

MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİNDE GÜNCEL KONULAR 1

Aralık 2024

EDİTÖRLER

PROF.DR. HAKAN SEPET

DOÇ.DR. MURAT ÇANLI

SERÜVEN
YAYINEVI

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2024

ISBN • 978-625-5955-00-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

İÇİNDEKİLER

PHASEOLUS VULGARİS'İN TOHUMLARI VE MERİSTEMATİK HÜCRELERİNDE MANGANIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hakan SEPET, Murat ÇANLI..... 7

DRAMATİK ŞEKİLDE KİRLENEN, ISINAN, DEĞİŞEN ÇEVRENİN “BÖCEKLER ÖZELİNDE” TÜRKİYE'YE ETKİSİ

Tayfun KAYA..... 19

GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE OKSİYANMA VE KARBON EMİSYONU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Halit ARAT, Oğuzhan ERBAŞ..... 32

PYTHON PROGRAMLAMA DİLİNİN KİMYA BİLİMİNDEKİ UYGULAMALARI

Mehmet Sadrettin ZEYBEK..... 47

**CİCER ARIETİNUM' UN TOHUMLARI VE
MERİSTEMATİK HÜCRELERİNDE MANGANIN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Murat ÇANLI, Hakan SEPET..... 60

**UZUN MENZİLLİ SINIRLAR ÖTESİ HAVA KİRLİLİĞİ
DİSPERSİYON MODELLERİ VE TÜRKİYE**

Halit ARAT, Oğuzhan ERBAŞ..... 73

PHASEOLUS VULGARIS'İN TOHURLARI VE MERİSTEMATİK HÜCRELERİNDE MANGANIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hakan SEPET¹, Murat ÇANLI²

GİRİŞ

Büyüyen insan nüfusu sonucu ortaya çıkan endüstriyel gelişmeler beraberinde metal kirliliğinin artan ölçülerden toprakta ve bitkilerde oluşmasına neden olmuştur (Albayrak, 2024a-c; Albayrak, 2023a-b; Yalçın ve Altay, 2023). Metal iyon-DNA etkileşimleri, bitkilerin dış etkilere karşı davranışları açısından sitogenetik çalışmalarının doğasını anlamak için hayati öneme sahiptir (Garlich ve ark., 2016; Oliveira ve ark., 2008; Özdemir ve ark., 2015; Saxena ve ark., 2009). Metallere dayalı sanayilerin neden olduğu büyük miktardaki çevre kirliliği nedeniyle metallerin, özellikle de ağır metallerin sitogenetik etkileri halen araştırma çalışmalarının odağında yer almaktadır (Aksoy ve Deveci 2012; Özdemir ve ark., 2015; Pesnya, 2013; Sepet ve ark., 2014). Bitki sitogenetiği hala doğal ve insan faktörlerinin neden olduğu kromozomal değişiklikler yaşamaktaydı (Andronic, 2015; Gupta, 2006). Bitkiler metalleri topraktan alır ve yapraktan kök uçlarına kadar bitkinin her yerinde birikirler (Baranowska-Morek ve Wierzbicka, 2004; Maestri ve ark., 2010; Sepet ve ark., 2014).

DNA, metal iyonlarını bağlamak için fosfat oksijen atomları, riboz hidroksiller, baz halkası nitrojenleri ve siklik baz keto grupları gibi dört potansiyel bölgeye sahiptir (Oliveira ve ark., 2008). Bhardwaj ve ark. (2022), geçiş metalleri sıklıkla dolaylı olarak fosfat gruplarına ve doğrudan yukarıda bahsedilen DNA'daki bazlara olmak üzere ikiden fazla farklı bölgeyi kullanır. Metal iyonları ile DNA arasındaki bağlantı, metal iyonlarını çevreleyen koordine edici su moleküllerinin hidrojen bağlanması yo-

1 Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5841-9969, hakan.sepet@ahievran.edu.tr

2 Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mucur Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5275-861X, murat.canli@ahievran.edu.tr

luyla kurulur. Bazlara metal bağlanması genellikle baz çiftindeki hidrojen bağının kopmasına neden olur ve DNA yapısının çift sarmalını zayıflatır ve şeker konformasyonunu dolaylı olarak etkiler (Bhardwaj ve ark., 2022).

Metaller, konsantrasyonları belirli bir noktaya ulaşana kadar büyüme üzerinde olumlu etkiye sahiptir (Bhat ve ark., 2012; Çanlı, 2018; Tangahu vd., 2011) ve ayrıca bitki içindeki kromozomların yapısını da değiştirmektedir (Çanlı, 2018; Liehr ve ark., 2009; Özdemir ve diğerleri, 2015). Çeşitli kaynaklarda kromozomlardaki altı tür değişiklik; köprüler, C-mitoz, fragmanlar, gecikmeler, çok kutupluluk ve yapışkanlık olarak adlandırılmıştır (Kuchy ve diğerleri, 2016; Özkul ve diğerleri, 2016). Ayrıca, Zahan ve Begum (2023) anormallikleri kromozom ayrımı, sitokinez yokluğu, sitomiksis, hücre füzyonu, düzensiz hücre şekli, kromozom köprüleri ve genomik ayrılma olarak tanımladılar. Ayrıca kromozomlardaki değişikliklere ilişkin olarak köprü kromozomu, kromozomal yapışma, kromozom kırılması, kromozom dağılımları, kromozom küçülmesi, balık kılıçığı, halka kromozomu gibi şekillerine göre yapılan bir sınıflandırma daha bulunmaktadır (Tablo 1, Şekil 1). Abdelsalam ve ark. (2018) bu anormallikleri metafazda yanlış yönelim, kromozomal kırılma, metafazik plaka distorsiyonu, iğ disfonksiyonu, yapışkanlık, metafazda anormal hareket, parçalanma, saçılma, eşit olmayan ayrılma, saçılma, kromozomal boşluklar, çok kutuplu anafaz, erozyon ve dağıtılmış ve gecikmeli kromozomlar olarak sınıflandırmıştır.

Metallerin sitogenetik etkisi son araştırma çalışmalarının odağında kalmaya devam edecek gibi görünmektedir (Çanlı, 2018; Janas ve diğerleri, 2010; Kıran ve Şahin, 2005; Özdemir ve diğerleri, 2015; Sepet ve diğerleri, 2014).

Mangan (Mn) yeraltı ve yerüstü sularında bazı aylarda yüksek seviyelerde bulunması nedeniyle suyun kalitesini bozmaktadır (Tezcan ve Tezcan, 2007). Mn ın sularında 0,05mg/L den yüksek olması istenmez. Mn hakkındaki bazı araştırmalarda tohum büyümesi gelişmesi ve çoğalması üzerine olumlu etkileri görülmüştür (Hajmoradi ve Taleb Beydokhti, 2019; Mittal ve ark., 2018). Bir diğer çalışmada buğday üzerinde Mn emiliminin büyümeye katkısına pozitif yönde katkı yaptığı görülmüştür (Abbas ve ark., 2011). Mn eksikliğinin eksiklik indeksine göre 0 ile 1 arası değerlendirmede 0,66 değerine kadar tolerans gösterdiği ortaya konmuştur (Barman ve ark., 2017). Bitkilerin hücre duvarında kalınlaştırma ve dayanıklılığı arttırmaya Mn kullanımının etkisi olduğunu Humpries ve ark. (2016) bulmuşlardır. Seregin ve Kozhevnikova (2005) ve Kudo ve ark. (2015) metallerin mısır tohumlarının çimlenmesini şu sırayla engellediğini bulmuşlardır: $Mg > Cd > Ni \approx Pb > Mn$. Fernando ve Lynch (2015) fitotoksik etki açısından Mn'ı incelemişlerdir. Bitkilerde metal kirliliğinin mekanizması hakkında daha önce yapılan araştırmalar Mn'nin bitkilere

kolayca geçebildiğini göstermiştir (Çelik ve ark., 2004; Lemtiri ve diğerleri, 2016; Manzatu ve diğerleri, 2015).

Baklagiller, büyüme sürecinde ve vücudun her yerinde metal toksisitesi gösterebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Talukdar, 2013). Talukdar (2013), bitkideki arsenik (As) birikimini anlamak için mercimeği kullanmıştır ancak çalışması yalnızca bitkinin katı sodyum arsenatla maruz bırakılmasına odaklanmıştır. Sonunda, Mercimek'in sekiz genotipinde farklı porsiyonlarda birikimin gerçekleştiğini buldu. Janas ve ark. (2010) mercimek vakuollerinde ve kök hücre duvarlarında bakır iyonlarının birikiminin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Çanlı (2018), *Lens culinaris*'te baryum (Ba) ve vanadyum (V) iyonlarının neden olduğu sapmanın belirlenmesine odaklanmıştır. *Lens culinaris* ile ilgili çeşitli çalışmalar olmasına rağmen (Sepet ve ark, 2014; Talukdar, 2013), Mn'nin *Phaseolus Vulgaris*'teki kromozomal değişim üzerindeki etkisini anlamaya yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca hiçbir bitkinin tohumunda ppm'in üzerindeki metal konsantrasyonları da tespit edilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada, *Phaseolus Vulgaris*'e farklı zaman dilimlerinde Mn maruziyeti sonucunda bitkinin kök ucu hücrelerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Mn'in hücre bölünmesi ve kromozomal anormallikler üzerindeki etkisini ve Mn'in DNA ile kimyasal olarak nasıl reaksiyona girdiğini anlamak bu çalışmanın ana hedefleriydi.

HESAPLAMA YÖNTEMİ

Araştırmada Mn'nin etkilerini görebilmek için 14 (2n) kromozomlu mercimek tohumları tercih edildi. Fasulye fidelerinin kök uçlarına yerleştirilen meristematik hücreler, bitki sitogenetiğinde (Singh, 2003) anlatıldığı gibi mikroskobik kromozom incelemesi için hazırlanır.



Şekil 1. Mangana maruz bırakılan fasulyelerin çimlenme süreci

Tohumlar sağlam, dolgun ve eşit büyüklükte olmalarına göre seçilmiştir. Tohum kontaminasyonunu önlemek amacıyla %10'luk sodyum hipoklorit içerisinde 10 dakika bekletilmiştir (Sepet ve ark., 2014). Aşırı hipokloritin uzaklaştırılması için tohumlara birkaç kez (5 kez) distile su uygulanmış ve daha sonra tohumlar 25°C'de filtre kağıtları üzerinde kurutulmuştur. Zaman parametresi için 1.0 mol L⁻¹(M) Mn standart çözeltisi oda sıcaklığında bir beher içindeki tohumlara maruz bırakıldı. Tohumlar 1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, ve 24 saatlik süreyle kontrol amaçlı Mn standartlarında tutuldu. Daha sonra tohumların üzerinde kalan metal solüsyonu uzaklaştırmak için distile su kullanıldı ve 20–25 °C'de petri kaplarında çimlendirildi. Fiksasyon için kök uçları 1,5-2 cm ucundan kesilerek fiksatif etil alkol-glasiyel asetik asit solüsyonunda (3:1 oranında) bırakılır. Stok kök uçları Feulgen yöntemiyle (Bozdağ ve ark., 2023) boyanarak daha detaylı incelemeye hazır hale getirildi. Hücre anomalilerinin mikroskopik tespitinde homolog alanlar tercih edildi. Mitotik hücre sayısı belirlendi. Hücrelerde kromozomal anormalliklerin varlığı ve sıklığı tespit edildi. Preparatların fotoğraflanması için motorlu taramalı Leica DM 3000 mikroskop kullanıldı.

Her uygulama için toplam 400 hücre sayıldıktan sonra, aşağıdaki denklemlerle mitotik indeks (MI) elde edildi (Prates ve diğerleri, 2000):

$$MI = (m/T) \times 100$$

Burada: m = mitoz bölünen hücre sayısı; and T = toplam hücre sayısı.

BULGULAR

Bitkilerde hücre sel anormallikler kendiliğinden veya bir metale fiziksel maruz kalmanın bir sonucu olarak ortaya çıkabilir (Hemachandra ve Pathiratne, 2015). DNA kırılmaları, DNA sentezinin inhibisyonu ve yapıdaki veya DNA kromozomlarının toplam sayısındaki değişen DNA replikasyonu gibi anormalliklerle karakterize edilirler (Morais-Leme ve Marin-Morales, 2009; Restrepo ve ark., 2012; Russel, 2002).

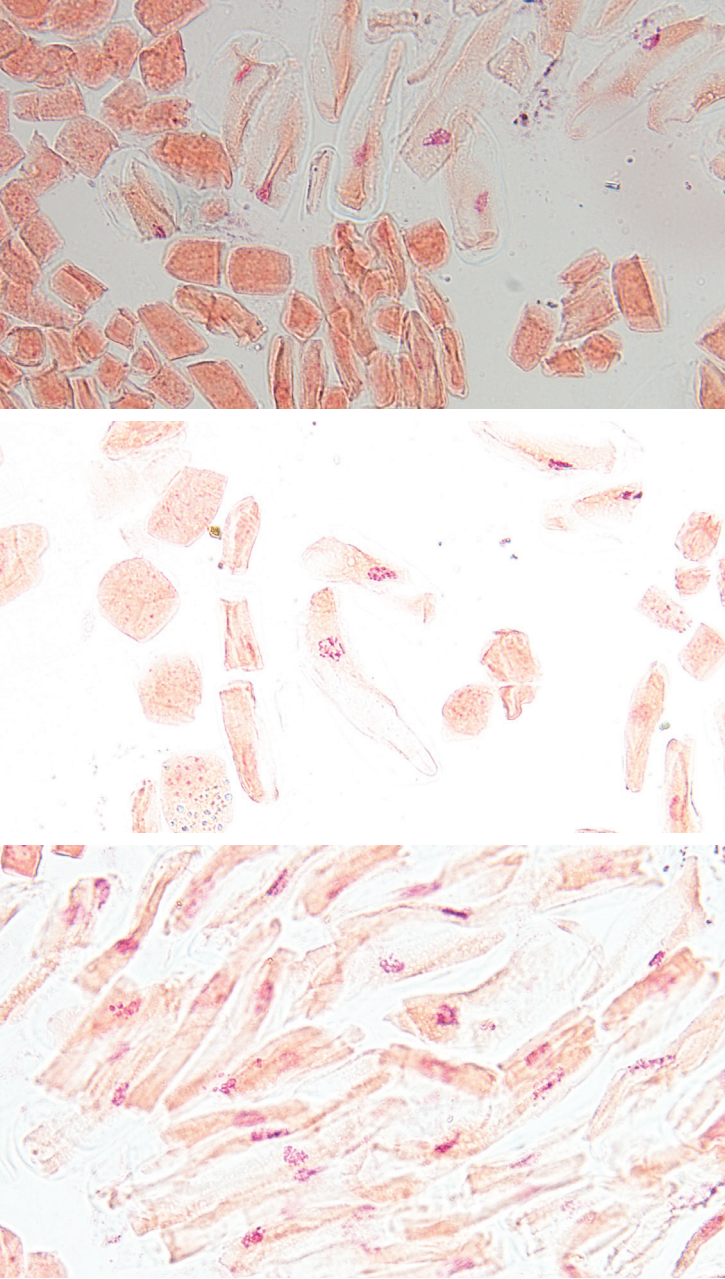
Tablo 1. *Phaseolus Vulgaris* 'in Farklı Zaman Periyodundaki Kök Ucu Hücrelerinin Mitotik İndeksi ve Mn maruziyetinden sonra etkilenen ve etkilenmeyen hücrelerin yüzdeleri

Süre (Saat)	Mitotik İndeks \pm *S.D.	Çimlenmiş tohumlar (%)
1/2	8	80
1	7	70
2	7	70
4	4	40
6	3	30
8	3	30
12	Oluşmadı	
16	Oluşmadı	
24	Oluşmadı	
Kontrol Grup	20\pm3.35	

*S.D. = Standart Sapma

Zaman değişkenine göre değerlendirme

Tablo 1, bitki hücrelerindeki mitoz derecesini gösteren mitotik indeksi (MI) temsil etmektedir. ½ ve 1 saatlik maruz kalma için MI bir düşüş gösterirken 2-8 saat arası uygulamalar benzer sonuçlar vermiştir (sırasıyla 11 ve 10). 12 saatten sonra herhangi bir çimlenme gözlenmemiştir. Fidelelerde mitotik hücre bölünmesinin artmasında farklı zaman periyotlarında Mn standart solüsyon uygulaması ortaya çıkmıştır. ½-8 saat arasında mitotik hücre bölünmesinin derecesi azaldı. 8 saatlik maruz kalma sonrasında herhangi bir fide gözlenmedi. Kontrol grubu, her uygulama döneminde fidelelerde daha fazla mitotik hücre bölünmesi gösterdi.



Şekil 2. Fasulye filizlerinin kök uçlarında görülen bazı anomali şekilleri

Hücre bölünmesinin yanı sıra Mn uygulamasından sonra hücrelerde çeşitli anormallikler de tespit edildi (Şekil 2). 1/2 saatte kromozom dağılımı, köprü kromozomu ve balık kılıçığı gözlemlendi. 1 saatlik temas süresi

boyunca balık kılçığı, köprü kromozomu ve kromozom dispersiyonu kaydedilirken, 2 saatlik uygulamada at kromozom dispersiyonu ve at köprü kromozom anormalliği tespit edildi. 4 saatlik uygulama sonucunda balık kılçığı ve halka kromozomunda anormallik ortaya çıktı. 8 saatlik uygulama sonunda balık kılçığı, kromozom dağılımı, kromozom kırılması ve halka kromozomu oluştu. En sık görülen anormallik olarak kromozom dispersiyonu tespit edildi. Tüm uygulama süreleri boyunca kromozom yapışması, kromozom dağılımı ve köprü kromozomu gözlemlendi. Kromozom dağılımlarının sayısı 4 saatlik uygulamada en yüksekti. 2 saat hariç tüm uygulama periyotlarında kromozom kırılması tespit edildi. Balık kılçığı ve kromozom yapışması 1 saatlik uygulamada en yüksek düzeyde belirlendi. 2. ve 4. saatlerde en yüksek sayıda kromozom yapışması gözlemlendi. Köprü kromozomu 1, 2 ve 4 saatlik uygulamada yüksek düzeyde belirlendi. Uygulamanın 4. saatinde kromozom kırılmasının yüksek düzeyde olduğu ve 4. saate kadar anormalliğin azaldığı görüldü. Halka kromozomu 2 ve 8 saatlik uygulamada gözlemlendi. Tüm uygulama sürelerinde kromozom küçülmesi görüldü. Maruz kalma süresinin arttırılmasıyla çimlenme oranı düştü (%80'den %50'ye).

DNA'daki baz ve şeker bağlanarak nükleozid molekülünü oluşturur. Baz ile şeker arasında glikozit bağı kurulur. Fosfodiester veya monosakaritlerin arasındaki bağların kopmasıyla sakkaritler veya monofosfata bağlı esterler arasındaki bağların oluştuğu, DNA'da kromozomal değişiklikler ve anormalliklerin olduğu gözlenir. Bazlar arasındaki hidrojen bağları DNA yapısını bir arada tutar. O-bağlı monoglikozidlerin metal kompleksleri CAD üzerine neredeyse tamamen şeker kalıntılarını (glikoz veya ramnoz) kaybederken, C-bağlı monoglikozidlerin metal kompleksleri dehidrasyonla birlikte yoğun çapraz halka bölünmelerine maruz kalma eğilimindedir (Zhang ve ark., 2004).

SONUÇ

Metal iyonlarının DNA üzerindeki etkileri, bazlar ve şekerler arasında yeni kimyasal bağların oluşumuna yol açmakta, bu da bitki DNA'sında çeşitli anomalilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Oliveira ve arkadaşlarının (2008) gerçekleştirdiği bir çalışmada, kurşun (Pb) iyonlarının özellikle adenin içeren DNA bölgeleriyle etkileşime girdiği ve bunun oksidatif strese sebep olduğu ortaya konmuştur. Nükleik asitlerin konformasyonu açısından şeker yapısının önemi büyüktür; metal iyonunun DNA'daki hareketi bu durumu etkilemektedir (Bhardwaj ve ark., 2022). Metal iyonları, bazlarla etkileşerek hidrojen bağlarını zayıflatabilirken çift sarmal dengeseleştirip aşırı negatif yüklü fosfat gruplarını nötralize edebilir. Bu durum, sarmalın stabilites artırıcı bir etki sağlayabilir. Tüm bu faktörler bitkilerin DNA'sında farklı anomalilerin meydana gelmesine katkıda bulunmaktadır. Mangan iyonlarının DNA üzerindeki kimya-

sal etkileşimleri anormalliklerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Metal kaynaklı değişimler bitkinin genetik yapısı üzerinde önemli sonuçlara sahiptir. Önceki çalışmalarla uyumlu olarak bu araştırma da mangana karşı duyarlılığın anlaşılmasında önemli bir katkı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abbas, G., Khan, M. Q., Khan, M. J., Tahir, M., Ishaque, M., & Hussain, F. (2011). Nutrient uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by manganese application. *Pakistan Journal of Botany*, 43(1), 607-616.
- Abdelsalam N. R., Abdel-Megeed A., Ali H.M., Salem M.Z.M., Al-Hayali M.F.A., Elshikh, M.S. (2018). Genotoxicity effects of silver nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) root tip cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **155**: 76-85.
- Aksoy Ö., Deveci A. (2012). The Investigation of the Cytotoxic Effects of Some Pesticides on Soybean (*Glycine max* L.) *Cytologia* **77**(4): 475–483
- Albayrak, E. (2024a). LiMn₂Si Full Heusler Alaşımın Elektronik, Manyetik, Yapısal ve Titreşim Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi (Fizik Alanındaki Güncel Araştırmalar). 149-164.
- Albayrak, E. (2024b). LiMn₂Al Heusler Alaşımının Bazı Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi (Fizik Alanında Uluslararası Güncel Çalışmalar) 175-192.
- Albayrak, E. (2024c). LiMn₂Ge Alaşımının Bazı Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi (Fizik Alanında Uluslararası Güncel Çalışmalar) 193-208.
- Albayrak, E. (2023a). Fm-3m Uzay Grubundaki LiMn₂Ga Full Heusler Alaşımının Teorik Olarak İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 52: 87-94.
- Albayrak, E. (2023b). Li₂MnSi Full Heusler Alaşımının Teorik Olarak İncelenmesi (Doğa Bilimlerinde Güncel Konular). 181-197.
- Andronic, L. (2012). Viruses as triggers of DNA rearrangements in host plants. *Can. J. Plant Sci.* **92**: 1083-1091.
- Barman, A., Pandey, R. N., Singh, B., & Das, B. (2017). Manganese deficiency in wheat genotypes: Physiological responses and manganese deficiency tolerance index. *Journal of Plant Nutrition*, 40(19), 2691-2708.
- Bhardwaj, V., Salunke, P. S., Puranik, A. A., Kulkarni, N. D., & Ballabh, A. (2022). Design and synthesis of novel heterocyclic pivalamide ligands and their copper (II) complexes: Structure, BSA/DNA interactions and SOD synzyme activity. *Polyhedron*, 225, 116054.
- Bhat, S. A., Bashir, O., Haq, S. A. U., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Americo-Pinheiro, J.H.P., & Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303, 134788.
- Bozdağ, B., Özdemir, C., Özdemir, A., Vural, Y., & Vural, S. (2023). Bakla (*Vicia faba* L.) Kök Ucu Hücrelerinde Nonilfenolün Sitogenetik Etkilerinin İncelenmesi. *Journal of New Results in Engineering and Natural Scien-*

ces, 2023(18), 40-52.

- Çanlı M. (2018). A new perspective to aberrations caused by barium and vanadium ions on *Lens culinaris* Medik, *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 160: 19–23.
- Çelik, M., Aksoy, H., & Yılmaz, S. (2010). Evaluation of beauvericin genotoxicity with the chromosomal aberrations, sister-chromatid exchanges and micronucleus assays. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(7), 1553-1557.
- Çelik A., Kartal A., Akdoğan A., Kaska Y. (2005). Determining the heavy metal pollution in Denizli (Turkey) by using *Robinio pseudo-acacia* L., *Environmental International*. 31(1): 105-112.
- Fernando, D.R., Lynch, J.P. (2015). Manganese phytotoxicity: new light on an old problem, *Annals of Botany*, 116(3), 313–319.
- Garlich N., Cruz C., Silva A.F., Malaspina I.C., Ferreira R.G., Tedesque M.G., Pittelli R.A., Bianco S. (2016). Effectiveness of Diquat, Copper Hydroxide, Copper Oxychloride and their Association in Control of Submerged Macrophytes *Ceratophyllum demersum*, *Planta Daninha*. 34(1): 117-123.
- Gupta P.K. (2006). Plant cytogenetics: A re-birth in twenty-first century. *Indian Journal of Crop Science*, 1(1-12): 1-7.
- Hajmoradi, F., & Taleb Beydokhti, A. (2019). Effect of heavy metals on meiosis cell division in *Stachys inflata* Benth. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 17(4), 363-373.
- Hemachandra C., Pathiratne A. (2015). Assessing toxicity of copper, cadmium and chromium levels relevant to discharge limits of industrial effluents into inland surface waters using common onion, *Allium cepa* bioassay *Contam. Toxicol.*, 94 (2): 199-203.
- Humphries, J. M., Stangoulis, J. C., & Graham, R. D. (2016). Manganese. In *Handbook of plant nutrition* (pp. 367-390). CRC Press.
- Janas K.M., Zielińska-Tomaszewska J., Rybaczek D., Maszewski J., Posmyk M.M., Amarowicz R., Kosińska A. (2010). The impact of copper ions on growth, lipid peroxidation, and phenolic compound accumulation and localization in lentil (*Lens culinaris* Medik.) seedlings. *J Plant Physiol*. 167(4): 270-276.
- Kıran Y., Şahin A. (2005). The effects of the lead on the seed germination, root growth and root tip cell mitotic divisions of *Lens culinaris* medik. *Gazi University Journal of Science*. 18 (1):17–25.
- Kozhevnikova A. D., Seregin I. V., Bystrova E. I., Belyaeva A. I., Kataeva M. N., Ivanov V. B. (2009). The Effects of Lead, Nickel, and Strontium Nitrates on Cell Division and Elongation in Maize Roots. *Russian Journal of Plant Physiology*. 56 (2): 242–250.
- Kudo, H., Kudo, K., Uemura, M., and Kawai, S. (2015). Magnesium inhibits cad-

- mium translocation from roots to shoots, rather than the uptake from roots, in barley. *Botany*. **93**: 345–351.
- Lemtiri, A., Lienard, A., Alabi, T., Brostaux, Y., Cluzeau, D., Francis, F., and Colinet, G. (2016). Earthworms *Eisenia fetida* affect the uptake of heavy metals by plants *Vicia faba* and *Zea mays* in metal-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*. **104**: 67–78.
- Liehr, T., Ewers, E., Kosyakova, N., Klaschka, V., Rietz, F., Wagner, R., & Weise, A. (2009). Handling small supernumerary marker chromosomes in prenatal diagnostics. *Expert review of molecular diagnostics*, 9(4), 317-324.
- MacMillan, J.P., Park, J.W., Gerstenberg, R., Wagner, H., Köhler K., and Walbrecht P. (2005). Strontium and strontium compounds, in Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry (7th ed.): Weinheim, Germany, VCH Verlagsgesellschaft mbH, A25, p321–327.
- Manzatu C., Nagy B., Ceccarini A., Iannelli R., Giannarelli S., Majdik C. (2015). Laboratory tests for the phytoextraction of heavy metals from polluted harbor sediments using aquatic plants. *Marine Pollution Bulletin*. **101**: 605–611.
- Marin A.R., Masscheleyn P.H., Patrick W.H. Jr. (1992). The Influence of Chemical Form and Concentration of arsenic on rice growth and tissue arsenic concentration. *Plant and Soil*. **139**: 175-183
- Mittal, A., Chhibber, S., & Madan, Z. (2018). The effect of manganese on antioxidant enzymes activity on the wheat seedling. *Int J Pharm Biol Sci*, 8(1), 92-98.
- Movahhedy-Dehnavy, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2009). Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. *Industrial Crops and Products*, 30(1), 82-92.
- Morais-Leme D., Marin-Morales M. (2009). *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application *Mutat. Res.*, **682**: 71-81.
- Oliveira S.C.B., Corduneau O., Oliveira-Brett A.M. (2008). In situ evaluation of heavy metal-DNA interactions using an electrochemical DNA biosensor. *Bioelectrochemistry*. **72**: 53-58.
- Özdemir A., Bozdağ B., Sepet H., Parlak Y., Kocabaş O., Ereeş F.S., Özdemir C. (2015). Cytogenetic effects of ⁹⁹technetium on meristematic cells of root tips of *Vicia faba* L. and statistical comparison. *Caryologia*. **68** (3): 200–206.
- Pesnya D.S. (2013). Cytogenetic effects of chitosan-capped silver nanoparticles in the *Allium cepa* test, *Caryologia*. **66** (3): 275-281.
- Prates H.T., Paes J.M.V., Pires N.D.M., Filho I.A.P., Magalhaes P.C. (2000). Efeito do extrato aquoso de leucena na germinação e no desenvolvimento do milho. *Pesq Agropec Bras*. **35**(5): 909-914.

