындағы элементтердің таралуының SEM-EDS карталары

Бақылаулар бірге алғанда мыналарды растайды: (i) тұрақты бетаралық байланыстары бар Pd және Ti бөлінген металл фазаларының болуы; (ii) Mg шашыраңқы түйіршікаралық локализациясы; (iii) $\text{Pd} \leftrightarrow \text{Ti}$ байланыс орындарында ядролану ықтималдығы жоғары болған кезде, негізгі деңгейде дамыған интерметаллдардың болмауы. Бұл зерттеу нәтижелері Pd-Ti диффузиясын күшейту және Mg тотығуы мен бөлінуін бір мезгілде шектеу үшін кейінгі өңдеумен басқарылатын қыздыру/ұстап тұру стратегиясын анықтайды.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу үштік Pd-Ti-Mg жүйесінің механикалық активтенуі fcc-Pd, α -Ti (hcp) және fcc-Ti-дің аз метастабильді фракциясы бар минорлық hcp-Mg элементтік фазалары тұрақты түрде бірге өмір сүретін көп компонентті микроқұрылымды құрайтынын көрсетеді. Қазіргі өңдеу кезеңінде интерметаллдардың айқын шағылысулары пайда болмайды, бұл олардың өте аз көлемдік фракциясын немесе профильді талдаусыз ұнтақ рентгенограммасының анықтау шегінен төмен орналасқан әлеуетті ядролардың субмикрондық өлшемдерін көрсетеді. Сонымен қатар, SEM-EDS картасы Pd және Ti байланыс аймақтарында жергілікті колокализациясын тіркейді, оны $\text{PdTi}/\text{Pd}_2\text{Ti}$ сияқты реттелген қосылыстардың ядролануының алдын ала реакция күйі ретінде түсіндіруге болады. Дамыған фазалық шекаралардың қатысуымен массивті интерметаллдардың болмауының бұл үйлесімі жеделдетілген (де)гидрлеу үшін қолайлы бастапқы күй болып табылады.

Гранулометрия ұнтақтың ($D_{10} \approx 5$ мкм, $D_{50} \approx 20$ мкм, $D_{90} \approx 50$ мкм) полидисперсті, мультимодальды сипатын көрсетеді, ол ұсақ 5 мкм-ден кіші режимде және Mg бөлшектеріне жатқызылады, шамамен 300-600 мкм ірі құйрықты құрайды. Бөлшектердің бұл «құрылымы» технологиялық шектеулер мен мүмкіндіктерді белгілейді: ұсақ фракция меншікті беткі ауданды және ақау тығыздығын арттырады, H үшін диффузия жолдарын қысқартады және тез қанығуды қамтамасыз етеді; 10-40 мкм орташа класты ұнтақ қолайлы көлемдік тығыздықты және орауыштың қайталануын қамтамасыз етеді; үлкен Mg құйрығы, керісінше, ұнтақтау кезінде сегрегация және біркелкі емес энергия берілісінің қаупін арттырады. Демек, ірі құйрықтың бақыланатын тарылуы (Mg-ны сақтау/деагломерациялау) және ұсақ фракцияның дозаланған түрде сақталуы (агрегация мен тотығуды бақылаумен) қасиеттің тұрақтылығы мен процестің масштабталуы үшін маңызды болып көрінеді.

Механистік тұрғыдан алғанда, деректер жиынтығы механикалық активтендірудің қысқартылған диффузия жолдарын жасайтынын, жоғары энергиялы шекаралардың үлесін арттыратынын және $\text{Pd} \leftrightarrow \text{Ti} \leftrightarrow \text{Mg}$ интерфейстерінің желісін құратынын көрсетеді. Бұл желіде Pd H_2 диссоциациясының катализаторы және атомдық сутегі үшін «кіру қақпасы» ретінде әрекет етеді; Ti «диффузия көпірі» және гидридті фазалар үшін әлеуетті ядролану орталығы ретінде қызмет етеді; Mg сутегін сақтауға арналған

негізгі көлемдік резервуар болып табылады. Бастапқыда массивті интерметаллдардың болмауы тасымалдауды блоктайтын «тұйыққа тірелген» фазалардың алдын алуға көмектеседі және термиялық өңдеу арқылы кейінгі дәл баптау үшін икемділікті сақтайды.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер механикалық белсендірілген Pd-Ti-Mg ұнтақтарын қатты денелі сутегін сақтау платформасы ретінде пайдаланудың орындылығын растайды. Одан әрі оңтайландыру стратегиясы мыналарға негізделуі керек: (a) дисперстілікті және Pd↔Ti байланыс желісін ақаулықтың минималды жоғалуымен дәл реттеу; (b) көлемді ретке келтіруге көшпей, интерфейстердегі аралық металл белсенділігінің бақыланатын «қосылуы»; (c) масса алмасу кедергілерін азайту үшін Mg бетінің химиясын инженерлік басқару. Бұл стратегияны бақыланатын фрезерлеу режимдері және in-situ диагностикасы бар термоциклдеу арқылы жүзеге асыру реттелетін сыйымдылығы, жеделдетілген (дегидрогенизация) кинетикасы және циклдік тұрақтылығы жоғары материалдарға жол ашады, бұл сутегі энергиясында практикалық қолдану үшін өте маңызды.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

Қорытынды: Автор(лар) осы мақаланы зерттеу және/немесе жариялау үшін қаржылық қолдау алынғанын мәлімдейді. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады. (ГРАНТ № AP26194265) .

Қолданылған әдебиеттер

1. Mekonnin A. S. et al. Hydrogen storage technology, and its challenges: a review // *Catalysts*. – 2025. – Т. 15. – №. 3. – С. 260. <https://doi.org/10.3390/catal15030260>
2. Xu Y. et al. Engineering LiBH₄-Based Materials for Advanced Hydrogen Storage: A Critical Review of Catalysis, Nanoconfinement, and Composite Design // *Molecules*. – 2024. – Т. 29. – №. 23. – С. 5774. <https://doi.org/10.3390/molecules29235774>
3. Giza K. et al. Hydrogen Materials and Technologies in the Aspect of Utilization in the Polish Energy Sector // *Applied Sciences*. – 2024. – Т. 14. – №. 21. – С. 10024. <https://doi.org/10.3390/app142110024>
4. Yang X. et al. Hydrogen storage performance of Mg/MgH₂ and its improvement measures: research progress and trends // *Materials*. – 2023. – Т. 16. – №. 4. – С. 1587. <https://doi.org/10.3390/ma16041587>
5. Jung, Hwaebong, Sungmee Cho, and Wooyoung Lee. "Enhanced hydrogen storage properties of Pd/Ti/Mg/Ti multilayer films using the catalytic effects of Pd." *Applied Physics Letters* 106.19 (2015).
6. Dębski A. et al. Mechanical synthesis and calorimetric studies of the enthalpies of formation of chosen Mg-Pd alloys // *Molecules*. – 2024. – Т. 29. – №. 23. – С. 5734. <https://doi.org/10.3390/molecules29235734>

7. Nivedhitha K. S. et al. Enhancing hydrogen storage capacity: MWCNT-infused Mg-Ti alloy synthesized via mechanical alloying //International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Т. 67. – С. 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.135>
8. Altaf M., Demirci U. B., Haldar A. K. Review of solid-state hydrogen storage: Materials categorisation, recent developments, challenges and industrial perspectives //Energy Reports. – 2025. – Т. 13. – С. 5746-5772. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.05.034>
9. Zhang Y. et al. A review on advances, strategies, and future perspectives of solid-state hydrogen storage materials //Sustainable Chemistry for Energy Materials. – 2025. – С. 100014. <https://doi.org/10.1016/j.scenem.2025.100014>
10. Chen G. et al. Review of Hydrogen Storage in Solid-State Materials //Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 11. – С. 2930. <https://doi.org/10.3390/en18112930>
11. Kalibek M. R. et al. Solid-state hydrogen storage materials //Discover Nano. – 2024. – Т. 19. – №. 1. – С. 195. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04137-y>
12. Xu Y. et al. Magnesium-based hydrogen storage alloys: advances, strategies, and future outlook for clean energy applications //Molecules. – 2024. – Т. 29. – №. 11. – С. 2525. <https://doi.org/10.3390/molecules29112525>
13. Guan S. et al. Progress and perspectives on hydrogen storage and release in negative hydrogen medium //Energy & Environmental Science. – 2025. <https://doi.org/10.1039/D5EE04149J>
14. Alasali F. et al. A review of hydrogen production and storage materials for efficient integrated hydrogen energy systems //Energy Science & Engineering. – 2024. – Т. 12. – №. 5. – С. 1934-1968. <https://doi.org/10.1002/ese3.1723>
15. Alkhabet M. M. et al. Palladium (Pd) coated fiber optic hydrogen sensors: A review //Materials Science in Semiconductor Processing. – 2025. – Т. 188. – С. 109204. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.109204>
16. Bannenberg L. J. et al. Palladium-PTFE Metal-Polymer Nanocomposite Film Produced by Cosputtering for Hydrogen Sensing Applications //ACS Applied Energy Materials. – 2025. – Т. 8. – №. 9. – С. 5664-5674. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03202>
17. Fovanna T. et al. Preparation, quantification, and reaction of Pd hydrides on Pd/Al₂O₃ in liquid environment //Acs Catalysis. – 2023. – Т. 13. – №. 5. – С. 3323-3332. <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c04791>
18. Setayandeh S. S., Webb C. J., Gray E. M. A. Electron and phonon band structures of palladium and palladium hydride: a review //Progress in Solid State Chemistry. – 2020. – Т. 60. – С. 100285. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2020.100285>
19. Camuti L. et al. Phase-Stable Palladium Hydride Derived from PdCoO₂ for Sustainable Hydrogen Evolution Reaction //Advanced Functional Materials. – 2025. – С. e14366. <https://doi.org/10.1002/adfm.202514366>

20. Liu C. et al. Review on improved hydrogen storage properties of MgH_2 by adding new catalyst //Journal of Energy Storage. – 2024. – T. 97. – C. 112786. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112786>
21. Jangir M., Jain I. P., Mirabile Gattia D. Effect of Ti-based additives on the hydrogen storage properties of MgH_2 : a review //Hydrogen. – 2023. – T. 4. – №. 3. – C. 523-541. <https://doi.org/10.3390/hydrogen4030034>
22. Sun Z. et al. Enhancing hydrogen storage properties of MgH_2 by transition metals and carbon materials: A brief review //Frontiers in Chemistry. – 2020. – T. 8. – C. 552. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00552>
23. Xu Y. et al. Ball milling innovations advance Mg-based hydrogen storage materials towards practical applications //Materials. – 2024. – T. 17. – №. 11. – C. 2510. <https://doi.org/10.3390/ma17112510>
24. Lobo N., Klimkowicz A., Takasaki A. Effect of $\text{TiO}_2 + \text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{TiH}_2$ Catalysts on Hydrogen Storage Properties of Magnesium Hydride //MRS Advances. – 2020. – T. 5. – №. 20. – C. 1059-1069. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.29>
25. Wu Z. et al. The Improvement in Hydrogen Storage Performance of MgH_2 Enabled by Multilayer Ti_3C_2 . Micromachines 2021; 12 <https://doi.org/10.3390/mi12101190>
26. Yang M. et al. Incorporating in-situ formed Ti_3C_2 and oxygen vacancies to TiO_2 via Ni loading for superior hydrogen storage in magnesium hydride //International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – T. 169. – C. 151158. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.151158>
27. Bu F. et al. Synergistic effect of multivalent Ti, Zr, and oxygen vacancies to significantly enhance the hydrogen sorption properties of MgH_2 //Journal of Materials Chemistry A. – 2025. – T. 13. – №. 21. – C. 16102-16111. <https://doi.org/10.1039/D5TA01302J>
28. Luo W. et al. Multivalent Ti/Nb catalysts with oxygen vacancies: Bridging electron transfer pathways to enhance MgH_2 hydrogen desorption property //Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – C. 181070. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.181070>
29. Sun H. et al. Hydrogen storage properties of TiFe-based composite with Ni addition //Heliyon. – 2024. – T. 10. – №. 24. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41022>
30. Czujko T., Oleszek E. E., Szot M. New aspects of MgH_2 morphological and structural changes during high-energy ball milling //Materials. – 2020. – T. 13. – №. 20. – C. 4550. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13204550>
31. Polanski M., Bystrzycki J., Plocinski T. The effect of milling conditions on microstructure and hydrogen absorption/desorption properties of magnesium hydride (MgH_2) without and with Cr_2O_3 nanoparticles //International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – T. 33. – №. 7. – C. 1859-1867. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.01.043>

32. Liu Y., Chabane D., Elkedim O. Intermetallic compounds synthesized by mechanical alloying for solid-state hydrogen storage: a review. *Energies* 2021; 14: 5758. <https://doi.org/10.3390/en14185758>
33. Hwang K. et al. Enhanced initial hydrogenation of TiFe-based hydrogen storage alloys containing C // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2025. – C. 183716. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183716>

Green Energy Literacy in Secondary Geography Curricula of the Organization of Turkic States: A Comparative Curriculum Analysis

Türk Devletleri Teşkilatı Ülkelerinin Lise Coğrafya Öğretim Programlarında Yeşil Enerji Okuryazarlığı: Karşılaştırmalı Bir Program Analizi

Eyüp Artvinli

Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Education, Eskişehir, Türkiye

Niyazi Kaya

Assoc. Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Education, Eskişehir, Türkiye

Abstract

The purpose of this study is to comparatively examine how green energy literacy is addressed in the secondary school geography curricula of the full member states of the Organization of Turkic States. The study was conducted within the framework of a qualitative research approach using a document analysis design. The data sources consisted of secondary-level geography curricula from Türkiye, Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, and Uzbekistan. The curricula were analyzed in terms of the extent to which green energy and related concepts were included, the knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions of green energy literacy, as well as the similarities and differences among countries. The findings revealed that environmental issues, natural resources, sustainability, and human-nature relationships occupy an important place in all of the examined curricula. However, the extent to which green energy and renewable energy concepts are directly addressed varies across countries. The Turkish curriculum stands out for explicitly associating renewable energy, energy conservation, and energy transition concepts with learning outcomes and instructional activities. In the curricula of Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, and Uzbekistan, green energy literacy is structured more indirectly within the context of natural resources, environmental issues, ecological awareness, and sustainability. As a result, the study concludes that geography education in the member states of the Organization of Turkic States has significant potential for promoting green energy literacy; however, this area needs to be strengthened through more explicit, systematic, and practice-oriented curricular approaches.

Keywords: green energy literacy; geography education; curriculum; Organization of Turkic States.

Özet

Bu araştırmanın amacı, Türk Devletleri Teşkilatı'na tam üye ülkelerin lise coğrafya öğretim programlarında yeşil enerji okuryazarlığının nasıl ele alındığını karşılaştırmalı olarak incelemektir. Araştırma, nitel araştırma yaklaşımı kapsamında doküman analizi deseniyle yürütülmüştür. Veri kaynaklarını Türkiye, Azerbaycan, Kazakistan, Kırgızistan ve Özbekistan'ın lise düzeyindeki coğrafya öğretim

programları oluşturmuştur. Programlar; yeşil enerji ve ilişkili kavramlara yer verme düzeyi, yeşil enerji okuryazarlığının bilgi, beceri, değer/tutum ve eylem boyutları ile ülkeler arası benzerlik ve farklılıklar açısından analiz edilmiştir. Bulgular, incelenen programların tamamında çevre, doğal kaynaklar, sürdürülebilirlik ve insan-doğa ilişkisi temalarının önemli yer tuttuğunu göstermektedir. Bununla birlikte yeşil enerji ve yenilenebilir enerji kavramlarının programlarda doğrudan ele alınma düzeyi ülkeler arasında farklılaşmaktadır. Türkiye programı, yenilenebilir enerji, enerji tasarrufu ve enerji dönüşümü kavramlarını doğrudan öğrenme çıktıları ve etkinliklerle ilişkilendirmesi bakımından öne çıkmaktadır. Azerbaycan, Kazakistan, Kırgızistan ve Özbekistan programlarında ise yeşil enerji okuryazarlığı daha çok doğal kaynaklar, çevre sorunları, ekolojik bilinç ve sürdürülebilirlik bağlamında dolaylı biçimde yapılandırılmıştır. Sonuç olarak, Türk Devletleri Teşkilatı ülkelerinde coğrafya eğitiminin yeşil enerji okuryazarlığı açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu; ancak bu alanın programlarda daha açık, sistematik ve uygulama temelli biçimde güçlendirilmesine ihtiyaç bulunduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil enerji okuryazarlığı; coğrafya eğitimi; öğretim programı; Türk Devletleri Teşkilatı.

Introduction

Climate change, the energy crisis, carbon emissions, biodiversity loss, and the sustainable use of natural resources are among the main problem areas affecting education systems on a global scale today. Especially in line with renewable energy, energy transition, and sustainable development goals, it has become increasingly important for individuals to develop environmental awareness, energy consciousness, and sustainable living skills (UNESCO, 2020; United Nations, 2015).

In this context, green energy literacy is considered a multidimensional area of competence related to individuals' recognizing energy resources, evaluating the environmental effects of energy use, analyzing sustainable energy solutions, and developing environmental responsibility (Monroe et al., 2019). Geography education has an important role in developing green energy literacy because it directly addresses topics such as human-nature relationships, natural resource use, environmental sustainability, energy resources, climate systems, and global environmental problems (Stevenson, 2007).

Geography courses support students not only in acquiring environmental knowledge, but also in analyzing environmental problems, establishing cause-effect relationships, developing sustainable living skills, and participating in environmental decision-making processes (Hungerford & Volk, 1990). When the development of geography curricula in Türkiye is examined, it is seen that the dimensions of environment, sustainability, and geographical skills have become more visible, especially in recent curricula (Kızılçaoğlu, 2006).

The Organization of Turkic States (OTS) is an international organization that aims to develop cooperation among the countries of the Turkic world, especially Türkiye, Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, and Uzbekistan, in the fields of education, culture, and science (Organization of Turkic States, 2021).

In recent years, common education policies, common instructional materials, and studies on developing common course contents for the Turkic world have gained importance within the scope of the OTS. The Turkic World Geography Course Curriculum, prepared within this scope, emphasizes research, inquiry, problem solving, project development, and environmental awareness skills (Ministry of National Education [MoNE], 2022).

In Türkiye, the secondary school geography curriculum includes topics such as sustainability, energy resources, environmental problems, climate change, and the conscious use of natural resources to a significant extent. In the current geography curriculum prepared within the scope of the Türkiye Century Education Model, it is aimed that students analyze environmental problems, develop sustainable living skills, and evaluate changes in energy use (MoNE, 2024).

In particular, the association of renewable energy, energy conservation, and energy transition concepts with learning outcomes makes the Turkish curriculum noteworthy. In Azerbaijan, geography education is structured more around environment, natural resources, economic geography, and geographical skills. It is seen that contents related to environmental problems, natural resource use, and human-nature relationships have an important place in Azerbaijani geography textbooks (Yıldırım & Baloğlu Uğurlu, 2023). However, the level at which renewable energy or green energy concepts are structured as a direct and independent instructional area appears to be more limited.

In Kazakhstan, functional literacy, environmental awareness, and a geoecological approach come to the fore in geography education. Geographical skills, environmental problems, and natural resource management have an important place in education programs (Akhmetova, 2020).

Emphases on problem solving, analysis, and evaluating environmental processes are noteworthy. In Kyrgyzstan, geography education is structured around environment, human-nature relationships, natural resource use, and ecological awareness. Through geography courses, it is aimed that students develop environmental awareness, interpret natural processes, and acquire geographical thinking skills (Ismailov, 2019). However, there is limited evidence that green energy literacy is structured as an independent and systematic instructional area.

In Uzbekistan, the concepts of “ekologik savodxonlik” (ecological literacy), conscious use of natural resources, environmental problems, and sustainable development stand out remarkably in geography curricula (Uzbekistan Ministry of Public Education, 2022).

In the curricula, it is aimed that students analyze environmental problems, think critically, develop solution proposals, and participate in project-based learning processes. Although there are many studies in the international literature on environmental education, education for sustainable development, and climate change education, it is seen that studies comparatively examining the geography curricula of the countries of the Organization of Turkic States in terms of green energy literacy are quite limited (Tilbury, 2011; UNESCO, 2017).

Existing studies mostly focus on environmental education, sustainability education, or cultural contents in textbooks. This situation increases the need for comparative studies that reveal how green energy literacy is structured in the context of geography curricula in the countries of the Turkic world. In addition, although studies based on environmental education and sustainability are extensive in the existing literature, it is seen that studies directly examining green energy literacy comparatively in the context of geography curricula are quite few.

This research aims to comparatively examine the secondary school geography curricula of the full member states of the Organization of Turkic States in terms of green energy literacy. In the research, the secondary school geography curricula of Türkiye, Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, and Uzbekistan were analyzed in terms of the level of inclusion of green energy and related concepts, the knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions, and the similarities and differences among countries. In this respect, it is thought that the study will contribute to understanding common pedagogical approaches in the fields of environmental sustainability, energy education, and geography teaching in the Turkic world.

In line with these explanations, the main problem sentence of the study was determined as follows: "How is green energy literacy addressed in the secondary school geography curricula of the full member states of the Organization of Turkic States?"

To find an answer to this question, the following sub-problems were developed.

1. To what extent are the concepts of green energy, renewable energy, sustainable energy, and energy transition included in the secondary school geography curricula of the full member states of the Organization of Turkic States?
2. How is green energy literacy structured in these curricula in terms of knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions?
3. What similarities and differences exist among the countries' secondary school geography curricula in terms of green energy literacy?

Method

Research Design

This study was conducted within the scope of the qualitative research approach using the document analysis design. Qualitative research aims to examine individuals' experiences, perceptions, social processes, and meaning structures in their natural settings (Creswell, 2017).

Document analysis is a data collection and analysis method based on the systematic examination and interpretation of written documents (Yıldırım & Şimşek, 2021). In this study, the secondary school geography curricula of the full member states of the Organization of Turkic States were comparatively examined in terms of green energy literacy. The study was structured within the framework of the comparative education approach. Accordingly, the secondary school geography curricula of Türkiye, Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, and Uzbekistan were evaluated in terms of the

level of inclusion of green energy and related concepts, the knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions, and the similarities and differences among countries.

Data Sources

The data sources of the study consisted of the current secondary school geography curricula of the full member states of the Organization of Turkic States: Türkiye, Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, and Uzbekistan. In the study, only current and accessible curriculum documents published by the ministries of education, official educational institutions, or official curriculum platforms of the related countries were used. In this context, the data related to Türkiye were obtained from the current geography curricula published by the Ministry of National Education; the data related to Azerbaijan were obtained from the geography curricula published by the Ministry of Education of the Republic of Azerbaijan; the data related to Kazakhstan and Kyrgyzstan were obtained from the related curriculum documents; and the data related to Uzbekistan were obtained from curriculum and educational policy documents emphasizing environment, sustainability, and “ekologik savodxonlik.”

The main data sources used in the study were as follows:

- Geography curricula published by the Ministry of National Education of the Republic of Türkiye,
- Geography curricula published by the Ministry of Education of the Republic of Azerbaijan,
- Secondary education geography curricula of Kazakhstan,
- Secondary education geography curricula of Kyrgyzstan,
- Secondary education geography/education curriculum documents of Uzbekistan,
- Turkic World Geography Course Curriculum,
- International policy documents related to sustainable development, environmental education, and climate change education.

Data Collection Instrument and Data Collection Process

The “Green Energy Literacy Curriculum Review Form” developed by the researcher was used in collecting the data. While preparing the review form, the literature on environmental education, education for sustainable development, climate change education, and green energy literacy were utilized. The following categories were included in the review form:

- renewable energy,
- energy resources,
- energy transition,
- energy conservation,
- carbon footprint,
- sustainability,

- environmental problems,
- natural resource use,
- climate change,
- human–nature relationships,
- ecological awareness,
- environmental awareness,
- environmental responsibility,
- problem solving,
- project development,
- practice and action dimension.

The data was collected through the systematic examination of the official curriculum documents of the related countries. First, the sections in which green energy and related concepts were directly or indirectly included in the curricula were identified. Then, learning outcomes, skill areas, values/attitudes dimensions, and practice-oriented contents were analyzed. Since there were language differences among the curricula, non-Turkish curriculum documents were examined with translation support when necessary, and attention was paid to preserving semantic integrity in conceptual comparisons. In particular, the concept of “ekologik savodxonlik” in the Uzbekistan curriculum, the functional literacy approach in the Kazakhstan curriculum, and the emphasis on geoeological competencies in the Kyrgyzstan curriculum were evaluated within their original conceptual contexts.

Data Analysis

The research data were analyzed using descriptive analysis and content analysis techniques. Descriptive analysis aims to organize and interpret the obtained data according to predetermined themes (Yıldırım & Şimşek, 2021). In content analysis, similar data are brought together and interpreted within the framework of certain concepts and themes (Creswell, 2017). Accordingly, in the first stage, green energy and related concepts included in the curricula were identified; then these concepts were coded under thematic categories. During the coding process, the curriculum contents were analyzed under the following sub-themes:

1. the level of inclusion of green energy and related concepts,
2. knowledge dimension,
3. skills dimension,
4. values/attitudes dimension,
5. action dimension,
6. similarities and differences among countries.

During the analysis process, each country’s curriculum was examined separately, and then the comparative analysis stage was initiated. The findings were presented through tables and thematic explanations. Whether green energy literacy was

structured directly or indirectly in the curricula, and in which contexts the concepts of sustainability, environmental problems, energy resources, and environmental awareness were addressed, were comparatively evaluated. In order to increase the reliability of the study, the same concepts were evaluated within similar semantic contexts across different curricula, and the original terminologies of the curricula were taken into consideration while interpreting conceptual differences among countries. Thus, the ways in which green energy literacy is structured in the secondary school geography curricula of the countries of the Organization of Turkic States were revealed through a holistic and comparative approach.

Findings

The Level of Inclusion of Green Energy and Related Concepts in the Curricula

Within the scope of this sub-problem, the secondary school geography curricula of Türkiye, Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, and Uzbekistan were examined. As a result of the analysis, it was observed that the themes of environment, natural resources, and sustainability were widely included in the curricula; however, the level of direct use of the concepts of green energy and renewable energy differed among countries.

Table 1.

The Level of Inclusion of Green Energy and Related Concepts in the Curricula

Country	Renewable Energy	Energy Resources	Sustainability / Ecology	Environmental Problems	Direct Green Energy Emphases
Türkiye	Strong	Strong	Strong	Strong	Present
Azerbaijan	Limited	Moderate	Moderate	Moderate	Absent
Kazakhstan	Limited	Moderate	Strong	Moderate	Absent
Kyrgyzstan	Limited	Moderate	Strong	Moderate	Absent
Uzbekistan	Limited	Strong	Strong	Strong	Absent

When Table 1 is examined, it is seen that the concepts of green energy and renewable energy are included most explicitly in the Turkish secondary school geography curriculum. In the Turkish curriculum, energy resources, renewable energy, energy conservation, and changes in energy use are explicitly associated with learning outcomes. In the Uzbekistan curriculum, however, the energy issue is addressed more in the context of natural resources, the world economy, environmental problems, and sustainable development. The concepts of “tabiiy resurslar,” “ekologik muammolar,” “tabiatdan oqilona foydalanish,” and “ekologik savodxonlik” are noteworthy in the curriculum.

Nevertheless, it was not observed that the concepts of “green energy” or “renewable energy” was structured as a direct and independent theme in the curriculum. Similarly, in the curricula of Azerbaijan, Kazakhstan, and Kyrgyzstan, the energy issue is addressed more indirectly within the framework of natural resources, environment, economy, and ecological awareness. This situation shows that environmental sustainability has an important place in the curricula; however, green energy literacy has not yet turned into a systematic instructional area. When the findings are evaluated in general, it can be said that the curricula address environmental sustainability mostly along the axis of ecological awareness and natural resource management, whereas the instructional framework that directly structures energy transition and green energy literacy remains more limited.

The Structuring of Green Energy Literacy in Terms of Knowledge, Skills, Values/Attitudes, and Action Dimensions

Within the scope of this sub-problem, not only the conceptual contents of the curricula but also the knowledge, skills, values/attitudes, and practice dimensions that they aim to develop in students were analyzed. The findings show that environmental awareness and geographical skills come to the fore in most countries.

Table 2.

Distribution of the Curricula According to the Dimensions of Green Energy Literacy

Country	Knowledge	Skills	Values/Attitudes	Action
Türkiye	Strong	Strong	Strong	Strong
Azerbaijan	Strong	Strong	Moderate	Limited
Kazakhstan	Strong	Moderate	Moderate	Limited
Kyrgyzstan	Strong	Moderate	Moderate	Limited
Uzbekistan	Strong	Strong	Strong	Moderate

According to Table 2, the Turkish curriculum appears to be the most comprehensive structure that includes all four dimensions together. In the curriculum, students are expected to analyze energy resources, interpret changes in energy use, develop social responsibility activities related to energy conservation, and make future-oriented inferences. In the Uzbekistan curriculum, the dimensions of ecological awareness and environmental awareness appear to be particularly strong.

In the curriculum, students are expected to understand the importance of natural resources, explain the causes of environmental problems, develop solution proposals for environmental problems, and analyze the relationship between nature and humans. In addition, the emphases on “ekologik savodxonlik,” “tanqidiy fikrlash,” “ijodkorlik,” “o’quv tadqiqotlari,” and “loyihalashtirish” in the curriculum are noteworthy. This situation strengthens the skills and values/attitudes dimensions of the Uzbekistan curriculum. In the Kazakhstan and Kyrgyzstan curricula, geoecological competencies, functional literacy, problem solving, and environmental awareness come to the fore. However, in these curricula, the direct practice or social action dimension related to green energy appears to be more limited.

Similarities and Differences Among the Curricula

Within the scope of this sub-problem, the curricula of the countries were evaluated comparatively. The findings show that there is a common approach among the curricula in terms of environmental sustainability and the human-nature relationship; however, the level at which green energy literacy is structured differs.

Table 3.

Approaches of the Curricula to Green Energy Literacy

Country	Type of Approach	Main Focus
Türkiye	Direct	Renewable energy and energy conservation
Azerbaijan	Indirect	Environment and geographical skills
Kazakhstan	Indirect	Ecology and functional literacy
Kyrgyzstan	Indirect	Geoecological competence
Uzbekistan	Indirect-Strong	Ecological awareness and sustainability

When Table 3 is examined, it is seen that most of the curricula structure green energy literacy indirectly. In countries other than Türkiye, the green energy issue is addressed not as an independent learning area but in the context of environmental problems, natural resource use, sustainability, and the human-nature relationship. The Turkish curriculum appears to be the strongest structure, as it uses the concept of renewable energy directly and supports it with activities, projects, and social responsibility studies. The Uzbekistan curriculum, on the other hand, is noteworthy in terms of environmental awareness, ecological literacy, and a sustainable living approach. In the curriculum, students are expected to analyze environmental problems, use natural resources consciously, and develop solution proposals for environmental problems. Overall, environment and sustainability stand out as common themes in the secondary school geography curricula of the full member states of the Organization of Turkic States. However, it is seen that green energy literacy has not yet become a common, explicit, and systematic instructional area.

Conclusion and Recommendations

In this study, the curricula, program outcomes, course contents, and course schedules of seven universities with active geography teacher education programs in Türkiye were examined from the perspective of the green transition. The findings of the study demonstrated that geography teacher education programs in Türkiye largely provide the geographical knowledge and spatial thinking infrastructure required for the green transition; however, the green transition has not yet been sufficiently structured in these programs as an explicit, systematic, and practice-oriented teacher education approach. The findings related to the first sub-problem revealed that courses directly titled “green transition,” “sustainable energy,” “energy transition,” or “climate action”

are quite limited in the programs. On the other hand, it was determined that areas such as physical geography, climatology, hydrology, natural resources, environmental problems, disasters, sustainability, GIS, and field studies are strongly represented in the programs. This situation indicates that geography teacher education programs provide the basic geographical infrastructure necessary for the green transition; however, this infrastructure is not directly organized within a holistic green transition framework.

Among the programs, Marmara University stood out because climate change, sustainability, and environmental problems were more explicitly structured at the level of program outcomes, and the course “Sustainable Geography” directly supported this field. While a strong physical geography and climatology infrastructure was remarkable in Dokuz Eylül University, field studies and practice-oriented structures came to the fore in Necmettin Erbakan and Dicle Universities. At Atatürk University, current field studies and the practice dimension attracted attention, whereas at Çanakkale Onsekiz Mart University, teaching practice and school experience courses provided significant potential in terms of professional transfer. The findings related to the second sub-problem showed that the programs were particularly strong in terms of knowledge and skills dimensions. Courses such as physical geography, climatology, economic geography, natural resources, and disasters provide prospective teachers with a strong theoretical foundation concerning climate, environment, and human-nature relationships. In addition, practice components such as GIS, remote sensing, map literacy, spatial analysis, and teaching practice support prospective teachers’ geographical thinking and analytical skills. However, it was determined that the action dimension of the programs was more limited.

Although school experience, teaching practice, field studies, and some project-based courses exist in the programs, no strong evidence was found showing that these components are systematically integrated with areas such as green transition, sustainable energy education, carbon reduction, or climate action. Therefore, it can be stated that the programs possess a strong infrastructure in terms of knowledge and skills related to the green transition, but a clearer framework is needed for transforming this infrastructure into instructional action and classroom practice design. The findings related to the third sub-problem demonstrated that the general structures of the programs are largely similar. In all programs, the classical teacher education structure consisting of subject matter knowledge, pedagogical content knowledge, general culture, and practice courses is maintained. However, the main difference among the programs lies in the visibility level of concepts related to the green transition. While sustainability, environmental problems, and climate change are emphasized more explicitly in some programs, these concepts are addressed more indirectly within themes such as physical geography or environmental studies in others.

Overall, geography teacher education programs in Türkiye provide prospective teachers with a strong infrastructure of geographical knowledge and spatial analysis. However, areas that are increasingly important today—such as green transition, sustainable energy, energy efficiency, carbon reduction, and climate action—need to

be structured in the programs through more visible, interdisciplinary, and practice-oriented approaches. In particular, integrating sustainable energy education, climate change mitigation, environmental citizenship, and green transition pedagogy into teaching practice courses may strengthen the function of geography teacher education programs in the face of current global transformations.

Recommendations

- Compulsory or elective courses directly including themes such as “green transition,” “sustainable energy,” “climate action,” and “carbon reduction” should be developed in geography teacher education programs.
- Courses such as physical geography, climatology, natural resources, and environmental problems should be more explicitly associated with sustainable energy, energy transition, and environmental policy dimensions.
- Teaching practice and school experience courses in the programs should be supported with green transition-based instructional designs and sustainable energy education activities.
- Applied courses such as GIS, remote sensing, and spatial analysis should be enriched with application examples related to climate change, disaster risks, energy use, and environmental sustainability.
- To ensure that prospective teachers’ environmental awareness does not remain only at the knowledge level, more practice-based project studies focusing on carbon footprint reduction, energy conservation, sustainable living, and climate action should be included.
- A common framework regarding green transition pedagogy should be developed in geography teacher education programs in order to ensure standardization and up-to-dateness among programs.

References

Aladağ, C. (2023). Geography curricula and geography education in Türkiye and Kazakhstan. *Review of International Geographical Education Online*. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3551783>

Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi. (2013). *Azərbaycan Respublikasının ümumtəhsil məktəbləri üçün coğrafiya fənni üzrə təhsil proqramı (kurikulumu) (VI–XI siniflər)*. Azərbaycan Respublikası Təhsil Problemləri İnstitutu. https://arti.edu.az/wp-content/uploads/2025/04/7_-Cografiya-kurikulum.pdf

Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi. (2020). *Tam orta təhsil səviyyəsinin təmayül sinifləri üçün coğrafiya fənni üzrə kurikulum, X–XI siniflər*. <https://www.arti.edu.az/nodupload/editor/files/Co%C4%9Frafiya%20%20-%20t%C9%99may%C3%BCI%20kurikulumu%2CX-XI%20sinifl%C9%99r%20.pdf>

Creswell, J. W. (2017). *Araştırma deseni: Nitel, nicel ve karma yöntem yaklaşımları* (S. B. Demir, Çev.). Eğiten Kitap.

- Hungerford, H. R., & Volk, T. L. (1990). Changing learner behavior through environmental education. *The Journal of Environmental Education*, 21(3), 8–21. <https://doi.org/10.1080/00958964.1990.10753743>
- Kızılçaoğlu, A. (2006). Coğrafya dersi öğretim programı hakkında düşünceler. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(16), 99–108.
- Kyrgyz Academy of Education. (2018). *Geography: Curriculum for General Education Organizations, Grades 10–11*. <https://www.kgma.kg/pdf/geografiya.pdf>
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2018). *Coğrafya dersi öğretim programı*. <https://mufredat.meb.gov.tr/Dosyalar/2018120203724482-Cografya%20dop%20pdf.pdf>
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2022). *Türk dünyası coğrafyası dersi öğretim programı*. <https://mufredat.meb.gov.tr/ProgramDetay.aspx?PID=1205>
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2024). *Coğrafya dersi öğretim programı: 9, 10, 11 ve 12. sınıflar*. <https://tymm.meb.gov.tr/upload/program/2024programcog9101112Onayli.pdf>
- Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A., & Chaves, W. A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. *Environmental Education Research*, 25(6), 791–812. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1360842>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2010). *Reviews of national policies for education: Kyrgyz Republic 2010: Lessons from PISA*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2010/11/reviews-of-national-policies-for-education-kyrgyz-republic-2010_g1g10a96/9789264088757-en.pdf
- Organization of Turkic States. (n.d.). *Organization of Turkic States*. <https://turkicstates.org/en>
- Republic of Türkiye Ministry of Foreign Affairs. (n.d.). *Organization of Turkic States (OTS)*. <https://www.mfa.gov.tr/turk-konseyi-en.en.mfa>
- UNESCO. (2017). *Education for sustainable development goals: Learning objectives*. UNESCO. <https://www.unesco.org/en/articles/education-sustainable-development-goals-learning-objectives>
- UNESCO. (2020). *Education for sustainable development: A roadmap*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374802>
- UNICEF Uzbekistan. (2020). *Recommendation to national curriculum framework: Uzbekistan*. <https://www.unicef.org/uzbekistan/media/4476/file/Recommendation%20to%20National%20Curriculum%20Framework%20Uzb.pdf>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Yıldırım, A., & Şimşek, H. (2021). *Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri* (12. bs.). Seçkin Yayıncılık.

Türkiye’de Lise Coğrafya Ders Kitaplarında İklim Değişikliği-Yenilenebilir Enerji İlişkisi: Bir Doküman Analizi Çalışması

The Climate Change - Renewable Energy Relationship in Turkish High School School Geography Textbooks: A Document Analysis Study

Eyüp Artvinli

Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Eskişehir, Türkiye

Niyazi Kaya

Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Eskişehir, Türkiye

Özet

Bu araştırmanın amacı, Türkiye’de lise coğrafya ders kitaplarında iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisinin nasıl yapılandırıldığını incelemektir. Araştırma, nitel araştırma yaklaşımı kapsamında doküman analizi deseniyle yürütülmüştür. Araştırmanın veri kaynaklarını Millî Eğitim Bakanlığı tarafından okutulması uygun görülen 9, 10, 11 ve 12. sınıf coğrafya ders kitapları oluşturmıştır. Ders kitaplarında yer alan metinler, görseller, etkinlikler ve değerlendirme içerikleri; iklim değişikliği, yenilenebilir enerji, sürdürülebilirlik, karbon salımı, enerji tasarrufu, çevresel farkındalık, çevresel sorumluluk ve insan-doğa ilişkisi bağlamında analiz edilmiştir. Bulgular, iklim değişikliği, çevre sorunları, sürdürülebilirlik ve enerji kaynakları konularının kitaplarda farklı sınıf düzeylerinde yer aldığını; ancak yoğunluk ve sistematiklik bakımından sınıflar arasında farklılık bulunduğunu göstermektedir. 9. sınıf kitabında iklim sistemi ve sürdürülebilir çevre konuları daha çok farkındalık düzeyinde ele alınırken, 10. sınıf kitabında afetler, sürdürülebilir çevre, afet bilinci ve dirençli yaşam alanları öne çıkmıştır. 11. sınıf kitabında enerji kaynakları, alternatif kaynaklar ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı daha belirgin biçimde işlenmiştir. 12. sınıf kitabında ise küresel iklim değişikliği, kuraklık ve doğal sistemlerin geleceği konuları doğrudan iklim değişikliği bağlamında ele alınmıştır. Sonuçlar, ders kitaplarında bilgi, görsel farkındalık ve değer/tutum boyutlarının güçlü; buna karşılık uygulama, çevresel eylem ve yenilenebilir enerjiye dayalı çözüm üretme boyutlarının sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisinin ders kitaplarında daha açık, bütüncül ve eylem odaklı biçimde güçlendirilmesine ihtiyaç vardır.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği; yenilenebilir enerji; coğrafya ders kitapları; doküman analizi.

Abstract

The aim of this study is to examine how the climate change-renewable energy relationship is structured in Turkish high school school geography textbooks. The study was conducted within the framework of a qualitative research approach using a document analysis design. The data sources of the study consisted of 9th, 10th, 11th,

and 12th grade geography textbooks approved by the Turkish Ministry of National Education for instructional use. The texts, visuals, activities, and assessment contents included in the textbooks were analyzed within the context of climate change, renewable energy, sustainability, carbon emissions, energy conservation, environmental awareness, environmental responsibility, and human-nature relationships. The findings revealed that climate change, environmental issues, sustainability, and energy resources were addressed across different grade levels; however, there were notable differences among grades in terms of intensity and systematic organization. In the 9th grade textbook, climate systems and sustainable environment themes were addressed primarily at the level of awareness raising, whereas the 10th grade textbook emphasized disasters, sustainable environments, disaster awareness, and resilient living spaces. In the 11th grade textbook, energy resources, alternative resources, and the sustainable use of natural resources were addressed more extensively. In the 12th grade textbook, global climate change, drought, and the future of natural systems were discussed directly within the context of climate change. The results indicate that while the textbooks strongly emphasize knowledge, visual awareness, and values/attitudes, they provide limited content related to practical implementation, environmental action, and renewable energy-based solution development. Therefore, there is a need to strengthen the climate change-renewable energy relationship in geography textbooks through more explicit, holistic, and action-oriented approaches.

Keywords: climate change; renewable energy; geography textbooks; document analysis.

Ana Problem

Türkiye’de lise coğrafya ders kitaplarında iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisi nasıl yapılandırılmıştır?

Alt Problemler

1. Türkiye’de lise coğrafya ders kitaplarında iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji kavramlarına hangi düzeyde yer verilmiştir?
2. Lise coğrafya ders kitaplarında iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisi bilgi, beceri, değer/tutum ve eylem boyutları açısından nasıl yapılandırılmıştır?
3. Ders kitaplarında yer alan metin, görsel, etkinlik ve değerlendirme içerikleri sürdürülebilirlik ve çevresel farkındalık açısından nasıl bir yaklaşım ortaya koymuştur?

Yöntem

Araştırma Deseni

Bu araştırma, nitel araştırma yaklaşımı kapsamında doküman analizi deseni kullanılarak yürütülmüştür. Araştırmada Türkiye’de ortaöğretim düzeyinde okutulan lise coğrafya ders kitapları, iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisi açısından

incelenmiştir. Çalışmada ders kitaplarında yer alan metinler, görseller, etkinlikler ve değerlendirme içerikleri sistematik biçimde analiz edilmiştir.

Veri Kaynakları

Araştırmanın veri kaynaklarını Millî Eğitim Bakanlığı tarafından 2024–2025 eğitim öğretim yılında okutulması uygun görülen 9, 10, 11 ve 12. sınıf coğrafya ders kitapları oluşturmuştur. Araştırmada yalnızca resmî öğretim sürecinde kullanılan güncel ders kitapları analiz kapsamına alınmıştır.

Veri Toplama Aracı ve Verilerin Toplanması

Verilerin toplanmasında araştırmacı tarafından geliştirilen “İklim Değişikliği-Yenilenebilir Enerji İçerik Analizi Formu” kullanılmıştır. Form kapsamında;

- iklim değişikliği,
- yenilenebilir enerji,
- sürdürülebilirlik,
- karbon salımı,
- enerji tasarrufu,
- çevresel farkındalık,
- çevresel sorumluluk,
- insan-doğa ilişkisi

gibi kavramlara ilişkin içerikler analiz edilmiştir.

Ayrıca ders kitaplarında yer alan görseller, haritalar, grafikler, etkinlikler, proje önerileri ve değerlendirme soruları da inceleme kapsamına alınmıştır. Veriler, ders kitaplarının dijital ve basılı nüshalarının sistematik biçimde incelenmesi yoluyla toplanmıştır.

Verilerin Analizi

Araştırma verileri betimsel analiz ve içerik analizi teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. İlk aşamada ders kitaplarında iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji ile ilişkili içerikler belirlenmiş; ardından bu içerikler bilgi, beceri, değer/tutum ve eylem boyutları altında kodlanmıştır.

Metin içeriklerinin yanı sıra görsel ve etkinlik temelli unsurlar da sürdürülebilirlik ve çevresel farkındalık açısından değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde frekans tabloları, tema kategorileri ve içerik yoğunlukları kullanılmıştır. Bulgular sınıf düzeyleri ve içerik türleri açısından karşılaştırmalı biçimde yorumlanmıştır.

Bulgular

1. Lise Coğrafya Ders Kitaplarında İklim Değişikliği ve Yenilenebilir Enerji Kavramları

Bu alt problem kapsamında 9, 10, 11 ve 12. sınıf coğrafya ders kitaplarında iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji kavramlarının yer alma düzeyi incelenmiştir. Analiz

sonuçları, söz konusu kavramların özellikle 11. ve 12. sınıf kitaplarında daha yoğun ve sistematik biçimde ele alındığını göstermiştir.

9. sınıf kitabında “İklim Sisteminde Yaşanan Değişiklikler” ile “Afetler ve Sürdürülebilir Çevre” başlıklarının yer aldığı görülmektedir. Bu durum, çevre ve sürdürülebilirlik konularının erken sınıf düzeyinde farkındalık temelli biçimde ele alındığını göstermektedir.

10. sınıf kitabında ise “Afetler ve Sürdürülebilir Çevre” ünitesine yer verilmiş; çevresel riskler, afet bilinci ve dirençli yaşam alanları gibi konuların öne çıktığı belirlenmiştir. Ancak iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisine doğrudan vurgu sınırlı kalmıştır.

11. sınıf kitabında “Türkiye’de Madenler ve Enerji Kaynakları”, “Maden ve Enerji Kaynaklarının Çevre Üzerindeki Etkileri”, “Yenilenemeyen Kaynakların Tükenebilirliği ve Alternatif Kaynaklar” ile “Doğal Kaynakların Sürdürülebilir Kullanımı ve Geri Dönüşüm Stratejileri” başlıklarının bulunduğu görülmektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilirlik temasının en yoğun biçimde 11. sınıf düzeyinde yapılandırıldığını göstermektedir.

12. sınıf kitabında ise “Küresel İklim Değişikliği”, “Kuraklık” ve “Doğal Sistemlerin Geleceği” başlıklarının doğrudan iklim değişikliği ekseninde ele alındığı belirlenmiştir.

13.

Tablo 1. Sınıf Düzeylerine Göre İklim Değişikliği ve Yenilenebilir Enerji İçeriklerinin Dağılımı

Sınıf	İklim Değişikliği	Yenilenebilir Enerji	Sürdürülebilirlik	Çevre Sorunları
9. Sınıf	Orta	Sınırlı	Orta	Orta
10. Sınıf	Orta	Sınırlı	Güçlü	Güçlü
11. Sınıf	Güçlü	Güçlü	Güçlü	Güçlü
12. Sınıf	Güçlü	Orta	Orta	Güçlü

Alt Probleme İlişkin Vurucu Görseller

9. sınıf kitabındaki “İklim Sisteminde Yaşanan Değişiklikler” bölümü, iklim süreçlerinin değişimini çevresel sistem yaklaşımıyla ele almaktadır.

11. sınıf kitabındaki “Yenilenemeyen Kaynakların Tükenebilirliği ve Alternatif Kaynaklar” başlığı, enerji dönüşümünü doğrudan sürdürülebilirlik bağlamında tartışmaktadır.

2. Lise Coğrafya Ders Kitaplarında İklim Değişikliği-Yenilenebilir Enerji İlişkisinin Bilgi, Beceri, Değer/Tutum ve Eylem Boyutları

Bu alt problem kapsamında ders kitaplarında yer alan içerikler bilgi, beceri, değer/tutum ve eylem boyutları açısından analiz edilmiştir. Bulgular, kitaplarda bilgi boyutunun güçlü biçimde yapılandırıldığını; eylem boyutunun ise sınırlı kaldığını göstermektedir.

Bilgi boyutunda enerji kaynakları, doğal kaynak kullanımı, çevre sorunları, küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik konularının yoğun biçimde işlendiği belirlenmiştir. Özellikle 11. sınıf kitabında enerji kaynakları ile çevresel etkiler arasındaki ilişkinin sistematik biçimde ele alındığı görülmektedir.

Beceri boyutunda öğrencilerin harita yorumlama, grafik analiz etme, neden-sonuç ilişkisi kurma ve çevresel süreçleri değerlendirme becerilerini geliştirmeye yönelik etkinliklerin yer aldığı belirlenmiştir. 10. sınıf kitabındaki afet bilinci ve sürdürülebilir çevre etkinlikleri bu açıdan dikkat çekmektedir.

Değer/tutum boyutunda çevresel farkındalık, doğal kaynakların bilinçli kullanımı ve sürdürülebilir yaşam anlayışı ön plana çıkmaktadır. Kitaplarda çevre sorunlarının küresel etkilerine sıkça vurgu yapıldığı görülmektedir.

Eylem boyutunda ise öğrencileri doğrudan çevresel uygulamalara yönlendiren içeriklerin görece sınırlı olduğu belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji kullanımına yönelik toplumsal katılım, bireysel karbon ayak izi azaltımı veya enerji tasarrufu uygulamaları daha çok teorik düzeyde ele alınmıştır.

Tablo 2. Ders Kitaplarında İklim Değişikliği-Yenilenebilir Enerji Okuryazarlığı Boyutları

Boyut	Düzey
Bilgi	Güçlü
Beceri	Orta
Değer/Tutum	Güçlü
Eylem	Sınırlı

Alt Probleme İlişkin Vurucu Görseller

10. sınıf kitabındaki “Afet Bilinci” ve “Direnci Yaşam Alanları” temaları öğrencilerde çevresel duyarlılık geliştirmeyi hedeflemektedir.

11. sınıf kitabındaki “Doğal Kaynakların Sürdürülebilir Kullanımı ve Geri Dönüşüm Stratejileri” bölümü sürdürülebilir yaşam kültürünü destekleyen içerikler sunmaktadır.

3. Ders Kitaplarında Yer Alan Metin, Görsel, Etkinlik ve Değerlendirme İçeriklerinin Sürdürülebilirlik ve Çevresel Farkındalık Açısından Yaklaşımı

Bu alt problem kapsamında ders kitaplarında yer alan metinler, görseller, etkinlikler ve değerlendirme içerikleri sürdürülebilirlik ve çevresel farkındalık açısından incelenmiştir. Bulgular, kitapların genel olarak çevre merkezli ve sürdürülebilirlik odaklı bir yaklaşım benimsediğini göstermektedir.

Metin içeriklerinde çevre sorunları, enerji kaynakları, doğal kaynak kullanımı ve iklim değişikliğinin küresel etkileri yoğun biçimde ele alınmıştır. Özellikle 12. sınıf kitabındaki “Küresel İklim Değişikliği” ve “Doğal Sistemlerin Geleceği” başlıkları öğrencilerin küresel çevre sorunlarına ilişkin farkındalık geliştirmesini amaçlamaktadır.