- Restrepo R., Reyes D., Ortiz M.C., Ruiz F.A.R., Kouznetsov V. (2012). Aberaciones cromosomales en bulbos de cebolla *Allium cepa* inducidas por moléculas híbridas 4-aminoquinolínicas Univ. Sci., **17**(3): 253-261.
- Russel P. (2002). Chromosomal mutation B. Cummings, Genetics, Pearson Education Inc, San Francisco.
- Salazar-Mercado, S. A., Torres-León, C. A., & Rojas-Suárez, J. P. (2019). Cytotoxic evaluation of sodium hypochlorite, using *Pisum sativum* L as effective bioindicator. *Ecotoxicology and environmental safety*, **173**, 71-76.
- Saxena P.N., Murthy R.C., Gupta S.K. (2009). Evaluation of cytogenetic effects of deltamethrin in root meristem cells of *Allium sativum* and *Allium cepa*: A possible mechanism of chromosome damage, *Toxicological & Environmental Chemistry*. **91**(3): 577-594.
- Sepet H., Çanlı M., Özdemir A., Bozdağ B., Özdemir C. (2014). Cytogenetic effects of ⁴⁸Titanium (⁴⁸Ti) on meristematic cells of root tips of *Lens culinaris* Medik, *Pakistan Journal of Botany*. **46**(1): 101-110.
- Silva Jr. A.C., Gonçalves C.G., Scarano M.C., Pereira M.R.R., Martins D. (2018). Effect of Glyphosate on Guineagrass Submitted to Different Soil Water Potential *Planta Daninha*. **36**: 1-12.
- Singh R.J. (2003). *Plant Cytogenetics* (2nd Ed.). CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Smical A.I., Hotea V., Oros V., Juhasz J., Pop E. (2008). Studies on Transfer And Bioaccumulation Of Heavy Metals From Soil Into Lettuce, *Environmental Engineering and Management Journal*. **7**(5): 609-615.
- Sözen, E., Yılmaz, M., Çolak, G., & Yücel, E. (2010). Alkali metal tuzları NaCl, KNO₃, kuvvetli asit H₂SO₄ ve bazı ağır metallerin CuCl₂, FeCl₃, MgCl₂ ve ZnCl₂ nohut *Cicer arietinum* tohumlarının çimlenmesi üzerine ekotoksikolojik etkileri. *Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma*, **3**(3), 64-71.
- Talukdar D. (2013). Bioaccumulation and transport of arsenic in different genotypes of lentil (*Lens culinaris* Medik.). *International Journal of Pharma and Bio Sciences*. **4**(1): 694–701.
- Tangahu, B. V., Sheikh Abdullah, S. R., BaMni, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International journal of chemical engineering*, 2011, 1-31.
- Yalcin, I. E., & Altay, V. (2023). Investigation of water-soil-plant relationships based on hazardous and macro-micro element concentrations on Orontes River, Türkiye. *International Journal of Phytoremediation*, 1-22.
- Zahan, N., & Begum, K. N. (2023). Meiotic behavior of B chromosome in two species of *Trigonella* L. from Bangladesh. *CYTOLOGIA*, **88**(3), 217-223.
- Zhang J., Brodbelt J.S., Wand J. (2005). Threshold Dissociation and Molecular Modeling of Transition Metal Complexes of Flavonoids. *J Am Soc Mass Spectrom*. **16**: 139–151.

DRAMATİK ŞEKİLDE KİRLENEN, ISINAN, DEĞİŞEN ÇEVRENİN “BÖCEKLER ÖZELİNDE” TÜRKİYE’YE ETKİSİ

Tayfun KAYA¹

Giriş

Dünya’daki ortamlar sürekli değişir ve canlı sistemler bunların içinde farklılaşarak gelişir. Bu gelişim süreci, dinamik ilişki ile işleyen ve birbirine doğrudan-dolaylı bağlı olan, biyotik (canlı: bitkiler, hayvanlar ve diğer organizmalar) faktörler ile abiyotik (cansız: sıcaklık, nem ve diğer unsurlar) faktörler tarafından şekillenen/şekillendirilen ekosistemlerde hayat bulur. Genel olarak, güneş ışığı ile büyümesi desteklenen biyotik yapıda, dönüştürülen enerji otçulları, avcıları ve hatta ayrıştırıcıları beslerken, sürdürülebilir döngü halinde yaşam dengesi ortaya çıkarır. Bu denge biyosferde birbirine coğrafik olarak bağlı ekosistemler arasında da yani biyomlarda sürdürülür. Ancak bu dinamik denge durumu, iklim (abiyotik) ve/veya insan faaliyetleri (biyotik) gibi çevresel kaynaklı nedenlere bağlı olarak kesintiye uğrayabilir.

Çevre Kirliliği, Küresel Isınma ve İklim Değişikliği

Genel olarak değişen zaman içerisinde, canlı ve cansız öğeleri olumsuz yönde etkileyerek yapısal zararlar meydana getiren ve niteliklerini bozan faaliyetlerin tamamı çevre için risk oluşturmaktadır (Chu ve Karr, 2016; Manisalidis vd., 2020). İktisadi kalkınmaya paralel olarak, dünyada doğal olmayan bir süreçte insan eliyle, doğal kaynakların tüketimi ve atık miktarının artışı şeklinde ortaya çıkan durum ise çevre kirliliği olarak adlandırılır. Diğer bir değişle çevrenin doğal olmayan bir şekilde insan eliyle tahribatıdır (Demir, 2009; Chu ve Karr, 2016). Temelinde ise, fosil yakıt kullanımı, endüstriyel ve zirai faaliyetlerin yanı sıra insanın günlük rutini içerisindeki evsel (katı, sıvı ve gaz formunda ortaya çıkan) atıkların hava, su ve toprağa yoğun bir şekilde karışması yatmaktadır (Wang vd.,

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü Orcid Id: 0000-0001-9086-4520

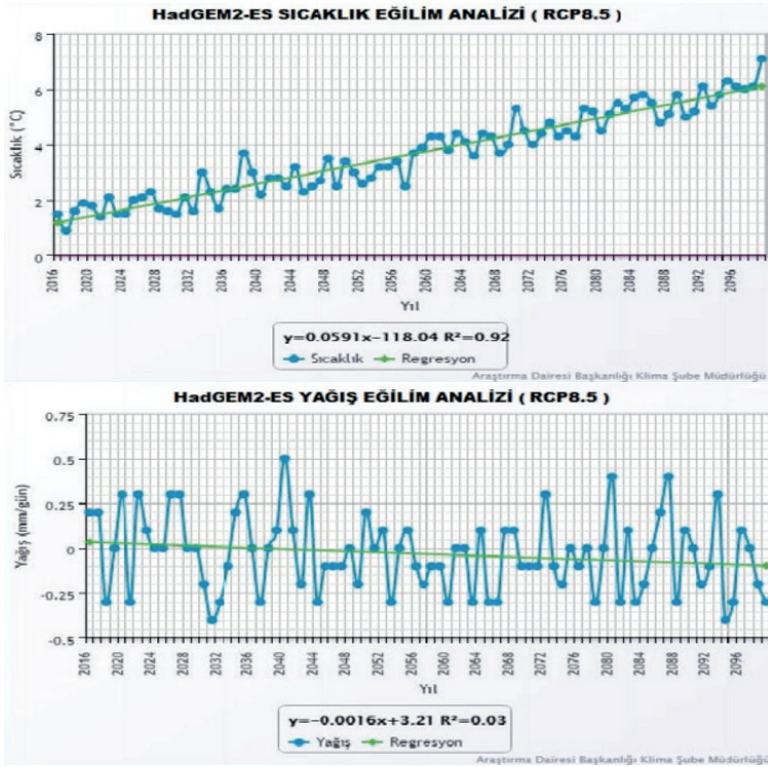
2021; Kareem vd., 2023). Bu durum dünya çapında başta insan olmak üzere canlı sağlığı ve ekosistemler üzerinde her geçen gün daha fazla baskı oluşturmaktadır.

Çeşitli kaynaklardan gelen kirleticiler, hava, su ve toprak gibi ekosistemin ana bileşenleri içerisinde kısır bir döngü halinde ilerler. Öyle ki, başta karbondioksit olmak üzere, amonyak ve azotoksitleri gibi reaktif azotlu bileşikler ile kükürtdioksit gibi atmosferik kirleticiler havada kirliliğe neden olur ve bir kısmı da genel olarak yağışlarla yeryüzüne iner (Wang vd., 2021; Edwards vd., 2024; WHO, 2024). Bununla birlikte kurşun, kadmiyum, cıva ve arsenik gibi toksik metaller, pestisitler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve poliklorlu bifeniller ile evsel organik atıklar toprak ve su ortamlarında kirliliğe neden olur (Shetty vd., 2023; Wang F. vd., 2024). Bu kirleticiler fotosentez, solunum, beslenme gibi çeşitli süreçler ile flora ve fauna bileşenleri üzerinden besin zincirine girerek, doğal denge içerisindeki döngüye dahil olurlar (Livingstone ve Gallacher, 2003).

Diğer yandan fosil yakıtların kullanılması, endüstriyel faaliyetler, arazi kullanımını değişiklikleri ve ormansızlaştırma gibi süreçler atmosfere salınan gazların birikmesine ve sera etkisinin artmasına neden olmaktadır. Nitekim, uzun dalga boylu güneş ışınlarının bir kısmı sera etkisini regüle eden gazlar (su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazotmonoksit (N_2O), ozon (O_3), vb.) tutulur (Livingstone ve Gallacher, 2003; Manisalidis vd., 2020). Atmosferdeki sera gazı yoğunluklarının artmasının sonuçlarından olan küresel ısınma, genel olarak ortalama küresel sıcaklıklardaki artışı ifade eder ki, dünya yüzeyinde ortalama küresel hava sıcaklığı son yüz yıl içerisinde artış eğilimindedir (Hoegh Guldberg vd., 2018). Bu artış eğiliminin en çarpıcı sonuçları iklim üzerinde görülmektedir. Öyle ki, iklim, bir alanda belirli periyotlarda gözlemlenen sıcaklık, nem, hava basıncı, rüzgâr, yağış, yağış şekli gibi meteorolojik göstergelerin ortalamasıdır. Ancak bu ortalamalar karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde, doğrudan veya dolaylı nedenlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Temel meteorolojik göstergelerdeki değişimlere dalayalı olarak ölçümü ve analizi yapılan; ortalama hava durumlarında değişimler ortaya çıkarmakla birlikte, hava durumlarının sıklığı ve/veya şiddetinde çeşitli ölçüsüzlüklerin/aşırılıkların görülmesine neden olur (Hekimoğlu ve Altındeğer, 2008; Demir, 2009; Chu ve Karr, 2016; Liu-Helmersson vd., 2019; Wang vd., 2021; Nyamukondiwa vd., 2022; Kareem vd., 2023). Bunlar dünyanın iklimi tarihi içerisinde uzun zaman periyotlarında meydana gelen döngüler şeklinde değerlendirildiğinde, olağan/doğal bir sürecin sonucu olarak yorumlanabilir. Ancak, özellikle de son yarım asırda iklimde görülen hızlı değişikliklerin uzun vadeli iklim döngülerinden kaynaklanmadığını, hatta doğal olmayan dolaylı nedenlere, örneğin artan gaz emisyonlarına, bağlı olduğunu göstermektedir (Seneviratne vd.,

2021). Dolayısıyla normal sürece göre aşırılıklar içeren bu değişiklikler, diğer bir deyişle hava durumlarındaki ölçsüzlükler-kararsızlıklar, iklim değişikliği ile ifade edilir.

Şüphesiz küresel dünyanın bir parçası olan Türkiye’de çevre kirliliği ile sonuçlarından direk ve dolaylı olarak etkilenmektedir. Nitekim, Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen Türkiye için iklim projeksiyonlarına (küresel model veri setleri ve bölgesel modeli ile dinamik ölçek küçültme yöntemi RCP8.5 kullanılarak yapılan senaryosuna) göre; 2016-2099 döneminde Türkiye yıllık ortalama sıcaklıkların sürekli bir artış eğiliminde olacağı, ortalama artışın ise 3,6 °C olacağı hesaplanmıştır (Şekil 1). Buna karşın 2016-2099 periyodu içerisinde, düzensiz bir yağış rejimi halinde görülmesi beklenen yağışların, yaklaşık 60 mm/yıl azalacağı hesaplanmıştır (Şekil 1) (Akçakaya vd., 2015).



Şekil 4. Türkiye için iklim projeksiyonu senaryosuna göre 2016-2099 döneminde Türkiye yıllık ortalama sıcaklık ve yağış hesaplamaları (Akçakaya vd., 2015).

Ancak, küresel olarak ortalama sıcaklıklardaki artış trendi, coğrafi olarak, dünyanın her bölgesinde aynı şekilde gerçekleşmemesi normal

olarak görülmektedir (Türkeş vd., 2000, Türkeş, 2007). Diğer bir değişle, sıcaklıkların artması yağışların azalmasında, global ısınmanın yanı sıra, ilgili bölgenin konumu, bulunduğu iklim kuşağı, görülen iklim tipleri, denizlere olan yakınlık ve topoğrafik yapı gibi coğrafi faktörlerin de etkisi vardır (Türkeş, 2007; Hekimoğlu ve Altındağ, 2008; Yörük ve Şahiner, 2013). Ancak, küresel ölçekte, bölgeler arasındaki uygulanan/izlenen politika ve ekonomik büyüme/gelişmişlik farklılıklarının da getirdiği; hızlı kentleşme, nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, artan talep ve enerji ihtiyacı gibi çevresel unsurlar da birer etkidir (Öztürk, 2001; Khan ve Khan, 2023). Dolayısıyla nedenlerinden bağımsız olarak düşünüldüğünde, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin, halihazırda bazıları hissedilmeye başlanmakla birlikte, i) aşırı sıcaklık artışları, ii) kuraklık, iii) artan kararsız yağış rejimleri, iv) içme suyu ve gıda krizleri, v) yükselen deniz seviyesi, vi) biyoçeşitlilik kaybı şeklinde doğal dengeye etkilerinin olacağı beklenmektedir (Hoegh Guldberg 2001; Demir, 2009; Chu ve Karr, 2016; Kareem vd., 2023; Edwards vd., 2024; WHO, 2024).

Kirlenen ve Isınan Çevrede Böcekler

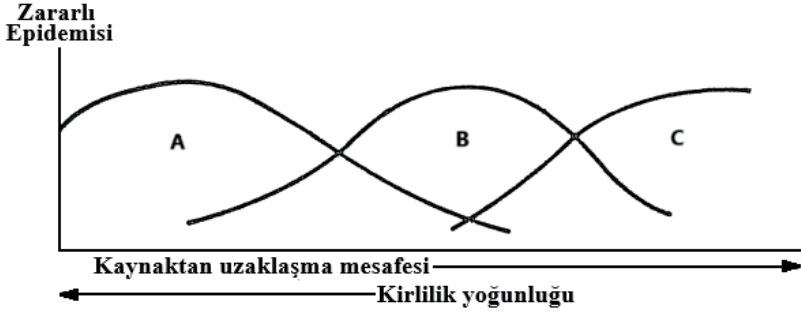
Dünyada ve Türkiye’de artan talep doğrultusunda habitat kayıpları ve/veya parçalanmaları, sanayileşme ve zirai faaliyetler gibi pek çok faktörün sonucu olarak ortaya çıkan çevre kirliliği, küresel ısınma ve iklim değişikliği; günümüzde canlıların biyolojik aktiviteleri ve yayılışı üzerinde ekili olan en önemli kriter haline gelmiştir (Kareem vd., 2023; Edwards vd., 2024; WHO, 2024). Öyle ki, canlılığın var oluşundan bugüne değin elde edilen kazanımlar “ekosistemlerde tarihsel birikim” (Demir, 2009) olarak denge halinde işlemektedir. Bu kazanımların korunması ve sürdürülebilirliği, karmaşık ekolojik ağlar şeklinde ekosistem dinamikleri tarafından kontrol edilir (Miller, 1977; Chu ve Karr, 2016; Kareem vd., 2023; Edwards vd., 2024). Ancak (biyolojik, genetik, tür vb. bakımından) oldukça çeşitlilik arz eden bu yapılar içerisinde biyokütle ve/veya enerjinin yayılması çevresel tahribatlar ile kesintiye uğratabilir. Diğer bir değişle ekosistemleri ve/veya biyolojik çeşitlilik farklı şekillerde etkilenebilir (Chu ve Karr, 2016; Tolunay, 2019; Edwards vd., 2024).

Çevresel tahribata türlerin verebileceği tepkiler türlerin yaşam ortamlarındaki değişkenlere rağmen hayatta kalma ya da hayatta kalabilmek için daha uygun ortamlara göç etme şeklinde olabilir. Hayatta kalma becerisi çoğunlukla direnç geliştirme ya da uyum sağlama (adaptasyon) şeklinde gözlenirken, en dramatik olan türlerin yok olmasıdır. Diğer yandan söz konusu çeşitlilik olunca, canlıların biyolojik (davranışsal, psikolojik, fizyolojik ve morfolojik gibi) farklılıkları nedeniyle çevresel değişkenlere verecekleri reaksiyon da çeşitlilik göstereceği kaçınılmazdır (WWF, 2015; Sheikh et al., 2017; Skendžić vd., 2021; Harvey vd., 2023). Bu bağlamda çevre kirliliği ve bağlı olarak ortaya çıkan küresel ısınma ile iklim de-

ğişikliği günümüzde yaşayan canlıların çoğunluğunu, özellikle de böcek türlerinin yaşamının temel belirleyicisidir.

Aslında böcekler *i)* dış iskelete sahip olmaları, *ii)* uçabilmeleri, *iii)* küçük olmaları, *iv)* az miktarda yiyeceğe ihtiyaç duymaları, *v)* kısa sürede çok sayıda nesil üretebilmeleri, *vi)* oldukça fazla genetik çeşitliliğe sahip olmaları, *vii)* farklı veya değişen ortamlara uyum sağlama konusunda büyük bir potansiyele sahip olmaları, *viii)* böcek ilaçlarına karşı göreceli olarak hızlı direnç geliştirmeleri gibi çoğu ortamda başarılı bir şekilde yaşamak üzere evrimleşmiş olsa da (van Huis, 2014; Sheikh et al., 2017;), değişen koşullara fizyolojik olarak uyum sağlama konusunda avantajlı da olabilir dezavantajı da. Öyle ki, habitat tahribatı, kirlilik çeşitliliği, ısınmanın düzeyi ve mücadele amaçlı kullanılan kimyasallar gibi birçok etken tabiatın ve böceklerin tolere edemeyeceği kadar yüksek ekstrem koşullar oluşturur.

Boyut, biçim ve davranış açısından inanılmaz bir çeşitliliğe sahip böcekler, vücut sıcaklığını çevrelerindeki sıcaklığa göre ayarlayan soğukkanlı (ektotermik) hayvanlar olduklarından, kirlilik ve dolayısıyla küresel ısınmadan çeşitli şekillerde etkilenmektedirler/etkilenenlerdir ve canlı sağlığı ile tarımsal üretim bağlamında etkileyeceklerdir (Özgür ve Tuncer, 2011; Akdeniz vd., 2014; Sheikh et al., 2017; Harvey vd., 2020; Subedi vd., 2023). Bu kapsamda böcekler söz konusu ekstrem koşullara maruz kalmaları durumunda, biyolojik özellikleri gereği farklı tepkiler vermelerinin yanı sıra yayılışları ve yoğunluklarının da değişkenlik göstermesi beklenir (Führer, 1985; Ülgentürk ve Toros, 1993; Harvey vd., 2020; Skendžić vd., 2021; Harvey vd., 2023). Buna göre; *i)* bazı böcek türleri avantaj sağlayabilirler, yayılış alanları içerisinde sık ve yüksek düzeyli yayılış gösterirler (Şekil 2, A tipi böcekler). *ii)* Bazıları ise olumsuz çevresel değişkenlere orta derecede duyarlıdır, bu değişkenlere mesafeli konumda yayılış gösteriler, ancak doğal düşmanları ise yok olur (Şekil 2, B tipi böcekler). *iii)* Ekstrem değişimlere aşırı hassas olan bazı böcekler ise bu koşullarda yaşayamazlar (Şekil 2, C tipi böcekler) (Führer, 1985; Ülgentürk ve Toros, 1993). Diğer yandan küçük vücutlu ve ektoderm canlılar olmaları nedeniyle, böcekler artan ısınmanın metabolizma hızını da arttıracığından olumsuz etkilenme ve yok olma ile sonuçlanan süreçler işler. Ayrıca yayılış alanları içerisindeki besin kaynağı olan bitki türlerinin ortadan kalması nedeniyle başta endemik ve hareket kabiliyeti kısıtlı türler olumsuz etkilenir (Sheikh et al., 2017; Harvey vd., 2020; Skendžić vd., 2021; Harvey vd., 2023). Bu kapsamda başta polinatör böcekler olmak üzere ekosistemlerde için kritik öneme sahip avcı, parazitoid ve saprofit gibi yararlı türlerin yok olması ya da göç etmesi doğal dengenin bozulmasına neden olur (Miller, 1977; Özgür ve Tuncer, 2011; WWF, 2015; Sheikh et al., 2017; Harvey vd., 2023; Nyamukondiwa vd., 2022).

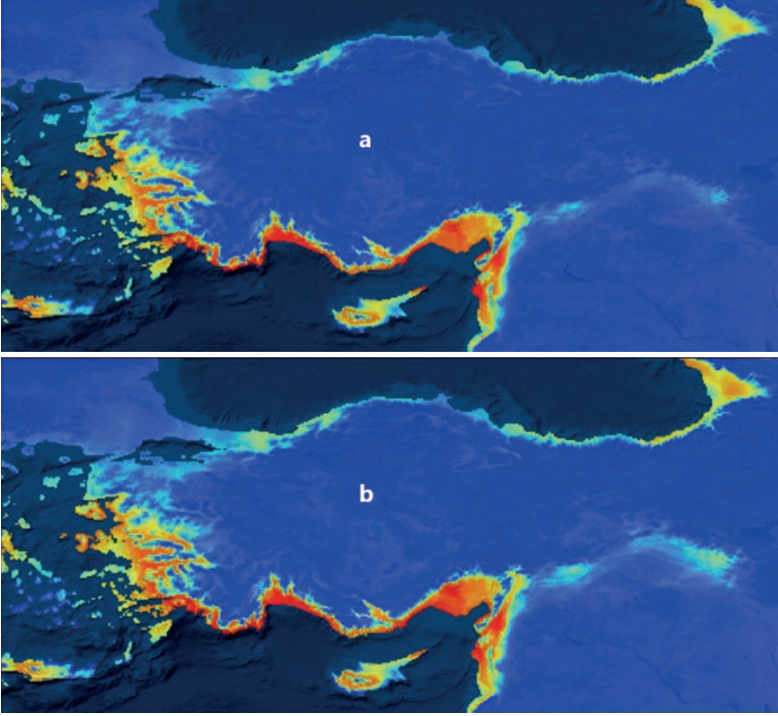


Şekil 2. Çevre kirliliği ve küresel ısınma karşısında böcek türlerinin epidemi olasılıkları (Führer, 1985; Ülgentürk ve Toros, 1993).

Dramatik şekilde ısınan ve kirlenen dünyada ve Türkiye’de yaşanan kuraklık, düzensiz yağış rejimi ve değişen bağıl nem, doğadaki senkronizasyonun bozulmasını tetikler (Çelik vd., 2002; Demir, 2009; Dabanlı, 2019). Bu durum özellikle zararlılarının yayılışını, yumurtlama ve nesil üretme miktarını, kışın hayatta kalma süresini etkilemekle birlikte, istilacı türlerin baskın olmasını, yararlı türlerin yok olmasını ve fitopatogenlerin taşıyıcısı vektör türlerin yayılışı ve biyolojisi agresif değişikliklere neden olur (Dabanlı, 2019; Skendžić vd., 2021; Demirci vd., 2021; Nyamukondiwa vd., 2022). Bu etkenler ve sonuçları bir bütün içerisinde değerlendirildiğinde doğal denge ve iktisadi kalkınma açısından insanlık için risk oluşturmaktadır.