Görsel içeriklerde kuraklık, orman yangınları, sanayi faaliyetleri, çevre kirliliği ve doğal afetlere ilişkin görsellerin yoğun biçimde kullanıldığı görülmüştür. Bu görseller aracılığıyla öğrencilerde çevresel risk algısı ve sürdürülebilirlik bilinci oluşturulmaya çalışılmıştır.

Etkinlik içeriklerinde öğrencilerin çevre sorunlarını analiz etmeleri, çözüm önerileri geliştirmeleri ve sürdürülebilir yaşam üzerine düşünceleri hedeflenmiştir. Ancak uygulama temelli çevresel proje örneklerinin sınırlı olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. İçerik Türlerine Göre Sürdürülebilirlik Yaklaşımı

İçerik Türü	Kullanım Düzeyi	Temel Amaç
Metinler	Güçlü	Kavramsal farkındalık geliştirme
Görseller	Güçlü	Çevresel duyarlılık oluşturma
Etkinlikler	Orta	Analiz ve yorumlama becerisi geliştirme
Değerlendirme Soruları	Orta	Kavramsal öğrenmeyi ölçme

Alt Probleme İlişkin Vurucu Görseller

10. sınıf kitabında “Afetler ve Sürdürülebilir Çevre” ünitesinde kullanılan orman yangını görselleri çevresel risk algısını güçlendirmektedir.

12. sınıf kitabındaki “Küresel İklim Değişikliği” ve “Kuraklık” içerikleri küresel çevre sorunlarının geleceğe etkisini vurgulayan görsel ve metinsel yapı sunmaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Bu araştırmada Türkiye’de okutulan 9, 10, 11 ve 12. sınıf coğrafya ders kitapları, iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisi açısından incelenmiştir. Bulgular, iklim değişikliği, çevre sorunları, sürdürülebilirlik ve enerji kaynakları konularının ders kitaplarında farklı sınıf düzeylerinde yer aldığını; ancak bu konuların yoğunluk ve sistematiklik bakımından sınıflar arasında farklılaştığını göstermektedir. 9. sınıf kitabında iklim sistemi ve sürdürülebilir çevre konuları daha çok farkındalık

düzeyinde ele alınırken, 10. sınıf kitabında afetler, sürdürülebilir çevre, afet bilinci ve dirençli yaşam alanları ön plana çıkmıştır. 11. sınıf kitabında enerji kaynakları, yenilenemeyen kaynakların tükenebilirliği, alternatif kaynaklar ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı daha belirgin biçimde işlenmiştir. 12. sınıf kitabında ise küresel iklim değişikliği, kuraklık ve doğal sistemlerin geleceği konuları doğrudan iklim değişikliği bağlamında ele alınmıştır.

Araştırmanın ilk alt problemine ilişkin bulgular, iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji kavramlarının ders kitaplarında aynı yoğunlukta yer almadığını göstermektedir. İklim değişikliği konusu özellikle 12. sınıf kitabında daha açık biçimde ele alınırken, yenilenebilir enerji ve alternatif enerji kaynakları teması en güçlü biçimde 11. sınıf kitabında görülmüştür. Bu durum, iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisinin ders kitaplarında bütüncül ve sürekli bir öğrenme hattı olarak değil, sınıf düzeylerine dağılmış temalar üzerinden yapılandırıldığını göstermektedir.

İkinci alt probleme ilişkin bulgulara göre ders kitaplarında bilgi boyutu güçlü, beceri ve değer/tutum boyutları orta-güçlü, eylem boyutu ise sınırlı düzeydedir. Kitaplarda enerji kaynakları, doğal kaynak kullanımı, çevre sorunları, küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik konularına ilişkin kavramsal açıklamalar belirgin biçimde yer almaktadır. Bununla birlikte öğrencileri doğrudan yenilenebilir enerji kullanımı, enerji tasarrufu, karbon ayak izini azaltma veya iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik uygulamalara yönlendiren içerikler sınırlı kalmıştır.

Üçüncü alt probleme ilişkin bulgular, ders kitaplarında metin ve görsel içeriklerin çevresel farkındalık oluşturmada güçlü bir işleve sahip olduğunu göstermektedir. Kuraklık, orman yangını, çevre kirliliği, sanayi faaliyetleri, enerji kaynakları ve doğal afetlere ilişkin görseller öğrencilerde çevresel risk algısı oluşturmayı desteklemektedir. Etkinlik ve değerlendirme içerikleri ise daha çok analiz etme, yorumlama, neden-sonuç ilişkisi kurma ve kavramsal öğrenmeyi ölçme işlevi görmektedir. Ancak uygulama temelli çevresel proje, toplumsal katılım ve davranış geliştirme boyutlarının sınırlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, lise coğrafya ders kitapları iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji konularını çevre, sürdürülebilirlik ve doğal kaynak kullanımı bağlamında ele almaktadır. Ancak iki kavram arasındaki ilişki ders kitaplarında açık, bütüncül ve eylem odaklı bir yapı içinde yeterince görünür değildir. Bu nedenle iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisinin öğrencilerde yalnızca bilgi ve farkındalık değil, aynı zamanda beceri, tutum ve çevresel eylem geliştirecek biçimde yeniden güçlendirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

Öneriler

1. Lise coğrafya ders kitaplarında iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji konuları ayrı temalar olarak değil, neden-sonuç ve çözüm ilişkisi içinde daha bütüncül biçimde ele alınmalıdır.
2. 9 ve 10. sınıf kitaplarında yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve enerji tasarrufu içerikleri güçlendirilerek erken sınıf düzeylerinden itibaren süreklilik sağlanmalıdır.

3. 11 sınıf kitabında yer alan enerji kaynakları, alternatif kaynaklar ve sürdürülebilir kullanım içerikleri; iklim değişikliğiyle mücadele, karbon salımı ve enerji dönüşümü bağlamında daha açık biçimde ilişkilendirilmelidir.
4. 12 sınıf kitabındaki küresel iklim değişikliği ve kuraklık içerikleri, yenilenebilir enerji çözümleriyle daha doğrudan bağlantılandırılmalıdır.
5. Ders kitaplarında yalnızca kavramsal açıklama ve görsel farkındalık değil; öğrencilerin enerji tasarrufu, karbon ayak izi azaltımı ve yenilenebilir enerji kullanımı konusunda uygulama yapmalarını sağlayacak etkinliklere daha fazla yer verilmelidir.
6. Değerlendirme soruları bilgi ölçmenin ötesine geçerek öğrencilerin iklim değişikliği-yenilenebilir enerji ilişkisine yönelik analiz, karar verme, çözüm üretme ve eylem planı geliştirme becerilerini ölçmelidir.

Preparing Geography Teachers for the Green Transition: An Analysis of Geography Teacher Education Programs in Türkiye

Yeşil Dönüşüm İçin Coğrafya Öğretmeni Yetiştirmek: Türkiye'deki Coğrafya Öğretmenliği Programlarının Analizi

Eyüp Artvinli

Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Education, Eskişehir, Türkiye

Niyazi Kaya

Assoc. Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Education, Eskişehir, Türkiye

Abstract

The aim of this study is to examine how geography teacher education programs in Türkiye prepare prospective teachers for geography education related to the green transition, sustainable energy, and climate change. The study was conducted within the framework of a qualitative research approach using a document analysis design. The data sources consisted of official web pages, Bologna information packages, course catalogs, program introduction pages, updated curricula, and course schedule announcements of geography teacher education programs at Atatürk University, Çanakkale Onsekiz Mart University, Dicle University, Dokuz Eylül University, Gazi University, Marmara University, and Necmettin Erbakan University. Data were collected through the "Green Transition-Oriented Geography Teacher Education Program Review Form" and analyzed in terms of green transition, sustainability, climate change, environmental education, renewable energy, energy resources, disaster and risk education, sustainable development, ecological citizenship, and practice/activity dimensions in geography teaching. The findings revealed that courses directly titled "green transition," "sustainable energy," "energy transition," or "climate action" were limited across the programs. However, courses and content related to physical geography, climatology, hydrology, natural resources, environmental issues, disasters, GIS, field studies, and teaching practice provided a strong indirect foundation for the green transition. The programs were found to be strong in terms of knowledge and skills dimensions, while remaining relatively limited in action-oriented dimensions such as sustainable energy education, carbon reduction, and green transition pedagogy. As a result, geography teacher education programs in Türkiye need to be restructured through more explicit, holistic, interdisciplinary, and practice-oriented approaches in the context of the green transition.

Keywords: green transition; geography teacher education; sustainable energy; teacher education.

Özet

Bu araştırmamızın amacı, Türkiye’deki coğrafya öğretmenliği programlarının öğretmen adaylarını yeşil dönüşüm, sürdürülebilir enerji ve iklim değişikliğiyle ilişkili coğrafya eğitimi açısından nasıl hazırladığını incelemektir. Araştırma, nitel araştırma yaklaşımı kapsamında doküman analizi deseniyle yürütülmüştür. Veri kaynaklarını Atatürk Üniversitesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Dicle Üniversitesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Gazi Üniversitesi, Marmara Üniversitesi ve Necmettin Erbakan Üniversitesi’nin resmî web sayfaları, Bologna bilgi paketleri, ders katalogları, program tanıtım sayfaları, güncel öğretim planları ve ders programı duyuruları oluşturmaktadır. Veriler, “Yeşil Dönüşüm Odaklı Coğrafya Öğretmenliği Programı İnceleme Formu” aracılığıyla toplanmış, yeşil dönüşüm, sürdürülebilirlik, iklim değişikliği, çevre eğitimi, yenilenebilir enerji, enerji kaynakları, afet ve risk eğitimi, sürdürülebilir kalkınma, ekolojik vatandaşlık ve coğrafya öğretiminde uygulama/etkinlik boyutu açısından analiz edilmiştir. Bulgular, programlarda “yeşil dönüşüm”, “sürdürülebilir enerji”, “enerji dönüşümü” veya “iklim eylemi” başlığını doğrudan taşıyan derslerin görece azınlıkta olduğunu göstermektedir. Buna karşılık fiziki coğrafya, klimatoloji, hidroğrafya, doğal kaynaklar, çevre sorunları, afetler, CBS, arazi çalışmaları ve öğretmenlik uygulaması gibi ders ve içerikler yeşil dönüşüm için dolaylı bir altyapı sağlamaktadır. Programların bilgi ve beceri boyutlarında güçlü olduğu, ancak eylem, sürdürülebilir enerji eğitimi, karbon azaltımı ve yeşil dönüşüm pedagojisi boyutlarında daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, coğrafya öğretmenliği programlarının yeşil dönüşüm açısından daha açık, bütüncül, disiplinler arası ve uygulama odaklı biçimde yeniden yapılandırılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil dönüşüm; coğrafya öğretmenliği; sürdürülebilir enerji; öğretmen eğitimi.

Introduction

The climate crisis, biodiversity loss, energy security problems, and environmental degradation have placed the concept of green transition at the center of global policy agendas and educational discussions (United Nations, 2015). The green transition is addressed as a multidimensional transformation process requiring the restructuring of economic, social, and educational systems through sustainability, renewable energy, carbon reduction, climate action, and environmentally sensitive production-consumption models (European Commission, 2019). In this context, education systems are expected not only to transfer environmental knowledge, but also to develop sustainability-oriented skills, values, attitudes, and action competencies (UNESCO, 2020).

Climate change is one of the most critical components of the green transition because of the ecological, economic, political, and social consequences it creates at local and global scales (IPCC, 2023). Limiting global warming and reducing greenhouse gas emissions necessitate the transition from fossil fuel-based energy systems to renewable energy, energy efficiency, and low-carbon development models (International Renewable Energy Agency, 2023). Therefore, education systems should be structured in ways that support students in understanding environmental crises, critically

evaluating sustainability issues, and participating in climate action processes (Stevenson et al., 2017).

Teacher education programs have a strategic function in realizing sustainability-oriented educational transformation because teachers are among the main actors shaping students' environmental awareness, climate literacy, and sustainability competencies (UNESCO, 2024). The teacher education literature demonstrates that sustainability education should be addressed not only as an independent course, but also as a holistic approach spread across different components of the program (Evans et al., 2017). Therefore, it is important for teacher education programs to integrate themes such as climate change, sustainable development, renewable energy, environmental citizenship, and ecological responsibility into both program structures and instructional practices (Ferreira et al., 2007).

Geography education provides a strong disciplinary basis in terms of green transition because it addresses human-nature-environment-economy-resource relationships through a spatial and holistic approach (Lambert & Morgan, 2010). Geography courses and geography teacher education programs can bring together issues such as climate systems, natural resources, disasters, environmental problems, energy resources, land use, sustainability, and spatial analysis within the same disciplinary framework (Butt, 2011). Therefore, training prospective geography teachers with strong knowledge, skills, and action competencies regarding green transition, sustainable energy, and climate change is critically important in terms of sustainability-oriented educational policies (Jorgenson et al., 2019).

Research on climate change education reveals that merely transferring knowledge is not sufficient for behavioral change and action development (Monroe et al., 2019). It is emphasized that children and young people should be positioned not only as recipients of information regarding climate change, but also as actors who express opinions, make decisions, and participate in action (Rousell & Cutter-Mackenzie-Knowles, 2020). Therefore, prospective teachers should be supported with applied competencies such as sustainability-oriented instructional design, environmental problem solving, climate action, and ecological citizenship (Cantell et al., 2019). UNESCO (2015) emphasizes that climate change education should support practical environmental awareness and sustainability-oriented action competencies.

Sustainable energy education is one of the fundamental components of the green transition because the transition to renewable energy constitutes a central policy area in terms of reducing carbon emissions and combating climate change (International Energy Agency, 2024). Renewable energy literacy includes dimensions such as understanding energy systems, evaluating the environmental impacts of energy resources, analyzing sustainable energy policies, and supporting energy-efficient lifestyles (Jorgenson et al., 2019). Geography education is a field that can directly contribute to sustainable energy education because it can address the spatial distribution of energy resources, regional development, environmental impact, and sustainability contexts together (Lambert & Morgan, 2010).

In Türkiye, teacher education programs are structured around subject matter knowledge, pedagogical knowledge, and general culture components within the

framework of undergraduate programs determined by the Council of Higher Education (Council of Higher Education, 2018). In the teacher education undergraduate programs published by the Council of Higher Education, it is stated that the programs generally consist of subject matter knowledge and skills, pedagogical knowledge and skills, and general culture courses (Council of Higher Education, 2018). Examining the 2018 revision of the geography teacher education undergraduate program, Sağdıç analyzed the program in the context of subject matter knowledge, general culture, pedagogical knowledge, and teaching practice and revealed that the structure of geography teacher education should be evaluated at the program level (Sağdıç, 2020).

Environmental education research conducted on prospective geography teachers in Türkiye provides important findings supporting the problem area of this study. The study conducted by Aydın using the example of Gazi University demonstrates that the views of prospective geography teachers regarding environmental problems and environmental education should be taken into consideration in terms of the teacher education process (Aydın, 2010). The study conducted by Koç and Karatekin with prospective geography teachers studying at five different universities in Türkiye reveals that environmental literacy should be addressed together with knowledge, affective, behavioral, and cognitive skill components (Koç & Karatekin, 2013). The study by Aydemir and Alım demonstrates that examining the environmental literacy levels of prospective geography teachers in terms of various variables makes visible the need for training teachers equipped in terms of environmental education (Aydemir & Alım, 2022).

Current studies indicate that the views of prospective geography teachers regarding the environment and environmental protection still constitute an important area that needs to be investigated (Aydemir & Alım, 2025). Studies conducted on prospective teachers' awareness of sustainable development and climate change reveal that sustainability and climate change issues should be directly associated with teacher education (Şahintürk & Saka, 2025). Research examining prospective teachers' attitudes toward sustainable environments also indicates that environmental awareness, sustainable living, and applied environmental education components should be strengthened within teacher education programs (Çimen, 2019).

The Türkiye Century Education Model published in 2024 presents a new framework emphasizing environment, values, action, skills, and a holistic educational approach (Ministry of National Education, 2024). In the common text of the model, it is emphasized that values should not be addressed separately from skills and subject content, but should instead be integrated into programs (Ministry of National Education, 2024). This situation necessitates structuring green transition in geography teacher education programs not only at the knowledge level, but also together with skill, value, attitude, and action dimensions (UNESCO, 2024).

The findings of this study demonstrate that courses directly focusing on green transition, sustainable energy, energy transition, and climate action are limited in geography teacher education programs in Türkiye; however, courses such as physical geography, climatology, hydrography, natural resources, environmental problems, disasters, GIS, field studies, and teaching practice provide a strong indirect

infrastructure for green transition. This situation suggests that the programs are strong in terms of knowledge and skill dimensions, but more limited in action-oriented dimensions such as sustainable energy education, carbon reduction, climate action, and green transition pedagogy. Therefore, it is necessary to systematically examine to what extent geography teacher education programs are structured explicitly, holistically, interdisciplinary, and practice-oriented in terms of green transition.

Within this framework, the aim of the study is to examine how geography teacher education programs in Türkiye prepare prospective teachers in terms of geography education related to green transition, sustainable energy, and climate change. The study also aims to evaluate the courses and contents included in geography teacher education programs in terms of the knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions required for green transition. In this respect, the study aims to reveal the sustainability-oriented transformation capacity of geography teacher education programs in Türkiye through program documents.

Problem and Sub-Problems

In line with the explanations presented above, the problem statement of this study was determined as follows: “How do geography teacher education programs in Türkiye prepare prospective teachers in terms of geography education related to green transition, sustainable energy, and climate change?” To answer this question, the following sub-problems were also formulated.

1. To what extent are courses related to green transition, sustainability, climate change, environmental education, and renewable energy included in the curricula of geography teacher education programs in Türkiye?
2. How are the course contents included in geography teacher education programs structured in terms of the knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions required for green transition?
3. What similarities and differences exist among geography teacher education programs in terms of green transition-oriented teacher education?

Method

Research Design

This study was conducted within the framework of a qualitative research approach using a document analysis design. Qualitative research is defined as a research approach that aims to examine events, phenomena, perceptions, and meanings in depth within their natural context (Creswell & Creswell, 2018). Similarly, Yıldırım and Şimşek (2021) state that qualitative research focuses on understanding social phenomena holistically and interpreting them through detailed analyses. Since the present study aimed to examine how geography teacher education programs in Türkiye prepare prospective teachers for green transition, sustainable energy, and climate change-related geography education in line with the research problem and sub-problems, the qualitative research approach was considered appropriate for the nature of the study. In this context, the study sought to examine not only whether green transition, sustainability, climate change, environmental education, and

renewable energy themes were included in the programs, but also how these themes were structured in terms of knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions.

Document analysis was employed as the main research design of the study. Document analysis is a qualitative research method based on the systematic examination and interpretation of written and visual materials related to the phenomenon being investigated (Yıldırım & Şimşek, 2021). Bowen (2009) also emphasizes that document analysis provides systematic and context-sensitive interpretation opportunities in qualitative educational research. Karasar (2020) emphasizes that document-based studies constitute important sources of scientific data, particularly in educational research, because official documents, curricula, and textbooks directly reflect institutional structures and educational priorities. Similarly, Büyüköztürk et al. (2020) note that document analysis enables researchers to evaluate educational contents, concepts, themes, and learning processes in a systematic manner. Accordingly, within the scope of this study, the curricula, course descriptions, Bologna information packages, program outcomes, course schedules, and departmental documents of geography teacher education programs were analyzed systematically in terms of green transition, sustainability, climate change, environmental education, renewable energy, energy resources, disaster and risk education, ecological citizenship, and practice/activity dimensions.

Data Sources

The data sources of the study consisted of the undergraduate Geography Teacher Education/Geography Education program documents of seven universities in Türkiye that currently have geography teacher education undergraduate programs and whose curriculum plans, course contents, program outcomes, or course schedule information could be accessed through their official web pages. Within this scope, Atatürk University, Çanakkale Onsekiz Mart University, Dicle University, Dokuz Eylül University, Gazi University, Marmara University, and Necmettin Erbakan University were included in the analysis.

In this study, the criterion sampling approach was employed. Only universities that have active geography teacher education/geography education undergraduate programs in Türkiye and whose open-access program documents could be accessed through official web pages, Bologna information packages, course catalogs, program outcomes, curriculum plans, or course schedule announcements were included within the scope of the analysis. Web-based documents were accessed and examined during the February–April 2026 period; sources that could not be accessed, whose currency could not be verified, or that did not provide sufficient program/course content were evaluated cautiously in the analysis. In the study, only open-access documents available on the official web pages of universities, Bologna information packages, course catalogs, program introduction pages, current curriculum plans, and course schedule announcements were used. The aspects of the programs related to green transition, sustainability, climate change, environmental problems, natural resources, disasters, GIS, field studies, and teaching practice were evaluated through these documents.

Table 1*Data Sources Used in the Study*

University	Type of Document Used	Main Information Used in the Analysis
Atatürk University	Geography Education Department web page, current course schedule, and field study announcements	Current implementation status of the program, course schedule, and practice/field study dimension
Çanakkale Onsekiz Mart University	Geography Education Department web page, undergraduate program courses, and course contents	Subject matter knowledge, pedagogical knowledge, elective courses, school experience, and teaching practice
Dicle University	Geography Education Department/program introduction and Bologna information	Physical geography, human and economic geography, geography education, and field studies
Dokuz Eylül University	2025–2026 curriculum plan and program page	Current curriculum plan, physical geography, climatology, cartography, and teacher education structure
Gazi University	2025–2026 undergraduate course schedule announcements and program pages	Current course schedule, implementation status of the program, and course structure
Marmara University	Program introduction, program outcomes, and course information package	Climate change, sustainability, environmental problems, GIS, field and laboratory practices
Necmettin Erbakan University	Geography Education Department web page and course information package	Theoretical/applied course structure, field trips, and nature-sensitive teacher education approach

Data Collection Instrument and Data Collection

The Green Transition-Oriented Geography Teacher Education Program Review Form developed by the researchers was used in the data collection process. The form included the following categories:

- Green transition,
- Sustainability,
- Climate change,
- Environmental education,
- Renewable energy,

- Energy resources,
- Disaster and risk education,
- Sustainable development,
- Ecological citizenship,
- Practice/activity dimension in geography teaching.

The data were collected through the systematic examination of universities' Bologna information packages, course catalogs, curriculum plans, and course contents. In each program, courses directly or indirectly related to green transition were identified; the compulsory/elective status of the courses, grade level, ECTS value, and content scope were recorded.

Data Analysis

The research data were analyzed through descriptive analysis and content analysis techniques. In the first stage, the related courses in each program were identified and their positions within the curriculum plan were classified. In the second stage, the course contents were coded according to the themes of green transition, sustainability, climate change, environmental education, and renewable energy. In the third stage, the coded contents were evaluated under the dimensions of knowledge, skills, values/attitudes, and action. The analysis results were compared to universities; the similarities and differences among the programs were presented through tables and thematic matrices. Thus, the teacher education capacity of geography teacher education programs in Türkiye for green transition was revealed at the program level.

Findings

The Level of Inclusion of Green Transition-Related Courses in Geography Teacher Education Programs

Within the scope of this sub-problem, the curriculum plans, course contents, and program introduction documents of seven universities in Türkiye that actively offer geography teacher education undergraduate programs were examined. The examined programs are as follows: Atatürk University, Çanakkale Onsekiz Mart University, Dicle University, Dokuz Eylül University, Gazi University, Marmara University, and Necmettin Erbakan University. The Trabzon University/KTÜ line was excluded from the scope of the analysis because it could not be verified as an active geography teacher education undergraduate program currently admitting students.

When evaluated in general terms, it was observed that a compulsory or elective course directly carrying the name "green transition" is not widespread in the programs. However, in most of the programs, courses that may be related to green transition are indirectly included under the headings of physical geography, climatology, hydrography, environmental problems, natural resources, disasters, sustainability, GIS, field studies, and geography teaching.

The Marmara University program stands out in terms of explicitly including climate change, sustainability, and environmental problems at the level of program outcomes.

In the program outcomes, it is stated that students will be able to evaluate climate change, urbanization, globalization, sustainability, international migration, and environmental problems through a critical perspective. In addition, the “Sustainable Geography” course aims to address the concept of sustainability from a geographical perspective, ensure the protection of natural resources, contribute to the solution of environmental problems, and raise awareness regarding the principles of sustainable development.

In the 2025–2026 curriculum plan of Dokuz Eylül University, core subject courses such as introduction to physical geography, map knowledge and cartography, and climatology are included beginning from the first semester. This structure provides an indirect infrastructure for green transition based on understanding climate, space, environment, and physical processes rather than a direct one. Furthermore, the fact that the 2025–2026 curriculum plan was approved by the decision of the university senate dated 31.07.2025 strengthens the currency of the data source.

At Necmettin Erbakan University, it is stated that the program consists of subject matter knowledge, pedagogical knowledge, general culture, and practice courses and that the courses are conducted both theoretically and practically. In this program, the nature-sensitive teacher education approach, field trips, and practice courses constitute an indirect but important basis in terms of green transition.

The Dicle University program is structured around physical geography, human and economic geography, geography education, and field studies. This structure is important in terms of covering many areas that can be associated with green transition, such as climate, water, living organisms, landforms, population, economy, industry, and agriculture. However, within the accessed program information, no explicit finding could be reached indicating that the concepts of green transition or sustainable energy were directly structured as a central course title. On the Geography Education Department page of Atatürk University, the course schedules of 2025–2026 academic year and field study announcements dated 2026 are included. These findings indicate that the program is currently being implemented and that the field study dimension continues.

On the Geography Education page of Çanakkale Onsekiz Mart University, it is stated that, in addition to general culture, subject matter knowledge, pedagogical knowledge, and elective courses, the geography teacher education undergraduate program also includes school experience and teaching practice courses. Although this structure provides a potential basis for transferring green transition into teaching practice, the green transition/sustainable energy focus is not directly visible on the accessed page.

Table 2*Level of Inclusion of Green Transition-Related Courses and Contents in the Programs*

University	Direct Green Transition/Sustainability Course	Climate/Environment/Natural Resource Content	GIS/Field/Practice Dimension	General Evaluation
Marmara University	Moderate-Strong	Strong	Strong	It is one of the programs in which concepts related to green transition are most visible at the level of program outcomes and courses.
Dokuz Eylül University	Limited	Strong	Moderate	Core infrastructure courses such as physical geography, climatology, and cartography are strong in the current curriculum plan.
Necmettin Erbakan University	Limited	Moderate-Strong	Strong	Theoretical and practical courses together with field trips provide an indirect basis for green transition.
Dicle University	Limited	Strong	Strong	Physical, human, and economic geography fields are strong; the concept of green transition is not directly visible.
Atatürk University	Limited	Moderate-Strong	Strong	The current course schedule and field studies support the practice dimension of the program.
Gazi University	Limited	Moderate	Moderate	Current undergraduate course schedules have been published; access to detailed course contents is limited.
ÇOMÜ	Limited	Moderate	Moderate-Strong	School experience and teaching practice courses are important in terms of professional transfer.

According to Table 2, geography teacher education programs provide an indirect infrastructure for green transition mostly through climate, environment, natural resources, disasters, field studies, and GIS. However, it cannot be stated that concepts such as “green transition,” “sustainable energy,” “energy transition,” “carbon reduction,” or “climate action” are structured as an independent teacher education framework positioned at the center of the programs.

Structuring of Course Contents in Terms of Knowledge, Skills, Values/Attitudes, and Action Dimensions

Within the scope of this sub-problem, the courses and program outcomes included in the programs were evaluated in terms of knowledge, skills, values/attitudes, and action dimensions. The findings demonstrate that the programs are particularly strong in the dimensions of knowledge and skills, whereas they remain more limited in the action dimension.

In terms of the knowledge dimension, courses such as physical geography, climatology, geomorphology, hydrography, biogeography, human geography, economic geography, natural resources, and disasters stand out in the programs. In the curriculum plan of Dokuz Eylül University, the inclusion of courses such as introduction to physical geography, map knowledge, and climatology beginning from the first semester provides prospective teachers with a strong foundation regarding climate, space, and natural systems.

In the skills dimension, components such as GIS, remote sensing, field studies, map literacy, spatial analysis, instructional technologies, and teaching practice stand out. In the program outcomes of Marmara University, it is observed that geographical knowledge and skills can be integrated with laboratory and field studies; moreover, competencies related to working with GIS, remote sensing, and spatial technologies are included. The inclusion of current field study announcements on the Atatürk University page demonstrates that the practice dimension of the program continues.

In terms of the values/attitudes dimension, environmental problems, sensitivity toward nature, sustainability, social responsibility, and environmental awareness stand out. The inclusion of climate change, sustainability, and environmental problems within the program outcomes at Marmara University strengthens this dimension. At Necmettin Erbakan University, it is stated that the program conducts theoretical and practical courses together; this situation creates potential in terms of supporting environmental and nature sensitivity through practice.

The action dimension was identified as the most limited aspect of the programs. Although the programs include school experience, teaching practice, field studies, and some project-based courses, no widespread and systematic structure was observed indicating that these are explicitly connected to areas such as green transition, sustainable energy education, carbon footprint reduction, or climate action. Therefore, it can be stated that the programs possess a strong knowledge and skills infrastructure in terms of green transition; however, this infrastructure requires a more explicit framework in terms of transforming it into instructional action and classroom practice design.

Table 3

Visibility of Green Transition-Oriented Teacher Education Dimensions in the Programs

Dimension	General Level	Main Correspondences Observed in the Programs	Interpretation Based on the Findings
Knowledge	Strong	Physical geography, climatology, hydrography,	The programs largely provide the geographical

Dimension	General Level	Main Correspondences Observed in the Programs	Interpretation Based on the Findings
		biogeography, natural resources, disasters, economic geography	knowledge base required for green transition.
Skills	Moderate-Strong	GIS, map knowledge, field studies, spatial analysis, teaching practices	Components that can improve the spatial analysis and practice skills of prospective teachers are included.
Values/Attitudes	Moderate-Strong	Sustainability, environmental problems, sensitivity toward nature, social responsibility	Environmental sensitivity is visible in program outcomes and some course contents.
Action	Limited-Moderate	School experience, teaching practice, field studies, project/activity planning	Green transition-themed teaching practice, sustainable energy education, and climate action are not explicitly systematic.

According to Table 3, the strongest aspect of the programs in terms of green transition is that they provide prospective teachers with geographical knowledge and spatial skills. In contrast, a more limited explicit and holistic structure appears to exist regarding the development of instructional designs themed around green transition, sustainable energy, and climate action by prospective teachers in future classroom practices.

Similarities and Differences Among the Programs

Within the scope of this sub-problem, seven geography teacher education programs were compared in terms of their green transition-oriented teacher education capacity. The most prominent common aspect of the programs is that all of them maintain the classical teacher education structure consisting of subject matter knowledge, pedagogical knowledge, general culture, and practice courses. On the ÇOMÜ page, it is stated that students take school experience and teaching practice courses in addition to general culture, subject matter knowledge, pedagogical knowledge, and elective courses throughout their undergraduate education. Similarly, at Necmettin Erbakan University, it is stated that compulsory courses, subject matter knowledge courses, pedagogical knowledge courses, general culture courses, and practice courses are included in the program.

The main difference among the programs lies in the visibility and systematicity level of concepts related to green transition. At Marmara University, climate change, sustainability, and environmental problems are explicitly included at the level of program outcomes; moreover, the “Sustainable Geography” course directly supports this field. At Dokuz Eylül University, although the current curriculum plan provides a strong infrastructure in physical geography and climatology, the concept of green transition does not appear as the central framework of the program. At Atatürk University, while the current course schedule and field study announcements support the applied geography education aspect, sustainable energy or green transition is not directly visible in the accessed information.

The Dicle and Necmettin Erbakan programs provide a strong basis in terms of physical and human geography together with the field/practice dimension. At ÇOMÜ, teaching practice and school experience courses are important in terms of professional transfer. At Gazi University, the publication of current undergraduate course schedules demonstrates that the program is currently being implemented; however, since detailed course contents are limited on the accessed pages, interpretations regarding green transition should be made more cautiously.

Table 4

Comparative Evaluation of the Programs in Terms of Green Transition Orientation

University	Prominent Strength	Limitation in Terms of Green Transition	General Interpretation
Marmara University	Climate change, sustainability, and environmental problems are explicitly included in the program outcomes; the “Sustainable Geography” course is available.	Sustainable energy and energy transition do not appear as a separate teaching practice framework.	It is one of the strongest programs in terms of green transition visibility.
Dokuz Eylül University	Current 2025–2026 curriculum plan; strong foundation in physical geography, cartography, and climatology.	Green transition is not directly visible as a program concept.	It provides a strong geographical knowledge base; green transition is mostly indirect.
Necmettin Erbakan University	Theoretical and practical course structure; subject matter knowledge, pedagogical knowledge, general culture, and practice	Sustainable energy/green transition does not appear as a separate course or module.	The practice dimension is strong, while green transition visibility is indirect.

University	Prominent Strength	Limitation in Terms of Green Transition	General Interpretation
	courses are offered together.		
Dicle University	Strong infrastructure in physical, human, and economic geography together with field studies.	Green transition, carbon reduction, or sustainable energy education are not explicitly visible.	The geographical infrastructure is strong; the green transition framework is not explicit.
Atatürk University	Current course schedules and field study announcements are available.	The visibility of green transition/sustainable energy within course contents is limited.	The practice and field dimensions are important; green transition is indirect.
Gazi University	Current undergraduate course schedules have been published.	Access to detailed Bologna/course contents is limited.	Current program information is available; more documents are needed for content analysis.
ÇOMÜ	The structure of general culture, subject matter knowledge, pedagogical knowledge, elective courses, school experience, and teaching practice is explicit.	Green transitions or sustainable energy are not directly visible.	Teaching practice provides strong potential; the green transition focus is not explicit.

Table 4 demonstrates that the programs possess a common geographical and pedagogical infrastructure for green transition; however, green transition is not visible at the same level across the programs. Marmara University is one of the examples presenting the most explicit program outcomes and course contents in this respect. In the other programs, green transition is supported more indirectly through physical geography, environment, climate, natural resources, disasters, field studies, and teaching practice. In general, geography teacher education programs in Türkiye provide the geographical knowledge and spatial thinking infrastructure required for green transition. However, there is a need to structure themes such as sustainable energy, energy transition, carbon reduction, climate action, and green transition pedagogy within the programs through a more explicit, holistic, and practice-based teacher education approach.

Conclusion and Recommendations

In this study, the curriculum plans, program outcomes, course contents, and course schedules of seven universities in Türkiye that actively offer geography teacher education undergraduate programs were examined from the perspective of green transition. The findings of the study demonstrate that geography teacher education programs in Türkiye largely provide the geographical knowledge and spatial thinking infrastructure required for green transition; however, green transition has not yet been sufficiently structured within the programs as an explicit, systematic, and practice-based teacher education approach.

The findings related to the first sub-problem revealed that courses directly carrying the names “green transition,” “sustainable energy,” “energy transition,” or “climate action” are quite limited in the programs. In contrast, areas such as physical geography, climatology, hydrography, natural resources, environmental problems, disasters, sustainability, GIS, and field studies were found to be strongly included in the programs. These findings demonstrate that geography teacher education programs provide the fundamental geographical infrastructure required for green transition; however, this infrastructure is not directly organized holistically around the axis of green transition. Among the programs, Marmara University was found to structure climate change, sustainability, and environmental problems more explicitly at the level of program outcomes; moreover, it directly supports this field through the “Sustainable Geography” course. While the strong physical geography and climatology infrastructure at Dokuz Eylül University attracts attention, the field studies and applied structure at Necmettin Erbakan and Dicle Universities stand out. At Atatürk University, current field studies and the practice dimension attract attention, whereas at ÇOMÜ, teaching practice and school experience courses provide important potential in terms of professional transfer. The findings related to the second sub-problem demonstrate that the programs are particularly strong in the dimensions of knowledge and skills. Courses such as physical geography, climatology, economic geography, natural resources, and disasters provide prospective teachers with a strong theoretical foundation regarding climate, environment, and human-nature relationships. In addition, practice components such as GIS, remote sensing, map knowledge, spatial analysis, and field studies support the geographical thinking and analysis skills of prospective teachers. Nevertheless, it was determined that the action dimension within the programs is more limited. No strong findings could be reached indicating that issues such as green transition, sustainable energy education, carbon reduction, or climate action are systematically reflected in teaching practices, instructional design, or classroom activities.

The findings related to the third sub-problem demonstrate that the general structure of the programs is largely similar. In all programs, the classical teacher education structure consisting of subject matter knowledge, pedagogical knowledge, general culture, and practice courses is maintained. However, the main difference among the programs lies in the visibility level of concepts related to green transition. While sustainability, environmental problems, and climate change are emphasized more explicitly in some programs, these concepts are included only indirectly within physical geography or environmental themes in some other programs. When

evaluated in general terms, geography teacher education programs in Türkiye provide prospective teachers with a strong geographical knowledge and spatial analysis infrastructure. However, there is a need for areas that are increasingly gaining importance today, such as green transition, sustainable energy, energy efficiency, carbon reduction, and climate action, to be structured within the programs in a more visible, interdisciplinary, and practice-oriented manner. In particular, integrating issues such as sustainable energy education, combating climate change, environmental citizenship, and green transition pedagogy with teaching practices may strengthen the function of geography teacher education programs in the face of current global transformations.

Suggestions

- Compulsory or elective courses directly including the themes of “green transition,” “sustainable energy,” “climate action,” and “carbon reduction” should be developed in geography teacher education programs.
- Courses such as physical geography, climatology, natural resources, and environmental problems should be more explicitly associated with the dimensions of sustainable energy, energy transition, and environmental policy.
- Teaching practice and school experience courses included in the programs should be supported through green transition-based instructional design and sustainable energy education activities.
- Applied courses such as GIS, remote sensing, and spatial analysis should be enriched with practice examples related to climate change, disaster risks, energy use, and environmental sustainability.
- In order to ensure that the environmental awareness of prospective teachers does not remain only at the knowledge level, greater emphasis should be placed on applied project studies based on carbon footprint reduction, energy saving, sustainable living, and climate action.
- A common framework related to green transition pedagogy should be developed in geography teacher education programs in order to ensure standardization and currency among programs.
- In future studies, not only program documents but also the practical effectiveness of the programs should be examined through interviews with faculty members, prospective teachers, and graduate teachers.

References

- Aydemir, Y., & Alım, M. (2022). Coğrafya öğretmen adaylarının çevresel okuryazarlık düzeylerinin çeşitli değişkenler açısından incelenmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2(2), 1–25. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/refad/article/1294688>
- Aydemir, Y., & Alım, M. (2025). Coğrafya öğretmen adaylarının çevre ve çevre korumaya yönelik görüşlerinin incelenmesi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 16(1), 236–261. <https://doi.org/10.54558/jiss.1419031>

- Aydın, F. (2010). Coğrafya öğretmen adaylarının çevre sorunları ve çevre eğitimi hakkındaki görüşleri: Gazi Üniversitesi örneği. *International Online Journal of Educational Sciences*, 2(3), 818–839. https://unis.karabuk.edu.tr/yayin-detay/2_DJarDG_92/cografya-ogretmen-adaylarinin-cevre-sorunlari-ve-cevre-egitimi-hakkindaki-gorusleri-gazi-universitesi-ornegi
- Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27–40. <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>
- Butt, G. (2011). *Geography, education and the future*. Continuum.
- Büyüköztürk, Ş., Çakmak, E. K., Akgün, Ö. E., Karadeniz, Ş., & Demirel, F. (2020). *Bilimsel araştırma yöntemleri* (28th ed.). Pegem Akademi.
- Cantell, H., Tolppanen, S., Aarnio-Linnanvuori, E., & Lehtonen, A. (2019). Bicycle model on climate change education: Presenting and evaluating a model. *Environmental Education Research*, 25(5), 717–731. <https://doi.org/10.1080/13504622.2019.1570487>
- Çimen, H. (2019). Fen bilgisi ve sınıf öğretmen adaylarının sürdürülebilir çevreye yönelik tutumlarının incelenmesi. *İnsan ve İnsan*, 6(21), 525–542. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/insanveinsan/article/475471>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). Sage.
- European Commission. (2019). *The European Green Deal*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- Evans, N., Stevenson, R. B., Lasen, M., Ferreira, J.-A., & Davis, J. (2017). Approaches to embedding sustainability in teacher education: A synthesis of the literature. *Teaching and Teacher Education*, 63, 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.01.013>
- Ferreira, J.-A., Ryan, L., & Tilbury, D. (2007). Mainstreaming education for sustainable development in initial teacher education in Australia: A review of existing professional development models. *Journal of Education for Teaching*, 33(2), 225–239. <https://doi.org/10.1080/02607470701259515>
- International Energy Agency. (2024). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- International Renewable Energy Agency. (2023). *World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway*. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jorgenson, S. N., Stephens, J. C., & White, B. (2019). Environmental education in transition: A critical review of recent research on climate change and energy education. *The Journal of Environmental Education*, 50(3), 160–171. <https://doi.org/10.1080/00958964.2019.1604478>
- Karasar, N. (2020). *Bilimsel araştırma yöntemi: Kavramlar, ilkeler, teknikler* (35th ed.). Nobel Akademik Yayıncılık.

- Koç, H., & Karatekin, K. (2013). Coğrafya öğretmen adaylarının çevre okuryazarlık düzeylerinin çeşitli değişkenler açısından incelenmesi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 28, 139–174. <https://dergipark.org.tr/en/pub/marucog/article/3928>
- Lambert, D., & Morgan, J. (2010). *Teaching geography 11–18: A conceptual approach*. Open University Press.
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2024). *Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli ortak metni*. https://tymm.meb.gov.tr/upload/brosur/ortak_metin.pdf
- Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A., & Chaves, W. A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. *Environmental Education Research*, 25(6), 791–812. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1360842>
- Rousell, D., & Cutter-Mackenzie-Knowles, A. (2020). A systematic review of climate change education: Giving children and young people a “voice” and a “hand” in redressing climate change. *Children's Geographies*, 18(2), 191–208. <https://doi.org/10.1080/14733285.2019.1614532>
- Sağdıç, M. (2020). 2018 yılı Coğrafya Öğretmenliği Lisans Programının alan bilgisi, genel kültür ve pedagoji dersleri açısından analizi. *International Journal of Geography and Geography Education*, 41, 136–152.
- Şahintürk, A., & Saka, A. (2025). Öğretmen adaylarına yönelik sürdürülebilir kalkınma odağında küresel iklim değişikliği ve etkileri konusunda başarı testi geliştirme. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 5(2), 121–145. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/5489238>
- Stevenson, R. B., Nicholls, J., & Whitehouse, H. (2017). What is climate change education? *Curriculum Perspectives*, 37(1), 67–71. <https://doi.org/10.1007/s41297-017-0015-9>
- UNESCO. (2015). *Not just hot air: Putting climate change education into practice*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000233083>
- UNESCO. (2020). *Education for sustainable development: A roadmap*. <https://doi.org/10.54675/YFRE1448>
- UNESCO. (2024). *Education and climate change: Learning to act for people and planet*. <https://doi.org/10.54676/GVXA4765>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Yıldırım, A., & Şimşek, H. (2021). *Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri* (12th ed.). Seçkin Yayıncılık.
- Yükseköğretim Kurulu. (2018). *Yeni öğretmen yetiştirme lisans programları*. <https://www.yok.gov.tr/documents/documents/68f1dc912d8a0.pdf>

İklim Değişikliğinin Arı Popülasyonu ve Arıcılık Faaliyetlerine Etkileri: Türkiye Örneği

The Effects of Climate Change on Bee Populations and Beekeeping Activities: The Case of Türkiye

Esmeray Alacadağlı

Doç. Dr., Bayburt Üniversitesi, İktisadi İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Bayburt, Türkiye

Özet

Türkiye; coğrafi konumu, iklimsel özellikleri, kıyılardan iç kesime doğru giderek artan rakımı, zengin florasına bağlı farklı vejetasyon tipleri sayesinde arıcılık için uygun bir ülkedir. Koloni varlığı ve bal üretimiyle dünya sıralamasında ilk sıralarda yer alan ve sahip olduğu bitki örtüsü ve farklı iklim koşullarıyla dünyanın en kaliteli ballarını üretebilecek durumda olan ülkede bu zengin zengin flora'ya bağlı olarak çok çeşitli bal üretilmektedir. Arılar bir çevreye uzun yıllar süresinde uyum sağlayan ve yaşamını burada sürdüren canlılardır. Öte yandan arılar koloni olarak yaşayan ve birbirleri arasında etkileşim sürekli olan canlılardır. Küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği, sıcaklık ve nemde meydana gelen artışlar, bitki örtüsünde oluşan değişimler diğer canlılar gibi arıları da etkilemektedir. Çünkü iklim değişikliklerine bağlı çevresel değişiklikler; gıda kaynakları, konak-parazit dengesi ve canlılar arası etkileşimi bozabilmekte ve o bölgede yaşayan türlerin yaşadıkları bölgeyi terk etmelerine neden olabilmektedir.

Bu çalışmada insan yaşamı için önemli olan arı popülasyonunun ve sahip olduğu genetik özellikleri, sosyo-ekonomik ve kültürel etkileri ile Türkiye açısından önemli bir sektör olan arıcılık sektörünün faaliyetlerinin ve iklim değişikliğinden nasıl etkilendiği ortaya konulmaya çalışılacaktır. Bu amaçla alana yönelik yapılan literatür taraması ile bilimsel bilgiler, sektörel ve istatistiki veriler ve resmi raporlar kanalıyla da uygulamaya yönelik veriler sağlanacaktır. Bu verilerin birlikte analizi ile sonuca ulaşılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, Arı popülasyonu, Sürdürülebilir arıcılık, Bölgesel riskler, Sosyo ekonomik etkiler

Abstract

Turkey is a suitable country for beekeeping thanks to its geographical location, climatic characteristics, increasing altitude from the coast to the interior, and diverse vegetation types resulting from its rich flora. Ranking among the top countries in the world for colony numbers and honey production, and possessing the vegetation and diverse climatic conditions to produce some of the world's highest quality honey, the country produces a wide variety of honey thanks to this rich flora. Bees are creatures that adapt to an environment and survive there for many years. Furthermore, bees live in colonies and constantly interact with each other. Climate change due to global warming, with

increases in temperature and humidity and changes in vegetation, affects bees as well as other living things. This is because environmental changes caused by climate change can disrupt food sources, host-parasite balance, and inter-organism interactions, potentially causing species living in those areas to abandon their habitats.

This study aims to reveal how the bee population, which is important for human life, and its genetic characteristics, socio-economic and cultural impacts, as well as the activities of the beekeeping sector, an important sector for Turkey, are affected by climate change. To this end, scientific information, sectoral and statistical data, and practical data from official reports will be collected through a literature review. The conclusion will be reached through the combined analysis of this data.

Keywords: Climate change, Bee population, Sustainable beekeeping, Regional risks, Socio-economic impacts

Giriş ve Kavramsal Çerçeve

Türkiye, Akdeniz Havzası'nda yer alması nedeniyle küresel ısınmanın ve iklim krizinin etkilerini şiddetli hisseden ve bu konuda riski yüksek ülkeler arasında yer almaktadır. Son yıllarda tırmanışa geçen aşırı hava olayları, rekor sıcaklıklar ve meteorolojik kuraklık, ülkenin su kaynaklarını, tarımsal üretimini ve ekosistem dengesini doğrudan sarsmaktadır (Türkeş vd, 2000: 13, Dellal vd., 2011: 376).

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (BM İDÇS) göre iklim değişikliği, *“karşılaştırabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan insan faaliyetleri sonucunda iklimde oluşan değişikliklerdir”* (BM İDÇS, 1992).

Küresel İklim Değişikliği ise “fosil yakıt ve arazi kullanımı tercihleri, ormansızlaştırma, sanayileşme süreçleri gibi insan etkinliklerine bağlı olarak atmosfere salınan sera gazları birikimlerindeki hızlı artışın sera etkisini kuvvetlendirmesi sonucunda yerküredeki ortalama yüzey sıcaklıklarındaki artış ile iklimde oluşan değişiklikler” ifade eder (URL 1; Türkeş vd, 2000: 20). İklim değişikliğiyle mücadeleyle yönelik artan taahhütlere ve hedeflere rağmen yüzyılın sonunda 2,7°C'lik bir sıcaklık artışı beklenmekte olup (UNEP, 2021), 2024 yılı, küresel kayıtların başladığı 1850'den bu yana en sıcak yıl olmuştur. 20. yüzyıl ortalamasının 1,29°C üzerine çıkmış ve 175 yıllık kayıttaki en sıcak on yılın tamamı 2015-2024 arası son on yılda gerçekleşmiştir (URL 2).

İklim değişikliğine bağlı olarak hava koşullarında, ortalama sıcaklık ve yağış miktarında oluşan değişiklikler, flora, faunayı, tarımsal ekosistemleri ve gıda üretimini etkilemekte, böcekler de dahil pek çok hayvanın davranışlarında ve yaşam tarzlarında değişikliğe yol açabilmektedir (Erdem vd., 2023: 33). Böcekler için sıcaklık ve nemde meydana gelen artışlar, onların gelişme oranlarının, yer değiştirme hızları ve üreme kapasitelerinin artması demek olup bu değişiklikler zincirleme olarak doğadaki diğer ekolojik süreçleri de etkileyebilmektedir. Bu bağlamda sıcaklık değişimleri, ürünlerin gelişme ve olgunlaşma sürecini hızlandırarak verim ve randıman kayıplarına neden olabilmekte, böcek, hayvan popülasyonunu olumsuz etkilemektedir. Öte yandan küresel ısınma, bir bölgede yaşayan canlı türlerinin

yaşadıkları bölgeyi terk etmelerine ve böylece onların yerine bölgeye özgü olmayan yeni istilacı türlerin yerleşmesine de olanak yaratabilmektedir. Bunun sonucunda ekosistemimizdeki biyolojik çeşitlilik azalmakta ve bazı canlı türleri dünya üzerinden yok olmaktadır (Demir, 2009: 43-45) . Oysa biyoçeşitlilik; çevre koşullarındaki olumsuzluklara ve çevresel değişime karşı sigorta sağlayan bir faktör olup sürdürülebilirliği ekolojik döngü açısından da büyük önem arz etmektedir.

Arıcılık sektörü ve arılar, insan yaşamı için çok önemli olan bal, polen, propolis, arı sütü gibi ürünleri üretirler. Bu bağlamda arılar, dünya üzerindeki yaşamın devamlılığı, gıda güvenliği ve ekosistem dengesi için en kritik canlı türlerinden biridir. Uzmanlara göre arılar ve arıcılık sektörü; küresel ısınma ve iklimsel değişimlerden hem en fazla hem de bir çok açıdan etkilenecek sektörlerden biridir. Çünkü iklim, arıcılıktaki stres faktörlerinden birisi olup iklimsel değişiklikler arının, ihtiyacı olan besin kaynaklarını, arı popülasyonunu ve arıcılığı direkt etkilemektedir (TRGM-TEPGE, 2025: 1).

Arı popülasyonu kavramı; insan ve çevrenin sürdürülebilirliği için kritik bir canlı türü olan arıların varlığını tanımlamada kullanılır. Belirli bir zaman diliminde, sınırları net olarak tanımlanmış coğrafi bir alanda yaşayan aynı arı türüne ait bireylerin/kolonilerin toplam sayısı olarak tanımlanır. Bilim insanlarına göre arı popülasyonunun azalması ve süreç içinde arıların yok olması durumunda küresel ekosistemler ve insanlık doğrudan bir çöküş tehdidiyle karşı karşıya kalacaktır (Asutay&Söğüt, 2023: 5-8).