Türkiye’de çevre kirliliğinin ve küresel ısınmasının sonuçları çoğunlukla sucul ekosistemlerde sulak alan kayıpları ya da denizlerde denge bozuklukları şeklinde hali hazırda görülmektedir (Birpınar ve Tuğaç, 2018; Salihoğlu ve Öztürk, 2021). Ayrıca aşırı ve düzensiz yağışlar ya da kuraklık şeklinde de hem toplumsal düzeyde hem de tarımsal üretimde rekolte kayıpları şeklinde günlük yaşantıda etkileri hissedilmektedir (Öztürk, 2001; Syed vd., 2022). Her ne kadar bazı belirtiler olsa da gerek etkilerinin ölçülmesindeki zorluklar gerekse belirgin olarak takip edilememesi nedeniyle olmalıdır ki, çevresel ekstrem değişikliklerin böceklere olan etkilerine yönelik çalışmalar henüz sınırlıdır. Tarımsal üretim açısından önemli bir zararlı olan Akdeniz meyve sineğinin (*Ceratitidis capitata* W., Diptera: Tephritidae) son dönemde Orta Anadolu’da ve Karadeniz bölgesinde yayılış göstermeye başladığı belirlenmiştir (Kaya vd., 2017; İpekdal ve Kaya, 2018). Diğer yandan 2017 yılına kadar ki ortalama sıcaklık verileri kullanılarak gerçekleştirilen modelleme çalışması göre ise gelecek elli yıl içerisinde daha geniş alanda yayılış göstereceğini ve popülasyon yoğunluğunun artacağını, 2070’lerde ise Kafkaslarda baskın zararlılardan olacağını göstermektedir (Şekil 3) (Kaya vd., 2017). Isınmaya bağlı

olarak iklim kuşaklarının kuzeye kayması sonucu bölgesel ve mevsimsel farklılıklarla birlikte, türlere göre bir artış ya da azalış öngörüldüğünden, aslında bu durum tesadüf değildir ki; denizlerde normalde bulunmayan çeşitli türlerin Karadeniz’de dahi görülmeye başlamıştır (Hekimoğlu ve Altındeğer, 2008). Ayrıca sıcaklıklardaki her 1-3 °C’lik artışın böceklerin habitat zonunu 500 m yükselteceği çıkarımı da bunu desteklemektedir (Yörük ve Şahiner, 2013).



Şekil 3. Ortalama sıcaklık verileri kullanılarak gerçekleştirilen modellemeye göre, Türkiye’de Akdeniz meyve sineğinin (*Ceratitis capitata* W., Diptera: Tephritidae) 2050 (a) ve 2070 (b) yıllarındaki yayılışı.

Bir diğer etki ise artan sıcaklıkların etkisi ile Türkiye’de elma, kiraz ve buğday gibi ürünlerin fenolojik dönemlerini öne çektiği ve Şubat-Mayıs aylarındaki 1.0 °C’lik artışın hasat zamanını etkilediği belirlenmiştir (Türkoğlu vd., 2016). Bu durum özellikle doğadaki senkronizasyonun bozulmasını da tetikleyerek, *Tropinota hirta* P. (Coleoptera: Scarabaeidae) ve *Eurygaster integriceps* P. (Hemiptera: Scutelleridae) gibi söz konusu zararlılarla biyolojik döngüsü üzerinde de etkili olarak ekonomik zarar düzeyinin artmasına neden olabilir. *Tropinota hirta* (Bakla zınnı) elma, kiraz ve şeftali gibi pek çok ekonomik değere sahip tarımsal üründe çiçeklen-

me döneminde zarara neden, polinatör tür olması nedeniyle de kimyasal mücadelenin yapılamadığı zararlıdır. Ayrıca etkili olduğu gün içi saatleri ve biyolojik döngüsü (Homonnay ve Homonnayné-Csehi, 1990; Avcı ve Özpınar, 2021; Kaplan, 2022) dikkate alındığında zarar düzeyini artırma ihtimali hayli yüksektir. Diğer yandan artan (600-670-700 ppm'lik) CO₂ dozlarına maruz bırakılan *Eurygaster integriceps*'in başlangıçta (ilk 5-30 dakikalık dilimde) çiftleşme eğiliminde artış olduğu, 30. dakikadan sonra ise ortama alıştığı ve beslenme gibi normal biyolojik sürecine döndüğü belirtilmiştir (Özgen vd., 2024).

Ekolojik süreç içerisinde fenoloji başta sıcaklık olmak üzere yağış ve rüzgar gibi iklim faktörleri ile düzenlendiğinden, birçok tür bu faktörlerle duyarlıdır. Ani hava değişiklikleri, su kaynaklarının kaybı, mevsimlerdeki kaymalar ve/veya sıcaklık değişimleri ile türlerin ısı toleransları, vejetasyondaki çiçeklenme dönemlerindeki değişiklikler ve/veya vejetasyon kayıpları gibi nedenler özellikle bal arıları gibi doğanın dinamosu durumundaki polinatörlerde koloni kaybına neden olur (Yörük ve Şahiner, 2013; Akdeniz vd., 2014; Topal vd., 2016; White ve Dillon, 2023; Rahimi ve Jung, 2024). Bu durumlar bir taraftan bal arılarının nektar bulamamalarına bağlı olarak koloni yaşam gücünü kısıtlarken, diğer taraftan sıcaklık dalgalanmaları arıların kovanlarına dönmelerini engellemektedir (Akdeniz vd., 2014). Ayrıca mevsimsel sıcaklık değişiklikleri nedeniyle kışlama döngüsüne de etkilenmektedir (Yörük ve Şahiner, 2013).

Aratan ısınma hastalık etkeni patojenleri taşıyıcısı türlerin yayılışını arttırmakta hatta baskın olma tür olmasını da tetiklemektedir ki, Edirne'de, 11 farklı sivrisinek türü tespit edilmiş olup, bunlardan ikisi halk sağlığı açısından risk oluşturan sıtma vektörü *Anopheles sacharovi* F. ile Batı Nil virüsünün vektörü *Culex pipiens* s.l. L. türleridir. Bölgede çeltik üretimi yapılıyor olması bu vektörlerin üremesi için uygun kolları da oluşturmaktadır (Şakacı ve Çamlıtepe, 2022). Bir diğer arbovirüsü taşıyıcısı *Aedes albopictus* S. (Diptera: Culicidae) ilk olarak Türkiye'nin Kuzeybatısında tespit edilmiş beş yıllık (2015-2020) süreç içerisinde yayılışını genişlettiği yakın gelecekte Türkiye geneline yayılma potansiyeli taşıdığı belirtilmektedir (Demirci, 2022). Özellikle iklim değişikliğinin ve insan faaliyetlerinin arbovirüs enfeksiyonlarının ve aracısı sivrisineklerin coğrafi ayak izini genişlettiğine yönelik bulgular artmaktadır (Whitehorn ve Yacoub, 2019; Liu-Helmersson vd., 2019; Wang H. R. vd, 2024).

Dünya'da ve Türkiye'de nüfus artışına bağlı olarak artan talep doğrultusunda habitat kayıpları ve/veya parçalanmaları, sanayileşme ve ziraai faaliyetler sonucu doğal dengedeki tahribat hali hazırda açıkça görülmektedir. Ancak hem çevresel kirliliğin (çeşitliliği) ve hem de buna bağlı olarak ortaya çıkan küresel ısınmanın (kuraklığın, iklim değişikliğinin) ulaşabileceği seviye ile alınması gereken/düşünülen önlemlerin ne kadar

etkili olacağı henüz tam olarak kestirilememektedir. Nitekim her geçen yeni rekorlar kırılmaktadır; Copernicus İklim Değişikliği Servisi verilerine göre, 2024 başlarında en sıcak yıl olarak 2023 açıklanmıştır. Ancak Temmuz 2024 küresel günlük ortalama sıcaklıkta yeni bir rekor görüldüğü ve 2024'ün kayıtlardaki en sıcak yıl olacağı beklendiği belirtilmektedir. Dolayısıyla boyuttu, şiddeti, süresi, çeşitliliği ve bunların bileşkesi (bir cisme uygulanan birden fazla gücün toplamı) altında; ekolojik havzaların giderek artan tahribatın üstesinden gelip gelemeyeceği henüz tam olarak kestirilememek birlikte, bu abiyotik faktörlerin her canlı türünü aynı oranda olmasa da biyolojik özellikleri doğrultusunda az ya da (kaçınılmaz olarak) çok etkileyeceği muhtemeldir.

Kaynaklar

- Akçakaya, A., Sümer, U. M., Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., Gürkan, H.,... & Yazıcı, B., (2015). Yeni senaryolar ile Türkiye iklim projeksiyonları ve iklim değişikliği. Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Ankara, ss 72.
- Akdeniz, G., Aktürk, S., Kılıçın, T. (2014). İklim Değişikliklerinin Ordu İlindeki Bal Arısı (*Apis mellifera* L.) Kolonileri Üzerine Olası Etkileri. Arıcılık Araştırma İstasyonu Müdürlüğü, Ordu.
- Avcı, H. İ., & Özpınar, A. (2021). Çanakkale İlinde Farklı Konukçularda (*Tropinota* (*Epicometis*) *hirta* (Poda, 1761)(*Cetoniidae*: *Coleoptera*))'nın Mevsimsel Uçuşu ve Ergin Popülasyon Gelişmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(2), 237-246.
- Birpınar, M. E., & Tuğaç, C. (2018, September). Impacts of climate change on water resources of Turkey. In Gastescu P, Bretcan P (edit, 2018), *Water resources and wetlands*, 4th international conference water resources and wetlands (pp. 5-9).
- Chu, E. W., & Karr, J. R. (2016). Environmental impact: Concept, consequences, measurement. Reference module in life sciences, B978-0.
- Çelik, O., Semerci, A., Şanlı, B., Belindir, B.ve Gedik, Ö., 2002. Ankara Çevresinde Anadolu Karaçamlarında (*Pinus nigra* Arn. *Ssp.pallasiana* Lamb. *Holmboe*) Görülen Kurumaların Nedenleri, *Orman Mühendisliği*: 39; 7-16.
- Dabanlı, İ. (2019). A climate change impact: Variation in precipitation patterns, and increased drought risk in Turkey. *Sakarya University Journal of Science*, 23(2), 193-202.
- Demir, A. (2009). Küresel iklim değişikliğinin biyolojik çeşitlilik ve ekosistem kaynakları üzerine etkisi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 37-54.
- Demirci, B., Bedir, H., Öztürk, M., & Akiner, M. M. (2021). Status of the invasive mosquito species *Aedes aegypti* (L., 1762) and *Aedes albopictus* (Skuse, 1895)(*Diptera*: *Culicidae*) in Turkey. *Turkish Journal of Entomology*, 45(2), 279-292.
- Edwards, T. M., Puglis, H. J., Kent, D. B., Durán, J. L., Bradshaw, L. M., & Farag, A. M. (2024). Ammonia and aquatic ecosystems—A review of global sources, biogeochemical cycling, and effects on fish. *Science of The Total Environment*, 907, 167911.
- Führer, E. (1985). Air pollution and the incidence of forest insect problems. *Zeitschrift für angewandte Entomologie*, 99(1-5), 371-377.
- Harvey, J. A., Heinen, R., Gols, R., & Thakur, M. P. (2020). Climate change-mediated temperature extremes and insects: From outbreaks to breakdowns.

- Global change biology, 26(12), 6685-6701.
- Harvey, J. A., Tougeron, K., Gols, R., Heinen, R., Abarca, M., Abram, P. K., ... & Chown, S. L. (2023). Scientists' warning on climate change and insects. *Ecological monographs*, 93(1), e1553.
- Hekimoğlu, B., & Altındeğer, M. (2008). Küresel Isınma Ve İklim Değişikliği. Samsun Valiliği İl Tarım Müdürlüğü, 1-79.
- Hoegh Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I. A., ... & Zhou, G. (2018). Impacts of 1.5 C global warming on natural and human systems. Baede, A. P., Ahlonsou, E., Ding, Y., & Schimel, D. S. (2001). The climate system: an overview. *Climate Change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*, 87-98.
- Homonnay, F., Homonnayné-Csehi, É. 1990. Cserebogarak – Melolonthidae T Jermý, K Balázs (Eds.), A Növényvédelmi Állattan Kézikönyve (Handbook of Plant Protection Zoology). III/A, Akadémiai Kiadó, Budapest, (In Hungarian).pp. 156-215
- İpekdal, K., & Kaya, T. (2018). Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae)'nın Kırşehir'deki ilk kaydı ve barkodlaması. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 31(2), 101-105.
- Kaplan, M. (2022). Determination of *Tropinota hirta* (Poda)(Coleoptera: Cetoniidae) Caught in Different Traps Feeding on Almond (*Prunus amygdalus* Linnaeus) Flowers. *Entomological News*, 130(3), 286-295.
- Kareem, H. A., Riaz, S., Sadia, H., & Mehmood, R. (2023). Industrial Waste, Types, Sources, Pollution Potential, and Country-Wise Comparisons. In *Waste Problems and Management in Developing Countries* (pp. 169-203). Apple Academic Press.
- Kaya, T., Ada, E., & İpekdal, K. (2017). Modeling the distribution of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) (Diptera, Tephritidae) in Turkey and its range expansion in Black Sea Region. *Turkish Journal of Entomology*, 41(1), 43-52.
- Khan, H., & Khan, I. (2023). The effect of technological innovations, urbanization and economic growth on environmental quality: does governance matter?. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1239288.
- Liu-Helmersson, J., Rocklöv, J., Sewe, M., & Brännström, Å. (2019). Climate change may enable *Aedes aegypti* infestation in major European cities by 2100. *Environmental research*, 172, 693-699.
- Livingstone, D. R., & Gallacher, S. (2003). Shellfish; Contamination and spoilage of molluscs and Crustaceans. Ed: Caballero, B., *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (Second Edition), Academic Press.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 14.

- Miller, D. H. (1977). Water Detained on the Soil Surface. (in) International Geophysics, Milwaukee, Wisconsin.
- Nyamukondiwa, C., Machekano, H., Chidawanyika, F., Mutamiswa, R., Ma, G., & Ma, C. S. (2022). Geographic dispersion of invasive crop pests: the role of basal, plastic climate stress tolerance and other complementary traits in the tropics. *Current Opinion in Insect Science*, 50, 100878.
- Özgen, İ., Buran, A., Sönmez, C., Kıstak, C., Karaca, V., & Aydoğmuş, E. (2024). Kesikli CO₂ Uygulamalarının Eurygaster Integriceps Puton, 1881 (Hemiptera: Scutelleriae)'in Bazı Davranışsal Özelliklerine Etkisi. 5. Bilsel International Efes Scientific Researches and Innovation Congress. 26-27 October, 2024 İzmir/Türkiye.
- Özgür, E., & Tuncer, C. (2011). Küresel Isınmanın Böceklere Etkileri. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(1), 83-90.
- Öztürk, K. (2001). Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye'ye Olası Etkileri", G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi Cilt 22, Sayı 1, 47-65.
- Rahimi, E., & Jung, C. (2024). Global trends in climate suitability of bees: Ups and downs in a warming world. *Insects*, 15(2), 127.
- Salihoğlu, B., & Öztürk, B. (2021). İklim Değişikliği ve Türkiye Denizleri Üzerine Etkileri. Turkish Marine Research Foundation, İstanbul.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D., ... & Allan, R. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. IPCC Sixth Assessment Report.
- Sheikh, A. A., Rehman, N. Z., & Kumar, R. (2017). Diverse adaptations in insects: A review. *Journal of entomology and zoology studies*, 5(2), 343-350.
- Shetty, S. S., Deepthi, D., Harshitha, S., Sonkusare, S., Naik, P. B., & Madhyastha, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*, 9(9).
- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, 12(5), 440.
- Subedi, B., Poudel, A., & Aryal, S. (2023). The impact of climate change on insect pest biology and ecology: Implications for pest management strategies, crop production, and food security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100733.
- Syed, A., Raza, T., Bhatti, T. T., & Eash, N. S. (2022). Climate Impacts on the agricultural sector of Pakistan: Risks and solutions. *Environmental Challenges*, 6, 100433.
- Şakacı, Z., & Çamlıtepe, Y. (2022). A mosquito survey of culicidae species at Edirne central district for disease vector. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 23(Special Issue: Biodiversity of Insect), 41-51.
- Tolunay, D. (2019). İklim Değişikliğinin Ekolojik Sistemlerdeki Yeri. İklim Değişikliği Eğitim Modülleri Serisi, 5, 1-67.

- Topal, E., Özsoy, N., & Şahinler, N. (2016). Küresel Isınma ve Arıcılığın Geleceği. Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 21(1).
- 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.
- Türkeş, M. (2007). Küresel İklim Değişikliği Nedir? Temel Kavramlar, Nedenleri, Gözlenen ve Öngörülen Değişiklikler, 1. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi – TİKDEK 2007, 11 – 13 Nisan 2007, İTÜ, İstanbul.
- Türkoğlu, N., Şensoy, S., & Aydın, O. (2016). Effects of climate changes on phenological periods of apple, cherry and wheat in Turkey Türkiye’de iklim değişikliğinin elma, kiraz ve buğdayın fenolojik dönemlerine etkileri. Journal of Human Sciences, 13(1), 1036-1057.
- Ülgentürk, S., & Toros, S. (1993). Çevre kirliliğinin böcekler üzerine etkileri. Türk Entomoloji Dergisi, 17(1), 55-64.
- Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., ... & Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. The Innovation, 2(4).
- Wang, F., Xiang, L., Leung, K. S. Y., Elsner, M., Zhang, Y., Guo, Y., ... & Tiedje, J. M. (2024). Emerging contaminants: a One Health perspective. The Innovation. 5(4).
- Wang, H. R., Liu, T., Gao, X., Wang, H. B., & Xiao, J. H. (2024). Impact of climate change on the global circulation of West Nile virus and adaptation responses: a scoping review. Infectious Diseases of Poverty, 13(1), 38.
- WHO. Air quality, energy and health. World Health Organization (2024). <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/>
- White, S. A., & Dillon, M. E. (2023). Climate warming and bumble bee declines: the need to consider sub-lethal heat, carry-over effects, and colony compensation. Frontiers in Physiology, 14, 1251235.
- Whitehorn, J., & Yacoub, S. (2019). Global warming and arboviral infections. Clinical Medicine, 19(2), 149-152.
- WWF. (2015). İklim Değişikliğinin Türler Üzerindeki Etkisi. https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/iklim_degisikliginin_turler_uzerindeki_etkisi_raporu_1.pdf
- van Huis, A. (2014). The global impact of insects. Wageningen University, Wageningen UR.
- Yörük, A. & Şahiner, N. (2013). Küresel ısınmanın balarılarını üzerine olası etkileri. Uludağ Arıcılık Dergisi, 13(2), 79-87.

GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE OKSİYANMA VE KARBON EMİSYONU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Halit ARAT¹, Oğuzhan ERBAŞ²

1. GİRİŞ

Enerji, gelişmekte olan ülkeler için toplumun refahını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Ülkeler güvenli, yeterli, uygun fiyatlı ve temiz bir enerji tedariki sağlayarak sosyal ve ekonomik sorunları iyileştirmiştir. Bu doğrultuda, ülkelerin enerji kaynaklarını ortaya çıkarma, çeşitlendirme ve sürekliliğini sağlama çabaları geçmişte olduğu gibi giderek artan bir seyir izlemektedir (Erbaş and Arat 2021). Sanayi, ısıtma ve elektrik üretimi için yerli enerji kaynaklarının kullanımını artırmak, ülkelerin artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için elzemdir. Çünkü ekonomi ve enerji güvenliği, enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında ön plana çıkmaktadır. Enerji ithal eden ülkelerin cari açığının büyük bir kısmında ithal edilen enerjinin etkisi dikkate alınmalıdır. Kapsamlı, pratik ve sürdürülebilir bir plan çerçevesinde, çevresel dezavantajları azaltırken yerel enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilerek artırılmalıdır.

Günden günde farklı sektörlerde kullanılan karbon bazlı yakıtlar nedeniyle sera gazı salımını artmakta ve çözülmesi gereken acil bir sorun olarak tüm dünyayı etkilemektedir. Dahası, CO₂ emisyonlarının 2050 yılına kadar şu anki seviyelerinden daha yüksek değerlere ulaşacağı öngörülmektedir (Nemitallah et al. 2017). Avrupa Birliği (AB) ülkeleri, 2050 yılına kadar karbon nötrlüğüne ulaşmak için sağlam planları sürekli olarak uygulayarak kararlı ve kesin kararlar almışlardır. AB, 1990'dan bu yana sera gazı emisyonlarını kademeli olarak azaltmış ve 2023'teki net emisyonlar 1990'dakinden %37 daha düşük olarak gerçekleşmiştir. AB'nin 1990'a göre %55 net azalma ve 2050'ye kadar iklim nötrlüğü hedefine ulaşma becerisine olan güven, sera gazı emisyonlarındaki son derece cesaret ve-

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, 0000-0002-6634-2535, halit.arat@dpu.edu.tr

² Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, 0000-0001-9424-4273, oguzhan.erbas@dpu.edu.tr

rici azalma ile güçlenmiştir (European Commission 2024b). CO₂ emisyonlarının, sera gazı emisyonlarının %65'inden fazlasının oluşumundan sorumlu olduğu ve son yıllarda küresel ısınmanın etkilerini ele alarak CO₂ emisyonlarını azaltmak; ekonomik, çevre ve enerji mevzuatları için kritik bir konu olarak değerlendirilmektedir. Ülkelerin politikacıları ve işletmeleri iklim değişikliği ve ekolojik felaketlerin yarattığı endişeler nedeniyle, özellikle CO₂ emisyonları olmak üzere, atmosfere salınan insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması yönünde çalışmalar yapmak zorunda kalmışlardır (Zieliński et al. 2023). Bununla birlikte, bu sorunun çözümü için ülkeler karbon salınımını azaltan sistemlerin teşvik edilmesi, kullanılması ve daha verimli hale getirilmesi konularında düzenlemeler yapmaktadırlar (Arat and Erbaş 2023). Avrupa Birliğinin, AB'ye giren karbon yoğun malların üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarına adil bir fiyat belirleme ve AB dışındaki ülkelerde daha temiz endüstriyel çıktıları teşvik etme aracı Karbon Sınır Ayarlama Mekanizması (CBAM)'dır (European Commission 2024a).

Yürürlüğe konulan sistemlerle karbon salınımları izlenmekte ve bunlara göre hedefe ulaşma konusu değerlendirilmektedir. Avrupa Birliği ülkelerinin son on yıldaki karbondioksit emisyon değerlerini değişimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Avrupa Birliği son on yıldaki karbondioksit emisyon değerlerini değişimi (Statista 2024).

Şekil 1 incelendiğinde, AB'nin karbondioksit emisyon değerlerinin son on yılda dalgalı bir seyir izlediği ancak genel eğilimin azalma yönünde olduğu görülmektedir. 2020 pandemi dönemindeki düşüşü bir kenara bırakılırsa son beş yıldır düşüş gerçekleşmiştir. 2014 yılında 2981,4 milyon ton olan CO₂ emisyonları 2017 yılına kadar sürekli bir artış göstererek 2017 yılında 3117 milyon ton değerine ulaşmıştır. Küresel pandemi nedeniyle belirli dönemlerde durma noktasına gelen sektörler nedeniyle yaşanan düşüş ile 2020 yılında 2564 milyon ton olarak ölçülürken 2023 yılındaki emisyonlar bu değer de altında en düşük seviye olan 2517,6 milyon ton CO₂ emisyonu değeri elde edilmiştir. Ülkemizin 2015-2021 yılları arasındaki CO₂ emisyon değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ülkemizin 2015-2021 yılları arasındaki CO₂ emisyon değerleri (TÜİK 2023)

YIL	CO ₂ EMİSYONU (milyon ton)
2015	384,9
2016	406,0
2017	430,9
2018	422,1
2019	402,7
2020	412,9
2021	452,7

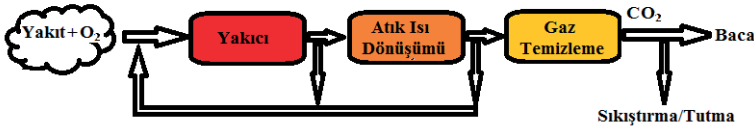
Tablo 1 incelendiğinde, ülkemizin 2015-2021 yılları arasındaki CO₂ emisyon değerleri dalgalı bir seyir izlemekle beraber 2015 yılından 2017 yılına kadar sürekli artmıştır. Bu yıldan itibaren 2019 yılına kadar düşmüş ardından 2021 yılında en yüksek değer olan 452,7 milyon ton CO₂ seviyesine ulaşmıştır. Bununla birlikte, 2021 yılında toplam CO₂ emisyonlarının %32,7'si elektrik ve ısı üretiminden olmak üzere %85,2'si enerji sektöründen, %14,5'i endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektöründen, %0,3'ü ise tarım ve atık sektörlerinden kaynaklanmıştır (TÜİK 2023). Anlaşılacağı üzere enerji sektörünün karbon emisyonları üzerindeki etkisi oldukça yüksektir. Özellikle bu sektörlerde enerjinin verimli kullanılması ve mevcut sistemlerde iyileştirmeler yapılarak karbon emisyonlarının azaltılması büyük önem arz etmektedir.

Karbonun (CO₂ olarak) yakıt yanmasından önce mi yoksa sonra mı çıkarıldığına bağlı olarak, CO₂ yakalama teknolojileri genellikle ön yanma veya son yanma sistemleri olarak kategorize edilir. CO₂ yakalama cihazı gerektirmeyen ve işlem sırasında karbonu gaz akışından ayırmayan üçüncü bir yöntem oksijen-yakıt veya oksijenlenme denir. Bazı endüstriyel süreçler oksijenlenme sistemini kullansa da (cam ve metal sektörleri gibi), bu fikir hala geliştirmenin erken aşamalarında ve henüz elektrik santrali

operasyonlarında ticari olarak kullanılması yönünde çalışmalar devam etmektedir (Rubin et al. 2012).

Güç ve ısı üretimi gibi sistemlerinde meydana gelen CO₂ emisyonlarını azaltmak için kullanılan en umut verici yöntemlerden biri (oksijen-yakıt) oksiyandır. Oksi-yakıt yanması, yakıtın hava yerine oksijen ve geri dönüştürülmüş baca gazı (çoğunlukla CO₂ ve H₂O) karışımı içinde yakılmasıyla saflaştırma ve sıkıştırmanın ardından ayırma için hazırlanan, CO₂ açısından zengin bir baca gazı akımı üretmektedir (Fujimori and Yamada 2013). Oksiyandırma sistemleri, ister katı (Yan et al. 2011) yakıtlı ister gaz (Mletzko, Ehlers, and Kather 2016) yakıtlı olsun güç üretim santrallerine uygulanabilmektedir. Öte yandan, sıvı yakıtlı sistemler içinde çalışmalar yürütülmektedir. Wohlthan vd. (Wohlthan et al. 2024) gemilerde oksi-yakıt yakma yöntemiyle karbon yakalamanın tekno-ekonomik potansiyeli incelemişlerdir. Oksi-yakıt konsepti, oksijen açısından zengin bir atmosferde yanma yoluyla karbondioksit ve su karışımı üretmekte ve karbondioksit açısından zengin gaz, su yoğunlaştığında hemen gemide depolanabilmektedir. Sıvı oksijen yakıt ikmali ve gemide hava ayırma için farklı sistemler, gemide oksijen dağıtımını için araştırdıkları konular arasındadır (Wohlthan et al. 2024).

Oksiyandırma işleminin genel şeması Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, oksijen yakıtlı yanma prosesinde yakıtı yakmak için genellikle en az %95 saflıkta geri kazanılmış baca gazı ve oksijen karışımı kullanılır. Baca gazının geri dönüştürülmesi, esas olarak CO₂ ve sudan oluşan ve gaz akışından CO₂ çıkarılmadan izole edilebilen bir gaz üretmektedir. Yakıcıdan ısıyı aktarmak için yeterli gaz olduğundan emin olmak için geri dönüştürülmüş baca gazı alev sıcaklığını düzenlemek ve eksik N₂ hacmini doldurmak için kullanılmaktadır (Buhre et al. 2005).