Türkiye; sahip olduğu coğrafi konumu, farklı iklim kuşaklarını barındıran iklimsel özellikleri, kıyılardan iç kesime doğru giderek artan rakımı, zengin florası nedeniyle arıcılık için uygun bir ülkedir. Dünya ballı bitki florasının yüzde 75'ini barındıran Türkiye, koloni varlığı ve bal üretimiyle de dünya sıralamasında ilk sıralarda yer almaktadır. Ancak son yıllarda sıcaklık artışları, kuraklık ve aşırı hava olaylarına bağlı olarak ülke genelinde arı ölümleri olmakta ve bal üretiminde düşüşler yaşanmaktadır (Erdem vd, 2023: 39-40)

Bu çalışmanın amacı; insan yaşamı için önemli bir besinleri üreten bir sektör olmasının yanı sıra sahip olduğu genetik özellikleri, sosyo-ekonomik ve kültürel etkileri ile Türkiye açısından önemli bir sektör olan arıcılık faaliyetlerinin, arı popülasyonunun iklim değişikliğinden nasıl etkilendiği ortaya koymaktır. Bu amaçla yapılan literatür taraması ile alana yönelik bilimsel bilgiler sağlanmış, sektörel ve istatistiki veriler ve resmi raporlar kanalıyla da uygulamaya yönelik veriler elde edilmiştir. Bu verilerin birlikte analizi ile Türkiye örneğinde iklim değişikliğinin arı popülasyonu ve arıcılık sektörüne etkileri belirlenmiştir.

İklim Değişikliğinin Arıcılığa Etkileri

Küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği arılar üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. Bu bağlamda bu etkiler; bitkilere bağlı ortam kalitesinin değişiminden, koloni hasat kapasitesine, arıların gelişimine, türler ve ırklar arasında olduğu kadar parazitleri ve patojenleri arasında yeni rekabet ilişkilerine, sektörel sorunlara yol açma gibi pek çok yönde olabilmektedir. Arılar üzerinde yaratılan bu etkileri genel olarak; **i.** Biyolojik ve Davranışsal Etkiler, **ii.** Flora ve Bal Üretimi Üzerindeki Etkiler, **iii.** Hastalık ve Zararlıların Yayılımı, **iv.** Sektörel ve Ekonomik Etkiler olarak gruplamak mümkündür.

Бйологик ve Davranışsal Etkiler: Bal arıları bulundukları bölgeye uzun dönemde uyum sağlayabilen canlılardır. Gıda kaynakları dengesi, konak-parazit dengesi ve çevre değişiklikleriyle birbirleri arasında etkileşim süreklidir. İklım değişiklikleri, bu etkileşimi bozacağı gibi bir bölgede yaşayan arı türlerinin yaşadıkları bölgeyi terk etmelerine ve bölgeye özgü olmayan yeni istilacı türlerin yerleşmesine de yol açabilmektedir. Ayrıca iklimdeki değişimler, koloni gelişimindeki düzensizliklere neden olabilmekte, bu da zayıf kolonilerin oluşmasına, hastalıkların yaygınlaşmasına, tarlacı arıların kovanına geri dönmemesine ve ölümlerine neden olmaktadır (Topal vd., 2016: 113-114). Öte yandan küresel iklimde meydana gelen değişimler bal arılarının dağılım alanlarını, davranışını ve yaşamını da değiştirebilmektedir. Sonbahardaki sıcaklıkta ve nemde meydana gelen artışlar, doğrudan bal arılarının gelişmesini etkilemekte ve kışlamada problemler oluşmasına neden olabilmektedir (şahinler ve ark., 2008). Bu konuda yapılan bir çalışmada; dokuz arı türünde kış sıcaklığı artmasının (1,5-9,5°C arasında) yalancı bahar ve kışlama sorunları yaşamasına yol açarak arıların kovanı erken terketmelerine yol açtığı arıların ağırlık ve gelişimleri üzerinde ters etkileri olduğunu göstermiştir. Çalışmada; ağırlık kayıpları, enerji tüketiminde artışlar olması nedenleriyle ilkbaharda bazı türlerin yaşam döngüsünün sona erdiği ifade edilmiştir (Frund ve ark.'dan aktaran Ayan vd., 2022: 20). Bu tür çalışmalar, sıcaklık dalgalanmalarının, kuraklığın arıların biyolojik ritmini değiştirdiğini, koloni kayıplarına yol açtığını açıkca göstermektedir. Öte yandan değişen iklim parametreleri, yüksek nem ve aşırı sıcaklık gibi faktörler, arıların fiziksel gelişimini bozarak kanatlarında asimetriye neden olmakta ve uçuş kabiliyetlerini düşürmekte, davranış bozukluklarına yol açarak yön bulma yeteneklerini ve üreme zincirlerini de olumsuz etkilemektedir.

Flora ve Bal Üretimi Üzerindeki Etkiler: İklımsel hava olayları, bitki örtüsünü dolayısıyla bal arısının yiyecek arama olanaklarını da etkilemektedir. Örn. sıcaklık artışı bitkilerin erken çiçek açmasına ve arıların uyanma zamanı ile bitkilerin nektar salgılama dönemleri arasındaki uyumun kırılmasına yol açmaktadır. Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin arıların besin kaynağı olan bitkileri etkilemesi sonucu, arıların yararlandığı yerel zenginlik ve bitki ile tozlaştırıcıların dağılımı da değişmektedir. Çünkü bitkisel üretimin en kritik noktalarından birisi tozlaşma olup en etkin polinatörler de bal arılarıdır. Ani sıcaklık değişimleri arıların gelişimi için gerekli olan polen ve nektar kaynaklarının varlığına direkt etki ederek onların yok olmasına, besinsiz kalan kolonilerde açlığa bağlı ani sönmelere ve kovan veriminin düşmesine sebep olabilmektedir. Son yıllarda sıklıkla çiçeklenme döneminde yaşanan olumsuz hava koşulları ve polinatörlerin görevini yerine getirememesi nedeniyle tozlaşma sekteye uğramakta ve bitkisel üretim dolayısıyla gıda üretimi de olumsuz yönde etkilenmektedir (Eştürk, 2022: 1233). Bu ise küresel gıda üretimini de olumsuz etkileyecek bir durumdur. Çünkü bazı bitkilerin ve buna bağlı olarak da gıdaların üretimi tozlama sürecine bağlı olup bal arısı gibi tozlayıcılar olmadan üretimin sürdürülebilirliği olanaksızdır. Buna karşın son yıllarda dünya çapında bal arısı popülasyonu artan ölüm oranlarıyla alarm vermektedir.

Hastalık ve Zararlıların Yayılımı: Arılar yaşadıkları alan dışına çıktıklarında hayatta kalma, varroa (parazitsel bir hastalık) ve Nosema ceranae (protozoon bir hastalık) hastalıklarına karşı direnci azalmaktadır. Değişen iklim koşulları, arı parazitlerinin ve fungal hastalıkların kovanlarda daha hızlı üremesine zemin hazırlarlar. Böylece

hastalık ve zararlılara karşı daha hassas olan koloniler oluşmasına ve toplu ölümlerin görülmesine neden olabilir. Öte yandan hastalık baskısı, besin yetersizliği ve sıcaklık stresiyle birleşerek koloni çöküşlerini ve yok oluşlarını tetiklerler (URL 3).

Sektörel ve Ekonomik Etkiler: İklim değişikliğinin etkilerinden biri de arıcılar ve arıcılık yöntemleri üzerinedir. Küresel ısınmanın sonucu ani ısı değişimlerinin floraya olan etkileri arıcıları da olumsuz etkilemektedir. Flora sürdürülebilirliği ve takibi arıcıların nakliye ve işçilik giderlerinin ve nihai olarak üretim maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Arıcılık; son yıllarda iklimin baskısı altında harcanan emek ve zamanın karşılığının alınamadığı bir üretim modeli haline gelmiştir. Bu ise; arıcıların arıcılık yöntemlerini değiştirmesi (Topal vd., 2016: 117) ya da üretici kapasitesinin azalması gibi muhtemel sonuçları olan bir durumdur. Türkiye’de olduğu gibi gezginci arıcılık yöntemi mrutin göç yollarındaki floranın öngörülemez şekilde değişmesi; sadece üretimi değil maliyetleri artırarak ekonomik kriz yaşanmasına neden olarak bu üretim yönteminin de uygulanabilirliğinin sorgulanmasını bereberinde getirmektedir. Yukarıda da söz edildiği üzere bal arıcılığı tarımsal üretimle eşgüdümlü bir sektör olup; bal arılarının nektar bulamaması durumu, tarımsal bitkilerdeki tozlaşma oranının azalmasına ve meyve ve sebze üretiminde genel bir zincirleme gıda krizine yol açabilecek bir durumdur.

Yukarıda belirtilen tüm bu etkiler, iklim değişikliğinin tüm dünyada arı sağlığı, bal rekorları ve bitkisel tozlaşma süreçlerini doğrudan bozarak arıcılık sektörünü küresel ölçekte tehdit ettiğini göstermektedir.

Türkiyede Arıcılık Faaliyetleri ve İklim Değişikliği

Türkiye, sahip olduğu; coğrafi konum, buna bağlı iklimsel ve kıyılardan iç kesime doğru artan rakımsal özellikleri, zengin florası ve farklı vejetasyon tipleri nedeniyle, arıcılık için uygun bir ülkedir. Öte yandan arıcılık; az masrafla kısa sürede gelir getirebilen, toprağa bağımlı olmadan yapılabilen bir iş koludur. Bu yönü ile topraksız ya da az topraklı çiftçilerin gelir düzeyinin artmasını sağlayan, orman içi ve kenarı yaşayan bireylere gelir yaratan ve sosyoekonomik önemi olan bir sektördür. Dünya ballı bitki türlerinin yaklaşık $\frac{3}{4}$ ’ne sahip olmasından dolayı da arıcılık açısından son derece verimli bir ülkedir. Başka bir ifade ile Türkiye bu zengin florası, uygun ekoloji, koloni varlığı ve arı popülasyonlarında ki genetik varyasyon bakımından büyük bir arıcılık potansiyeline sahiptir (Kırpık&Gülen, 2014: 42-43).

Koloni varlığı ve bal üretimiyle dünya sıralamasında ilk sıralarda yer alan ve sahip olduğu bitki örtüsü ve farklı iklim koşullarıyla dünyanın en kaliteli ballarını üretebilecek durumda olan ülkede, bu zengin floraya bağlı olarak çok çeşitli bal üretilmektedir. Bu özelliklerinden de kaynaklı olarak arı genetik çeşitliliğinin %22-23’üne sahip olan Türkiye/Anadolu toprakları, Dünya arı gen merkezleri/havzalarından da biridir (Türk Tarım Orman Dergisi, 2024; URL3). Çünkü yedi coğrafik bölgeye ayrılan ülkede her bölgenin iklim koşulları ve bitki çeşitliliği farklıdır ve bu çok çeşitli iklim deseni nedeniyle ülke arı gen kaynakları açısından da oldukça zengindir. Yapılan bilimsel çalışmalarda Türkiye’de beş farklı arı ekotipi bulunduğundan söz edilmektedir. Bununla birlikte bu çalışmalarda ve sektör raporlarında, bu ırk ve ekotiplere ek bulundukları bölgelerin ekolojik koşullarına uyum sağlamış yerel bal arısı popülasyonlarının da olduğu belirtilmektedir (Kara vd.,

2015: 21; TRGM-TEPGE Arıcılık Ürün Raporu, 2025). Türkiye’de bulunan başlıca bal arısı tipleri aşağıda verilmektedir (URL 4):

- Kafkas Arısı; yayılma alanı Kuzeydoğu Anadolu’da Ardahana ve Doğu Karadeniz’de Artvin’e kadar uzanır.
- Efe Arısı; Ege, Güney-Batı Marmara ve Batı Akdeniz Bölgelerinde yayılım gösterir.
- Gökçeada Ekotipi; Çanakkale Gökçeada’da yayılım gösterir.
- Anadolu Arısı; Anadolu koşullarına adapte olan arı ekotipidir.
- Hatay Arısı; Hatay ve çevresinde yayılım alanı bulan ekotiptir.
- Trakya Arısı; Trakya Bölgesi’nde yayılım gösteren arı ekotipidir.
- Muğla Bal Arısı; Muğla ve Güneybatı Anadolu’da yayılım gösteren arı ekotipidir.
- Yığılca Bal Arısı; Düzce Yığılca’da yayılım gösterir.

Koloni varlığı, bal üretimi, kovan ve 100 bine yakın işletme varlığıyla arıcılık konusunda sayılı ülkeler arasında yer alan Türkiye, Dünyanın en büyük üçüncü arı kolonisine sahiptir.

Tablo 1. Dünya Kovan Varlığı

Ülkeler	Yıllara Göre Kovan Varlığı (1000 adet)				
	2019	2020	2021	2022	2023
Hindistan	12.233	12.411	12.501	12.582	12.664
Çin	9.189	9.263	9.259	9.287	9.314
Türkiye	8.128	8.179	8.733	8.985	9.225
İran	6.990	7.048	7.124	7.231	7.358
Etiyopya	6.958	6.986	5.982	6.229	6.795
Birleşik Tanzanya Cumhuriyeti	2.993	3.041	3.044	3.062	3.080
Arjantin	2.924	3.014	3.006	3.009	3.013
İspanya	3.034	3.102	2.953	2.923	2.804
Rusya Federasyonu	3.094	2.982	2.890	2.790	2.743
Amerika Birleşik Devletleri	2.812	2.706	2.697	2.667	2.509
Diğer	38.925	40.318	41.767	42.339	42.554
Dünya	97.280	99.050	99.956	101.104	102.059

Kaynak: Arıcılık Ürün Raporu- TRGM-TEPGE, 2025: 2

Türkiye Dünya bal üretiminde ise ikinci sırada yer almaktadır.

Tablo 2. Dünya Bal Üretimi

Ülkeler	Yıllara Göre Bal Üretimi (Ton)				
	2019	2020	2021	2022	2023
Çin	444.054	458.100	472.700	461.900	463.500
Türkiye	109.330	104.077	96.344	118.297	114.886

Ülkeler	Yıllara Göre Bal Üretimi (Ton)				
	2019	2020	2021	2022	2023
Etiyopya	150.258	129.301	52.034	73.120	84.591
İran	72.424	74.015	76.484	78.386	80.389
Arjantin	71.195	73.539	72.919	73.047	73.395
Hindistan	67.961	70.546	74.000	75.732	70.850
Rusya	63.526	66.368	64.533	67.014	64.511
Brezilya	45.801	52.493	55.679	62.494	64.189
ABD	71.179	66.948	57.490	56.849	62.855
Meksika	61.986	54.165	62.079	64.320	58.033
Diğer	730.160	754.209	747.008	776.885	756.606
Dünya	1.887.874	1.903.761	1.831.270	1.908.044	1.893.805

Kaynak: Arıcılık Ürün Raporu-TRGM-TEPGE, 2025: 3

Türkiye’de arı kolonisi varlığı bakımından bölgeler itibarıyla sıralama; Ege, Karadeniz, Akdeniz, Doğu Anadolu, Marmara, İç Anadolu, Güneydoğu Anadolu Bölgesi şeklindedir. Bal üretimi bakımından Türkiye’de iller sıralamasında Ordu, Adana, Muğla, Sivas ve Kocaeli en üst sırada yer almaktadır. 2024 yılı bal üretiminde Akdeniz Bölgesi 18 bin ton üretimle lider konumda olup, 2024 yılında Türkiye balının %19,1’lik kısmını tek başına üretmiştir. Onu 16 bin ton ile Doğu Karadeniz Bölgesi izlemektedir. Ege Bölgesi ise yüzde 15,8’lik pay ile üçüncü sırada yer almaktadır (TRGM-TEPGE Arıcılık Ürün Raporu, 2025: 11).

Türkiye arıcılığı genel olarak büyüyen bir sektör olmasına rağmen, son yıllarda kovan sayılarında il bazında önemli farklılıklar görülmekte ve il bazında az da olsa yaşanan düşüşler dikkat çekmektedir. Türkiye’nin toplam koloni sayısı 2024 yılında 9 milyona ulaşmakla birlikte toplam kovan sayısı bir önceki yıla göre %2,8 oranında azalmıştır. Bal üretimi de 2024 yılında bir önceki yıla oranla %16,9 azalarak yaklaşık 96 bin ton olarak gerçekleşmiştir. Genel olarak 2024 yılındaki üretim miktarı, son beş yılın en düşük seviyesindedir. İl bazında incelendiğinde ise kovan sayıları Muğla’da %10,8 ve Adana’da %1,5 azalırken, Ordu’da %2,2 oranında artış yaşanmıştır. 2024 yılında 2024 yılında bal ihracatı da bir önceki yıla göre %7,8 oranında azalmış ve 8 bin 657 tona gerilemiştir (TRGM-TEPGE Arıcılık Ürün Raporu, 2025: 10-13).

Türkiye, 2025 yılında 97.253 ton bal üretimi gerçekleştirerek (%1,8’lik artış) üretimdeki yerini ve hacmini korumuştur. 2025 yılında bal ihracatından 33 milyon 524 bin 594 dolar geleri sağlanmış, ABD, Almanya ve İngiltere başta olmak üzere 51 farklı ülkeye Türk balı gönderilmiştir (URL 5).

Daha önce de söz edildiği üzere Türkiye bulunduğu konum ve tarımsal faaliyetlerin yoğun yapıldığı bir ülke olması sebebiyle, küresel ısınma ve iklim değişikliğinden çok fazla etkilenecek bir ülkedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, IPPC raporları ülkemizde; yaz ve kış sıcaklıklarının artacağı, yağışların azalacağı, kar yağışı ve yağmurun daha seyrek ve daha şiddetli görüleceği, su kaynaklarının bilinçsiz ve aşırı kullanımı nedeniyle yeraltı sularının azalacağı gibi bulguları içermektedir. Araştırmacılarca, Meteoroloji Genel Müdürlüğü metrolojik olay ve sıcaklık izleme verilerine dayanılarak verilen veriler, son yıllarda yaşanan fırtına, sel ve dolu gibi meteorolojik olaylardaki artışı göstermektedir (Karaca vd., 2024: 106-108). Tüm bu etmenler,

Türkiye'yi iklim değışikliğinin etkilerine karşı daha kırılgan hale getirmekte, tarım ve hayvancılık gibi sektörler açısından endişeleri artırmaktadır. Çünkü, iklim değışikliğinin etkisiyle meydana gelen meteorolojik afetler, ülkede tarımsal üretimi ve ürünleri doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda yapılan kestirimlere göre iklim değışikliğine bağlı sıcaklık artışından, tüm Türkiye etkilenecek olmakla birlikte, Güney Doğu ve İç Anadolu gibi kurak ve yarı kurak bölgeler ile yarı nemli Ege ve Akdeniz bölgeleri daha fazla etkilenecektir. Uzmanlara göre; Seyhan nehri havzasında 2070-2100 yıllarında yağış önemli oranlarda azalacak, kar yağışı miktarı ve erime zamanına bağlı buğday, mısır gibi ürünlerin ekim/dikim zamanlar ve ekiliş yöreleri değışecektir. Son yıllarda sıklıkla yaşanan, meyve ağaçlarının kış dinlenme, çiçeklenme, tomurcuk oluşumu ve meyve döneminde meydana gelen ekstrem hava koşulları, sadece meyve üretimi ve kalitesini etkilememekte aynı zamanda tozlaşmada görev alan arılar üzerine de olumsuz etkiler yaratmaktadır. Yukarıda da belirtildiği üzere Dünya da olduğu gibi ülkemizde de iklim değışiklikleri bal arılarında zayıf kolonilerin oluşumunu tetikleyerek hastalıkların yaygınlaşması, arı kayıpları ve ölümlere neden olmaktadır (Şahin vd., 2015: 148).

Türkiye arıcılığının %80-90 gibi büyük bir oran gezginci arıcılık olarak yapılmakta ve floradan maksimum verim almak yoluna gidilmektedir. Bu üretim yönteminde iklimsel faktörler son derece önemli olup bal üretim ısınma, kuraklık, yağış gibi faktörlere bağlı olarak değışebilmektedir. Bu açıdan iklimde yaşanan ve doğal döngüyü etkileyen değışimler arıcılar için büyük bir olumsuzluk olarak karşılarına çıkmaktadır. Bu konuda yukarıda sözü edilen araştırma verilerini (dokuz arı türünde kış sıcaklığının artmasının etkilerine yönelik araştırma) doğrulayan etkiler bizim ülkemizde de yaşanmaktadır. Örneğin 2006 yılında kuraklık nedeniyle ülkemizde bir bal krizi yaşanmış ve buna bağlı olarak yıllık bal üretimi 50 bin tona kadar düşmüştür (Göktaş, 2020: 178). Aşağıdaki Tablo 3'dan da görüleceği üzere iklimsel faktörlere bağlı olarak bal üretimi ve bağlı faaliyetlerde etkilenmeler ve kayıplar yaşanmaktadır.

Tablo 3. Türkiye Arıcılık Faaliyetleri Genel Durum Tablosu

Yıl	İşletme Sayısı (Adet)	Toplam Kovan Sayısı (Adet)	Bal Üretimi (Ton)	Balmumu Üretimi (Ton)
2017	83.210	7.796.666	114.471	4.488
2018	81.830	7.904.502	107.920	3.987
2019	80.675	7.929.368	109.330	3.971
2020	82.862	7.956.933	104.077	3.765
2021	89.361	8.456.305	96.344	3.766
2022	95.386	8.734.938	118.297	4.165
2023	100.399	8.969.387	114.886	3.971
2024	97.984	8.815.146	95.492	3.316

Kaynak: Arıcılık Ürün Raporu-TRGM-TEPGE, 2025: 9

Ülkemiz ekosistemi ve gıda ürünleri üretimi açısından da açısından büyük önem arzeden arıcılık sektörünün geleceğini korumak adına, Tarım ve Orman Bakanlığı koordinasyonunda iklim değışikliğine dayanıklı yerli arı ırklarının ıslahı ve kuraklığa uyumlu yapay flora alanlarının oluşturulması çalışmaları ve projeler yürütölmektedir.

Bu kapsamda Tarım ve Orman Bakanlığı, küresel iklim değişikliğinin arıcılık üzerindeki sosyo-ekonomik ve kültürel etkilerini araştırmak, arı işletmelerinin iklim değişikliğine uyumuna yönelik politika önerileri geliştirmek için proje başlatmıştır. Bu kapsamda Bakan tarafından yapılan açıklamada; “Dünya gündeminin ilk sıralarında yer alan küresel iklim değişikliğinin ülkemiz tarımsal faaliyetlerini de etkilediğine dikkat çekilerek, iklim değişikliğinin arıcılık üzerindeki etkilerinin en aza indirilmesi amacıyla bu projeyi başlattıkları” belirtilmiştir (URL 6).

Sonuç ve Değerlendirme

İklim değişikliği, Dünya da olduğu gibi Türkiye’de de arı sağlığı, bal rekorları ve bitkisel tozlaşma süreçlerini doğrudan bozarak arıcılık sektörünü tehdit etmektedir. Eğer bu konuda önlem alınmazsa; niteliksiz ana arı üretimi, zayıf kolonilerde direncin düşmesine, hastalık ve zararlılara karşı savunmasız olunmasına ve sonunda koloninin sönmeye kadar giden sonuçları beraberinde getirecektir. Bu sonuçlar nedeniyle ekonomik anlamda önemli getirisi olan bir alanda ülkemiz kayıplara uğrayacaktır. İklim kaynaklı yapısal krizlere karşı, Türkiye’de arıcılık sektörünün sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla acil olarak uygulanmak üzere somut çözümler stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu açıdan kanımızca ilk öncelikle yapılması gereken şey iklim değişikliğinin arıcılık üzerindeki yıkıcı etkilerini önlemek üzere biyolojik çeşitliliğin ve sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır. Çünkü arıcılık sektörü ile biyoçeşitlilik birbirini besleyen iki ayrılmaz unsur olup bu sayede yerli ırkların korunması da sağlanabilir. Özellikle ülkemiz arıcılığı için bölgesel koşullara uyum sağlamış sağlamış Kafkas, Anadolu ve Muğla gibi yerli arı türlerinin genetik sağlığının korunması ve olası koloni çöküşlerine karşı yerli ırkların genetik materyallerinin dondurularak saklanması gerekmektedir.

Arıların tozlaşma yoluyla tarımsal biyoçeşitliliğe ve meyve/sebze verimine katkısının, ürettikleri balın ekonomik değerinin çok üzerinde olduğu dikkate alınarak; gezginci arıcılığın optimizasyonu için bölgesel rotalar çizilmeli, anlık ve geleceğe yönelik bitki örtüsü / çiçeklenme dönemleri takip edilerek arıcılara erken uyarı verilmeli, kurakçıl bal ormanları, ardışık çiçeklenme koridorları oluşturulmalı ve iklim stresine zayıflayan arıların tarımsal ilaçlardan etkilenmemesi için pestisit denetimleri yapılmalıdır. Yine iklimsel faktörler dikkate alınarak; kovan içi sıcaklık ve nem dengesini sağlayan, aşırı sıcak/soğuk dalgalanmalarını absorbe eden yalıtımlı kovan sistemlerine geçilmeli, kovanlarda sensörlü uyarı sistemleri kullanımı yaygınlaştırılmalı, polen kıtlığı yaşanan dönemler için arı bağışıklığını destekleyici özel kek formülleri geliştirilmelidir. Tüm bu stratejilerin hayata geçirilmesi için Tarım ve Orman Bakanlığı, üniversiteler ve Türkiye Arı Yetiştiricileri Merkez Birliği gibi kurumlar ortaklığında projeler yürütülmeli ve bölgesel teşvik paketleri uygulanmalıdır.

Kaynakça

Asutay, Z., Söğüt, B. (2023). Arıcılıkta Küresel Isınmanın Etkileri, Ed. H. İnci, T. Ayaşan, S. İnan, *Sürdürülebilir Tarım ve Agro Ekolojik Gelişmeler* içinde (3-15), İksad Yayınevi, DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10154803>

- Ayan, Z., İlkaya, M. Söğüt, B. (2022). İklim Değişikliğine Bağlı Küresel Isınmanın Bal Arısı Ekosistemleri Üzerinde Etkisinin Değerlendirilmesi, Ed. B. Söğüt, H. İnci, *Tarımsal Perspektifte Biyodinamik Yaklaşımlar* içinde (15-26), İksad Yayınevi, Ankara.
- BM İDÇS(1992). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, <https://iklim.gov.tr/bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi-i-33> adresinden alındı. (11.02.2026)
- Dellal, D., McCarl, B.A., Butt, T. 2011. The Economic Assessment of Climate Change on Turkish Agriculture, *Journal of Environmental Protection and Ecology*, Vol:12, No:1, 376-385.
- Erdem, S., İlkaya, M., Karaoğlu, B. (2023). Küresel Isınmanın Bal Arısı Popülasyonlarında Habitat Arayış Davranışı Ve Hastalık Etmenlerine Toleransı Üzerine Etkileri, Ed. Hakan İnci, T. Ayaşan, S. İnan, *Sürdürülebilir Tarım ve Agro Ekolojik Gelişmeler* içinde (31-46), DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10154872>
- Eştürk, Ö. (2022). İklim Değişikliğinin Ardahan İlinde Süt ve Bal Üretimi Üzerine Etkileri, *Erciyes Akademi*, 2022, 36(3), 1230-1239.
- Göktaş, B. (2020). Türkiye’de ve Dünya’da Arıcılık Faaliyetlerinin Ekonomisi, Ed. V. Aksakal ve Yaşar Erdoğan, *Arıcılık Üzerine Bilimsel Araştırmalar* içinde (173-200), İksad Yayınevi.
- Kara, M., Keskin, M., Merttürk E., Demir, C. (2015). Yerli Evcil Hayvan Genetik Kaynaklarının Korunması Projesi Kapsamında Kafkas Arı Irkının Halk Elinde Korunması Çalışmaları ve Yaygın Etkileri, *Arıcılık Araştırma Dergisi*, Yıl:7, Sayı:14, 19-27
- Karaca, S., Koday, Z., & Koday, S. (2024). Küresel Sıcaklık Artışının Doğal Afetler Üzerine Etkileri ve Ağrı. Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 10(1), 95-131. <https://doi.org/10.31463/aicusbed.1380159>
- Kırpık, M.A., Gülen, M. (2014). Ülkemizde Arıcılık Faaliyetleri, 21. Yüzyılda Fen ve Teknik, Cilt 1, Sayı 1, (37-46).
- Şahin, M., Topal, E., Özsoy, N., Altunoğlu, E. (2015). İklim Değişikliğinin Meyvecilik ve Arıcılık Üzerine Etkileri, *Anadolu Doğa Bilimleri Dergisi* 6 (Özel Sayı 2): 147-154
- TRGM/TEPGE (2025). Tarım Reformu Genel Müdürlüğü Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü (TRGM-TEPGE) 2025 Arıcılık Ürün Raporu, Haz. Volkan Burucu, Ankara, TEPGE Yayın No: 409, ISBN: 978-625-95521-8-7.
- Topal E., Özsoy N., Şahinler, N. (2016). Küresel Isınma ve Arıcılığın Geleceği, *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(1):112-120
- Türkeş, M., Sümer, U. M. ve Çetiner, G. (2000). Küresel İklim Değişikliği ve Olası Etkileri, Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (13 Nisan 2000, İstanbul Sanayi Odası), 7-24, ÇKÖK Gn. Md., Ankara.
- UNEP 2021. *Climate Change 2021: the Physical Science Basis, the Working Group Contribution to the Sixth Assessment Report*, <https://www.unep.org/resources/report/climate-change-2021-physical-science-basis-working-group-i-contribution-sixth>, (Erişim Tarihi: 11.02.2026)

URL-1 (2026). <https://www.ekolcevre.com/blog/kuresel-iklim-degisikligi-nedir> adresinden alındı.

URL-2 (2026). <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413> adresinden alındı.

URL-3. (2026). Dünyanın En Çok Bal Üreten İkinci Ülkesiyiz, *Türk Tarım Orman Dergisi*, Hülya Omrak, <https://www.turktarim.gov.tr/Haber/1096/dunyanin-en-cok-bal-ureten-ikinci-ulkesiyiz> adresinden alındı.

URL-4. (2026). Ülkemizdeki Arı Türleri, <https://www.akdenizhijyen.com.tr/blog/ulkemizdeki-ari-turleri> adresinden alındı.

URL-5.(2026). <https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/58015> ve <https://www.aa.com.tr/tr/eko-nomi/turkiyenin-bal-ihracati-2025te-33-5-milyon-dolari-asti/3796831> adreslerinden alındı.

URL-6.(2026). <https://www.tarimorman.gov.tr/Haber/5965/Kuresel-Iklim-Degisikliginin-Aricilik-Uzerindeki-Etkileri-Mercek-Altina-Alindi> adresinden alındı.

Artificial Intelligence in Agriculture for Drone Based Crop Monitoring and Sustainable Intensification

Muhammad Yasir Naeem¹, Batuhan Selamoglu^{2,3}, Zeliha Selamoglu^{4,5}

¹*Department of Agronomy, Animals, Food, Natural Resources and the Environment (DAFNAE), University of Padua, Italy*

²*Department of Electronics Technology, Istanbul Arel University, İstanbul, Türkiye*

³*Mersin University, Institute of Science, Electrical and Electronic Engineering, Mersin, Türkiye*

⁴*Department of Medical Biology, Faculty of Medicine, Nigde Ömer Halisdemir University, Nigde, Türkiye*

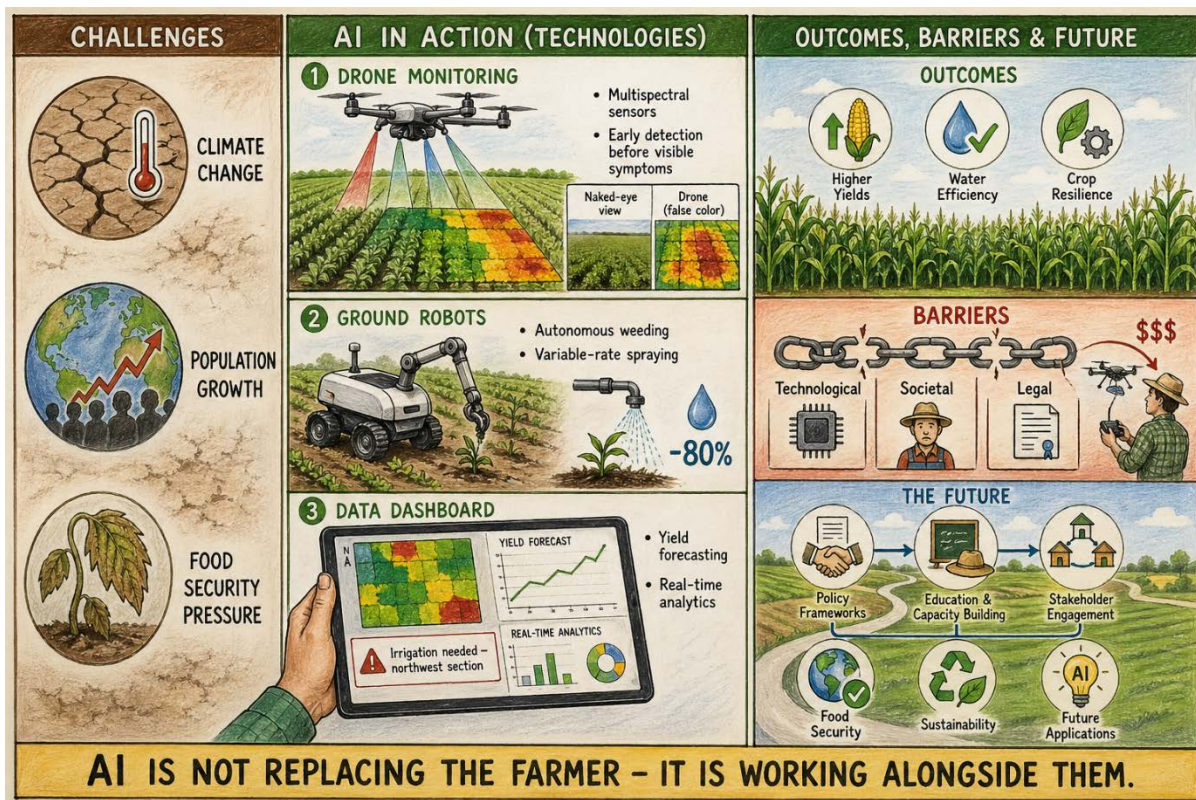
⁵*Department of Biology, Faculty of Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

Abstract

Over the past decade, artificial intelligence (AI) has begun to change how we approach agricultural production, moving farming away from uniform field management toward data-driven, precision-based strategies. In the article, we examined the practical integration of AI methods such as deep learning, computer vision, and ensemble machine learning across different stages of crop production. A particular focus is placed on drone-based crop monitoring. When unmanned aerial vehicles equipped with multispectral, thermal, or hyperspectral sensors were paired with convolutional neural networks, we found that farmers could track plant health, canopy cover, chlorophyll levels, and early signs of disease or drought stress at a resolution that satellite data alone cannot achieve. These AI-powered drones allowed farmers to detect problems before they became visible to the naked eye and to apply water, fertilizer, or pesticides only where needed. Beyond aerial monitoring, we also evaluated autonomous ground robots for weeding, recurrent neural networks for yield forecasting, and reinforcement learning frameworks for real-time irrigation decisions. Our results showed clear gains in resource efficiency and crop resilience. Nevertheless, several limitations remain. Models trained in one region often fail under different soil or climate conditions. Computing demands still exceed the capacity of many on-farm systems. For smallholder farmers particularly in developing countries cost and infrastructure continue to pose major barriers. We conclude by outlining what we see as the most urgent research conditions, explainable AI that farmers can trust, federated learning to pool data across farms without compromising privacy and policy reforms that make these technologies accessible rather than widening existing gaps in agriculture.

Keywords: Artificial intelligence, Machine learning, Precision agriculture, Sustainable production

Graphical Abstract



Large-Scale Screening of Hydrobarothermally Processed Soybean Prototypes to Identify Optimal Nutritional Quality for Poultry

Muhammad Umair Asghar¹, Mariusz Korczyński¹

¹*University Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Faculty of Biology and Animal Sciences, Department of Animal Nutrition and Feed Science, 51-630, Wrocław, Poland.*

Abstract

The optimization of soybean processing is essential to enhance its nutritional value and reduce anti-nutritional factors in poultry diets. The present study was designed as a large-scale screening experiment to identify the most effective hydrobarothermal processing conditions for soybean. A total of 92 soybean prototypes were produced using different combinations of temperature, pressure, time, and moisture. This extensive screening aimed to select the best-performing soybean prototypes based on their nutritional quality and suitability for animal feeding. The prototypes were evaluated for key parameters, including protein availability, reduction of anti-nutritional factors, and digestibility. Based on these criteria, the most promising candidates were identified and further assessed for their potential application in poultry nutrition. The results demonstrated considerable variation among the processed soybean samples, confirming that processing conditions play a critical role in determining nutritional value. Several prototypes showed significantly improved nutritional characteristics, indicating their potential to enhance feed efficiency and animal performance. This study highlights the importance of systematic screening approaches in identifying optimal processing conditions and provides a foundation for developing high-quality soybean-based feed ingredients.

Keywords: soybean processing, sustainability, protein, poultry nutrition, hydrobarothermal processing.

Feed Efficiency and Environmental Sustainability: Key Challenges in Global Poultry Production

Muhammad Umair Asghar¹

¹University Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Faculty of Biology and Animal Sciences, Department of Animal Nutrition and Feed Science, 51-630, Wrocław, Poland.

Qurat ul ain Sajid¹

¹University Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Faculty of Biology and Animal Sciences, Department of Animal Nutrition and Feed Science, 51-630, Wrocław, Poland.

Martyna Wilk²

²Independent Researcher, Niepruszewo 64-320, Poland

Mariusz Korczyński¹

¹University Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Faculty of Biology and Animal Sciences, Department of Animal Nutrition and Feed Science, 51-630, Wrocław, Poland.

Abstract

The global poultry sector is facing increasing pressure to meet the rising demand for animal protein while minimizing its environmental footprint and ensuring economic viability. Sustainability challenges in poultry production are closely linked to feed resource utilization, environmental emissions, and the efficient conversion of nutrients into animal products. This study explores the role of nutritional strategies in addressing these global challenges, with a particular focus on improving feed efficiency, optimizing nutrient utilization, and reducing environmental impact. Key approaches discussed include the use of advanced feed processing technologies, enzyme supplementation, and the incorporation of alternative protein sources to enhance nutrient digestibility and reduce reliance on conventional feed ingredients. Improving the bioavailability of nutrients such as phosphorus and amino acids can significantly reduce nutrient excretion, thereby lowering the environmental burden associated with poultry production. In addition, precision nutrition strategies allow for better alignment of dietary supply with animal requirements, minimizing waste and improving production efficiency. The findings highlight that targeted nutritional interventions can play a pivotal role in enhancing sustainability across poultry production systems. By improving feed conversion efficiency and reducing nutrient losses, these strategies contribute not only to economic performance but also to environmental protection. This work underscores the importance of integrating nutrition based solutions into broader sustainability frameworks to address current and future global challenges in poultry science.

Keywords: Poultry science, Sustainability, Feed efficiency, Environmental impact, Alternative protein sources, Nutritional strategies, Global challenges.

Biological Nitrification Inhibition in Legumes and Cereals for Improved Nitrogen Retention and Sustainable Crop Production

Muhammad Yasir Naeem¹, Yaira Ulugbekovna Rakhmetova^{2,3}, Zeliha Selamoglu^{4,5}

¹*Department of Agronomy, Animals, Food, Natural Resources and the Environment (DAFNAE),
University of Padua, Italy*

²*Research and Production Center for Microbiology and Virology LLC, Almaty, Kazakhstan*

³*Al - Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

⁴*Department of Medical Biology, Medicine Faculty, Nigde Omer Halisdemir University, Nigde,
Türkiye*

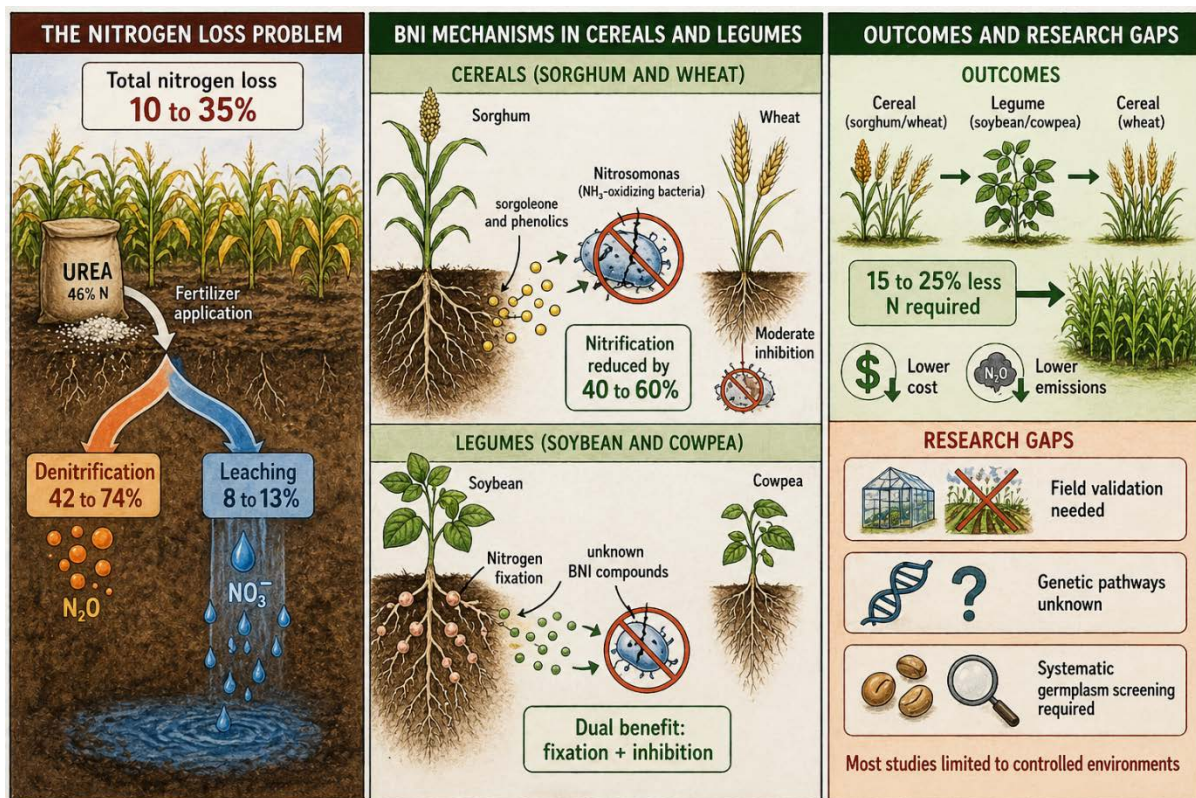
⁵*Department of Biology, Faculty of Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish
University, Turkestan, Kazakhstan*

Abstract

Nitrogen loss from agricultural soil represents a fundamental inefficiency in global crop production. Total nitrogen losses from agricultural fields range from 10 to 35% of applied fertilizer. These losses occur primarily through two pathways. The first denitrification, the microbial conversion of nitrate to nitrous under the field conditions. Second is nitrate leaching, which accounts for approximately 8 to 13% of applied nitrogen. In this review, we synthesized the current literature on BNI expression in two major crop groups, cereals and legumes. Among cereals, sorghum, demonstrated the strongest inhibition. Roots exudates including sorgoleone reduced soil nitrification potential by 40 to 60% in controlled studies. Wheat exhibits more moderate inhibition, with stronger expression observed in older landraces compared to modern cultivars. Among legumes, soybean and cowpea show measurable BNI activity, through their inhibitory compounds remain less characterized than those in cereals. Legumes offer a distinct advantage by combining biological nitrogen fixation with BNI exudation. We examined the considerable genotype variability reported both crop groups. Which indicated that BNI is a heritable trait amenable to breeding. This literature suggests that integrating high BNI cereal and legume genotypes into rotation system could reduce synthetic nitrogen requirement by 15 to 25% without yield penalty. However, we noted that most published studies remain limited to controlled environments. We concluded by identifying key gaps in the literature including the need for field validation, genetic pathway elucidation, and systematic germplasm screening.

Keywords: Biological nitrification inhibition, Cereals, Legumes. Nitrogen use efficiency, Sustainable agriculture

Graphical Abstract



General Biochemical Composition of *Chlorella Vulgaris* Biomass Grown on Wastewater from the Recirculating Aquaculture System

Sergiu Dobrojan¹, Gabriel-Ionuț Plavan^{2,3}, Zeliha Selamoglu⁴, Oana-Alexandra Plavan^{5, 6}, Melnic Victor¹, Jigău Gheorge¹, Galina Dobrojan¹

¹Moldova State University, Scientific Research Laboratory "Algology V. Salaru", Chisinau, Republic of Moldova

²"Alexandru Ioan Cuza" University of Iasi, Faculty of Biology, Iasi, Romania

³VASILE BACAUANU Scientific Research and Student Practice Station, Stefanesti

⁴Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

⁵Gheorghe Asachi" Technical University of Iași, Faculty of Chemical Engineering and Environmental Protection, "Department of Environmental Engineering and Management, "Cristofor Simionescu"

⁶"Petru Poni" Technological High School, Iași

Abstract

The algae *Chlorella vulgaris* is widely used in human food, animal nutrition, as a biofertilizer, biostimulator, as a source of biofuel and for other purposes. These applications are largely due to the favorable biochemical content of the algal biomass. Numerous nutrient cultivation media are used to obtain algal biomass, which, however, lead to increased production costs. In this context, numerous scientific researches are aimed at identifying alternative sources of nutrient media, cheap, accessible and efficient, which could ensure the accumulation of a significant content of biologically active substances in the algal biomass.

A potential source of cheap and accessible nutrients is wastewater from recirculating aquaculture systems (RAS). These are generated in considerable quantities, do not present high toxicity and often constitute an economic and technical problem for aquaculture operators. Based on these considerations, the purpose of the study was to use wastewater from the recirculating aquaculture system of the Iași Research and Development Station for Aquaculture and Aquatic Ecology, within the "Alexandru Ioan Cuza" University of Iași, as a nutrient medium for the cultivation of the algae *Chlorella vulgaris* and to evaluate the biochemical content of the obtained biomass. For this purpose, experiments were carried out to determine the general biochemical content of the *Chlorella vulgaris* biomass on the 3rd, 6th and 9th days of cultivation, on nutrient media with the addition of wastewater in concentrations of 10%, 30%, 60%, 90% and 100%. The experimental media were supplemented by the administration of Tamia nutrient medium, and Tamia nutrient medium was used as a control. The experiments were carried out under laboratory conditions, at a temperature of 21–25 °C, with natural lighting and without shaking the samples. The cultivation was carried out in Erlenmeyer flasks with a volume of 100 mL, in which the nutrient medium together with the algal inoculum constituted a total volume of 100 mL.

The results obtained on the 3rd day of cultivation show that the *Chlorella vulgaris* biomass has a protein content that increases from 35.20% at a concentration of 10%

wastewater to a maximum of 40.20% at a concentration of 60%, after which it decreases to 36.20% at a concentration of 100%, remaining however superior to the control (34.20%). The lipid content shows a constant increase with the increase in the proportion of wastewater in the nutrient medium, from 7.60% to 11.80%, compared to 7.20% in the control, while the carbohydrate content decreases from 37.21% to 26.90% with the increase in the wastewater concentration, compared to 39.20% in the control.

On the 6th day of cultivation, the *Chlorella vulgaris* biomass shows a significant increase in protein content with the increase in wastewater concentration up to 60%, from 45.00% to 50.12%, a value higher than the control (41.00%). At higher concentrations, the protein content decreases to 38.52% (90%) and 37.10% (100%). The lipid content increases steadily from 9.40% to 17.00%, significantly exceeding the control value (8.30%), while the carbohydrate content progressively decreases from 27.99% to 18.70%, compared to 37.40% in the control sample. On the 9th day of cultivation, pronounced biochemical changes are observed in response to the increase in the proportion of wastewater in the nutrient medium. The protein content increases from 43.21% at a concentration of 10% wastewater to 48.00% at a concentration of 60%, exceeding the control value (40.02%), after which it decreases to 36.68% at a concentration of 100%. Lipid accumulation increases significantly with increasing wastewater concentration, from 9.00% to 18.90%, while the carbohydrate content decreases steadily from 26.21% to 15.40%, compared to 29.48% in the control. These results indicate a progressive redirection of carbon flux towards lipid biosynthesis under conditions of prolonged cultivation and nutritional stress. The results obtained indicate that exceeding the optimal values of wastewater concentration in the cultivation medium of the *Chlorella vulgaris* algae leads to a decrease in the protein and carbohydrate content of the algal biomass and an increase in the lipid content. In conclusion, the biomass of *Chlorella vulgaris* cultivated on nutrient media with the addition of wastewater from recirculating aquaculture systems, in optimal concentrations, can accumulate significant amounts of biologically active substances, sometimes superior to those obtained on standard nutrient media. Therefore, the obtained biomass can represent a valuable nutritional source for the fish feed that generate these wastewaters.

Keywords: wastewater, recirculating aquaculture system, *Chlorella vulgaris*, biomass

Acknowledgement

This work was supported by a grant of the Ministry of Research, Innovation and Digitization, CNCS/CCCDI - UEFISCDI, through the project Center of Excellence in water management, materials, by-products and waste valorisation for circular bioeconomy implementation, proposal number PN-IV-P6-6.1-CoEx-2024-0056, contract 6 CoEx/08.01.2026.

Haskap (*Lonicera caerulea*) A Potent New Source of Natural Antioxidants

Muhammad Yasir Naeem^{1*}, Furkat Ubaev², Zeliha Selamoglu^{3,4}

¹Department of Agronomy, Animals, Food, Natural Resources and the Environment (DAFNAE),
University of Padua, Italy

²Center for Sustainable Development and Scientific Research, Khoja Akhmet Yassawi International
Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan

³Department of Medical Biology, Medicine Faculty, Nigde Omer Halisdemir University, Nigde,
Türkiye

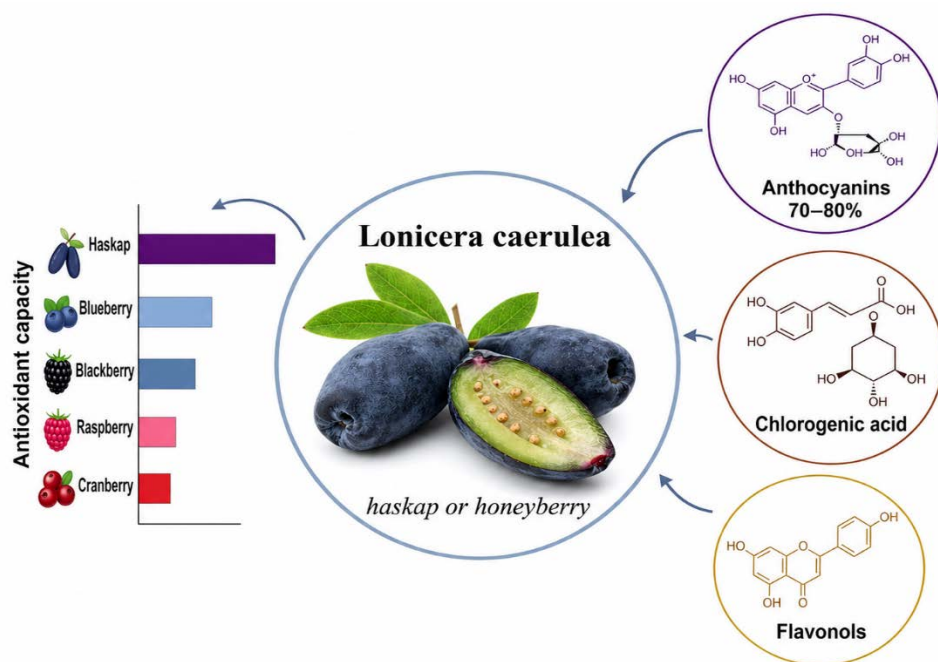
⁴Department of Biology, Faculty of Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish
University, Turkestan, Kazakhstan

Abstract

Lonicera caerulea, known as haskap or honeyberry, represents one of the most potent natural sources of dietary antioxidant among temperate small fruits. This review consolidates the current scientific evidence demonstrating the exceptional antioxidant capacity of this emerging berry crop. The principal bioactive compounds are anthocyanin, with cyaniding 3 O glucoside alone comprising 70% to 80% of the total anthocyanin's fraction, followed by chlorogenic acid and neochlorogenic acid as the dominant phenolic acids. Across numerous comparative studies, haskap extracts consistently outperform high bush blueberry, blackberry, raspberry, strawberry, and cranberry in standard antioxidant assays including the Oxygen Radical Absorbance Capacity and the Ferric Reducing Antioxidant Power test. This superior performance is directly attribute to the uniquely high concentration of cyanidin based compounds. Russian and Japanese cultivars generally exhibit the highest antioxidant values, while fully ripe berries contain two to three time's greater anthocyanin concentrations than half ripe fruits. Although the in vitro evidence is exceptionally robust, human clinical trial remained limited, with only to intervention studies published to date. Nevertheless, the existing evidence unequivocally establishes haskap as a premier antioxidant berry crop. For researchers and health conscious consumers. Haskap offers a validated, high density phenolic matrix with outstanding free radical scavenging potential.