Şekil 2. Oksiyandırma işleminin genel şeması (Buhre et al. 2005).

Oksijen yakıtlı yanmada, baca gazı yeniden yakıcıda dolaştırılır ve alev sıcaklığını düşürmek için oksijenle karıştırılır ve böylece ısıyla meydana gelen ısı transferi azaltılır. Oksijen yakıtlı yanmanın özellikleri, yanmanın hava yerine CO₂/O₂ atmosferinde gerçekleşmesi ve büyük miktarda baca gazının yeniden dolaştırılmasıyla meydana gelmektedir. Normal şartlarda yanma işlemi ortam havası ile yapılmakta olup buradaki

oksijen miktarı %21 oranındadır. Oksijenle yakma işlemi gerçekleştirildiğinde alev yapısı ve yanma karakteristiği önemli ölçüde etkilenmektedir.

Oksijen yakıt teknolojisine ilişkin değerlendirmelerin ve araştırmaların çoğu, CO₂ açısından zengin ve ayrıştırılmaya hazır bir akış sağlamak için kömürle çalışan pülverize yakıt kazanlarının kullanılmasına odaklanmaktadır. Gaz ve petrolle çalışan elektrik santrallerinde kullanımı ile ilgili çalışmalar da literatürde mevcuttur. Kroumian vd. (Kroumian et al. 2025) çimento sektöründe kullanılan fosil kökenli yakıtların yerine geri kazanılmış yakıt, odun ve çamurun oksiyenma sistemiyle yakılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Alternatif yakıtların yanması hem hava hem de oksijen yakıt koşullarında kararlı olduğunu ve alevlerin kömüre kıyasla daha geniş, daha uzun ve daha az yoğun olduğu sonucuna varmışlardır (Kroumian et al. 2025).

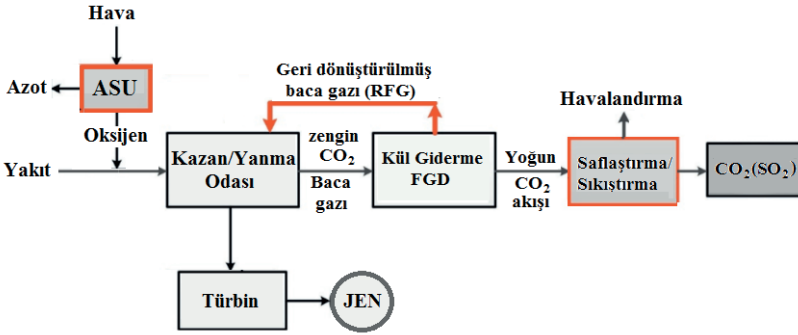
2.GÜÇ ÜRETİM SANTRALLERİNDE OKSİYANMA

Güç santrallerinde kullanılan oksiyenma sistemlerinin birincil amacı, elektrik santralindeki CO₂'i yakalamak için baca gazında yüksek konsantrasyonda CO₂ ve su buharı içeren bir karışım üretmektir. Daha sonra CO₂, düşük sıcaklıkta arıtma ve susuzlaştırma prosedürleri kullanılarak baca gazından ayrılır. Güç üretimi için oksijen yakıtlı yanma işleminin dört bileşeni vardır:

- Yanma için oksijen üretimi sağlayan hava ayırma ünitesi (ASU)
- Yakıtın yanması ve ısı üretimim için gereken kazan, fırın veya türbin olabilen yanma odası
- Entegre emisyon kontrolü sağlayan baca gazı işleme ünitesi.
- Taşıma ve depolama için CO₂ üreten işleme ünitesi (CPU).

Oksijen kullanan büyük endüstriyel tesislerden bazılarının kine benzer bir ölçekte tesis için hava ayırma ünitesi, yakıt tesisine sürekli olarak büyük miktarda oksijen sağlamak zorundadır. En büyük tek üniteler günde 4000 t/g'den fazla oksijen ürettiğinden, kriyojenik hava ayırma, bu kadar büyük ölçeklerde oksijen üretmek için kullanılan endüstriyel bir teknik olup cam, çelik ve kimyasal üretim gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Oksijen yakıtlı yanma için nispeten düşük saflıkta oksijen (>%95) kullanılabilirken, kriyojenik hava ayırma da oldukça enerji yoğun bir işlemdir ve tesis için en önemli dezavantajı tesisin güç çıkışının %10-15'ini kullanmasıdır (Lockwood 2014). Geri dönüşüm akımları çıkarıldıktan sonra, kalan baca gazı bir sıkıştırma ve arıtma ünitesine (CPU) beslenir, bu ünite onu saf bir CO₂ ürününe dönüştürür ve boru hattı geçişi için yoğun bir faza sıkıştırır. Oksi-yakıt yanmasından çıkan baca gazları en az %65 CO₂'ye (ıslak bazda) zenginleştirilmektedir (Lockwood 2014).

Kömür yakıtlı termik santrallerde oksijen yakıtlı yanmanın etki faktörleri başlıca yanma, emisyonlar ve kazan performansı olarak sıralanmaktadır. Yanma faktörü; alev kararlılığı, O_2/CO_2 'de alev yayılımı, daha düşük gaz hacmi nedeniyle daha düşük hız, kızdırma kaybı ve alev sıcaklığı ile ilişkilidir. Öte yandan, meydana gelen NO_x emisyonlarını azaltma ve yeniden yakma ile ve SO_x emisyonları yeniden dolaşımına zenginleştirme, SO_3 dönüşümü ve kül birikimi olarak gerçekleşmektedir. Kazan performansı faktörü ise ısı transferi, dayanıklılık ve güvenlik gibi parametrelerden etkilenmektedir (Fujimori and Yamada 2013). Güç üretim santralleri için oksijenleme sistemi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Güç üretim santralleri için oksijenleme sistemi (Cruz et al. 2020; Wall et al. 2009).

Şekil 3 incelendiğinde, hava ayırma ünitesinden elde edilen oksijen katı veya sıvı yakıtla birleşerek buharlı güç santrallerinde kazanda gaz türbinli santrallerde ise yanma odasında yanmaktadır. Elde edilen ısı enerjisi türbinde mekanik enerjiye oradan da jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülerek güç üretimi sağlanmaktadır. Kazan veya yanma odasından çıkan baca gazı kül giderme/FGD sistemiyle dönüştürülen baca gazının yeniden kazana gönderilerek yakılması sağlanmaktadır. Öte yandan kalan yoğun CO_2 saflaştırma/sıkıştırma işlemiyle emisyonlara ve havalandırma ile dış ortama atılmaktadır. Normal şartlarda yanma işlemi ortam havası ile yapılmakta olup buradaki oksijen miktarı %21 oranındadır. Oksijenle yakma işlemi gerçekleştirildiğinde alev yapısı ve yanma karakteristiği önemli ölçüde etkilenmektedir. Hava ve oksijen ile yanmada yanma odasındaki ve baca gazındaki gazların karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hava ve oksijen ile yanmada yanma odasındaki ve baca gazındaki gazların karşılaştırılması (Robert M Davidson 2010).

		Hava ile Yanma (%)	Oksiyanma (%)
Yanma Odası	O ₂	21	21–30
	N ₂	79	0–10
	CO ₂	0	40–50
	H ₂ O	küçük	10–20
	Diğerleri	–	NO _x , SO ₂
Baca Gazı	O ₂	3–4	3–4
	N ₂	70–75	0–10
	CO ₂	12–14	60–70
	H ₂ O	10–15	20–25
	Diğerleri	NO _x , SO ₂	NO _x , SO ₂

Tablo 2 incelendiğinde, yanma odasında hava ile yanmada O₂ ve N₂ içerikleri sırasıyla %21 ve %79 iken oksiyanda bu oranlar sırasıyla %21-30 ve %0-10 aralığındadır. Bununla birlikte, hava ile yanmada CO₂ içeriği bulunmazken oksiyanda bu değer %40-50 aralığına ulaşmaktadır. Öte yandan, baca gazında O₂ değerleri hava ve oksijen ile yanmada aynı değere (%3-4) sahipken N₂ değerleri sırasıyla %70-75 ile %0-10 aralığında ve CO₂ değerleri ise sırasıyla %12-14 ile %60-70 aralığında bulunmaktadır. Tüm su buharının yoğunlaşmasından sonra net baca gazı, kömür türüne, fazla oksijene, kaçak havaya ve kullanılan baca gazı işleme yöntemine bağlı olarak herhangi bir kömürle çalışan oksijen yakıtlı kazan için tipik olarak yaklaşık %80-95 (db) CO₂ içerebilir (Robert M Davidson 2010).

Stanger vd. (Stanger et al. 2015) yaptıkları çalışmada güç üretim sistemleri için kullanılan pülverize yakma, akışkan yataklı yakma sistemi ve gaz türbinli sistem olmak üzere üç farklı teknoloji grubunda oksiyanda teknolojilerini incelemişlerdir. Oksi-pülverize sistemi brülör tasarımını ve çalışmasını etkilemiş, geri dönüştürülmüş baca gazı ve O₂ enjeksiyonu oranı hem karmaşıklık hem de alev aerodinamiği, tutuşma ve fırın ısı transferini kontrol etmede esneklik fırsatı sağladığını ortaya koymuşlardır. Öte yandan, akışkan yataklarda oksijenle yakma sisteminin pülverize yakıt yakmaya göre daha az ilgi gördüğünü ancak yeni bir brülör tasarımı gerektirmemesi, düşük yanma sıcaklığı sebebiyle düşük NO_x emisyonlu olması ve daha yüksek O₂ konsantrasyonu ile çok farklı kalitedeki yakıtların yakılabilmesi gibi avantajlara sahip olduğunu vurgulamışlardır. Bununla birlikte, gaz türbini uygulamaları için oksijen yakıtlı yanma sistemleri diğer güç üretim sistemlerine göre daha yaygın bir şekilde çalışılmakta olup yanma ve türbin giriş sıcaklığını kontrol etmek için içten yanma ile su veya CO₂'nin yeniden dolaşımını kullanan farklı çevrimlerin olduğunu göstermişlerdir (Stanger et al. 2015).

Neshumayev vd. (Neshumayev, Baqain, and Konist 2024) yaptıkları deneysel çalışmada yarı kömürün hava ve O_2/CO_2 ortamlarında yanma davranışını araştırmışlardır. Çalışmalarını yarı kömür yakma deneyleri hem havada hem de oksijen açısından zengin ortamlarda (%21 ve %30 O_2/CO_2) Tallinn Teknoloji Üniversitesi Enerji Teknolojisi Bölümü'ndeki 60 kWth'lik sirküle akışkan yataklı (CFB) bir test tesisinde gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonunda, O_2/CO_2 karışımındaki oksijen içeriğinin %30'a çıkarılması durumunda ısı salınımının dağıtıldığını ve yükselticinin alt kısmındaki sıcaklık değerlerinin arttığını ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte hava yanma modlarında, $800^\circ C$ 'nin altındaki sıcaklıklarda, karbonatların termal ayrışması meydana gelmediğini ve harici ısı değiştiricisindeki serbest kireç (CaO_{free}) içeriğinin %3 olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, $800^\circ C$ 'den yüksek sıcaklıklarda, karbonatların büyük miktarının termal olarak ayrıştığını ve CaO_{free} içeriğinin %18'e yükseldiğini gözlemlemişlerdir (Neshumayev, Baqain, and Konist 2024).

Baqain vd. (Baqain, Neshumayev, and Konist 2023) Estonya'nın güç üretiminin bir kısmı termik santrallerde yağlı şist yakıldığından hava ve oksijen yakıtlı yanma ortamları için kalsiyum açısından zengin petrol şistin yanmasını araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneyler, %21 ila %52 hacim aralığında giriş O_2 'nin geri dönüştürülmüş baca gazı (RFG) modları ve %50 ve %87 RFG ile hava, O_2/CO_2 ve O_2 altında 60 kWth sirküle akışkan yataklı (CFB) bir test ünitesinde gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, megajoule başına NO_x konsantrasyonlarının O_2/RFG modunda %22 ve O_2/CO_2 modunda hava yanmasına kıyasla %14 azaldığını gözlemlemişlerdir. $OXY21$ modunda, N_2O emisyonlarının arttığını ve O_2/CO_2 altında, giriş O_2 'sinin %52'ye çıktığında 20 mg/MJ'den 4 mg/MJ'ye önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, NO_x emisyonlarının test edilen tüm koşullarda birincil oksitleyicideki ekstra oksijen miktarının sürekli arttığını bulmuşlardır (Baqain, Neshumayev, and Konist 2023).

Mack vd. (Mack, Maier, and Scheffknecht 2022) Stuttgart Üniversitesi'ndeki Yanma ve Güç Santrali Teknolojisi Enstitüsü'nde ileri etkili ızgara ve duman borulu kazana sahip 240 kWth'lik bir ızgara yakma tesisinde daha yüksek verimlilik için baca gazındaki CO_2 konsantrasyonunu artırmak amacıyla ızgara yakma sistemleri için oksijenleme teknolojisini deneysel olarak uygulamışlardır. Bu doğrultuda, oksijen yakıtlı işletim sırasında kurutulmuş odun yongalarını gaz besleme akımlarındaki oksijen konsantrasyonu ve geri dönüştürülmüş baca gazı ile %30 hacim kuru olarak ayarlamışlardır. Birincil ve ikincil bölge arasındaki oksijen dağılımını %30/%70 ve %40/%60 oranında değiştirerek birincil bölgede artan oksijen konsantrasyonuna sahip %40 kuru hacim oranının etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, yakıcının baca gazı bileşenlerinin

ölçümlerine göre CO emisyon oranının yeterli O₂ seviyeleriyle kontrol edilebildiğini ve yakıt yatağında yapılan sıcaklık ölçümlerine göre, aynı termal güç girişinde oksijen yakıtlı yanma sırasında yakıtın yanmasını önemli ölçüde etkilemeden daha düşük sıcaklıklara ulaşılabilirdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, kurutulmuş odun yongalarının yanması sırasında hava koşullarına kıyasla avantajlı cüruf oluşumu davranışının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir (Mack, Maier, and Scheffknecht 2022).

Yang vd. (Yang et al. 2019) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş odunu oksijen yakıtlı yakma ile atık biyoenerjiyi yeniden kullanmak ve karbon emisyonlarını azaltmak ancak yakıt özelliklerindeki ve yanma koşullarındaki değişiklikler nedeniyle kül birikimini belirlemek amacıyla 250 kW'lık pilot ölçekli bir fırında ve referans olarak EI Cerrejon kömür yakmada kül birikimi deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, tam ölçekli kazanlara benzer koşullar altında geri dönüştürülmüş odunun pilot ölçekli fırındaki EI Cerrejon kömüründen önemli ölçüde daha yüksek bir birikme oranına sahip olmasına rağmen yeni atık yakıt sayısal olarak kömürden daha düşük bir birikme oranına sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, oksijen yanma koşulunun kül birikimi üzerindeki etkisi, pilot ölçekli fırın ile tam ölçekli kazanlardaki yüksek hızlar arasında farklılık gösterdiğini oksijen-yakıt koşulu altında baca gazı hızındaki azalma nedeniyle hem parçacık Stokes sayısı hem de parçacık kinetik enerjisi azaldığını ortaya koymuşlardır (Yang et al. 2019).

Biyokütle ve atıkların oksijen yanma işlemine tabi tutulmasıyla birlikte son dönemde farklı karışım yakıtların ve sistemlerin kullanılmasıyla da güç üretimi üzerine çalışmalar mevcuttur. Jeddizahed vd. (Jeddizahed, Webley, and Hughes 2024) yaptıkları çalışmada oksijen ihtiyacı bir hava ayırma ünitesi (ASU) ve elektrolizörün bir kombinasyonu ile karşılanan NET Sıfır Döngüsünün (NZC) alkali elektrolizörler tarafından hidrojen üretimiyle entegre edilmesinin potansiyelini Aspen Plus programı yardımıyla araştırmışlardır. Sistem verimliliğini artırmak için yanma odası çıkış sıcaklığı (COT), türbin çıkış basıncı (TOP) ve yanma odası çıkış basıncı (COP) gibi temel parametrelerin çevrimin enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda; TOP, COT ve elektrolizör giriş gücünün çevrimin enerji verimi üzerinde sırasıyla %5,7, %4,0 ve %2,6 aralığında daha önemli bir etkiye sahip olduğunu, COP'nin ise çevrim verimliliğinde yalnızca %0,4'lük bir değişime neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, entegre sistemin %62,5'lik enerji ve %60,6'lık ekserji verimine sahip olduğunu bulmuşlardır (Jeddizahed, Webley, and Hughes 2024). Diğer bir çalışmada Li ve Jinxi (Li and Jinxi 2023) yaptıkları çalışmada tarımsal atıklardan üretilen depolama gazının (LFG: %50-Metan,%45-Karbondioksit ve %5-Azot) oksijen yakıtlı yakılması ve proton değişim membranı (PEM) elektrolizörü yoluyla metanol, oksijen

ve elektriğin eş zamanlı üretimi için yeni bir sistemi ortaya koymuşlardır. Çalışma sonunda, önerilen bu sistemin enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %75,58 ve %86,1 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, LFG yanması için oksijen kullanımının gaz kompresörlerindeki enerji tüketimini azalttığını ve enerji verimliliğini arttırdığını bununla birlikte sistemin CO₂ emisyonunun negatif olduğunu ortaya koymuşlardır (Li and Jinxi 2023).

Yanma prosesi için kurulan deney düzenekleri ile mevcut sistemler üzerinde yapılan deneyler oldukça maliyetli olduğundan oksijen yanma modellemesi için gerçeğe yakın sonuçlar veren hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımları kullanılmaktadır. Al-Abbas vd. (Al-Abbas, Naser, and Dodds 2011) pülverize kuru linyitin hava ateşlemeli ve üç farklı oksijen-yakıt yanma ortamı (%25 hacim O₂ konsantrasyonu (OF25), %27 hacim O₂ konsantrasyonu (OF27) ve %29 hacim O₂ konsantrasyonu (OF29) olmak üzere dört farklı durumda yanmasını sayısal olarak modellemişlerdir. CFD çalışmalarını doğrulamak için laboratuvar ölçekli 100 KW ateşlemeli linyit ünitesinden (Chalmer fırını) elde edilen deneysel sonuçları kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, OF25 durumunun alev sıcaklığı dağılımlarının ve O₂ tüketimlerinin referans yanma durumuna yaklaşık olarak benzer olduğunu öte yandan, OF27 ve OF29 yanma durumlarında, alev sıcaklıklarının daha yüksek ve brülör çıkış düzleminin en yakın bölgesinde daha sınırlı olduğunu ortaya koymuşlardır (Al-Abbas, Naser, and Dodds 2011). Krieger vd. (Krieger et al. 2015) ise yaptıkları çalışmada güç üretiminde kullanılan bir gaz türbininin yanma odasında oksijen-yanma işlemi için propan/oksi-yakıt ve sentez gazı/oksi-yakıt yanmasını sayısal olarak modellemişlerdir. Çalışma sonunda, propan/oksi-yakıt alevinin, yanma odasının merkezi çekirdeğinde, birincil bölgeden çıkış nozuluna kadar uzanan çok daha yüksek sıcaklık seviyeleriyle, temel duruma (propan/hava) benzediğini öte yandan, sentez gazı/oksi-yakıt durumu için en yüksek yakıt dönüşümünün ilk seyreltme deliklerinin yukarı akışında birincil bölgede gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir (Krieger et al. 2015).

Oksijen yanmada meydana gelen emisyonların tahmin edilmesinde yapay zeka modelleri de kullanılmaktadır. Krzywanski vd. (Krzywanski et al. 2022) Polonya'daki Czestochowa Teknoloji Üniversitesi'nde faaliyet gösteren 5 kW_{th}'lik test cihazında kömür ve biyokütle yanmasından kaynaklanan baca gazlarındaki CO₂, CO, NO_x, N₂O ve SO_x emisyonları deneysel olarak ölçüp bu değerleri tahmin etmek için de yapay zeka yöntemlerinden biri olan bulanık mantık temelli yeni bir yaklaşımı ortaya koymuşlardır. Parametrik olarak ele aldıkları çalışmada simülasyonlar, hava ateşlemeli, oksijen yakıtlı, yerinde gazlaştırma kimyasal döngülü yanma ve oksijen ayırmalı kimyasal döngü gibi farklı yanma ortamları kullanmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen modelin gaz kirletici emisyonlarının deneysel verilerle örtüşüğünü ve doğrulama ile tahmin edilen veriler arasındaki maksimum

bağlı hatanın %8'den düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, yapay zeka yöntemlerinden biri olan Bulanık mantık, karmaşık sistemleri ve ortamlarını simüle etmek için uygun, yüksek potansiyelli bir yaklaşım sağladığı sonucuna varmışlardır (Krzywanski et al. 2022).

Son yıllarda, artan fosil karbon emisyonları artan enerji çıkışıyla güçlü bir şekilde bağlantılıdır. Fosil yakıtlar, çevredeki karbon emisyonları hakkındaki endişelere rağmen büyük olasılıkla çok uzun bir süre birincil enerji kaynağı olmaya devam edecektir. Zamanla iklim felaketlerini önlemek veya azaltmak için üç temel strateji vardır; tüm sektörlerde yüksek enerji verimliliğini sağlamak, düşük fosil karbon emisyonlu yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın olarak benimsenmesi ve karbon yakalama/tutma sistemlerin yaygınlaştırılması (Huisingh et al. 2015). Karbon azaltma sistemlerini pahalı olması ve muhtemel sınırlı etkileri sebebiyle karbon emisyonlarının azaltılması yönünde yapılacak en kapsamlı çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılarak mevcut sistemlerin yüksek verimli olarak işletilmesi üzerine gerçekleştirilmelidir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Gelişmekte olan ülkelerdeki toplumların refahı üzerinde doğrudan etkisi olan birincil unsurlardan biri enerjidir. Ülkelerin artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için, üretim, ısıtma ve elektrik üretimi için daha fazla yerli enerji kaynağı kullanılmalıdır. Çünkü dış enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltmak öncelikle bir ekonomi ve enerji güvenliği meselesidir. Kapsamlı, gerçekçi ve sürdürülebilir bir planın parçası olarak, yerli enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmeli ve genişletilmeli ve çevresel dezavantajlar azaltılmalıdır.

Sera gazı emisyonları, birçok endüstride karbon bazlı yakıtların kullanımını sonucunda her geçen gün artmaktadır ve ele alınması gereken küresel bir sorundur. CO₂ emisyonları sera gazı emisyonlarının çoğunluğunu oluşturur ve son yıllarda, küresel ısınmanın etkilerini ele alırken CO₂ emisyonlarını azaltmak ekonomik, çevresel ve enerji mevzuatında önemli bir konu olarak görülmüştür. CO₂ yakalama teknolojileri, karbonun yakıt yanmasından önce mi yoksa sonra mı çıkarıldığına bağlı olarak genellikle yanma öncesi veya yanma sonrası sistemler olarak sınıflandırılır. Oksi-yakıt veya oksijenleme, gaz akışından karbonun çıkarılmasını gerektirmeyen ve bir CO₂ yakalama ekipmanı gerektirmeyen üçüncü bir tekniktir. Oksijenleme bazı endüstriyel proseslerde (cam ve metal endüstrilerindeki gibi) kullanılsa da konsept hala emekleme aşamasındadır ve şu anda elektrik santrali operasyonlarında ticari kullanım için araştırılmaktadır. Bu çalışmada güç üretim istemlerinde kullanılan oksijenleme sistemleri incelenmiştir. Sıvı yakıtlı, biyokütle ve kömür gibi farklı yakıtların kullanıldığı oksijenleme üniteleriyle ilgili çalışmalar ortaya koyulmuştur. Bununla bir-

likte, atıkların oksiyenma işlemine tabi tutulmasıyla birlikte son dönemde farklı karışım yakıtların ve sistemlerin kullanılmasıyla da güç üretimi üzerine çalışmalar ele alınmıştır. Ayrıca, yanma süreci için geliştirilen deney setleri ve mevcut sistemler üzerinde yapılan incelemeler oldukça pahalı olduğundan, oksiyenma modellemesi gerçekçi bulgular üreten hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımlarını kullanılan çalışmalar ile yapay zeka destekli araştırmalar da ortaya koyulmuştur.

Yapılan çalışmalar, oksiyenma işleminin alevin soğutulabileceğini ve N_2 veya CO_2 yerine fazla oksijen yanma işlemi kullanılarak brülörde geleneksel bir momentumun korunabileceğini göstermiş ayrıca, yakıcı duvarındaki ısı akışının azalmasına ve daha yüksek yanma verimliliğine ek olarak, aşırı stokiyometrik koşullar altında sıcaklık profilinde bir azalma olduğunu ortaya koymuştur (Kroumian, Maier, and Scheffknecht 2024). Oksiyenma teknolojisinin gelecekteki enerji döngüsünde tekno-ekonomik ve maliyet analizini sağlayarak karbon yakalama aracı olarak çok yaygın bir kullanıma sahip olması beklenmektedir (Bazooyar and Jomekian 2024). Öte yandan, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik en kapsamlı çaba, karbon azaltım teknolojilerinin maliyeti ve potansiyel sınırlı etkileri göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve mevcut sistemlerin mümkün olduğunca verimli bir şekilde çalıştırılması yoluyla gerçekleştirilmesidir.

KAYNAKLAR

- Al-Abbas, Audai Hussein, Jamal Naser, and David Dodds. 2011. "CFD Modelling of Air-Fired and Oxy-Fuel Combustion of Lignite in a 100 KW Furnace." *Fuel* 90(5).
- Arat, Halit, and Oğuzhan Erbaş. 2023. "Buhar Kazanlarında Enerji Dengesi İle Performans Test Yöntemi Uygulaması ve Parametreler." In *Fen ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Gelişmeler*, , 29–44.
- Baqain, Mais, Dmitri Neshumayev, and Alar Konist. 2023. "NO_x and N₂O Emissions from Ca-Rich Fuel Conversion in Oxyfuel Circulating Fluidized Bed Combustion." *Thermal Science and Engineering Progress* 42.
- Bazooyar, Bahamin, and Abolfazl Jomekian. 2024. "Chapter Twenty-One - Oxy-fuel Combustion as a Carbon Capture Technique." In *Advances and Technology Development in Greenhouse Gases: Emission, Capture and Conversion*, , 437–95.
- Buhre, B. J.P. et al. 2005. "Oxy-Fuel Combustion Technology for Coal-Fired Power Generation." *Progress in Energy and Combustion Science* 31(4).
- Cruz, Glauber et al. 2020. "Biofuels from Oilseed Fruits Using Different Thermochemical Processes: Opportunities and Challenges." *Biofuels, Bioprocesses and Biorefining* 14(3).
- Erbaş, Oğuzhan, and Halit Arat. 2021. "The Oxy-Fuel Combustion Power Plant Model with Desulphurization Process and The Effect of Different Types of Coal on Operating Parameters." *European Journal of Science and Technology*.
- European Commission. 2024a. "Carbon Border Adjustment Mechanism." https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en.
- . 2024b. "Progress on Climate Action." https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/progress-climate-action_en#:~:text=The EU has steadily decreased,compared to the previous year.
- Fujimori, Toshiro, and Toshihiko Yamada. 2013. "Realization of Oxyfuel Combustion for near Zero Emission Power Generation." *Proceedings of the Combustion Institute* 34(2).
- Huisingh, Donald et al. 2015. "Recent Advances in Carbon Emissions Reduction: Policies, Technologies, Monitoring, Assessment and Modeling." *Journal of Cleaner Production* 103.
- Jeddizahed, Javad, Paul A. Webley, and Thomas J. Hughes. 2024. "Integrating Alkaline Electrolysis with Oxyfuel Combustion for Hydrogen and Electricity Production." *Applied Energy* 361.
- Krieger, G. C. et al. 2015. "Numerical Simulation of Oxy-Fuel Combustion for Gas Turbine Applications." *Applied Thermal Engineering* 78.