Keywords: Anthocyanins, Antioxidant capacity, Haskap, *Lonicera caerulea*, Phenolic compounds

Graphical Abstract



Biyokütle Piroliz Ürünleri ve Biyoyağ Üst Isıl Değerinin Tahmini İçin Yorumlanabilir Çoklu-Çıkışlı Makine Öğrenmesi Yaklaşımı

**An Interpretable Multi-Output Machine Learning Framework for Predicting Biomass
Pyrolysis Product Distribution and Bio-Oil Higher Heating Value**

Şeyda Taşar¹

¹Doç. Dr, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye.

Beyda Taşar²

²Doç. Dr, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye.

Nurlan Akhmetov³

³Dr. Öğr. Üyesi, Ahmet Yesevi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Ekoloji ve Kimya Bölümü, Türkistan, Kazakistan

Meltem Çakmak Kalkan⁴

⁴Dr. Öğr. Üyesi Hakkari Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi, Hakkari, Türkiye.

Özet

Bu çalışmada, biyokütle hızlı piroliz sürecine ait çok değişkenli deneysel veri seti kullanılarak ürün dağılımı (katı, sıvı ve gaz ürünler) ile biyoyağın üst ısı değerinin (HHV) eş zamanlı tahmini için yorumlanabilir çoklu-çıkışlı makine öğrenmesi modelleri geliştirilmiştir. Toplam 122 örnekten oluşan veri seti; partikül boyutu, elementel bileşim ve proses parametrelerini kapsayan 14 giriş değişkeni (PS, C, H, N, O, Ash, V, FC, Cel, Hem, Lig, HT, FR, GFR) ile temsil edilmiştir. Çıkış değişkenleri ise char, bio-oil, gaz ürün ve HHV olarak belirlenmiştir.

Doğrusal olmayan ve çoklu-çıkışlı yapıya sahip sistemin modellenmesinde Extra Trees ve XGBoost algoritmaları Multi Output Regressor yaklaşımı ile uygulanmıştır. Model performansını artırmak amacıyla ağırlıklı ensemble ve veri sızıntısını engelleyen stacking yöntemleri geliştirilmiştir. Tüm modeller 10-katlı çapraz doğrulama ile değerlendirilmiş; performans ölçütü olarak R^2 , MAE ve RMSE kullanılmıştır.

Sonuçlar, HHV tahmininde en yüksek performansın Extra Trees modeli ile elde edildiğini ($R^2 = 0.9766 \pm 0.0685$, $RMSE = 0.28 \pm 0.66$) göstermiştir. Char tahmininde stacking ve XGBoost modelleri benzer doğruluk düzeyine ulaşmıştır ($R^2 \approx 0.856$). Gaz ürün tahmininde en iyi performans XGBoost modeli ile sağlanırken ($R^2 = 0.8129 \pm 0.1178$), sıvı ürün (bio-oil) tahmininde en yüksek başarı Extra Trees modeli tarafından elde edilmiştir ($R^2 = 0.7759 \pm 0.1476$).

Korelasyon ve kısmi bağımlılık (PDP) analizleri, piroliz sıcaklığının (HT) ürün dağılımı üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu, elementel bileşimin (özellikle C ve H içeriği) ise HHV üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, önerilen yorumlanabilir çoklu-çıkışlı makine öğrenmesi

yaklaşımının biyokütle piroliz süreçlerinin optimizasyonu için yüksek doğruluklu ve güvenilir bir karar destek aracı sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Makine öğrenmesi, biyokütle pirolizi, çoklu-çıktı regresyon, ensemble öğrenme, XGBoost

Abstract

In this study, interpretable multi-output machine learning models were developed for the simultaneous prediction of product distribution (solid, liquid, and gas products) and the higher heating value (HHV) of bio-oil using a multivariate experimental dataset derived from biomass fast pyrolysis. The dataset consists of 122 samples and is represented by 14 input variables including particle size, elemental composition, and process parameters (PS, C, H, N, O, Ash, V, FC, Cel, Hem, Lig, HT, FR, GFR). The output variables were defined as char, bio-oil, gas product, and HHV.

To model the nonlinear and multi-output nature of the system, Extra Trees and XGBoost algorithms were implemented using the Multi Output Regressor approach. In order to improve model performance, weighted ensemble and leak-free stacking methods were developed. All models were evaluated using 10-fold cross-validation, and R^2 , MAE, and RMSE were used as performance metrics.

The results showed that the highest performance for HHV prediction was achieved by the Extra Trees model ($R^2 = 0.9766 \pm 0.0685$, RMSE = 0.28 ± 0.66). For char prediction, stacking and XGBoost models reached similar levels of accuracy ($R^2 \approx 0.856$). While the best performance in gas product prediction was obtained using the XGBoost model ($R^2 = 0.8129 \pm 0.1178$), the highest accuracy for liquid product (bio-oil) prediction was achieved by the Extra Trees model ($R^2 = 0.7759 \pm 0.1476$).

Correlation and partial dependence (PDP) analyses revealed that pyrolysis temperature (HT) is a dominant parameter influencing product distribution, whereas elemental composition, particularly C and H content, has a strong effect on HHV. The findings demonstrate that the proposed interpretable multi-output machine learning approach provides a highly accurate and reliable decision-support tool for optimizing biomass pyrolysis processes.

Keywords: Machine learning, biomass pyrolysis, multi-output regression, ensemble learning, XGBoost

Plastik Atıkların Katalitik Torrefaksiyonu: Süreç Mekanizmaları, Enerji İyileştirme ve Sürdürülebilir Kaynak Geri Kazanımı

Catalytic Torrefaction of Plastic Waste: Process Mechanisms, Energy Enhancement, and Sustainable Resource Recovery

Muhammad Tayyeb Tahir¹

¹Yüksek Lisans Öğr. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye.

Şeyda Taşar²

²Doç. Dr, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye.

Fatih Kaya³

³Doç. Dr, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye.

Özet

Plastik üretimindeki hızlı artış, buna paralel olarak plastik atık miktarının küresel ölçekte ciddi boyutlara ulaşmasına neden olmuştur. Doğada uzun süre bozunmadan kalabilen plastik atıklar; çevresel kirlilik, mikroplastik oluşumu ve sera gazı emisyonları gibi çok yönlü sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle plastik atıkların sürdürülebilir ve katma değerli yöntemlerle değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu derleme çalışmasında, plastik atıkların katalitik torrefaksiyon yöntemi ile değerlendirilmesine yönelik mevcut literatür kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Çalışmada öncelikle plastik atıkların türleri, kimyasal yapıları ve termal davranışları incelenmiş; ardından mekanik, kimyasal ve termokimyasal geri dönüşüm yöntemleri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, özellikle termokimyasal dönüşüm yöntemlerinin enerji geri kazanımı açısından sunduğu avantajlar vurgulanmıştır. Torrefaksiyon süreci, 200–300°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen kontrollü bir ön işlem olarak değerlendirilmiş ve süreç mekanizmaları detaylı şekilde açıklanmıştır.

Literatür bulgularına göre torrefaksiyon sürecinde nem giderimi, uçucu bileşenlerin uzaklaştırılması ve kısmi termal bozunma gibi reaksiyonlar sonucunda malzemenin karbon içeriği artmakta ve enerji yoğunluğu yükselmektedir. Ayrıca katalizör kullanımının reaksiyon kinetiği, ürün dağılımı ve enerji özellikleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirtilmektedir. Süreç parametrelerinin (sıcaklık, süre, atmosfer ve plastik türü) optimize edilmesinin sistem performansı açısından kritik olduğu ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, katalitik torrefaksiyonun plastik atıkların enerji yoğunluğunu artıran, depolanabilirliğini iyileştiren ve ileri dönüşüm süreçlerine uygun hale getiren etkili bir ön işlem teknolojisi olduğu değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımın, sürdürülebilir atık yönetimi ve döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda önemli bir potansiyel sunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik atık, katalitik torrefaksiyon, termokimyasal dönüşüm, enerji geri kazanımı, sürdürülebilirlik

Abstract

The rapid increase in plastic production has resulted in a significant rise in plastic waste, posing serious environmental challenges worldwide. Due to their resistance to degradation, plastic wastes persist in the environment, leading to pollution, microplastic formation, and greenhouse gas emissions. Therefore, sustainable and value-added approaches for plastic waste management are urgently required. In this review, the catalytic torrefaction of plastic waste is comprehensively evaluated based on the current literature.

The study first examines the types, chemical structures, and thermal properties of plastic wastes, followed by a comparative assessment of mechanical, chemical, and thermochemical recycling methods. Among these, thermochemical conversion processes are highlighted due to their advantages in energy recovery. Torrefaction is discussed as a controlled pretreatment process typically conducted at temperatures between 200–300°C, and its fundamental mechanisms are analyzed in detail.

According to the reviewed studies, torrefaction involves moisture removal, devolatilization, and partial thermal degradation, resulting in increased carbon content and enhanced energy density. The use of catalysts is reported to significantly influence reaction kinetics, product distribution, and energy characteristics. Additionally, process parameters such as temperature, residence time, atmosphere, and plastic type are identified as critical factors affecting system performance.

In conclusion, catalytic torrefaction is identified as an effective pretreatment technology that enhances the fuel properties of plastic waste and improves its suitability for subsequent conversion processes. This approach offers significant potential in achieving sustainable waste management and circular economy objectives.

Keywords: Plastic waste, catalytic torrefaction, thermochemical conversion, energy recovery, sustainability

Microbial Phytase Supplementation Enhances Phytate Degradation and Mineral Utilization in Equine Diets

Qurat ul ain Sajid¹, Muhammad Umair Asghar¹, Patrycja Wróblewska¹, Barbara Król¹, Mariusz Korczyński¹

¹University Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Faculty of Biology and Animal Sciences, Department of Animal Nutrition and Feed Science, 51-630, Wrocław, Poland.

Abstract

Phytate-bound phosphorus in plant-based feed ingredients is poorly available to monogastric species, including horses, thereby limiting mineral utilization and contributing to increased nutrient excretion. This study investigated the potential of microbial phytase supplementation as a nutritional strategy to enhance phytate degradation and improve mineral bioavailability in equine diets. A controlled feeding approach was employed in which diets supplemented with microbial phytase were compared to non-supplemented controls. The evaluation focused on key nutritional parameters, including phytate degradation, phosphorus availability, and the utilization of essential minerals such as calcium, zinc, and iron. Digestibility indicators and selected physiological responses were also assessed to determine the overall impact on nutrient efficiency. The results indicated that microbial phytase supplementation significantly enhanced the breakdown of phytate, leading to improved phosphorus release and increased availability of associated minerals. This improvement in mineral utilization has important implications for equine health, particularly in supporting skeletal integrity and metabolic functions. Additionally, enhanced nutrient efficiency may contribute to reduced environmental phosphorus excretion. In conclusion, microbial phytase represents an effective and practical dietary strategy to overcome phytate-related limitations in equine nutrition. The findings support its application in improving feed efficiency and mineral utilization, with potential benefits for both animal performance and environmental sustainability.

Keywords: Microbial phytase, Phytate degradation, Equine nutrition, Mineral bioavailability, Phosphorus utilization, Feed efficiency, Nutritional strategies

Use of Wastewater from Recirculating Aquaculture Systems for the Production of *Spirulina Platensis* Biomass with Optimal Amino Acid Profile

Sergiu Dobrojan¹, Gabriel-Ionuț Plavan^{2,3}, Zeliha Selamoglu⁴, Galina Dobrojan¹, Oana-Alexandra Plavan^{5,6}, Mircea Nicușor Nicoară², Aurica Doina¹, Cristina Croitoru¹

¹Moldova State University, Scientific Research Laboratory "Algology V. Salaru", Chisinau, Republic of Moldova

²"Alexandru Ioan Cuza" University of Iasi, Faculty of Biology, Iasi, Romania

³VASILE BACAUANU Scientific Research and Student Practice Station, Stefanesti

⁴Department of Medical Biology, Faculty of Medicine, Nigde Ömer Halisdemir University, Nigde, Türkiye.

⁵Gheorghe Asachi" Technical University of Iași, Faculty of Chemical Engineering and Environmental Protection, "Department of Environmental Engineering and Management, "Cristofor Simionescu"

⁶"Petru Poni" Technological High School, Iași

Abstract

The cyanobacteria *Spirulina platensis* is an important source of biologically active substances, such as proteins, amino acids, carbohydrates, lipids, phycobiliproteins (phycocyanins and allophycocyanins), carotenoids, a wide range of amino acids (non-essential and essential), vitamins (A, B, D, E, K), linolenic and γ -linolenic acid, enzymes (superoxide dismutase, catalase, peroxidase), minerals (Ca, K, Mg, Na, P), some microelements (Fe, Cu, Cr, Mn, Zn) and other biologically active substances. Due to these, it has now gained global distribution, being cultivated in industrial quantities, including outside its natural range. However, a large part of the population does not have the opportunity to use *Spirulina* or products obtained from its biomass, due to the insufficiency of biomass and the relatively high price. In this context, we consider that optimizing nutrient media is very important in order to reduce the cost of biomass production.

In our previous research, we demonstrated that wastewater generated by recirculating aquaculture systems (RAS) can replace 10% of the standard Zarrouk nutrient medium for cultivating the cyanobacterium *Spirulina platensis*, which leads to obtaining an almost equal amount of biomass compared to cultivation on standard nutrient medium, with a proportional reduction in production cost.

In this sense, the purpose of the research was to analyze the amino acid content in the biomass of *Spirulina platensis* cultivated on standard nutrient medium (90%), with the addition of wastewater (10%) from the recirculating aquaculture system of the Research and Development Station for Aquaculture and Aquatic Ecology Iasi, within the "Alexandru Ioan Cuza" University of Iasi. The amino acid composition of the cyanobacterial biomass was determined at the end of the exponential growth phase of the culture, using the specific determination method.

The amino acid profile of *Spirulina platensis* biomass grown on nutrient medium with the addition of wastewater (RAS) highlights the predominance of glutamic acid (11.59%), followed by leucine (6.70%), arginine (5.90%), aspartic acid (5.79%) and alanine (5.51%). The composition of the biomass includes both non-essential and essential amino acids, such as threonine (2.98%), valine (3.99%), isoleucine (3.50%), leucine (6.70%), phenylalanine (3.14%), lysine (2.50%) and methionine (0.84%). The low content of tryptophan (0.17%) and cysteine (0.70%) is characteristic of *Spirulina* biomass.

The results indicate that the use of wastewater from the RAS system allows the production of *Spirulina platensis* biomass with a balanced and optimal amino acid profile for use in the nutrition of fish and other aquatic organisms.

Keywords: wastewater, recycling, *Spirulina platensis*, amino acids

Acknowledgement

This work was supported by a grant of the Ministry of Research, Innovation and Digitization, CNCS/CCCDI - UEFISCDI, through the project Center of Excellence in water management, materials, by-products and waste valorisation for circular bioeconomy implementation, proposal number PN-IV-P6-6.1-CoEx-2024-0056, contract 6 CoEx/08.01.2026.

Assessment of the Carbon Footprint in the Clinker-Based Cement Production Process

**Damira Sambaeva¹, Chynara Jayloobai kzy¹, Zarlyk Maimekov²,
Miraida Turgunbekova¹, Janarbek Izakov²**

*¹Kyrgyz State Technical University named after. I. Razzakov, 720044 Kyrgyz Republic, Bishkek, 66
Ch. Aitmatov Avenue*

*²Kyrgyz-Turkish University "Manas", 720038 Kyrgyz Republic, Bishkek, Chyngyz Aitmatov
Campus (Jal)*

Abstract

This paper analyzes the economic activities of several cement plants in the republic based on their ecological passports. It was noted that existing regulatory documents addressed the general environmental issues of individual industries, while the assessment of the carbon load in the cement production process remains open. Given these circumstances, it is emphasized that the formation of carbon-containing substances, including carbon dioxide, occurs during the high-temperature decomposition of calcium carbonate, the main raw material in cement production. Based on raw material consumption data at the Terek-Tash LLC plant (Novopokrovka village, Issyk-Ata District, Chui Region, Kyrgyzstan), a model chemical composition of cement clinker was compiled. It is emphasized that calcium oxide is not used directly in cement production, but is formed during the decomposition of limestone, meaning calcium carbonate was considered a carrier of carbon-containing substances. Accordingly, the concentration distribution of components and particles, including carbon-containing fragments formed at maximum entropy, was calculated. The established physicochemical and thermodynamic parameters of calcium carbonate degradation allowed us to determine the process direction, while the concentration distribution of various carbon-containing fragments in the gas phase revealed the total carbon footprint and the quantitative content of carbon oxides (CO, CO₂) depending on temperature.

Keywords: Clinker, Limestone, Cement, Thermodynamic modeling, Carbon footprint

Kinetic Investigation of the Nickel Fluoroborate Synthesis Reaction and Determination of Activation Energy

Nikel Floroborat Sentez Reaksiyonunun Kinetik İncelenmesi ve Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi

Eren Balcı

Lisans Öğrencisi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Selçuk Arıkan

²Yüksek Mühendis, Gazi Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Levent Nuralın

Dr. Öğr. Üyesi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Özet

Günümüzde alev geciktirici özellikleri ve kolay sentezlenebilme avantajlarıyla metal floroboratlar, ileri malzeme bilimi ve endüstriyel uygulamalarda giderek artan bir öneme sahiptir. Bu bileşikler ailesinde öne çıkan nikel floroboratın endüstriyel ölçekte üretim süreçlerinin iyileştirilebilmesi için reaksiyon kinetiğinin detaylı bir şekilde aydınlatılması gerekmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, nikel floroborat sentez reaksiyonunun kinetik parametrelerini incelemek; reaksiyon derecesini ve aktivasyon enerjisini hesaplayarak sistemin farklı sıcaklıklardaki reaksiyon hızlarına dair öngörüsül bir kinetik model oluşturmaktır. Deneysel çalışmalarda, geri soğutuculu sistem kullanılarak %20 kütlece floroborik asit çözeltisi ile nikel oksit katısı reaksiyona sokulmuştur. Kinetik incelemeler, literatürde/önceki çalışmalarda optimum reaktant oranı olarak belirlenmiş olan 4 mol aside karşılık 1 mol nikel oksit stokiometrik oranında gerçekleştirilmiştir. Kinetik verilerin elde edilebilmesi amacıyla sentez süreci 40 °C, 55 °C ve 70 °C olmak üzere üç farklı izotermal sıcaklıkta yürütülmüş ve her bir sıcaklık profilinde 10'ar dakikalık periyotlarla reaksiyon ortamından numuneler alınmıştır. Laboratuvar ölçekli ilk fiziksel gözlemler ışığında, 40 °C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda dahi nikel floroborat tuzunun oluşumunun başladığı tespit edilmiştir. Bu durum, reaksiyonun gerçekleşmesi için aşılması gereken aktivasyon enerjisi (E_a) bariyerinin görece düşük bir değere sahip olduğuna işaret etmektedir. ICP analizleri ile elde edilen nicel derişim bulguları kullanılarak reaksiyon hız sabitleri (k) hesaplanmış ve Arrhenius denklemi üzerinden net aktivasyon enerjisi ile reaksiyon derecesi kesin olarak belirlenmiştir. Bu araştırmanın ileri bor ürünlerinin fonksiyonel özelliklerini araştıran bilim insanlarına kıymetli veriler sunacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nikel Floroborat, Reaksiyon Kinetiği, Aktivasyon Enerjisi, Alev Geciktiriciler, İleri Bor Ürünleri

Abstract

Today, metal fluoroborates are gaining increasing importance in advanced materials science and industrial applications due to their flame-retardant properties and ease of synthesis. In order to improve the industrial-scale production processes of nickel fluoroborate, which stands out in this family of compounds, its reaction kinetics need to be elucidated in detail. The main objective of this study is to investigate the kinetic parameters of the nickel fluoroborate synthesis reaction, and to develop a predictive kinetic model for reaction rates at different temperatures by calculating the reaction order and activation energy. In the experimental studies, a 20 wt% fluoroboric acid solution and solid nickel oxide were reacted using a reflux system. Kinetic investigations were carried out at a stoichiometric ratio of 4 moles of acid to 1 mole of nickel oxide, which was determined as the optimum reactant ratio in previous studies/literature. To obtain kinetic data, the synthesis process was conducted at three different isothermal temperatures (40 °C, 55 °C, and 70 °C), and samples were collected from the reaction medium at 10-minute intervals for each temperature profile. ICP spectrometer analyses are ongoing to quantitatively determine the time-dependent concentration changes in the samples with high precision. Based on initial laboratory-scale physical observations, it was determined that the formation of nickel fluoroborate salt begins even at relatively low temperatures, such as 40 °C. This indicates that the activation energy (E_a) barrier required for the reaction to proceed is relatively low. Using the quantitative concentration data obtained from ICP analyses, reaction rate constants (k) were calculated, and the net activation energy and reaction order were definitively determined via the Arrhenius equation. It is anticipated that this research will provide valuable data for scientists investigating the functional properties of advanced boron products.

Keywords: Nickel Fluoroborate, Reaction Kinetics, Activation Energy, Flame Retardants, Advanced Boron Products

***Lysinibacillus fusiformis* BG46 Promotes Rice Growth and Reshapes the Rhizosphere Microbiome Under Drought Stress**

Bekzhan D. Kossalbayev^{1,2}, Mingda Lyu^{3,4}, Assemgul K. Sadvakasova², Dilnaz E. Zaletova^{1,2}, Meruyert O. Bauenova², Jingjing Wang^{3,4}, Zhiyong Huang^{3,4}

¹Department of Chemical and Biological Technologies, Satbayev University, 22 Satpaev Street, Almaty 050013, Kazakhstan.

²Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi 71, Almaty 050038, Kazakhstan.

³Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, No. 32, West 7th Road, Tianjin Airport Economic Area, Tianjin 300308, China.

⁴National Center of Technology Innovation for Synthetic Biology, Tianjin 300308, China.

Abstract

Drought stress is one of the major environmental constraints limiting rice (*Oryza sativa* L.) growth and productivity, particularly under increasingly frequent water-limited conditions. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) represent a sustainable approach for improving crop performance because they can modulate stress-related plant responses and influence rhizosphere microbial communities. In this study, rice-associated culturable bacteria were isolated from roots and rhizosphere soil, screened for plant growth-promoting potential, and evaluated under contrasting water regimes. A total of 1,425 colonies were screened, and 919 isolates were successfully identified. From 52 selected plant growth-promoting isolates, nine ACC-utilizing bacterial strains were chosen for pot experiments. Among these, *Lysinibacillus fusiformis* BG46 showed the strongest overall growth-promoting effect under drought stress.

Rice plants were grown under well-watered and drought-stressed conditions with or without bacterial inoculation, and plant growth traits were integrated with 16S rRNA amplicon-based rhizosphere microbiome analysis. Under drought stress, BG46 significantly increased shoot dry weight to 0.537 g, corresponding to an approximately 32% improvement compared with the drought-stressed control, and also improved shoot length. Root dry weight was not significantly altered, indicating that BG46 mainly enhanced aboveground biomass accumulation under water deficit. Rhizosphere bacterial community analysis showed that BG46 did not significantly change alpha diversity, but it clearly shifted beta diversity under both drought and well-watered conditions. LEfSe analysis indicated that BG46 inoculation consistently enriched biomarkers associated with *Geomonas*, *Thermodesulfobacteriota* / *Desulfuromonadia*, *Bacteroidales*, *Prolixibacteraceae* and *Clostridia*. Functional prediction further suggested that BG46 promoted sulfur respiration, sulfur compound respiration, iron respiration, nitrogen fixation, and related nutrient-cycling functions in the rhizosphere.

The results demonstrate that *L. fusiformis* BG46 can enhance rice growth under drought stress while reorganizing rhizosphere bacterial community structure and predicted functional potential. The combined improvement in plant biomass and

microbial functional profiles suggests that BG46 may support drought adaptation through both direct plant growth-promoting activity and indirect microbiome-mediated mechanisms. These findings highlight BG46 as a promising microbial bioinoculant for improving drought resilience and supporting climate-smart, sustainable rice production.

Keywords: Rice; Drought stress; *Lysinibacillus fusiformis*; PGPR; Rhizosphere microbiome.