- Kroumian, Cynthia et al. 2025. "Evaluation of 100% Alternative Fuel Combustion under Oxyfuel Conditions in a Pilot-Scale Burner for Application in Retrofit Oxyfuel Cement Kiln." *Fuel* 381(Part D).
- Kroumian, Cynthia, Jörg Maier, and Günter Scheffknecht. 2024. "Experimental Evaluation of Rich Oxyfuel Combustion Characteristics in Varying Over-Stoichiometric Conditions." *Fuel* 365.
- Krzywanski, J. et al. 2022. "Gaseous Emissions from Advanced CLC and Oxy-fuel Fluidized Bed Combustion of Coal and Biomass in a Complex Geometry Facility:A Comprehensive Model." *Energy* 251.
- Li, Xiaodong, and Wang Jinxi. 2023. "A Novel Process for the Simultaneous Production of Methanol, Oxygen, and Electricity Using a PEM Electrolyzer and Agricultural-Based Landfill Gas-Fed Oxyfuel Combustion Power Plant." *Energy* 284.
- Lockwood, Toby. 2014. *Developments in Oxyfuel Combustion of Coal*. IEA Clean Coal Centre.
- Mack, A., J. Maier, and G. Scheffknecht. 2022. "Modification of a 240 KWth Grate Incineration System for Oxyfuel Combustion of Wood Chips." *Journal of the Energy Institute* 104.
- Mletzko, Jan, Sören Ehlers, and Alfons Kather. 2016. "Comparison of Natural Gas Combined Cycle Power Plants with Post Combustion and Oxyfuel Technology at Different CO₂ Capture Rates." In *Energy Procedia*.
- Nemitallah, Medhat A. et al. 2017. "Oxy-Fuel Combustion Technology: Current Status, Applications, and Trends." *International Journal of Energy Research* 41(12).
- Neshumayev, Dmitri, Mais Baqain, and Alar Konist. 2024. "The Emissions of NO_x, SO₂, CO and Decomposition of Carbonates during Oxyfuel Combustion of Low Heating Value Semicoke in CFB Pilot Facility." *Fuel* 375.
- Robert M Davidson, Stanley O Santos. 2010. "Oxyfuel Combustion of Pulverised Coal." *International Energy Agency (IEA)* (August).
- Rubin, Edward S. et al. 2012. "The Outlook for Improved Carbon Capture Technology." *Progress in Energy and Combustion Science* 38(5).
- Stanger, Rohan et al. 2015. "Oxyfuel Combustion for CO₂ Capture in Power Plants." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40.
- Statista. 2024. "AB Karbondioksit Emisyonları." <https://www.statista.com/statistics/450017/CO2-emissions-europe-eurasia/>.
- TÜİK. 2023. "Sera Gazı Emisyon İstatistikleri." <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672&dil=1>.
- Wall, Terry et al. 2009. "An Overview on Oxyfuel Coal Combustion-State of the Art Research and Technology Development." *Chemical Engineering Research and Design* 87(8).

- Wohltham, Michael et al. 2024. "Oxyfuel Combustion Based Carbon Capture On-board Ships." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 137.
- Yan, Jinying et al. 2011. "Flue Gas Cleaning for CO₂ Capture from Coal-Fired Oxyfuel Combustion Power Generation." In *Energy Procedia*,.
- Yang, Xin et al. 2019. "Understanding the Effects of Oxyfuel Combustion and Furnace Scale on Biomass Ash Deposition." *Fuel* 247.
- Zieliński, Marcin, Marcin Dębowski, Joanna Kazimierowicz, and Izabela Świca. 2023. "Microalgal Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Utilization from the European Union Perspective." *Energies* 16(3).

PYTHON PROGRAMLAMA DİLİNİN KİMYA BİLİMİNDEKİ UYGULAMALARI

Mehmet Sadrettin ZEYBEK¹

1. Giriş

Fen ve doğa bilimlerinin ana kollarından biri olan kimya, maddenin en küçük yapı taşı olan atom ve atom altı parçacıklardan başlayarak bu taneciklerin arasındaki bağları ve aralarındaki etkileşimi inceleyen bir bilim dalıdır. Geleneksel olarak araştırmalar, laboratuvar koşullarında yürütülür. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde karmaşık kimyasal etkileşimlerin model denklemlerinin çıkarılması ve simülasyonları yapılması, büyük veri setlerinin analizleri ve yeni moleküllerin tasarımı için bilgisayar destekli hesaplamalı kimya yöntemleri önem kazanmıştır.

İlk dönemlerde bilgisayar destekli hesaplamalı kimya yöntemleri deney sonuçlarını desteklemek ve açıklamak için kullanılırken, son dönemlerde yeni bilimsel veriler üreten, deneysel çalışmalara yön veren, maddenin yapısını ve etkileşimlerini çok daha kolay ve hızlı bir şekilde yorumlanabilmesine imkan sağlamıştır. Örneğin etkinliği yüksek modern ilaçların keşfedilmesi bu yöntemlerle mümkün hale gelmiştir [1].

Literatürde hesaplamalı kimya ve uygulamaları ile ilgili birçok çalışma bulmak mümkündür. Örneğin, V. Pande ve T. Martinez'in ekibi, kuantum dinamik simülasyonlar kullanılarak yaşamın erken dönemlerini simüle eden ab initio nanoreaktör geliştirilmiştir [2].

Yapılan çalışmalar ışığında, Python programlama dili, hesaplamalı kimya ve uygulamaları konusunda araştırmacılar ve endüstride profesyonel olarak çalışanlar için önemli bir araç olarak değerlendirilebilir. Açık kaynak kodlarına sahip olması, geniş kütüphanelere sahip olması ve kullanıcı dostu özellikleri ile kimyasal hesaplamaları, veri analizini ve yapay zeka uygulamalarının kolaylıkla gerçekleştirilebileceği bir platform olarak öne çıkmaktadır.

1 Dr. Öğretim Üyesi, Manisa Celâl Bayar Üniversitesi/Turgutlu Meslek Yüksekokulu/Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü/Endüstriyel Cam ve Seramik Programı, 0000-0002-4753-1226, sadrettin.zeybek@cbu.edu.tr

Python programlama dili ile hesaplamalı kimyanın kullanım alanları oldukça geniştir. Kimyasal reaksiyonların kinetik hesaplamalarından moleküler modellemeye, spektral veri analizinden yapay zeka destekli moleküllerin tasarımına kadar bir çok uygulamada etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu hesaplamalarda Python programlama dilinin güçlü kütüphanelerinin rolü çok büyüktür. Örneğin RDKit[3] ve Open Babel[4] gibi kimyasal bilgi işleme dayalı kütüphaneleri yardımıyla molekülleri analiz edilebilmesini sağlarken, Numpy[5] ve Pandas[6] gibi genel veri işleme kütüphaneleri, kimyasal veriler üzerinde hızlı ve verimli analizler mümkün olabilmektedir.

Bu bölümde Python programlama dilinin kimyada kullanım alanlarıyla ilgili örneklerin yanında programın olumlu ve olumsuz yönleri tartışılacaktır. Ayrıca gelecekteki potansiyel kullanım alanları konusunda bazı öngörülerde bulunulacaktır. Bu şekilde, Python programlama dilinin kimya bilimine etkisi ve katkısı kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır.

2. Python'un Kimyada Kullanım Alanları

2.1. Kimyada Veri Analizi ve Görselleştirme

Kimya biliminde maddenin özellikleri araştırılırken genellikle deneysel çalışmalar gerçekleştirilir. Bu çalışmalarda özellikle enstrümental yöntemler kullanıldığında büyük miktarlarda veri açığa çıkar. Bu verilerin doğru bir şekilde analizinin yapılması ve anlamlandırılması için çeşitli bilgisayar programlarının desteğine ihtiyaç duyulur. Python, kimyasal veri analizi ve görselleştirilmesi açısından geniş bir araç ve kütüphane ekosistemine sahiptir.

Kimyasal veri setlerinin karmaşık ve çok boyutlu yapısı Python'un Numpy ve Pandas gibi kütüphaneleri aracılığıyla incelenmesi araştırmacılara çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Numpy, yüksek performanslı dizi işlemleri ve matematiksel hesaplamalar için kullanılan bir kütüphanedir. Kimyasal hesaplamalarda, spektral veri analizi, matris manipülasyonu ve temel istatistik hesaplamalarda sıklıkla kullanılır. Pandas kütüphanesi ise kimyasal deneylerden elde edilen verilerin düzenlenmesi temizlenmesi ve istatistik işlemler için oldukça kullanışlıdır. Örneğin bir UV-Vis veya IR spektrumundan alınan ham veriler filtrelenebilir, normalize edilebilir ve istenen formatta düzenlenebilir. Daha sonra spektrum verilerinin analizi yapılarak görsel haline getirilebilir. Şekil 1'de basit ve anlaşılır Python kodları kullanılarak Jupyter Notebook derleyicisi ile bir spektruma ait veriler Şekil 2'de görsel hale getirilmiştir. Matplotlib[7], Seaborn[8] ve Plotly[9] gibi Python kütüphaneleri, kimyasal verilerin etkileyici bir şekilde sunulmasına olanak sağlar[10]. Şekil 3'de polimerik malzemelerin termal analiz sonuçlarının 3

boyutlu görselleştirilmesine ait kodları ve Şekil 4.'te grafiği verilmiştir. Bir reaksiyonun farklı koşullardaki verimini analiz etmek için Seaborn kütüphanesi kullanılabilir. Bu işleme ait Şekil 5.'de örnek kodlar ve görseli Şekil 6.'da verilmiştir. Bu örnekler incelendiğinde Python'un veri analizi ve görselleştirilmesi konusundaki yetenekleri kimyagerlerin ve araştırmacıların daha verimli ve etkili bir şekilde çalışmasına çok büyük destek vereceği görülmektedir.

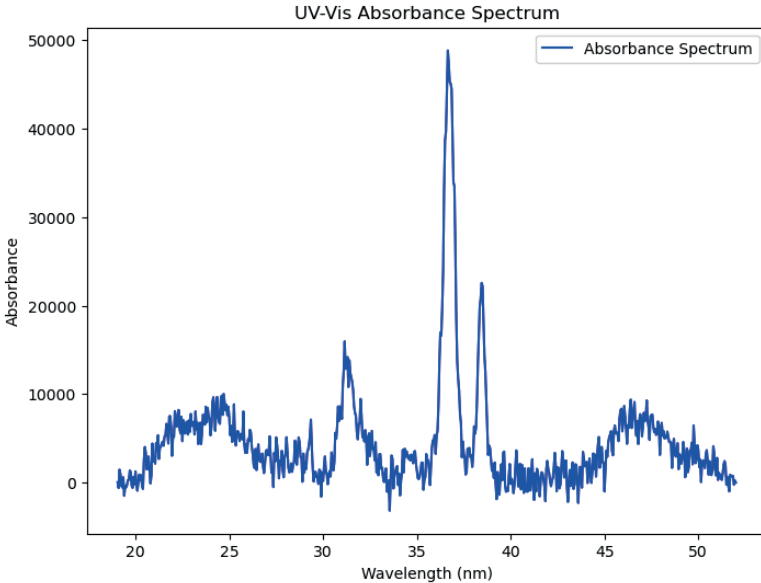
```
# https://datahub.duramat.org/hu/dataset/sample-file-uploads/resource/
# 7df96843-d365-4785-ac0f-90c8cfb2c1e2?view_id=9b7130d7-de30-4113-b47d-79f14a43d10a
# Spektrum verileri yukarıdaki linkten alınmıştır.]

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Spektral veriyi yükleme
data = pd.read_csv("public-spectra-data2.csv")
wavelength = data["19"]
absorbance = data["0"]

# Veriyi görselleştirme
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(wavelength, absorbance, label="Absorbance Spectrum", color="blue")
plt.xlabel("Wavelength (nm)")
plt.ylabel("Absorbance")
plt.title("UV-Vis Absorbance Spectrum")
plt.legend()
plt.show()
```

Şekil 1. Jupyter Notebook kullanılarak Spektrum Verilerinin Görselleştirilmesine ait kodlar



Şekil 2. Jupyter Notebook ile Spektrum Verilerinin Görselleştirilmesi

```

ax = plt.figure().add_subplot(projection='3d')
ax.plot(file.T_EAKPC1, file.TG_EAKPC1, zs=0, zdir='x', label='Q1',color='red', linewidth=2)
ax.plot(file.T_EAKPC2, file.TG_EAKPC2, zs=1, zdir='x', label='Q2',color='blue', linewidth=2)
ax.plot(file.T_EAKPC3, file.TG_EAKPC3, zs=2, zdir='x', label='Q3',color='Green', linewidth=2)
ax.plot(file.T_PP, file.TG_PP, zs=3, zdir='x', label='PP',color='Black', linewidth=2)

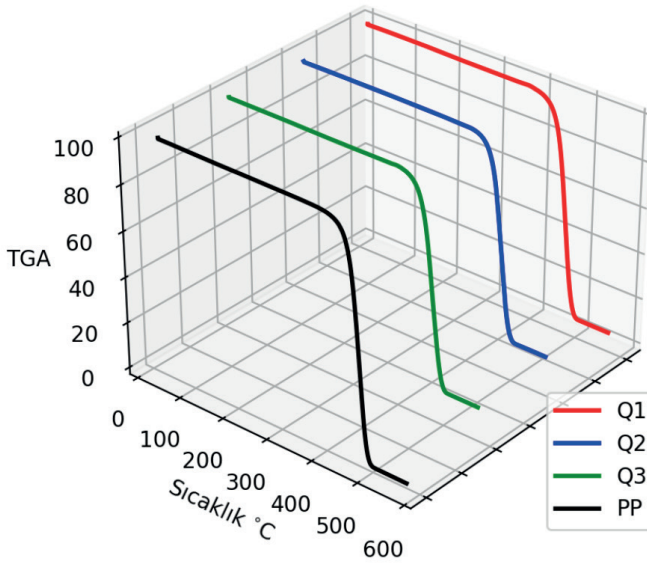
#ax.set_title("Sıcaklık -DTA Grafığı")
ax.set_ylabel("Sıcaklık ${\circ}$C",fontsize=10)
ax.set_zlabel('TGA',fontsize=10)
ax.grid(True)

ax.legend(loc='lower right')
ax.set(xticklabels=[])

ax.view_init(elev=30, azim=40)
plt.savefig('plot_TGA_EAKPC1.png',dpi=200)
plt.show()

```

Şekil 3. Jupyter Notebook ile Termal Analiz Verilerinin Görselleştirilmesine ait kodlar



Şekil 4. Termal Analiz Sonuçlarının 3 Boyutlu Görselleştirilmesi

```

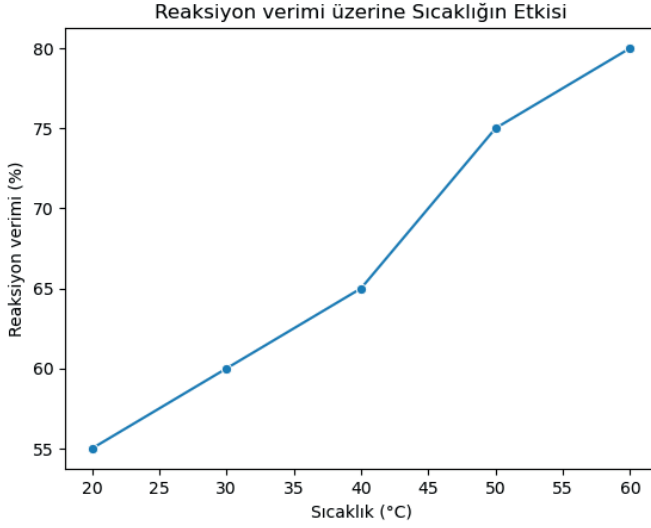
import seaborn as sns

# Örnek veri
reaction_data = pd.DataFrame({
    "Sıcaklık (°C)": [20, 30, 40, 50, 60],
    "Reaksiyon verimi (%)": [55, 60, 65, 75, 80]
})

# Veriyi görselleştirme
sns.lineplot(
    x="Sıcaklık (°C)",
    y="Reaksiyon verimi (%)",
    data=reaction_data,
    marker="o"
)
plt.title("Reaksiyon verimi üzerine Sıcaklığın Etkisi")
plt.show()

```

Şekil 5. Seaborn kütüphanesi kullanılarak Kimyasal Verilerin İşlenmesine Ait Kodlar



Şekil 6. Kimyasal Verilerin Görselleştirilmesine Ait Örnek Grafik

2.2. Kimyada Moleküler Modelleme ve Simülasyon

Moleküllerin yapısını, özelliklerini ve etkileşimlerini araştırmacılar incelemek istediklerinde modelleme ve simülasyon tekniklerinden faydalanırlar. Moleküler modelleme, atom ve moleküllerin davranışı matematiksel model denklemleri kullanılarak bilgisayarda simüle edilerek araştırılmaktadır. Moleküler modellemede, kuantum kimyası ve moleküler dinamik olmak üzere iki temel alanda çalışmalar yapılmaktadır. Bu konuda da Python güçlü açık kaynak kütüphanelere sahiptir. Moleküler yapıları tanımlamak, dönüştürmek ve görselleştirmek için RDKit en popüler kütüphanelerden bir tanesidir. SMILES[11], InChi[12] gibi formatlarda hazırlanan molekül yapılarının RDKit kütüphanesi ile analizi mümkündür. Şekil 7. ve Şekil 8. de örnek moleküllere ait çizimi ile ilgili Python kodları verilmiş olup, görselleri Şekil 9. ve Şekil 10.'da verilmiştir.

```

from rdkit import Chem
from rdkit.Chem import Draw

# Molekül oluşturma
smiles = "CCO"
molecule = Chem.MolFromSmiles(smiles)

# Molekülü çizme
Draw.MolToImage(molecule)

```

Şekil 7. SMILES Kullanılarak Çizilen Bir Moleküle Ait Kodlar

```

from rdkit import Chem
from rdkit.Chem import AllChem
import py3dmol

# Correct SMILES for tannic acid
tannic_acid_smiles =
'C1=CC(=C(C=C1O)OC2C(C(C(C(O2)OC3=CC(=C(C=C3O)O)OC4=CC(=C(C=C4O)O)OC5=CC(=C(C=C5O)O)OC6=CC(=C(C=C6O)O)O'

# Create RDKit molecule object for tannic acid
tannic_acid = Chem.MolFromSmiles(tannic_acid_smiles)

# Add hydrogens (required for 3D modeling)
tannic_acid = Chem.AddHs(tannic_acid)

# Generate 3D coordinates
AllChem.EmbedMolecule(tannic_acid)

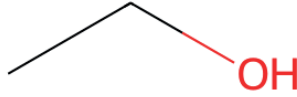
# Optimize the geometry
AllChem.UFFOptimizeMolecule(tannic_acid)

# Generate 3D coordinates in PDB format
mol_block = Chem.MolToPDBBlock(tannic_acid)

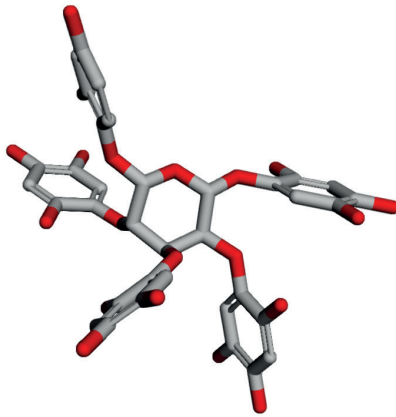
# Visualize using py3dmol
view = py3dmol.view(width=400, height=400)
view.addModel(mol_block, 'pdb')
view.setStyle({'stick': {}})
view.zoomTo()
view.show()

```

Şekil 8. SMILES Kullanılarak Çizilen Tannik Aside Ait Kodlar



Şekil 9. SMILES Kullanılarak Çizilen Molekül



Şekil. 10. SMILES kullanılarak Çizilen Tannik Aside Ait Görsel

Atomik modelleme ve simülasyonlar için yaygın olarak kullanılan bir diğer kütüphane ise ASE (Atomic Simulation Environment)'dir [13]. Bu kütüphane yardımı ile kristal yapılar, enerji hesaplamaları ve moleküler dinamik simülasyonlar yapmak mümkündür. Bir su molekülünün örnek olarak enerji optimizasyonuna ait kaynak kodlar Şekil 11.'de verilmiştir. Elde edilen enerji optimizasyonu verileri ise Tablo 1.'de gösterilmiştir. Bunun yanında moleküler formatlar arasında dönüştürme ve görselleştirilmesinde kullanılan bir diğer kütüphane Open Babel'dir. Kimyasal veri tabanlarından bilgi çekmek için etkili bir araçtır.

PySCF [14] ve Psi4 [15] kütüphaneleri ise kuantum kimyası hesaplamalarında kullanılmaktadır. Molekül orbitallerinin hesaplanması, enerji seviyelerinin ve spektral özelliklerinin analizlerini yapmak mümkündür.

Kimyada moleküler modelleme ve simülasyonların başlıca uygulama alanları, yeni ilaç moleküllerinin tasarımı veya katalizör geliştirilmesi gibi süreçler, aynı zamanda kimyasal reaksiyonların mekanizmalarının aydınlatılması ve araştırılması gelmektedir. Ayrıca moleküler modelleme yeni malzemelerin özelliklerinin ve performanslarının tahminlenmesinde etkin bir metottur. Bu kütüphaneler yardımıyla Protein-ligand etkileşimleri ve biyomoleküler yapıların dinamik koşullarının incelenmesi mümkün hale gelmektedir.

```

from ase import Atoms
from ase.calculators.emt import EMT
from ase.optimize import BFGS

# Su molekülü oluşturma
h2o = Atoms('H2O', positions=((0, 0, 0), (0.76, 0, 0), (-0.76, 0.58, 0)))

# Enerji hesaplayıcıyı ekleme
h2o.calc = EMT()

# Enerji optimizasyonu
optimizer = BFGS(h2o)
optimizer.run(fmax=0.05)

# Optimize edilmiş enerjiyi yazdırma
print("Optimized energy:", h2o.get_potential_energy())

```

Şekil 11. ASE Kullanılarak Su Molekülünün Enerji Optimizasyonu Kodları

Tablo 1. ASE Kullanılarak Su Molekülünün Enerji Optimizasyonu Hesaplama Sonuçları

Step	Time	Energy	Fmax
BFGS: 0	12:30:32	4.419610	12.6998
BFGS: 1	12:30:32	3.341656	2.1916
BFGS: 2	12:30:32	3.250903	1.6504
BFGS: 3	12:30:32	3.203097	1.3722
BFGS: 4	12:30:32	3.182939	0.4598
BFGS: 5	12:30:32	3.171908	0.4628
BFGS: 6	12:30:32	2.880917	2.1654
BFGS: 7	12:30:32	2.461773	5.2295
BFGS: 8	12:30:32	3.209782	13.4461
BFGS: 9	12:30:32	2.068682	0.9953
BFGS: 10	12:30:32	2.000889	0.7838
BFGS: 11	12:30:32	1.942355	1.0548
BFGS: 12	12:30:32	1.928636	0.5628
BFGS: 13	12:30:32	1.913920	0.2660
BFGS: 14	12:30:32	1.896342	0.2951
BFGS: 15	12:30:32	1.887827	0.2872
BFGS: 16	12:30:32	1.881840	0.2105
BFGS: 17	12:30:32	1.880125	0.1515
BFGS: 18	12:30:32	1.879233	0.0761
BFGS: 19	12:30:32	1.878950	0.0257
Optimized energy: 1.8789501080032476			

2.3. Kimyasal Tepkime Simülasyonları

Kimyasal tepkimelerin mekanizmaları, hızları ve sonuçlarını modelleme ve simülasyonu hem teorik hem de pratik açıdan oldukça önemlidir. Kimyasal tepkimelerde bu tür işlemler çeşitli bilgisayar algoritmaları kullanılarak tahminleri ve analizleri gerçekleştirilmektedir. Kimyasal tepkimelerde; tepkimenin mekanizması, tepkimenin hızı, termodinamik ve kinetik verilere ait parametrelerin incelenmesi söz konusudur. Zamana bağlı olarak bu parametreler Python içinde yer alan Cantera [16], Chempy [17], SciPy [18], RDKit araçları yardımıyla hesaplanabilmektedir. Aşağıda Şekil 12.'de verilen kodlar Jupyter Notebook'ta çalıştırıldığında, Şekil 13.'te verilen grafik kimyasal tepkimelerin hesaplamalarına ilişkin bir örnek olarak gösterilebilir.

```

import numpy as np
from scipy.integrate import odeint
import matplotlib.pyplot as plt

# Reaksiyon hızı sabiti
k = 0.1 # s-1

# Reaksiyon hız denklemi
def reaction_rate(conc, t):
    A = conc[0] # [A] konsantrasyonu
    dA_dt = -k * A # A'nın türevi
    return [dA_dt]

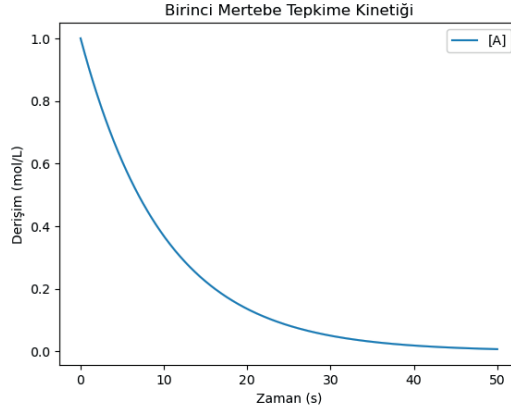
# Başlangıç konsantrasyonu ve zaman aralığı
A0 = [1.0] # [A] = 1.0 mol/L başlangıç
time = np.linspace(0, 50, 500) # 0-50 saniye arası

# Diferansiyel denklemi çöz
result = odeint(reaction_rate, A0, time)
A_concentration = result[:, 0] # A'nın konsantrasyonu

# Sonuçları görselleştir
plt.plot(time, A_concentration, label="[A]")
plt.xlabel("Zaman (s)")
plt.ylabel("Değişim (mol/L)")
plt.title("Birinci Mertebe Tepkime Kinetiği")
plt.legend()
plt.show()

```

Şekil 12. Tepkime Hız İfadesinin Çözümlemesine İlişkin Kodlar



Şekil 13. Birinci Mertebe Tepkimenin Değişim-Zaman Grafiği

2.4. Kimyada Makine Öğrenimi ve Yapay Zeka Uygulamaları

Kimya biliminde devrim niteliğinde gelişmelere yol açan bilgisayar teknolojilerinde geliştirilen makine öğrenmesi (Machine Learning: ML) ve yapay zeka (Artificial Intelligence: AI) algoritmaları büyük veri setlerinden anlamlı sonuçlar üretebilme kabiliyetine sahiptir.

Moleküllerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik özelliklerini tahmin etmek, yeni malzeme ve ilaçlar tasarlamak bu yöntemler sayesinde mümkün olabilmektedir. Ayrıca spektroskopik verileri kullanarak molekül yapılarının hızlı ve güvenilir şekilde tespit etmek mümkün hale gelmiştir. Scikit-learn kütüphanesi regresyon, sınıflandırma, kümelendirme işlemleri için oldukça elverişli bir araçtır. TensorFlow[19] ve PyTorch [20]

kütüphaneleri ise derin öğrenme modellerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Kimyada grafik temelli sinir ağları (Graph Neural Networks) yardımı ile molekül özellikleri tahmin edilebilir. DeepChem [21] kimyasal veri analizleri ve modelleme için özel olarak geliştirilmiş bir derin öğrenme kütüphanesidir. ChemProp [22] ise ilaç geliştirme proseslerinde grafik tabanlı modelleri kullanarak molekül tahminleri yapılabilmektedir. Molekül özelliklerinin tahmini algoritması genel olarak ilgili kütüphaneler yüklendikten sonra moleküle ait veriler sisteme tanımlanır. Ardından veri seti eğitilecek ve test verileri olmak üzere setlere ayrılır. Son olarak model oluşturulur ve eğitim sonucu çıkan elde edilen veriler tahmin modeli üzerinde uygulanarak standart sapma değerleri tespit edilir.

Makine öğrenmesi ve yapay zeka algoritmaları deneysel süreçlerin zaman ve maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Büyük veriler ile çalışıldığı için kimyasal veri tabanları kullanıldığında daha kapsamlı analiz yapılmasını mümkün kılar. Özellikle ilaç endüstrisinde hastaya özel ilaç geliştirilmesi mümkün olabilmektedir. Ancak makine öğrenmesi ve yapay zekanın kullandığı verilerin eksik, hatalı, eşik değerlerin altında veya üstünde çok verinin bulunması doğru modellerin oluşturulmasını güçleştirebilir. Modellerin sonuçlarının yorumlanması kimyasal anlamda çok pratik olmayabilir. Ve en önemlisi oluşturulan modellerin genelleme yapılarak bütün sistemlerde uyumlu olduğunu söylemek mümkün değildir. Bu açıdan modelin geçerliliği belli koşullar ve sınırlar için doğru olmaktadır.

2.5. Kimyada Veri Tabanları ve Bilgi Yönetimi

Kimya biliminde deneysel çalışmalarda kullanılan analiz yöntemine bağlı olarak çok büyük veri setleri oluşabilir. Bu veri setlerinin düzenlenmesi, saklanması ve analiz edilmesi kritik öneme sahiptir. Bu veri setleri doğru bir şekilde ele alınmadığında bilimsel çalışmalardan da başarılı sonuçlar alınması beklenemez. Veri tabanları kimyasal açıdan birçok bilgiyi içinde barındırır. Bu veri tabanlarına araştırmacılar, literatür taraması aşamasında veya deney sonuçlarını tekrar kontrol etmek için başvururlar.

Kimya, yoğun miktarda veri üretilen ve bu verilerin düzenlenmesi, saklanması, paylaşılması ve analiz edilmesinin kritik önem taşıdığı bir bilim dalıdır. Moleküler yapılar, reaksiyon mekanizmaları, termodinamik veriler ve spektroskopik ölçümler gibi bilgiler, doğru bir şekilde yönetilmediğinde bilimsel çalışmaların ilerlemesini engelleyebilir. Python, güçlü veri tabanı bağlantı araçları ve bilgi işleme kütüphaneleriyle, kimyada veri tabanlarının ve bilgi yönetiminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu anlamda PubChem [23], ChemSpider[24], Protein Data Bank [25], ChEMBL [26] ve Reaxys [27] önemli veri tabanlarıdır. Bu veri tabanlarına erişim API üzerinden erişim sağlanarak Python programlama

dilinde kullanılabilir [28].

Kimyada veri tabanları ve bilgi yönetimi, bilimsel ilerleme ve yenilik için temel bir role sahiptir. Python, veri tabanlarıyla etkileşim, kimyasal verilerin analizi ve bilgilerin saklanması konusunda araştırmacılara güçlü araçlar sunar. Bu sistemler, kimya dünyasında bilgiye dayalı karar alma süreçlerini destekleyerek, kimyasal verilerin değerini en üst düzeye çıkarmaya olanak tanır [29].

3. Sonuç ve Değerlendirme

Python, programlama dili, özellikle hesaplamalı kimya alanında güçlü bir araç olma yolunda hızla ilerlemektedir. Gelecekte de bu konuda yerini sağlamlaştırabileceğini söyleyebiliriz. Gelişen teknolojiyle birlikte, kimya alanında araştırmalarda en önemli anahtarlardan biri olacağına şüphe yoktur. Özellikle büyük veri, hesaplamalı modelleme ve simülasyonlarda disiplinler arası çalışmaların önemi ortaya çıkmaktadır. Örneğin kimya ve biyoloji bilim dallarının kesişim kümesi olan biyokimya ile ilgili araştırmalarda bilgisayar destekli Python programlama dili kullanılarak yapılan çözümler kilit rol üstlenecektir. Benzer şekilde kimya ve mühendislik bilimlerinin etkileşimi sonucunda malzeme bilimindeki modelleme ve simülasyon çalışmaları Python ile hız kazanacaktır.

Gelecekte kimya araştırmalarında yapay zeka ve makine öğrenmesi ön plana çıkması beklenmektedir. Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme alanındaki Python programlama dilinin güçlü kütüphaneleri sayesinde yapay zeka tabanlı modellerin kimyasal büyük veri setlerinden anlamlı sonuçlar çıkarması ve karmaşık tepkimelerin daha anlaşılır hale gelmesini sağlayacaktır.

Python ve ilgili kütüphanelerin kullanımı ile kuantum hesaplama, moleküler simülasyonlar, enerji hesaplamaları ve kimyasal reaksiyon dinamiklerinin modellenmesi için potansiyel bir devrim yaratmaktadır. Bu çalışmalar neticesinde moleküllerin elektronik yapılarının daha doğru bir şekilde hesaplanarak yeni malzeme ve ilaçların keşfedilmesinin önü açılmış olacaktır.

Genel sonuç olarak Python'un açık kaynak kod sistemine sahip olması geniş bir kütüphane ekosistemi içinde bilim insanlarının daha hızlı ve verimli çözümler üretmelerine yardımcı olacaktır. Kimya alanında yapılan disiplinler arası çalışmalarda Python entegrasyonu ile yeni keşif ve ilerlemeler mümkün hale gelecektir.

Kaynaklar

- Erdem, S. “Hesaplamalı Kimya” Erişim Linki: https://mimoza.marmara.edu.tr/~erdem/doc/Hesaplamali_Kimya%20nedir.htm Erişim tarihi 27.11.2024
- Wang, L. P., Titov, A., McGibbon, R., Liu, F., Pande, V. S., & Martínez, T. J. (2014). Discovering chemistry with an ab initio nanoreactor. *Nature chemistry*, 6(12), 1044-1048.
- RDKit: Open-Source Cheminformatics Software. Erişim Linki: <https://www.rdkit.org/> Erişim Tarihi 29.11.2024
- Open Babel- the chemistry toolbox. Erişim Linki: <http://openbabel.org/index.html> Erişim Tarihi 02.12.2024
- NumPy. Erişim Linki: <https://numpy.org/> Erişim Tarihi: 02.12.2024
- Pandas. Erişim Linki: <https://pandas.pydata.org/> Erişim Tarihi: 02.12.2024
- Matplotlib. Visualization with Phyton. Erişim Linki: <https://matplotlib.org/> Erişim Tarihi: 02.12.2024
- Seaborn: Statistical data visualization. Erişim Linki: <https://seaborn.pydata.org/> Erişim Tarihi: 02.12.2024
- Plotly. Erişim Linki: <https://plotly.com/> Erişim Tarihi: 02.11.2024
- Duramat. public-spectra-data2.csv. Erişim Linki: https://datahub.duramat.org/hu/dataset/sample-file-uploads/resource/7df96843-d365-4785-ac0f-90c-8cfb2c1e2?view_id=9b7130d7-de30-4113-b47d-79f14a43d10a Erişim Tarihi: 02.12.2024
- Wikipedia. Simplified Molecular Input Line Entry System. Erişim Linki: https://en.wikipedia.org/wiki/Simplified_Molecular_Input_Line_Entry_System Erişim Tarihi: 03.12.2024
- Github. InChI-The IUPAC International Chemical Identifier. Erişim Linki: <https://github.com/IUPAC-InChI/InChI> Erişim Tarihi: 03.12.2024
- ASE. Atomic Simulation Environment. Erişim Linki: <https://wiki.fysik.dtu.dk/ase/> Erişim Tarihi: 04.12.2024
- PySCF. Quantum Chemistry with Phyton. Erişim Linki: <https://pyscf.org/> Erişim Tarihi: 02.12.2024
- PSI4. Open-Source Quantum Chemistry. Erişim Linki: <https://psicode.org/> Erişim Tarihi: 03.12.2024
- Cantera. Open-source suite of tools for problems involving chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Erişim Linki: <https://cantera.org/> Erişim Tarihi: 03.12.2024
- ChemPy. Erişim Linki: <https://pypi.org/project/chempy/> Erişim Tarihi: 03.12.2024
- SciPy. Fundamental algorithms for scientific computing in Python. Erişim Lin-

ki: <https://scipy.org/> Erişim Tarihi: 23.10.2024

TensorFlow. Makine öğrenimi için uçtan uca bir platform. Erişim Linki: <https://www.tensorflow.org/?hl=tr> Erişim Tarihi: 03.12.2024

PyTorch. Erişim Linki: <https://pytorch.org/> Erişim Tarihi: 07.11.2024

Github. Deepchem. Erişim Linki: <https://github.com/deepchem/deepchem> Erişim Tarihi: 04.12.2024

Chemprop. Molecular Property Prediction. Erişim Linki: <https://pypi.org/project/chemprop/1.0.1/> Erişim Tarihi: 04.12.2024

National Library of Medicine. PubChem. Erişim Linki: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> Erişim Tarihi: 04.12.2024

Chemspider. Erişim Linki: <https://www.chemspider.com/> Erişim Tarihi: 04.12.2024

Protein Data Bank. RCSB. Erişim Linki: <https://www.rcsb.org/> Erişim Tarihi: 01.12.2024

Chembly. Erişim Linki: <http://chembly.com/eng/> Erişim Tarihi: 08.12.2024

Python. Erişim Linki: <https://www.python.org/> Erişim Tarihi: 05.12.2024

Jupyter. Erişim Linki: <https://jupyter.org/> Erişim Tarihi: 05.12.2024

Kas, E.A., Zeybek, M.S. Kuvars Katkılı Polipropilen Kompozitlerinin Termal Özelliklerinin İncelenmesi, MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ V. ÜNİVERSİTE SANAYİ İŞBİRLİĞİ, AR-GE VE İNOVASYON KONGRESİ, Bildiri özet kitabı 2023 Manisa. <https://argeinv.mcbu.edu.tr/forms/ozetkitapci.pdf>

CİCER ARIETİNUM' UN TOHURLARI VE MERİSTEMATİK HÜCRELERİNDE MANGANIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Murat ÇANLI¹, Hakan SEPET²

GİRİŞ

Ağır metal; kadmiyum (Cd), civa (Hg), kurşun (Pb), arsenik (As), nikel (Ni), krom (Cr), bakır (Cu), mangan (Mn) ve çinko (Zn) gibi yüksek atom numarasına sahip, yani 20'nin üzerinde ve daha yüksek yoğunluğa (5 g/cm³) sahip bir metal grubunu ifade eder (Albayrak, 2024a; Yalçın ve Altay, 2023). Bu metaller doğrudan çevreyi kirletir ve aşırı miktarda ağır metal çevreye girdiğinde biyolojik toksisiteye neden olur. Ancak Mn dahil olmak üzere bu metallere bazıları gerekli mikro besinlerdir ve belirli enzimler için kofaktör görevi gördükleri için yalnızca eser düzeylerde gereklidir (Albayrak, 2024b; Albayrak, 2024c; Albayrak, 2023a; Albayrak, 2023b). Organik kirleticiler kolayca parçalanabilirken, toksik ağır metaller biyokimyasal reaksiyonlarla değiştirilemez ve dünya çapında çevre kirliliğine neden olur. Bu nedenle bu metallerin doğal yollarla sudan ve topraktan uzaklaştırılması zordur (Konakçı, 2024).

Ağır metaller ile kirlenmiş alanlarda yetiştirilen mahsullerin, büyüme azalmasına, daha düşük biyokütle üretimine ve ağır metal birikimine yol açan değişmiş metabolizma, biyokimyasal ve fizyolojik süreçler gösterdiği bildirilmiştir (Vasilachi vd., 2023). Bu tür önemli tarımsal mahsullerden biri, küresel olarak çok önemli olan ve yetersiz beslenmeyi ve açlığı ortadan kaldırmak için diyet çeşitliliğinde önemli bir rol oynayan baklagillerdir.

Baklagil mahsulleri Fabaceae familyasına aittir, tarım sistemindeki önemi Poaceae familyasından sonra ikinci sıradadır. Dahası, bakla-

1 Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mucur Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5275-861X, murat.canli@ahievran.edu.tr

2 Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye, 0000-0002-5841-9969, hakan.sepet@ahievran.edu.tr

gil mahsulleri hayvansal proteinin yerine geçebilir ve böylece özellikle gelişmekte olan ülkelerde ihtiyaç duyulan temel bir diyet proteini haline gelebilir (Farooq vd., 2018). Baklagil mahsulleri, diğer çeşitli ekili mahsullere kıyasla zengin bir protein kaynağıdır. Ek olarak, baklagiller kök sistemlerinde azot sabitleyici bakterileri barındıran ve toprak verimliliğini artıran bir baklagil alt grubuna aittir (Huang, 2024). Baklagil bitkileri, bu biyoaktif peptitlerin antioksidan aktiviteler, antimikrobiyal etkiler, immünomodülasyon, mineral biyoyararlanımının/emilimin artırılması, kan basıncının ve kolesterolün düşürülmesi gibi çeşitli özelliklere sahip olması nedeniyle sağlık güçlendiriciler olarak önemli bir role sahiptir (Çakır vd., 2019).

Metal iyon-DNA etkileşimleri, bitkilerin dış etkilere karşı davranışları açısından sitogenetik çalışmalarının doğasını anlamak için hayati öneme sahiptir (Asimincesei vd., 2024; Garlich ve ark., 2016; Özdemir ve ark., 2015; Saxena ve ark., 2009). Metallerle dayalı sanayilerin neden olduğu büyük miktardaki çevre kirliliği nedeniyle metallerin, özellikle de ağır metallerin sitogenetik etkileri halen araştırma çalışmalarının odağında yer almaktadır (Aksoy ve Deveci 2012; Özdemir ve ark., 2015; Pesnya, 2013; Sepet ve ark., 2014). Bitki sitogenetiği hala doğal ve insan faktörlerinin neden olduğu kromozomal değişiklikler yaşamaktaydı (Andronic, 2015). Bitkiler metalleri topraktan alır ve yapraktan kök uçlarına kadar bitkinin her yerinde birikirler (Baranowska-Morek ve Wierzbicka, 2004; Maestri ve ark., 2010; Sepet ve ark., 2014).

DNA, metal iyonlarını bağlamak için fosfat oksijen atomları, riboz hidroksiller, baz halkası nitrojenleri ve siklik baz keto grupları gibi dört potansiyel bölgeye sahiptir (Yadav vd., 2020). Bhardwaj ve ark. (2022), geçiş metalleri sıklıkla dolaylı olarak fosfat gruplarına ve doğrudan yukarıda bahsedilen DNA'daki bazlara olmak üzere ikiden fazla farklı bölgeyi kullanır. Metal iyonları ile DNA arasındaki bağlantı, metal iyonlarını çevreleyen koordine edici su moleküllerinin hidrojen bağlanması yoluyla kurulur. Bazlara metal bağlanması genellikle baz çiftindeki hidrojen bağının kopmasına neden olur ve DNA yapısının çift sarmalını zayıflatır ve şeker konformasyonunu dolaylı olarak etkiler (Bhardwaj vd., 2022).

Metaller, konsantrasyonları belirli bir noktaya ulaşana kadar büyüme üzerinde olumlu etkiye sahiptir (Bhat ve ark., 2012; Çanlı, 2018; Tangahu vd., 2011) ve ayrıca bitki içindeki kromozomların yapısını da değiştirmektedir (Çanlı, 2018; Liehr vd., 2009; Özdemir vd., 2015). Çeşitli kaynaklarda kromozomlardaki altı tür değişiklik; köprüler, C-mitoz, fragmanlar, gecikmeler, çok kutupluluk ve yapışkanlık olarak adlandırılmıştır (Kuchy vd., 2016; Özkul vd., 2016). Ayrıca, Zahan ve Begum (2023) anormallikleri kromozom ayrımı, sitokinez yokluğu, sitomiksis, hücre füzyonu, düzensiz hücre şekli, kromozom köprüleri ve genomik ayrılma olarak tanımladılar.

Ayrıca kromozomlardaki değişikliklere ilişkin olarak köprü kromozomu, kromozomal yapışma, kromozom kırılması, kromozom dağılımları, kromozom küçülmesi, balık kılçığı, halka kromozomu gibi şekillerine göre yapılan bir sınıflandırma daha bulunmaktadır (Tablo 1, Şekil 1). Abdelsalam ve ark. (2018) bu anormallikleri metafazda yanlış yönelim, kromozomal kırılma, metafazik plaka distorsiyonu, iğ disfonksiyonu, yapışkanlık, metafazda anormal hareket, parçalanma, saçılma, eşit olmayan ayrılma, saçılma, kromozomal boşluklar, çok kutuplu anafaz, erozyon ve dağıtılmış ve gecikmeli kromozomlar olarak sınıflandırmıştır.

Metallerin sitogenetik etkisi son araştırma çalışmalarının odağında kalmaya devam edecek gibi görünmektedir (Çanlı, 2018; Janas vd., 2010; Kıran ve Şahin, 2005; Özdemir vd., 2015; Sepet vd., 2014).

Mangan (Mn) yeraltı ve yerüstü sularında bazı aylarda yüksek seviyelerde bulunması nedeniyle suyun kalitesini bozmaktadır (Tezcan ve Tezcan, 2007). Mn in sularında 0,05mg/L den yüksek olması istenmez. Mn hakkındaki bazı araştırmalarda tohum büyümesi gelişmesi ve çoğalması üzerine olumlu etkileri görülmüştür (Hajmoradi ve Beydokhti, 2019; Mittal vd., 2018). Bir diğer çalışmada buğday üzerinde Mn emiliminin büyümeye katkısına pozitif yönde katkı yaptığı görülmüştür (Abbas vd., 2011). Mn eksikliğinin eksiklik indeksine göre 0 ile 1 arası değerlendirmede 0,66 değerine kadar tolerans gösterdiği ortaya konmuştur (Barman vd., 2017). Bitkilerin hücre duvarında kalınlaştırma ve dayanıklılığı arttırmaya Mn kullanımının etkisi olduğunu Humpries ve ark. (2016) bulmuşlardır. Seregin ve Kozhevnikova (2005) ve Kudo ve ark. (2015) metallerin mısır tohumlarının çimlenmesini şu sırayla engellediğini bulmuşlardır: $Mg > Cd > Ni \approx Pb > Mn$. Fernando ve Lynch (2015) fitotoksik etki açısından Mn'ı incelemişlerdir. Bitkilerde metal kirliliğinin mekanizması hakkında daha önce yapılan araştırmalar Mn'nin bitkilere kolayca geçebildiğini göstermiştir (Çelik ve ark., 2004; Lemtiri ve diğerleri, 2016; Manzatu ve diğerleri, 2015).

Baklagiller, büyüme sürecinde ve vücudun her yerinde metal toksitesi gösterebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Sözen vd. 2010; Talukdar, 2013). Talukdar (2013), bitkideki arsenik (As) birikimini anlamak için mercimeği kullanmıştır ancak çalışması yalnızca bitkinin katı sodyum arsenatla maruz bırakılmasına odaklanmıştır. Sonunda, Nohut'in sekiz genotipinde farklı porsiyonlarda birikiminin gerçekleştiğini buldu. Janas ve ark. (2010) nohut vakuollerinde ve kök hücre duvarlarında bakır iyonlarının birikiminin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Çanlı (2018), *Lens culinaris*'te baryum (Ba) ve vanadyum (V) iyonlarının neden olduğu sapmanın belirlenmesine odaklanmıştır. Cicer arietinum ile ilgili çeşitli çalışmalar olmasına rağmen (Sözen vd., 2010), Mn'nin nohutun kromozomal değişim üzerindeki etkisini anlamaya yönelik herhangi bir çalışma

bulunmamaktadır. Ayrıca hiçbir bitkinin tohumunda ppm'in üzerindeki metal konsantrasyonları da tespit edilmeye çalışılmamıştır.

Bu çalışmada, Cicer arietinum üzerine farklı zaman dilimlerinde Mn iyonunun maruziyeti sonucunda bitkinin kök ucu hücrelerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Mn'in hücre bölünmesi ve kromozomal anormallikler üzerindeki etkisini ve Mn'in DNA ile kimyasal olarak nasıl reaksiyona girdiğini anlamak bu çalışmanın ana hedefleriydi.

HESAPLAMA YÖNTEMİ

Araştırmada Mn'nin etkilerini görebilmek için 14 (2n) kromozomlu nohut tohumları tercih edildi. Nohut fidelerinin kök uçlarına yerleştirilen meristematik hücreler, bitki sitogenetiğinde (Singh, 2003) anlatıldığı gibi mikroskopik kromozom incelemesi için hazırlanır.



Şekil 1. Mangana maruz bırakılan nohut tohumlarının çimlenme süreci

Tohumlar sağlam, dolgun ve eşit büyüklükte olmalarına göre seçilmiştir. Tohum kontaminasyonunu önlemek amacıyla %10'luk sodyum hipoklorit içerisinde 10 dakika bekletilmiştir (Sepet vd., 2014). Aşırı hipokloritin uzaklaştırılması için tohumlara birkaç kez (5 kez) distile su uygulanmış ve daha sonra tohumlar 25°C'de filtre kağıtları üzerinde kurutulmuştur. Zaman parametresi için 0.5 mol L⁻¹(M) Mn standart çözeltisi oda sıcaklığında bir beher içindeki tohumlara maruz bırakıldı. Tohumlar 1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, ve 24 saatlik süreyle kontrol amaçlı Mn standartlarında tutuldu. Daha sonra tohumların üzerinde kalan metal solüsyonu

uzaklaştırmak için distile su kullanıldı ve 20–25 °C’de petri kaplarında çimlendirildi. Fiksasyon için kök uçları 1,5-2 cm ucundan kesilerek fiksatif etil alkol-glasiyel asetik asit solüsyonunda (3:1 oranında) bırakılır. Stok kök uçları Feulgen yöntemiyle (Bozdağ vd., 2023) boyanarak daha detaylı incelemeye hazır hale getirildi. Hücre anomalilerinin mikroskopik tespitinde homolog alanlar tercih edildi. Mitotik hücre sayısı belirlendi. Hücrelerde kromozomal anormalliklerin varlığı ve sıklığı tespit edildi. Preparatların fotoğraflanması için motorlu taramalı Leica DM 3000 mikroskop kullanıldı.

Her uygulama için toplam 400 hücre sayıldıktan sonra, aşağıdaki denklemlerle mitotik indeks (MI) elde edildi (Prates vd., 2000):

$$MI = (m/T) \times 100$$

Burada: m = mitoz bölünen hücre sayısı; and T = toplam hücre sayısı.

BULGULAR

Bitkilerde hüresel anormallikler kendiliğinden veya bir metale fiziksel maruz kalmanın bir sonucu olarak ortaya çıkabilir (Hemachandra ve Pathiratne, 2015). DNA kırılmaları, DNA sentezinin inhibisyonu ve yapıdaki veya DNA kromozomlarının toplam sayısındaki değişen DNA replikasyonu gibi anormalliklerle karakterize edilirler (Morais-Leme ve Marin-Morales, 2009; Restrepo ve ark., 2012; Russel, 2002).