Determination of Saponins in the Plant Raw Material of *Acanthophyllum pungens*

Altynbek Abseyt¹, Nazym Yelibayeva², Gulzat Abdikarim¹, Nurlan Akhmetov¹

¹Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Research Institute "Ecology",
Turkestan, Kazakhstan

²PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Chemistry and Chemical Technology,
Department of Chemistry and Technology of Organic Substances, Natural Compounds and Polymers,
Almaty, Kazakhstan

Abstract

This study investigates the quantitative content of saponins and other biologically active compounds in the plant raw material of *Acanthophyllum pungens*. The increasing interest in medicinal plants as natural sources of biologically active substances highlights the importance of phytochemical investigations of wild and endemic plant species. The present work aimed to determine the extractive substances, identify major groups of biologically active compounds, and develop an effective method for the isolation of saponins from the studied plant material.

Different solvents, including 80 % ethanol, 50 % ethanol, water, and ethyl acetate, were used to evaluate the extraction efficiency of biologically active compounds. Comparative analysis showed that the highest yield of extractive substances was obtained using a 50 % aqueous ethanol solution. Therefore, this solvent system was selected as the most effective extractant for the studied plant material. Quantitative phytochemical analysis revealed that saponins were the predominant compounds, while amino acids were also present in relatively high amounts. In addition, flavonoids, polysaccharides, organic acids, tannins, alkaloids, and coumarins were identified in the plant composition.

The presence of saponins was confirmed by foam formation and colorimetric reactions. Stable foam formation under acidic and alkaline conditions indicated a high content of triterpene saponins in the plant material. Furthermore, an effective technology for the extraction and purification of saponins was proposed. The process included extraction with aqueous ethanol, vacuum concentration, precipitation, purification, filtration, and vacuum drying. As a result, a brown, odorless, amorphous saponin product was obtained.

The obtained results demonstrate that *Acanthophyllum pungens* is a promising natural source of biologically active compounds and may serve as valuable raw material for pharmaceutical and biotechnological applications.

Keywords: *Acanthophyllum pungens*, saponins, biologically active compounds, extraction, phytochemical analysis.

Development of A Method for Obtaining Synthetic Zeolites and Nanocomposites from Industrial Waste for Water Purification from Pollutants

Суды ластаушы заттардан тазарту үшін өндірістік қалдықтардан синтетикалық цеолиттер мен нанокөмпозиттер алу әдісін әзірлеу

Madina Suleimenova¹, Zhandos Tauanov¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Almaty, Kazakhstan

Abstract

At present, pollution of water resources is one of the most acute environmental problems. Particularly hazardous are toxic and persistent pollutants contained in solid and liquid industrial wastes, which negatively affect aquatic ecosystems and human health. In this context, the development of effective and environmentally safe water purification technologies is of high scientific and practical importance.

Synthetic zeolites and nanocomposites exhibit high adsorption capacity toward organic and inorganic pollutants, which determines their widespread use in modern water treatment technologies. However, conventional methods for producing adsorbents are characterized by high energy and material consumption, increasing their cost. Therefore, the use of industrial and agro-industrial wastes as raw materials for the synthesis of zeolites and nanocomposites represents an environmentally and economically promising approach.

Given the increasing volumes of waste in industrial regions of Kazakhstan and the limited availability of water resources, this research is particularly relevant for the development of environmentally safe water treatment technologies.

The aim of the work is to develop a method for obtaining porous nanocomposites from agricultural waste and thermal power plant waste via hydrothermal synthesis and to apply them for the removal of mercury ions from water.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- production of silicon dioxide from at least two types of local agro-industrial waste and characterization of its properties;
- optimization of hydrothermal reaction conditions for converting agricultural waste and thermal power plant waste into nanoporous zeolites;
- to obtain nanocomposites, modify zeolites synthesized from industrial waste via ion exchange with silver ions followed by reduction and formation of silver nanoparticles, as well as carry out surface modification of zeolites derived from rice husk using silver nitrate for the removal of contaminants from water;
- experimental investigation of adsorption kinetics and equilibrium adsorption of the synthesized zeolites and nanocomposites for mercury ion removal.

Keywords: rice husk, coal fly ash, zeolite, nanocomposite

Аңдатпа

Қазіргі кезеңде судың ластануы – экологиялық қауіптердің ең өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Әсіресе өндірістік қызмет нәтижесінде пайда болатын қатты және сұйық қалдықтардың құрамындағы токсикалық және тұрақты ластаушы заттар (ауыр металдар, бояғыштар, фенолдар, нафталиндер және т.б.) су экожүйелерінің биологиялық әртүрлілігіне және адам денсаулығына теріс әсерін тигізеді. Осыған байланысты су көздерін тиімді және экологиялық қауіпсіз әдістермен тазарту мәселесі ғылыми және тәжірибелік маңызға ие болып отыр.

Синтетикалық цеолиттер мен нанокөмпозиттер суды ластаушы органикалық және бейорганикалық заттарды адсорбциялау қасиеттерінің жоғары болуымен сипатталады, сондықтан олар заманауи суды тазарту технологияларында кеңінен қолданылады. Дегенмен, синтетикалық адсорбенттерді дәстүрлі шикізаттардан алу процесі энергия мен материалдық ресурстарды көп жұмсайды, соның салдарынан өндіріс құны жоғары болады. Сондықтан өндірістік қалдықтарды шикізат ретінде пайдалану арқылы синтетикалық цеолиттер мен нанокөмпозиттер алу экологиялық тұрғыдан тиімді және экономикалық перспективасы зор бағыт болып табылады.

Өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу арқылы адсорбенттер алу технологияларын жетілдіру суды ластаушы заттарды тиімді тазалауға, сонымен қатар қалдықтарды басқарудағы экологиялық мәселелерді шешуге мүмкіндік береді. Қазақстанның индустриялық аймақтарындағы қалдықтардың көлемінің өсуі мен су ресурстарының шектеулілігі жағдайында, аталмыш зерттеу экологиялық қауіпсіз суды тазарту технологияларын дамытуға бағытталған ғылыми ізденістердің маңыздылығын айқындайды.

Жұмыстың мақсаты гидротермиялық синтез арқылы ауылшаруашылық және жылу электр орталығы қалдықтарын кеуекті нанокөмпозиттерге айналдыру әдісін әзірлеу және судан сынапты тазартуда қолдану.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

- Жергілікті агроөнеркәсіптік қалдықтардың кемінде екі үлгісінен синтетикалық кремний диоксидін алу және оның сипаттамаларын (микроқұрылымдық, морфологиялық, элементтік, термиялық талдау) анықтау;
- Агроқалдықтарды нано-кеуекті цеолиттерге айналдырудың гидротермиялық реакциясы жағдайларын оңтайландыру (реагенттердің арақатынасы; кристалдану және ұстау уақыты; күлділену температурасы және т. б.);
- Нанокөмпозиттерді алу үшін өндірістік қалдықтардан синтезделген цеолиттердің бетін күміс нитраты мен натрий додецилсульфаты арқылы модификациялап, судан ластаушы заттарды тазалау мақсатында қолдану.
- Судан сынап иондарын және катиондық бояғыштарды жою үшін синтезделген нанокөмпозиттер мен бастапқы цеолиттердің кинетикасы мен тепе-теңдік адсорбциясын эксперименттік зерттеу.

Кілт сөздер: күріш қауызы, көмір ұшпа күлі, цеолит, нанокөмпозит

Application of Humic-Enriched Fly Ash for Slow-Release Improvement of Soil Health

Nuraly S. Akimbekov, Kuanysh T. Tastambek

*Ecology Research Institute, Khoja Akhmet Yassawi, International Kazakh-Turkish University,
Turkestan, 161200, Kazakhstan*

*Sustainability of Ecology and Bioresources Scientific Research Institute, Al-Farabi Kazakh National
University, Al-Farabi ave. 71, Almaty, 050040, Kazakhstan*

Abstract

Rising global food demand and the overexploitation of cultivable land have increased agriculture's dependence on chemical fertilizers to enhance crop yields. Excessive use of agrochemicals, however, diminishes soil fertility and adversely affects beneficial soil microorganisms. Recently, fly ash (FA), a byproduct of coal processing, has attracted global interest for its potential to support agricultural productivity and promote environmental sustainability. Modification of FA with bioavailable or bioactive molecules, such as humic acid (HA), may further augment these benefits. HA is a multifunctional biopolymer known to improve soil properties. In this study, FA was modified with HA derived from low-rank coal, and its adsorption and desorption characteristics were evaluated across various pH levels and incubation periods. Application of the HA-FA composite (10 t ha⁻¹) to test soils resulted in improved physicochemical and biological properties after 60 days. The HA-FA amendment also enhanced the activity of soil microbial communities and the enzymes polyphenol oxidase and dehydrogenase. These findings demonstrate that the HA-FA composite significantly improves soil health and is consistent with sustainable soil management practices.

Keywords: Fly ash; humic acid; low-rank coal; soil amendment; soil health.

Rapid expansion and physiological impacts of the invasive macroalga *Batophora occidentalis* in a Mediterranean coastal lagoon

Antoni Sureda¹, Jessica Lombardo¹, Maria Magdalena Quetglas-Llabrés¹, Amanda Cohen-Sánchez¹, Silvia Tejada², Samuel Pinya³, Montserrat Compa³

¹Research Group on Community Nutrition & Oxidative Stress, University of Balearic Islands, 07122 Palma de Mallorca, Spain.

²Laboratory of Neurophysiology, University of the Balearic Islands, 07122 Palma de Mallorca, Spain

³Interdisciplinary Ecology Group, University of the Balearic Islands, 07122 Palma de Mallorca, Spain

Abstract

Global warming and rising sea surface temperatures are facilitating the establishment and spread of non-native marine macroalgae in the Mediterranean Sea, a recognized hotspot for biological invasions. Here, we assess the distribution dynamics, environmental drivers, and ecological impacts of the invasive Caribbean green macroalga *Batophora occidentalis* in the shallow coastal lagoon S'Estany des Peix (Formentera, Balearic Islands). A spatial-temporal survey (2020–2025) combining perimeter transects, coverage estimates, and continuous temperature monitoring was conducted. Physiological impacts were evaluated in native primary producers and benthic fauna, including the marine plants such as *Zostera noltii*, macroalgae such as *Caulerpa prolifera* and *Acetabularia acetabulum*, the sponge *Sarcotragus spinosulus*, and the sea cucumber *Holothuria tubulosa*. Biomarkers of oxidative stress (CAT, SOD, GPx, GR, GST, MDA, and redox status indicators) were quantified and compared between impacted and non-impacted zones. Results show a rapid expansion of *B. occidentalis* from an initial 18% occupancy in 2020 to full perimeter colonization by 2025, with highest coverage (>60%) on rocky substrates. The lagoon exhibited strong thermal variability, with summer maxima exceeding 33°C and winter minima near 10.7°C, conditions under which the invasive species maintained stability. Native organisms exhibited significant physiological stress responses, including increased antioxidant and detoxification enzyme activities. However, lipid peroxidation responses were species-specific, with some taxa showing resilience. Notably, *C. prolifera* showed no increase in MDA, and *H. tubulosa* displayed altered redox balance without overt oxidative damage. Overall, *B. occidentalis* is driving measurable ecological and biochemical stress in benthic communities, highlighting its role as a strong ecosystem modifier and the need for urgent monitoring and management in vulnerable Mediterranean lagoons.

Keywords: Mediterranean Sea; Biological invasions; Coastal lagoon; Oxidative stress; Benthic communities

Green Extraction and Pharmaceutical Applications of Plant-Derived Bioactive Compounds: Advancing Sustainable Food Safety and Human Health

Ebrahim Alinia-Ahandani¹, Sahebe Hajipour², Zahra Alizadeh-Tarpoei³

¹Food and Drug Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Education, Tehran, Iran

²Department of Plant Biology, Faculty of Basic Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

³Department of Biology, Faculty of Basic Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

Background: Oxidative stress is a key pathogenic mechanism underlying chronic non-communicable diseases, including cardiovascular disorders, neurodegenerative conditions, diabetes, and cancer. Synthetic antioxidants (e.g., BHA, BHT) used in food and pharmaceutical industries raise concerns regarding hepatotoxicity, endocrine disruption, and environmental persistence. In contrast, plant-derived bioactive phytochemicals – such as polyphenols (curcumin, resveratrol, epigallocatechin gallate), flavonoids (quercetin, rutin), carotenoids (lycopene, β -carotene), and essential oils (thymol, carvacrol) – offer potent antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and preservative properties with favorable safety profiles.

Objective: This study provides a comprehensive review of emerging pharmaceutical and nutraceutical applications of natural antioxidants, with emphasis on green extraction technologies, mechanisms of action, bioavailability enhancement, and integration into sustainable food safety systems.

Methods: A systematic literature search (Scopus, Web of Science, PubMed; 2018–2026) was conducted to identify studies on green extraction methods (supercritical fluid extraction, microwave-assisted, ultrasound-assisted, pressurized liquid extraction, deep eutectic solvents). Comparative data on antioxidant activity (DPPH, ABTS, FRAP, ORAC assays), antimicrobial efficacy (MIC against foodborne pathogens: *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *E. coli* O157:H7), and pharmacokinetic parameters (bioavailability, half-life, metabolic stability) were extracted. Case studies of nanoformulations and active packaging incorporating natural antioxidants were analyzed.

Results: Green extraction technologies significantly improved yield (by 30–50% compared to conventional Soxhlet), reduced solvent consumption (up to 90%), and preserved bioactivity of thermolabile compounds. Polyphenol-rich extracts from green tea (*Camellia sinensis*), grape seed (*Vitis vinifera*), and rosemary (*Rosmarinus officinalis*) showed IC_{50} values $<10 \mu\text{g/mL}$ in DPPH assays and strong synergism with food matrices. Nanoencapsulation (liposomal, chitosan-based nanoparticles) enhanced oral bioavailability of curcumin from 1% to $>20\%$. Active packaging films containing 2–5% essential oils reduced lipid peroxidation (TBARS) by 40–60% in meat and dairy products and extended shelf-life by 7–10 days. Clinical studies indicated that daily supplementation of 500 mg standardized green tea extract reduced LDL oxidation by 25% in hyperlipidemic patients.

Conclusion: Plant-derived bioactive compounds, when obtained via eco-friendly green extraction and formulated with modern delivery systems, represent effective, safe, and sustainable alternatives to synthetic antioxidants. Their integration into pharmaceutical formulations, nutraceuticals, and active food packaging supports public health, chronic disease prevention, and global food security while minimizing ecological footprint.

Keywords: Natural antioxidants; plant-derived bioactive compounds; green extraction technologies; pharmaceutical applications; sustainable food safety; nutraceuticals; oxidative stress; bioavailability enhancement

Climate Change-Induced Heatwaves Trigger Malignant Ventricular Arrhythmias via Autonomic Dysfunction and Cardiac Electrical Remodeling: A Path to Green Energy Mitigation

Amir Aris¹, Ebrahim Alinia-Ahandani²

¹Cardiovascular Diseases Research Center, Department of Cardiology, Heshmat Hospital,

School of Medicine, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran

²Food and Drug Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran

Background: Rising global temperatures due to fossil fuel dependence have increased the frequency, intensity, and duration of heatwaves. Epidemiological studies report a significant rise in sudden cardiac death during extreme heat events, but the underlying electrophysiological mechanisms remain poorly understood. Green energy transition can reduce greenhouse gas emissions and thus heatwaves, yet direct evidence linking heat exposure to life-threatening arrhythmias is needed.

Objective: To investigate the effects of simulated heatwave conditions on ventricular electrophysiology, autonomic tone, and susceptibility to malignant arrhythmias in a translational animal model, and to evaluate the potential benefits of cooling interventions mimicking urban greening.

Methods: Thirty male New Zealand White rabbits were implanted with telemetric ECG recorders and randomized into three groups (n=10 each):

1. Control (24±1°C, 40% humidity)
2. Heatwave (38±1°C for 6 hours/day for 5 consecutive days, then 28°C overnight, 60% humidity)
3. Heatwave + active cooling (intermittent misting and shaded environment during heat exposure)

Measurements included:

Heart rate variability (HRV) indices (LF/HF ratio, RMSSD).

ECG parameters: QT interval, corrected QT (QTc), Tpeak-Tend interval (marker of transmural dispersion).

Programmed electrical stimulation (PES) to induce ventricular tachycardia/fibrillation (VT/VF).

Myocardial expression of connexin-43 (Cx43, gap junction protein) and nerve growth factor (NGF, sympathetic innervation).

Results: The heatwave group showed:

Autonomic imbalance: LF/HF ratio increased by 210% (p<0.001), RMSSD decreased by 45% (p<0.01) → sympathetic overdrive.

Electrical remodeling: QTc prolonged from 280 ± 12 ms to 340 ± 15 ms ($p < 0.001$); Tpeak-Tend increased from 42 ± 5 ms to 68 ± 7 ms ($p < 0.001$), indicating increased transmural dispersion.

Arrhythmia inducibility: PES induced sustained VT/VF in 7/10 heatwave rabbits vs. 1/10 controls ($p = 0.002$).

Molecular changes: Cx43 expression reduced by 55% ($p < 0.001$) with lateralization from intercalated discs; NGF increased 3-fold ($p < 0.01$).

The heatwave+cooling group had significantly less electrical remodeling and arrhythmia inducibility (2/10 VT/VF, $p < 0.05$ vs. heatwave alone). Cooling partially restored Cx43 localization.

Conclusion: Acute heatwave exposure induces sympathetic overactivity, gap junction remodeling, and prolongation of ventricular repolarization, creating a proarrhythmic substrate. These findings provide a mechanistic basis for the observed increase in sudden cardiac death during heatwaves. Active cooling strategies (e.g., urban greening, green roofs, reflective materials) mitigate these effects. Transitioning to green energy reduces fossil fuel emissions, thereby attenuating the frequency and severity of heatwaves—a novel cardiovascular benefit of climate action. This study bridges environmental science, cardiology, and sustainable urban planning.

Keywords: Heatwaves, climate change, ventricular arrhythmias, autonomic dysfunction, connexin-43, green energy mitigation

Environmental Heavy Metals (Lead and Cadmium) from Fossil Fuel Combustion Drive Epigenetic Remodeling and Subclinical Cardiac Fibrosis: A Multimodal Imaging and DNA Methylation Study

Ebrahim Alinia-Ahandani¹, Amir Aris²

¹Food and Drug Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran

²Cardiovascular Diseases Research Center, Department of Cardiology, Heshmat Hospital, School of Medicine, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran

Background: Fossil fuel combustion releases toxic heavy metals such as lead (Pb) and cadmium (Cd), which persist in the environment and accumulate in human tissues. While their association with hypertension is known, the molecular mechanisms linking low-level chronic exposure to subclinical myocardial fibrosis—a precursor of heart failure—remain unclear. Green energy transition promises to reduce these metals, but direct evidence of their cardiotoxic epigenomic effects is lacking.

Objective: To investigate whether chronic low-dose co-exposure to Pb and Cd induces cardiac fibroblast activation and diffuse myocardial fibrosis through DNA methylation changes in the promoters of antifibrotic genes (e.g., PPAR γ , MMP9), and to detect these changes using advanced cardiovascular magnetic resonance (CMR) imaging.

Methods: Forty-eight male C57BL/6J mice were randomly assigned to four groups (n=12 each):

Control (vehicle)

Pb acetate (10 μ g/L in drinking water)

Cd chloride (5 μ g/L in drinking water)

Pb + Cd combined (same doses)

Exposure lasted 16 weeks, simulating human environmental levels. Primary outcomes:

1. Epigenetic analysis: Methylation-specific PCR and bisulfite sequencing for PPAR γ and MMP9 promoter regions in cardiac fibroblasts.
2. Imaging: Cardiac magnetic resonance with extracellular volume (ECV) mapping and late gadolinium enhancement (LGE) to quantify diffuse and focal fibrosis.
3. Molecular: Hydroxyproline assay for total collagen, qPCR for COL1A1, TGF- β 1, and immunohistochemistry for α -SMA (fibroblast activation).
4. Functional: Echocardiography for diastolic function (E/A ratio, E/e').

Results: The Pb+Cd group showed significant hypermethylation of PPAR γ promoter (68% vs. 22% in control, $p < 0.001$) and hypomethylation of MMP9 promoter ($p < 0.01$), leading to reduced PPAR γ and increased MMP9 expression. These changes correlated with a 3.2-fold increase in cardiac fibroblast activation (α -SMA positivity, $p < 0.001$) and

a 2.8-fold rise in collagen content ($p < 0.01$). CMR revealed diffuse myocardial fibrosis with elevated ECV ($31 \pm 2\%$ vs. $24 \pm 1\%$ in control, $p < 0.001$) without focal LGE. Diastolic dysfunction (E/A reversal, $E/e' > 15$) was present in 75% of Pb+Cd mice. Notably, Pb alone caused primarily epigenetic changes, while Cd contributed more to oxidative stress, and their combination had synergistic effects.

Conclusion: Chronic low-dose exposure to Pb and Cd – emitted largely from fossil fuel combustion – induces an epigenetically driven myocardial fibrosis phenotype characterized by fibroblast activation and diffuse extracellular matrix expansion, detectable by CMR ECV mapping. These findings provide a mechanistic link between environmental pollution and heart failure with preserved ejection fraction (HFpEF). Transitioning to green energy sources (wind, solar, hydro) would drastically reduce Pb and Cd emissions, potentially preventing this subclinical cardiac remodeling. This study supports the integration of environmental cardiology and green energy policy under the One Health framework.

Keywords: Heavy metals, epigenetic remodeling, cardiac fibrosis, extracellular volume mapping, green energy transition, fossil fuel pollution

Engineered Microbial Consortia for Bioleaching of Critical Metals from Spent LIBs: A Green Circular Economy Approach

Ebrahim Alinia-Ahandani¹, Arian Mirzapour-Pahmedani²

¹Food and Drug Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran

²Chemical Engineering Department, Faculty Of Engineering, University Of Isfahan

Background: Spent lithium-ion batteries (LIBs) are a rapidly growing environmental liability, yet they contain high-value metals (Li, Co, Ni, Mn). Conventional recycling methods are energy-intensive and polluting. Bioleaching using acidophilic bacteria offers a sustainable alternative, but wild-type strains lack efficiency and tolerance.

Objective: To develop an engineered microbial consortium with enhanced metal solubilization kinetics, higher pulp density tolerance, and reduced acid consumption for green recycling of spent LIBs.

Methods: A synthetic consortium was constructed from three genetically modified strains: *Acidithiobacillus ferrooxidans* (overexpressing rusticyanin and porins for improved electron transfer), *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* (engineered for siderophore and biosurfactant secretion), and *Leptospirillum ferriphilum* (equipped with a heavy metal resistance operon). Bioleaching was performed in a continuous stirred-tank bioreactor cascade with cell retention and online pH/ORP control at 10–20% pulp density, pH 1.5–2.0, 35–40°C, and 0.5 vvm aeration.

Results: The consortium achieved >95% recovery of Co, Li, Mn, and Ni within 72–96 hours, with 40% lower acid consumption and zero organic solvents compared to chemical leaching. Life cycle assessment showed a 60% reduction in carbon footprint. The system tolerated pulp densities up to 20% without performance loss.

Conclusion: This hybrid biological–chemical engineering platform provides an industrially scalable, selective, and non-toxic pathway for critical metal regeneration from spent LIBs, directly supporting circular economy and green energy goals (UN SDGs 9, 12, 13).

Keywords: Bioleaching, spent lithium-ion batteries, engineered microbial consortia, synthetic biology, green circular economy

Honey Bees as Bio-indicators in the One Health Continuum: Bridging Environmental Monitoring, Pharmaceutical Toxicology, and Public Health

Ebrahim Alinia-Ahandani¹, Sahebe Hajipour², Amir Aris³, Zeliha Selamoglu⁴

¹*Food and Drug Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Education, Tehran, Iran*

²*Department of Plant Biology, faculty of Basic Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran*

³*Department of Medicines, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran*

⁴*Department of Biology, Faculty of Sciences, Khoja Ahmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

Background: Environmental pollution from anthropogenic activities introduces complex mixtures of heavy metals, pesticides, pharmaceutical residues, and industrial chemicals into ecosystems. These contaminants not only degrade environmental quality but also pose direct and indirect risks to human and animal health. Within the One Health framework, the health of humans, animals, and ecosystems is inextricably linked. Biological indicators, particularly honey bees (*Apis mellifera*), offer a unique, cost-effective, and integrative approach for real-time environmental surveillance due to their extensive foraging range, high mobility, and ability to accumulate xenobiotics in their bodies and hive products.

Objective: This study aims to critically evaluate the role of honey bees as sentinel organisms for monitoring environmental contamination and to explore how such bio-indicator data can inform pharmaceutical safety, antimicrobial resistance (AMR) surveillance, and public health policy within a One Health context.

Methods: A systematic synthesis of peer-reviewed literature (2015–2025) was conducted, focusing on studies that quantified pollutant loads (heavy metals, organophosphates, neonicotinoids, fluoroquinolones, and other pharmaceutical residues) in honey bee matrices (whole bees, pollen, honey, and wax). Correlations between pollutant levels and ecological parameters (proximity to agricultural or industrial zones, wastewater discharge) as well as public health data (local AMR trends, incidence of pesticide-related illnesses) were analyzed using comparative risk mapping and meta-analytical approaches.

Results: Honey bees consistently reflected local and regional pollution gradients. Elevated concentrations of neonicotinoids ($>5 \mu\text{g/kg}$ in pollen) and lead ($>0.5 \text{ mg/kg}$ in bees) were strongly associated with intensive agricultural and industrial areas. Notably, detection of fluoroquinolone and tetracycline residues in honey correlated with higher prevalence of resistant *E. coli* isolates in nearby water sources. Furthermore, regions with high pesticide residues in bee products showed increased reports of acute poisoning incidents in humans and livestock, establishing a direct ecological-to-clinical link.

Conclusion: Integrating honey bee-based biomonitoring into national One Health surveillance networks provides an early warning system for emerging environmental

toxicological risks. This approach enables proactive regulatory interventions, supports sustainable pharmaceutical development, and strengthens preventive healthcare strategies. Policy recommendations include routine bee-hive sampling as a mandatory component of environmental impact assessments and AMR action plans.

Keywords: One Health; honey bees; biological indicators; environmental toxicology; pharmaceutical residues; antimicrobial resistance; sustainable ecosystems; public health surveillance