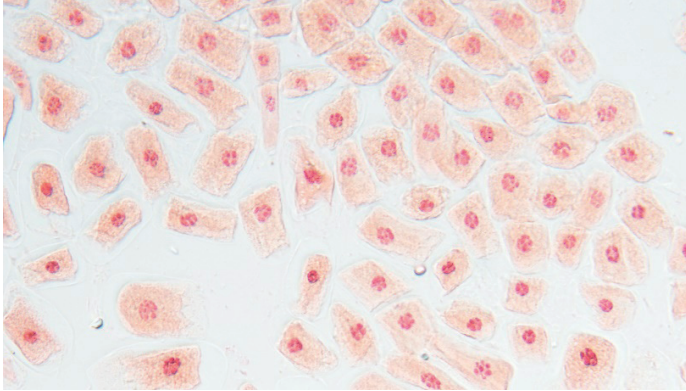
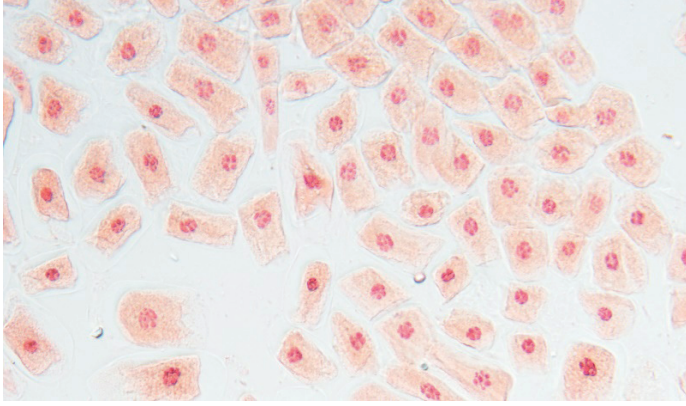
Tablo 1. *Cicer arietinum*’un Farklı Zaman Periyodundaki Kök Ucu Hücrelerinin Mitotik İndeksi ve Mn maruziyetinden sonra etkilenen ve etkilenmeyen hücrelerin yüzdeleri

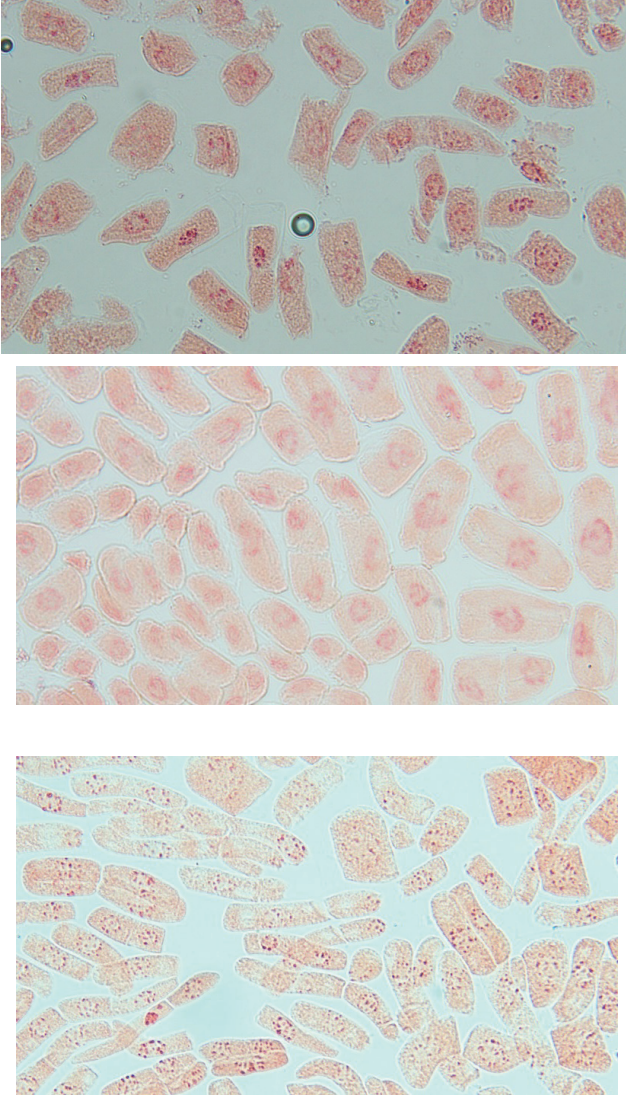
Süre (Saat)	Mitotik İndeks ± *S.D.	Çimlenmiş tohumlar (%)
1/2	10	80
1	9	70
2	9	70
4	4	40
6	3	30
8	Oluşmadı	
12	Oluşmadı	
16	Oluşmadı	
24	Oluşmadı	
Kontrol Grup	20±3.35	

*S.D. = Standart Sapma

Zaman değişkenine göre değerlendirme

Tablo 1, bitki hücrelerindeki mitoz derecesini gösteren mitotik indeksi (MI) temsil etmektedir. ½ ve 1 saatlik maruz kalma için MI bir düşüş gösterirken 2-6 saat arası uygulamalar benzer sonuçlar vermiştir (sırasıyla 9 ve 3). 8 saatten sonra herhangi bir çimlenme gözlenmemiştir. Fidelerde mitotik hücre bölünmesinin artmasında farklı zaman periyotlarında Mn standart solüsyon uygulaması ortaya çıkmıştır. ½-6 saat arasında mitotik hücre bölünmesinin derecesi azaldı. 8 saatlik maruz kalma sonrasında herhangi bir fide gözlenmedi. Kontrol grubu, her uygulama döneminde fidelerde daha fazla mitotik hücre bölünmesi gösterdi.





Şekil 2. Görülen bazı anomali şekilleri

Hücre bölünmesinin yanı sıra Mn uygulamasından sonra hücrelerde çeşitli anormallikler de tespit edildi (Şekil 2). 1/2 saatte kromozom dağılımı, köprü kromozomu ve balık kılıcı gözlemlendi. 1 saatlik temas süresi boyunca balık kılıcı, köprü kromozomu ve kromozom dispersiyonu kaydedilirken, 2 saatlik uygulamada at kromozom dispersiyonu ve at köprü kromozom anormalliği tespit edildi. 4 saatlik uygulama sonucunda balık kılıcı ve halka kromozomunda anormallik ortaya çıktı. 6 saatlik uygulama sonunda balık kılıcı, kromozom dağılımı, kromozom kırılması ve

halka kromozomu oluştu. En sık görülen anormallik olarak kromozom dispersiyonu tespit edildi. Tüm uygulama süreleri boyunca kromozom yapışması, kromozom dağılımı ve köprü kromozomu gözlemlendi. Kromozom dağılımlarının sayısı 4 saatlik uygulamada en yüksekti. 2 saat hariç tüm uygulama periyotlarında kromozom kırılması tespit edildi. Balık kılçığı ve kromozom yapışması 1 saatlik uygulamada en yüksek düzeyde belirlendi. 2. ve 4. saatlerde en yüksek sayıda kromozom yapışması gözlemlendi. Köprü kromozomu 1, 2 ve 4 saatlik uygulamada yüksek düzeyde belirlendi. Uygulamanın 4. saatinde kromozom kırılmasının yüksek düzeyde olduğu ve 4. saate kadar anormalliğin azaldığı görüldü. Halka kromozomu sadece 6 saatlik uygulamada gözlemlendi. Tüm uygulama sürelerinde kromozom küçülmesi görüldü. Maruz kalma süresinin arttırılmasıyla çimlenme oranı düştü (%80'den %30'a).

DNA'daki baz ve şeker bağlanarak nükleozid molekülünü oluşturur. Baz ile şeker arasında glikozit bağı kurulur. Fosfodiester veya monosakaritlerin arasındaki bağların kopmasıyla sakkaritler veya monofosfata bağlı esterler arasındaki bağların oluştuğu, DNA'da kromozomal değişiklikler ve anormalliklerin olduğu gözlenir. Bazlar arasındaki hidrojen bağları DNA yapısını bir arada tutar. O-bağlı monoglikozidlerin metal kompleksleri CAD üzerine neredeyse tamamen şeker kalıntılarını (glikoz veya ramnoz) kaybederken, C-bağlı monoglikozidlerin metal kompleksleri dehidrasyonla birlikte yoğun çapraz halka bölünmelerine maruz kalma eğilimindedir (Zhang ve ark., 2004).

SONUÇ

DNA'daki metal iyonları ile baz ve şeker arasındaki kimyasal bağlanma, yeni moleküllerin oluşmasına neden olmuş ve bu da bitkinin DNA dizisinde çeşitli anormalliklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Benzer bir çalışmada Dator ve diğerleri (2022), metal iyonlarının özellikle DNA'nın adenin içeren bölümleriyle etkileşime girdiğini ve bunun oksidatif etkilerle sonuçlandığını bulmuşlardır. Şeker konformasyonunda önemli olan nükleik asitlerin konformasyonu, metal iyonunun DNA'da nasıl hareket ettiğine bağlıdır (Bhardwaj ve ark., 2022). Metal iyonları, metali bazlara bağlayarak baz çifti hidrojen bağını bozmanın ve çift sarmalı denge-sizleştirmenin yanı sıra, aşırı negatif yüklü fosfat gruplarını da nötralize edebilir ve sarmalın stabilizasyonuna neden olabilir. Tüm bu değişiklikler bitkilerin DNA'sında farklı anormalliklerin oluşmasını etkiler.

KAYNAKLAR

- Abbas, G., Khan, M. Q., Khan, M. J., Tahir, M., Ishaque, M., & Hussain, F. (2011). Nutrient uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by manganese application. *Pakistan Journal of Botany*, 43(1): 607-616.
- Abdelsalam N. R., Abdel-Megeed A., Ali H.M., Salem M.Z.M., Al-Hayali M.F.A., Elshikh, M.S. (2018). Genotoxicity effects of silver nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) root tip cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **155**: 76-85.
- Aksoy Ö., Deveci A. (2012). The Investigation of the Cytotoxic Effects of Some Pesticides on Soybean (*Glycine max* L.) *Cytologia* **77**(4): 475–483
- Albayrak, E. (2024a). LiMn₂Si Full Heusler Alaşımın Elektronik, Manyetik, Yapısal ve Titreşim Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi (Fizik Alanındaki Güncel Araştırmalar). 149-164.
- Albayrak, E. (2024b). LiMn₂Al Heusler Alaşımının Bazı Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi (Fizik Alanında Uluslararası Güncel Çalışmalar) 175-192.
- Albayrak, E. (2024c). LiMn₂Ge Alaşımının Bazı Özelliklerinin Teorik Olarak İncelenmesi FİZİK ALANINDA ULUSLARARASI GÜNCEL ÇALIŞMALAR 193-208.
- Albayrak, E. (2023a). Fm-3m Uzay Grubundaki LiMn₂Ga Full Heusler Alaşımının Teorik Olarak İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 52: 87-94.
- Albayrak, E. (2023b). Li₂MnSi Full Heusler Alaşımının Teorik Olarak İncelenmesi (Doğa Bilimlerinde Güncel Konular). 181-197.
- Andronic, L. (2012). Viruses as triggers of DNA rearrangements in host plants. *Can. J. Plant Sci.* **92**: 1083-1091.
- Asiminicesei, D. M., Fertu, D. I., & Gavrilescu, M. (2024). Impact of Heavy Metal Pollution in the Environment on the Metabolic Profile of Medicinal Plants and Their Therapeutic Potential. *Plants*, 13(6): 913.
- Barman, A., Pandey, R. N., Singh, B., & Das, B. (2017). Manganese deficiency in wheat genotypes: Physiological responses and manganese deficiency tolerance index. *Journal of Plant Nutrition*, 40(19): 2691-2708.
- Bhardwaj, V., Salunke, P. S., Puranik, A. A., Kulkarni, N. D., & Ballabh, A. (2022). Design and synthesis of novel heterocyclic pivalamide ligands and their copper (II) complexes: Structure, BSA/DNA interactions and SOD synzyme activity. *Polyhedron*, 225: 116054.
- Bhat, S. A., Bashir, O., Haq, S. A. U., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Americo-Pinheiro, J.H.P., & Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach.

- ch. Chemosphere, 303: 134788.
- Bozdağ, B., Özdemir, C., Özdemir, A., Vural, Y., & Vural, S. (2023). Bakla (*Vicia faba* L.) Kök Ucu Hücrelerinde Nonilfenolün Sitogenetik Etkilerinin İncelenmesi. *Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences*, 2023(18): 40-52.
- Çanlı M. (2018). A new perspective to aberrations caused by barium and vanadium ions on *Lens culinaris* Medik, *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 160: 19–23.
- Çelik, M., Aksoy, H., & Yılmaz, S. (2010). Evaluation of beauvericin genotoxicity with the chromosomal aberrations, sister-chromatid exchanges and micronucleus assays. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(7): 1553-1557.
- Çelik A., Kartal A., Akdoğan A., Kaska Y. (2005). Determining the heavy metal pollution in Denizli (Turkey) by using *Robinia pseudo-acacia* L., *Environmental International*. 31(1): 105-112.
- Dator, R. P., Murray, K. J., Luedtke, M. W., Jacobs, F. C., Kassie, F., Nguyen, H. D., ... & Balbo, S. (2022). Identification of formaldehyde-induced DNA–RNA cross-links in the A/J mouse lung tumorigenesis model. *Chemical research in toxicology*, 35(11): 2025-2036.
- Fernando, D.R., Lynch, J.P. (2015). Manganese phytotoxicity: new light on an old problem, *Annals of Botany*, 116(3), 313–319.
- Garlich N., Cruz C., Silva A.F., Malaspina I.C., Ferreira R.G., Tedesque M.G., Pittelli R.A., Bianco S. (2016). Effectiveness of Diquat, Copper Hydroxide, Copper Oxychloride and their Association in Control of Submerged Macrophytes *Ceratophyllum demersum*, *Planta Daninha*. 34(1): 117-123.
- Hajmoradi, F., & Taleb Beydokhti, A. (2019). Effect of heavy metals on meiosis cell division in *Stachys inflata* Benth. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 17(4): 363-373.
- Hemachandra C., Pathiratne A. (2015). Assessing toxicity of copper, cadmium and chromium levels relevant to discharge limits of industrial effluents into inland surface waters using common onion, *Allium cepa* bioassay *Contam. Toxicol.*, 94 (2): 199-203.
- Huang, Q. (2024). Enhancing soil health and biodiversity through nitrogen fixation symbiosis in leguminous plants. *Molecular Microbiology Research*, 14.
- Humphries, J. M., Stangoulis, J. C., & Graham, R. D. (2016). Manganese. In *Handbook of plant nutrition* (pp. 367-390). CRC Press.
- Janas K.M., Zielińska-Tomaszewska J., Rybaczek D., Maszewski J., Posmyk M.M., Amarowicz R., Kosińska A. (2010). The impact of copper ions on growth, lipid peroxidation, and phenolic compound accumulation and localization in lentil (*Lens culinaris* Medik.) seedlings. *J Plant Physiol*. 167(4): 270-276.

- Kıran Y., Şahin A. (2005). The effects of the lead on the seed germination, root growth and root tip cell mitotic divisions of *Lens culinaris* medik. Gazi University Journal of Science. **18** (1):17–25.
- Konakçı, N. (2024). Serpantinli Topraklarda Yetişen *Teucrium polium*'un Bor Akümülyasyon Performansının İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **36**(2): 735-742.
- Kozhevnikova A. D., Seregin I. V., Bystrova E. I., Belyaeva A. I., Kataeva M. N., Ivanov V. B. (2009). The Effects of Lead, Nickel, and Strontium Nitrates on Cell Division and Elongation in Maize Roots. *Russian Journal of Plant Physiology*. **56** (2): 242–250.
- Kudo, H., Kudo, K., Uemura, M., and Kawai, S. (2015). Magnesium inhibits cadmium translocation from roots to shoots, rather than the uptake from roots, in barley. *Botany*. **93**: 345–351.
- Lemtiri, A., Lienard, A., Alabi, T., Brostaux, Y., Cluzeau, D., Francis, F., and Colinet, G. (2016). Earthworms *Eisenia fetida* affect the uptake of heavy metals by plants *Vicia faba* and *Zea mays* in metal-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*. **104**: 67–78.
- Liehr, T., Ewers, E., Kosyakova, N., Klaschka, V., Rietz, F., Wagner, R., & Weise, A. (2009). Handling small supernumerary marker chromosomes in prenatal diagnostics. *Expert review of molecular diagnostics*, **9**(4): 317-324.
- MacMillan, J.P., Park, J.W., Gerstenberg, R., Wagner, H., Köhler K., and Walbrecht P. (2005). Strontium and strontium compounds, in Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry (7th ed.): Weinheim, Germany, VCH Verlagsgesellschaft mbH, A25, p321–327.
- Manzatu C., Nagy B., Ceccarini A., Iannelli R., Giannarelli S., Majdik C. (2015). Laboratory tests for the phytoextraction of heavy metals from polluted harbor sediments using aquatic plants. *Marine Pollution Bulletin*. **101**: 605–611.
- Marin A.R., Masscheleyn P.H., Patrick W.H. Jr. (1992). The Influence of Chemical Form and Concentration of arsenic on rice growth and tissue arsenic concentration. *Plant and Soil*. **139**: 175-183
- Mittal, A., Chhibber, S., & Madan, Z. (2018). The effect of manganese on antioxidant enzymes activity on the wheat seedling. *Int J Pharm Biol Sci*, **8**(1), 92-98.
- Movahhedy-Dehnavy, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2009). Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. *Industrial Crops and Products*, **30**(1), 82-92.
- Morais-Leme D., Marin-Morales M. (2009). *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application *Mutat. Res.*, **682**: 71-81.

- Özdemir A., Bozdağ B., Sepet H., Parlak Y., Kocabaş O., Ereeş F.S., Özdemir C. (2015). Cytogenetic effects of ⁹⁹technetium on meristematic cells of root tips of *Vicia faba* L. and statistical comparison. *Caryologia*. **68** (3): 200–206.
- Pesnya D.S. (2013). Cytogenetic effects of chitosan-capped silver nanoparticles in the *Allium cepa* test, *Caryologia*. **66** (3): 275-281.
- Prates H.T., Paes J.M.V., Pires N.D.M., Filho I.A.P., Magalhaes P.C. (2000). Efeito do extrato aquoso de leucena na germinação e no desenvolvimento do milho. *Pesq Agropec Bras*. **35**(5): 909-914.
- Restrepo R., Reyes D., Ortiz M.C., Ruiz F.A.R., Kouznetsov V. (2012). Aberraciones cromosomales en bulbos de cebolla *Allium cepa* inducidas por moléculas híbridas 4-aminoquinolínicas *Univ. Sci.*, **17**(3): 253-261.
- Russel P. (2002). Chromosomal mutation B. Cummings, Genetics, Pearson Education Inc, San Francisco.
- Salazar-Mercado, S. A., Torres-León, C. A., & Rojas-Suárez, J. P. (2019). Cytotoxic evaluation of sodium hypochlorite, using *Pisum sativum* L as effective bioindicator. *Ecotoxicology and environmental safety*, **173**: 71-76.
- Saxena P.N., Murthy R.C., Gupta S.K. (2009). Evaluation of cytogenetic effects of deltamethrin in root meristem cells of *Allium sativum* and *Allium cepa*: A possible mechanism of chromosome damage, *Toxicological & Environmental Chemistry*. **91**(3): 577-594.
- Sepet H., Çanlı M., Özdemir A., Bozdağ B., Özdemir C. (2014). Cytogenetic effects of ⁴⁸Titanium (⁴⁸Ti) on meristematic cells of root tips of *Lens culinaris* Medik, *Pakistan Journal of Botany*. **46**(1): 101-110.
- Silva Jr. A.C., Gonçalves C.G., Scarano M.C., Pereira M.R.R., Martins D. (2018). Effect of Glyphosate on Guineagrass Submitted to Different Soil Water Potential *Planta Daninha*. **36**: 1-12.
- Singh R.J. (2003). *Plant Cytogenetics* (2nd Ed.). CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Smical A.I., Hotea V., Oros V., Juhasz J., Pop E. (2008). Studies on Transfer And Bioaccumulation Of Heavy Metals From Soil Into Lettuce, *Environmental Engineering and Management Journal*. **7**(5): 609-615.
- Sözen, E., Yılmaz, M., Çolak, G., & Yücel, E. (2010). Alkali metal tuzları NaCl, KNO₃, kuvvetli asit H₂SO₄ ve bazı ağır metallerin CuCl₂, FeCl₃, MgCl₂ ve ZnCl₂ nohut *Cicer arietinum* tohumlarının çimlenmesi üzerine ekotoksikolojik etkileri. *Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma*, **3**(3): 64-71.
- Talukdar D. (2013). Bioaccumulation and transport of arsenic in different genotypes of lentil (*Lens culinaris* Medik.). *International Journal of Pharma and Bio Sciences*. **4**(1): 694–701.

- Tangahu, B. V., Sheikh Abdullah, S. R., BaMni, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International journal of chemical engineering*, 2011, 1-31.
- Vasilachi, I. C., Stoleru, V., & Gavrilesco, M. (2023). Analysis of heavy metal impacts on cereal crop growth and development in contaminated soils. *Agriculture*, 13(10): 1983.
- Yadav, M., Kumar, R., & Krishnamurthy, R. (2020). Chemistry of abiotic nucleotide synthesis. *Chemical reviews*, 120(11): 4766-4805.
- Yalcin, I. E., & Altay, V. (2023). Investigation of water-soil-plant relationships based on hazardous and macro-micro element concentrations on Orontes River, Türkiye. *International Journal of Phytoremediation*, 1-22.
- Zahan, N., & Begum, K. N. (2023). Meiotic behavior of B chromosome in two species of *Trigonella L.* from Bangladesh. *CYTOLOGIA*, 88(3): 217-223.
- Zhang J., Brodbelt J.S., Wand J. (2005). Threshold Dissociation and Molecular Modeling of Transition Metal Complexes of Flavonoids. *J Am Soc Mass Spectrom.* 16: 139–151.

UZUN MENZİLLİ SINIRLAR ÖTESİ HAVA KİRLİLİĞİ DİSPERSİYON MODELLERİ VE TÜRKİYE

Halit ARAT¹, Oğuzhan ERBAŞ²

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, erken ölüm için önde gelen çevresel risk faktörüdür ve bunun çoğu partikül maddeye, özellikle de çapı 2,5 µm'den küçük olan partiküllere maruz kalmayla ilişkilidir. Bu küçük partiküller akciğerlerin derinliklerine ulaşarak hasara neden olur. Daha sonra zarları geçerek kan dolaşımına karışır ve vücutta taşınarak daha fazla hasara neden olur. Erken ölümler, hava kirliliğine maruz kalmayla ilişkili iskemik kalp hastalığı, felç, akciğer kanseri ve akut alt solunum yolu enfeksiyonlarındaki artışlardan kaynaklanır. Ayrıca, erken doğum riskini artırarak doğmamış çocukları da etkiler ve bu da yaşam boyu sağlık sorunlarına neden olma potansiyeline sahiptir. Hava kirliliği ayrıca her yaşta ciddi astım ataklarının görülme sıklığını artırır ve çocukluk zatürresinin başlıca nedenidir. Ölümcül olmayan sağlık etkileri arasında hastaneye yatmayı gerektirme, refahın azalması, ilaç kullanımının artması ve örneğin üretkenliğin azalması yoluyla ekonomiye zarar verme yer alır.

1960'larda bilim insanları ormanları yok eden, göllerde balık kaybına neden olan ve Kuzey Yarımküre 'deki tüm ekosistemleri riske atan asit yağmurunun nedenlerini araştırdıklarında, önemli bir kısmı binlerce kilometre öteye yayılan hava kirleticilerinin suçlu olduğunu keşfettiler. Çevre sorunları ilk kez 1972'de Stockholm'deki Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı'nda uluslararası düzeyde sahneye çıktı. Hava kirliliği ayrıca 1975'te Helsinki Avrupa'da Güvenlik ve İş birliği Konferansı'nın Nihai Senedinde uluslararası iş birliği gerektiren bir endişe konusu olarak kabul edildi. Bu iki önemli konferans ve Demir Perdenin her iki tarafındaki birçok ülke arasında daha birçok resmi ve gayri resmi görüşme hükümetler arası müzakerelerin yolunu açtı ve sonunda Uzun Menzilli Sınır

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, 0000-0002-6634-2535, halit.arat@dpu.edu.tr

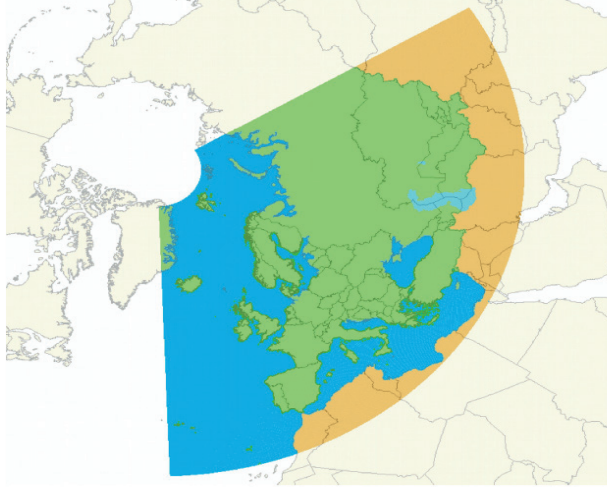
2 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, 0000-0001-9424-4273, oguzhan.erbas@dpu.edu.tr

Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi'nin imzalanmasıyla sonuçlandı. 1979'da Pan-Avrupa bölgesindeki 32 ülke hava kirliliğini azaltmak için iş birliği yapmaya karar verdi. Uzun menzilli sınır ötesi hava kirliliği konusunda UNECE Sözleşmesi'ni imzalayarak, hava kirliliğini geniş bir bölgesel temelde ele alan ilk uluslararası antlaşmayı oluşturdular. 1983'te yürürlüğe girdikten sonra, sözleşme hava kirliliğinin azaltılması için uluslararası iş birliğinin genel ilkelerini belirledi ve o zamandan beri bilim ve politikayı bir araya getiren kurumsal bir çerçeve oluşturdu. Başlangıcından bu yana geçen 40 yıl boyunca, sözleşme uluslararası çevre hukukunun gelişimine önemli ölçüde katkıda bulundu ve sınır ötesi hava kirliliğinin insan sağlığına ve çevreye verdiği zararı kontrol etmek ve azaltmak için temel çerçeveyi oluşturdu. Bu anlaşma hükümetler arası iş birliğiyle neler başarılabilirliğinin başarılı bir örneği olmuştur (WHO, 2023 ; Grøntoft ve Roux , 2020).

Sözleşmenin sağlam bilimsel temeli, başarısı için önemli olmuştur. Sözleşme kapsamındaki bilimsel ağ, ortak izleme, modelleme ve etki tabanlı programlar sağlayan ortak bir bilgiyi başarıyla geliştirmiştir. Sözleşme ayrıca bilim insanları ve politika yapımcıların bilgi alışverişinde bulunmaları için bir platform görevi görmüş, yenilikçi yaklaşımlara ve karşılıklı güven ve öğrenmeye yol açmıştır. Sözleşme üzerindeki müzakereler yetmişli yılların sonlarında başlamadan çok önce, Avrupa ülkeleri hava kirliliği, asit yağmuru ve ormanların kuruması sorununu ele almak için sınırlar arası bilimsel iş birliği kurmuşlardır. Özellikle, verileri karşılaştırma ve deneyimleri paylaşma ihtiyacı, 1977'de UNECE himayesinde Avrupa'da Hava Kirleticilerinin Uzun Menzilli İletiminin İzlenmesi ve Değerlendirilmesi için İşbirlikçi Programın (EMEP) geliştirilmesine yol açmıştır. Sözleşme üzerindeki tartışmaların başlarında, hava kirliliğinin zararlı etkilerinin iyi anlaşılmasının, etkili kirlilik kontrolü konusunda anlaşmaya varmak için bir ön koşul olduğu açıkça ortaya çıkmıştır. Etkiler Çalışma Grubu (WGE), kirletici etkilerin araştırılması ve izlenmesinde gerekli uluslararası iş birliğini geliştirmek amacıyla 1980 yılında sözleşme kapsamında kurulmuştur (WHO, 2023 ; Grøntoft ve Roux , 2020).

1980'lerde Soğuk Savaş'ın siyasi gerginliklerine rağmen, iki bilimsel kuruluş o zamandan beri sözleşme için bilim-politika arayüzünün omurgasını oluşturmuştur. Yıllar boyunca bilim insanları ağı aracılığıyla deneyim ve bilgi birikiminin tutarlı bir şekilde paylaşılması, giderek daha rafine, doğru ve karşılaştırılabilir verilere doğru ilerlemenin devam etmesini sağlamıştır. Grupların en önemli başarılarından biri, hava kalitesini iyileştirmede ilerlemeyi desteklemek için UNECE bölgesindeki bilim insanlarını ve politika yapımcıları ortak ve üretken bir diyalog için bir araya getirmek olmuştur. Bilim ve politika arasındaki yakın iki yönlü bağlantıları sürdürmek ve güçlendirmek esastır (Byrne, 2024).

Başlangıçta, EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) programı asitleşme ve ötrofikasyonun sınır ötesi taşınmasının değerlendirilmesine odaklanmıştır. Daha sonra programın kapsamı, yer seviyesinde ozon, kalıcı organik kirleticiler, ağır metaller ve partikül madde oluşumunu ele alacak şekilde genişletilmiştir. EMEP programı üç ana unsura dayanmaktadır; emisyon verilerinin toplanması, hava ve yağış kalitesinin ölçülmesi ve atmosferik taşınım ve hava kirliliğinin birikmesinin modellenmesidir. Şekil 1'de EMEP kapsama alanı gösterilmiştir (EMEP Status Report, 2024).



Şekil 1. EMEP'in Kapsadığı Coğrafi Alan Koordinatları
(30° K-82° K enlemi ile 30° B-90° D boylamı arası)

Bu üç unsurun birleşimi yoluyla EMEP gerekli değerlendirmeyi yerine getirmekte ve hava kirleticilerin emisyonları, konsantrasyonları ve birikimleri, sınır aşan akışların miktarı ve önemi ile kritik yükler ve eşik seviyelerine ilişkin aşırılıklar hakkında düzenli olarak rapor vermektedir. Bu bileşenlerin birleşimi aynı zamanda EMEP tahminlerinin değerlendirilmesi ve nitelendirilmesi için de iyi bir temel sağlamaktadır (EMEP Status Report, 2024).

EMEP programı, emisyon verilerinin, ölçüm verilerinin ve entegre değerlendirme sonuçlarının sistematik olarak toplanmasına, analiz edilmesine ve raporlanmasına katkıda bulunan geniş bir bilim insanı ve ulusal uzman ağı ile iş birliği içinde yürütülmektedir. EMEP bünyesindeki dört farklı çalışma grubu tartışma ve bilimsel paylaşım için bir forum sağla-

maktadır. Bunlar; “Ölçümler ve Modelleme Çalışma Grubu (TFMM)”, “Emisyon Envanterleri ve Projeksiyonlar Çalışma Grubu (TFEIP)”, “Entegre Değerlendirme Modellemesi Çalışma Grubu (TFIAM)” ve “Hava Kirleticilerinin Yarı Küresel Taşınması Çalışma Grubu (TFHTAP)”dur. EMEP Emisyon Envanterleri ve Projeksiyonları Merkezi’nin (CEIP) asitleştirici hava kirleticileri, ağır metaller, partikül maddeler ve fotokimyasal oksidanların emisyonlarını ve projeksiyonlarını toplama görevi vardır (EMEP Emission Report, 2023).

Kıtalararası veya yarım küre ölçeğinde, bir konumda yayılan kirliliğin miktarı ve nihayetinde belirli bir rüzgâr altı konumuna ulaşan kısım üç faktöre bağlıdır; kaynakta yayılan veya üretilen kirleticinin miktarı, kirliliği bir kıtadan diğerine taşıyan meteorolojik koşullar ve günlerden haftalara kadar süren taşıma sırasında kirliliğin miktarını ve bileşimini değiştiren fiziksel ve kimyasal dönüşüm süreçleridir (UNECE Report, 2010).

Türkiye ise, 1983 yılında Birleşmiş Milletler Uzun Menzilli Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi’ni (CLRTAP) ve 1985 yılında EMEP Protokolü’nü onaylamıştır, dolayısıyla emisyon verilerini yıllık olarak raporlamak zorundadır. Sözleşme ve EMEP Protokolü’ne taraf olan Türkiye, “Ulusal Hava Kirleticileri Emisyon Envanterini” 2011 yılından bu yana raporlamaktadır. Türkiye’nin de içerisinde bulunduğu EMEP’in finansmanı için maliyetlerin paylaşımına ilişkin zorunlu katkılar, 2004 yılından itibaren aşağıdaki ölçeğe göre (Tablo 1.) hesaplanmasına karar verilmiştir (UNECE Report, 2024).

Tablo 1. EMEP'in finansmanı için maliyetlerin paylaşımına ilişkin zorunlu katkı oranları

Parties	EMEP scale of Contributions (%)	Parties	EMEP scale of Contributions (%)
Belarus	0.0442	Switzerland	29.663
Bosnia and Herzegovina	0.0093	Turkey	10.245
Bulgaria	0.0303	Ukraine	0.1234
Canada	voluntary	United States	voluntary
Croatia	0.0908	Austria	22.050
Cyprus	0.0885	Belgium	26.287
Czech Republic	0.4727	Denmark	17.439
Estonia	0.0233	Finland	12.154
Hungary	0.2794	France	150.552
Latvia	0.0233	Germany	227.457
Liechtenstein	0.0140	Greece	12.550
Malta	0.0349	Ireland	0.6845
Monaco	0.0093	Italy	117.926
Norway	15.041	Luxembourg	0.1863
Poland	0.8801	Netherlands	40.467
Romania	0.1350	Portugal	10.757
Russian Federation	27.940	Spain	58.646
Serbia and Montenegro	0.0466	Sweden	23.906
Slovakia	0.1001	United Kingdom	128.898
Slovenia	0.1886	European Community	33.376
		Total	1.000.000

EMEP kurulduğundan beri hava kirliliği hakkındaki bilgi büyük ölçüde artmış ve mevzuatın bir sonucu olarak ekonomik ve teknolojik değişiklikler, emisyon kaynağı dağılımı ve kaynak güçleri önemli değişimlere uğramıştır. Genel olarak atmosfer kirliliğini ve özellikle azaltma önlemlerinin etkisini değerlendirmek için hala bağımsız ölçümler gerekmektedir. İzleme eğilimlerine ek olarak atmosferik süreçler hakkındaki bilgiler modelleri doğrulamak ve daha da geliştirmek için kilit öneme sahiptir (Tørseth vd, 2012).

İdeal olarak, uzun menzilli sınırlar ötesi analiz alanlarının mekânsal yoğunluğu hava konsantrasyonlarındaki ve birikim akışlarındaki eğimleri yansıtmalıdır. Ancak bazı bölgelerde yeterli bir izleme programının uygulanması zor olmuştur. Şu anda Akdeniz bölgesinde ve EECAA (Doğu Avrupa, Kafkasya ve Orta Asya) bölgesinde daha fazla alana özel ihtiyaç vardır. Ayrıca, atmosferik kaynakların ve süreçlerin değerlendirilmesine olanak sağlamak için ölçümlerin yeterince kısa bir zaman çözünürlüğüne ihtiyaç vardır (WHO, 2021). Saatlik veriler bazı türler (ozon gibi) için ideal ve uygulanabilir olarak görülürken, ekonomik veya pratik nedenlerle bu kadar yüksek bir zaman çözünürlüğünün gerçekçi olmadığı diğer değişkenler için günlük örnekler talep edilmektedir (aerosol kimyasal bileşimi gibi). Bir günden daha uzun bir zaman analiz etkisi, normalde süreç çalışmalarını ve kaynak-reseptör ilişkilerinin kurulmasını engellemektedir, çünkü hava kütlelerinin kökeni ve geçmişi tam analiz edilememektedir. Ayrıca bazı türlerin veya parametrelerin ölçülmesi maliyetli ve daha uzun bir örnekleme süresi istemektedir. Teknoloji geliştikçe, iyileştirilmiş zaman çözünürlüğüne sahip ölçümler kullanılabilir hale gelmektedir ve EMEP'in stratejik hedefi, araştırmacıları izleme programına katılmaya teşvik ederek bu tür gelişmelerden yararlanmaktır (Laj vd., 2009)

2.SINIR ÖTESİ HAVA KİRLİLİĞİ DISPERSİYON MODELLERİ VE METEOROLOJİK PARAMETRELERİN ETKİSİ

Kirletici emisyonların dispersiyon modelleri oluşturulurken; sektörler, yani ilgili süreçlerin ve kaynakların gruplarına dikkat edilmektedir. Bu sektörler şunlardır; enerji, endüstriyel süreçler ile ürün kullanımı, tarım ve atık vb. diğerleridir. Her sektör, örneğin ulaşım gibi ayrı kaynak kategorileri ve örneğin binek araçlar gibi alt kategoriler içerir. Sonuç olarak, ülkeler verilerin mevcut olma eğiliminde olduğu seviye için alt kategori (kaynak) seviyesinden bir envanter oluşturacak ve bu emisyonlar toplama yoluyla hesaplanacaktır. Ulusal bir toplam, her kirletici ve kategori için emisyonların bir araya getirilmesi ile hesaplanır. Bir istisna da, unutulması gereken ve ilave gelen emisyonlardır. Bunlar, ulusal toplamlara dahil edilmeyen, ancak bazen protokol gerekliliklerinde uyumu değerlendirmek için kullanılan, siyasi anlaşmaya göre ayrı ayrı raporlanan kaynaklardır. Buna örnek olarak uluslararası nakliyeden kaynaklanan (çizgisel kaynak-

lar) yakıt yanmasının neden olduğu emisyonlar verilebilir (UNECE Report, 2010).

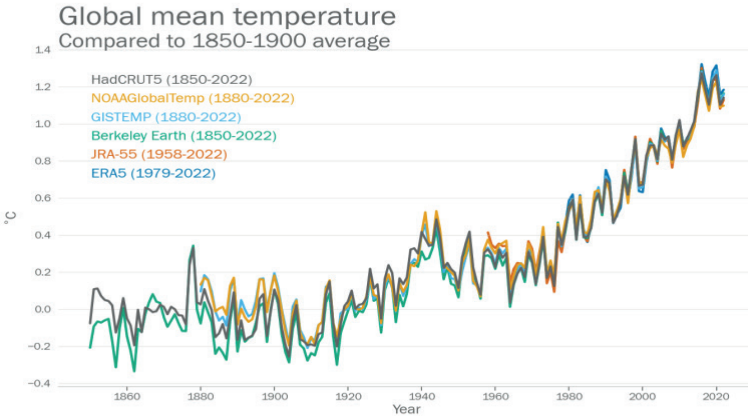
Ülkelerin dile getirdiği ihtiyaçlara uygun olarak, ulusal mevzuatın analizi, emisyon envanterlerinin geliştirilmesine ve sözleşme faaliyetlerine katılım ile farkındalık yaratmaya destek, program kapsamında üç ana faaliyet türü olarak desteklenmiştir. Hava kirliliği, ulusal, bölgesel ve küresel düzeylerde iş birliği gerektiren sınır ötesi bir sorundur. Hava kirliliğini azaltmak için çözümlerin uygulanmasına ilişkin önemli örnekler dünyanın dört bir yanında bulunabilir ve bunların birçoğu bölgesel iş birliği yoluyla önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Örneğin; Avrupa ve Kuzey Amerika'da hava kirliliği konusunda fikir birliği ve iş birliği isteği güçlü olmuştur. Ulusal ve bölgesel iş birliği, kirletici emisyonlarında ve konsantrasyonlarında dikkate değer bir azalma sağlanmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuş, ancak hala sorunlar devam etmektedir (SEI Report, 2021).

Emisyon kaynaklarının ne olduğunu ve emisyonların belirli bir zaman aralığında belirli bir ülkede nasıl geliştiğini anlamak, temiz hava politikasının geliştirilmesi için önemlidir. Emisyon envanterleri, emisyon kaynakları hakkında bilgi sağlar. Sözleşme çerçevesinde emisyon envanterlerinin raporlanması da, anlaşmanın düzgün bir şekilde işlenmesini sağlayan taraflar için temel bir yükümlülüktür. Emisyon envanterleri, sözleşme kapsamında uyumluluk izleme, modelleme ve politika geliştirme için anahtardır. Ülkelerin ulusal emisyon envanterlerini geliştirmelerine ve daha da iyileştirmelerine yardımcı olmak için, emisyon gridleme, büyük nokta kaynaklarının raporlanması, emisyon projeksiyonları ile senaryoları konusunda eğitim büyük önem taşımaktadır. Kimyasal taşıma modelleri ve emisyon envanterlerinin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi için veri sağlamak amacıyla birden fazla gözlem platformu ve yöntemi kullanan sağlam bir gözlem sistemine ihtiyaç vardır (Åström vd., 2021; Matthias vd., 2018). Ancak, karşılaşılan bazı temel zorluklar bulunmaktadır. Mevcut bilgileri ulusal ve yerel ölçekte kullanarak küresel emisyon envanterlerini iyileştirmek ve emisyon tahminlerini yer tabanlı, uçak ve uydu gözlemleriyle karşılaştırmak için ters modelleme ve diğer yöntemleri kullanmak bunlardan bir tanesidir.

2024 yılında, 51 taraf ülkenin 49'u (%96'sı) EMEP Emisyon Envanterleri ve Projeksiyonları Merkezi'ne (CEIP) emisyon envanterlerini sunmuş ve 43 taraf ülke de siyah karbon (BC) emisyonlarını bildirmiştir. Genel olarak, zamanında iletilen verilerin sayısı zamanla artmıştır. 0,1°×0,1° boylam/enlem kapsamında grid emisyonların raporlanması, EMEP ülkelerinin bu sınır içerisinde emisyonları raporlamak zorunda kaldığı ilk yıl olan 2017'den bu yana kademeli olarak artmıştır. Raporlama açısından bu olumlu eğilimlere rağmen, raporlama tamamlanamamış ve uzman tah-

minleri kullanılarak mekânsal olarak modeller oluşturulmuştur. EMEP için neredeyse tüm kirletici emisyonları COVID-19 salgınının üzerindeki sosyoekonomik etkileri nedeniyle, 2019 ile 2020 arasında düşmüştür. Ancak tüm kirleticiler ve bölgeler için 2022'deki emisyonlar, tekrar önceki yıla kıyasla artmıştır (United Nations, 2007; Aljboor, 2024)

Dünya Meteoroloji Örgütü'nün bir araya getirdiği altı önde gelen uluslararası sıcaklık veri setine göre, son sekiz yıl, sürekli artan sera gazı konsantrasyonları ve biriken ısı nedeniyle küresel olarak kayıtlara geçen en sıcak yıllar olmuştur. Kayıtlara geçen bu en sıcak sekiz yıl, iklim değişikliğinin etkilerinin hızla arttığını göstermektedir. Deniz seviyesinin yükselmesi hızlanırken, Avrupa buzullarının erimesi rekorları altüst etmiş ve aşırı hava koşulları yıkıma yol açmıştır. Küresel ortalama sıcaklık (1850-1900 ortalamasına göre) değerlerinin değişimi Şekil 2.'de gösterilmiştir. Gelecekte Dünya'nın ne kadar ısınacağı miktarı, önümüzdeki on yıllarda ne kadar karbondioksit ve diğer sera gazları yayacağımıza bağlıdır (Kumar, 2024; WMO Climate Report, 2024).

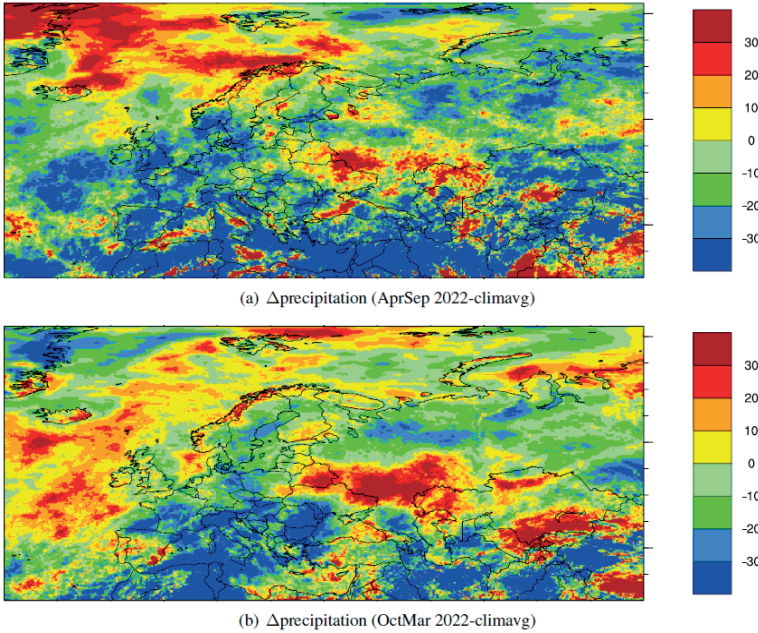


Şekil 2. Küresel ortalama sıcaklık (1850-1900 ortalamasına göre) değerlerinin değişimi

2022'de küresel ortalama sıcaklık, sanayi öncesi (1850-1900) seviyelerin yaklaşık 1,15 [1,02 ila 1,27] °C üzerindeydi. WMO tarafından derlenen tüm veri setlerine göre, 2022, yıllık küresel sıcaklıkların sanayi öncesi seviyelerin en az 1 °C üzerine ulaştığı üst üste sekizinci yıl (2015-2022) oldu. 2015 ila 2022, kayıtlardaki en sıcak sekiz yıl oldu. Paris Anlaşması'nın 1,5 °C sınırının geçici olarak aşılması olasılığı zamanla artmaktadır. Avrupa Birliği'nin (AB) Copernicus uydu izleme sistemi verilerine göre ise Arktik deniz buzul miktarı, eylül ayında 4,8 milyon kilometrekare ile

1991-2020 ortalamasının 1,1 milyon kilometrekare altında ölçüldü ve uzun yıllar ortalamasının yüzde 19 altında kaldı. Bu oran, en düşük 6'ncı eylül ayı verisi olarak kayıtlara geçti. Birçok ülke, buzulların erimesiyle birlikte deniz trafiği için oluşan yeni koşulları fırsat olarak değerlendirirken bu durum bölgedeki deniz trafiğinin artmasına yol açmıştır (Bhatti, 2024).

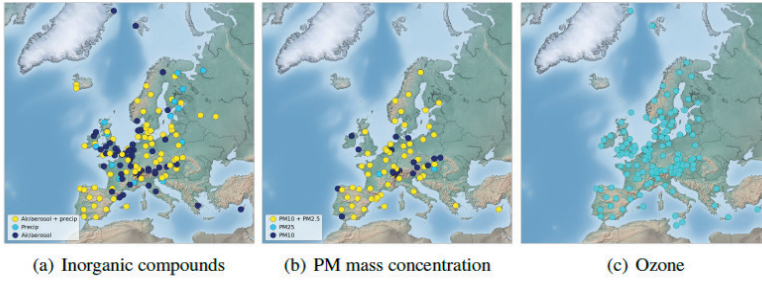
2022'de nisan ayından eylül ayına kadar, Kuzeybatı Norveç kıyıları, Belarus, Ukrayna, Avrupa, Rusya ve Batı Kazakistan normalden daha yağışlı iken; Batı, Güneybatı, Güneydoğu ve Orta Avrupa, Türkiye ve Doğu Kazakistan'ın (2000-2021) ortalamasından çok daha az yağış aldığı görülmektedir (Şekil 3a). Nisan ayında normalin altında yağıştan sonra, Fransa (Monako) kayıtlardaki en kurak Mayıs ayını bildirmiştir. Yaz ayları, Batı Avrupa'da çok kuraktı ve Belçika ve Lüksemburg'da 1991'den bu yana en kurak aylar yaşanmış oldu. Şekil 3b'de gösterildiği gibi, 2022 yılı kış ayları (Ocak-Mart ve Ekim-Aralık) Kuzeybatı Avrupa, Belarus'ta 2000-2021 ortalamasından daha yağışlı ve Orta Avrupa'da normale yakındı (EMEP Status Report, 2024).



Şekil 3. ECMWF-IFS modeliyle 2022'deki Meteorolojik Koşulların Karşılaştırılması

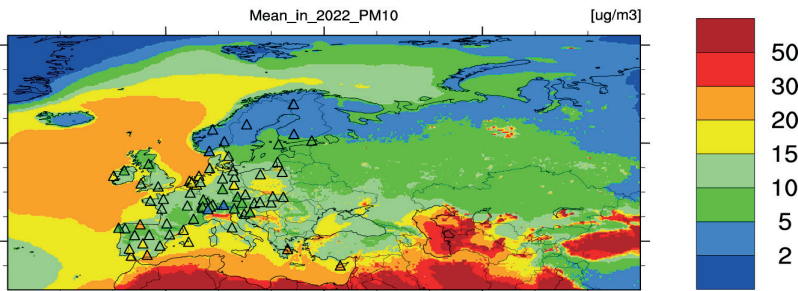
(a) Yaz (Nisan-Eylül) yağışı [%], (b) Kış (Ocak-Mart ve Ekim-Aralık) yağışı [%].

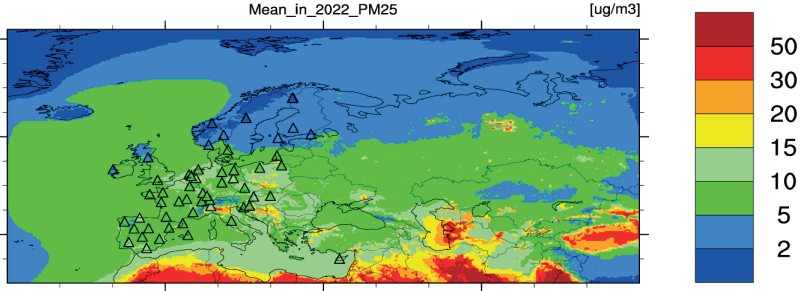
Fransa, İtalya, Çek Cumhuriyeti, Slovakya, Macaristan, Romanya ve Güneydoğu Avrupa normalden çok daha az yağış alırken, mart ayı özellikle İzlanda'da yağışlı geçti ve birçok istasyon rekor kırdı. Kuzey Makedonya kayıtlardaki en kurak baharını yaşarken, Çekya ve Polonya ise üçüncü en kurak aylarını bildirdi. Şekil 4'de, 2022 yılı için havadaki ve yağıştaki inorganik iyonlar, partikül madde ve ozon için veri bildiren sahalaların mekânsal dağılımı gösterilmektedir (EMEP Status Report, 2024 ; UNECE Report, 2010).



Şekil 4. 2022 Yılında "Seviye 1" Bileşenler için EMEP Ölçüm Ağı Sonuçları

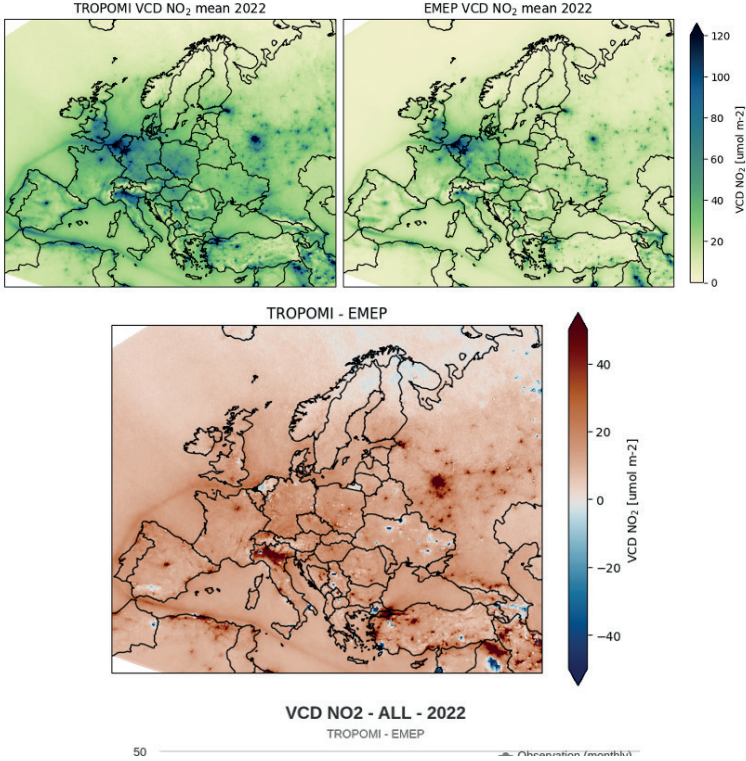
2022'de toplam 31 taraf üye ülke ile toplam 171 sahadan EMEP'e inorganik bileşenler, partikül madde ve/veya ozon ölçüm verileri bildirilmiştir. Tüm bu veriler EBAS veri tabanından (<http://ebas.nilu.no/>) ayrıntılı elde edilebilmektedir ve ayrıca EMEP/CCC tarafından teknik raporlarda ayrı ayrı raporlanmaktadır. EMEP MSC-W modeliyle simüle edilen 2022'deki PM10 ve PM2.5'in yıllık ortalama konsantrasyonlarının haritaları Şekil 5'te sunulmaktadır. Değerler ayrıca EMEP izleme ağında gözlemlenen yıllık ortalama PM10 ve PM2.5 konsantrasyonlarını da göstermektedir ve bunlar modellenmiş konsantrasyon alanlarının konturlarını kaplayan renkli üçgenlerle temsil edilmektedir.





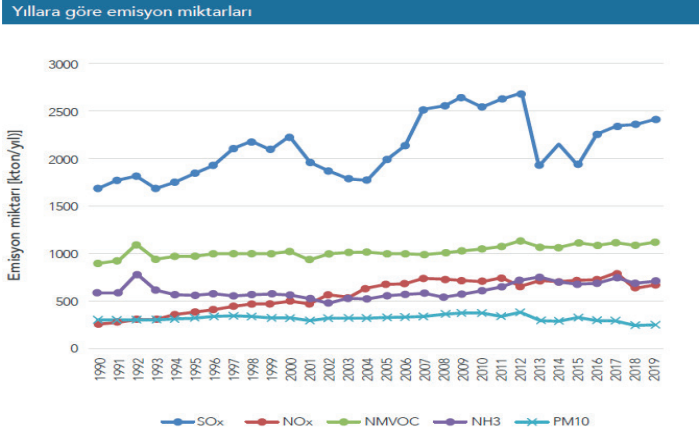
Şekil 5. Yıllık ortalama PM10 ve PM2.5 konsantrasyonları (2022-EMEP MSC-W)

Haritalar, bölgesel alanlarda PM10 ve PM2.5'in yıllık ortalamalarının kuzeyden güneye doğru genel olarak arttığını, PM10 konsantrasyonlarının Avrupa'nın kuzey kesimleri ve Rusya'da $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün altında olduğunu, orta enlemlerde $5-15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e, daha güneyde ise $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ üzerine çıktığını göstermektedir. Uzun menzilli taşınan ince ikincil aerosol derişimleri nedeniyle, yıllık ortalama PM10 seviyeleri batı/orta/doğu Avrupa genelinde oldukça homojendir. Denizler üzerindeki artan PM10, deniz tuzu aerosollerinden kaynaklanırken, Akdeniz bölgesindeki PM10 seviyeleri büyük ölçüde Afrika tozundan kaynaklanmaktadır. PM2.5 genel olarak aynı mekânsal model görüntüsü izlemekte ve PM10 açısından biraz daha düşük konsantrasyon seviyelerine sahiptir. EMEP modeli ve gözlemlere göre, Avrupa genelindeki PM dağılımının coğrafi dispersiyonu açısından oldukça iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Şekil 2.5'de ayrıca Kuzey Afrika ve Orta Asya bölgelerinde (Kazakistan, Özbekistan, Türkmenistan'ın bazı bölgelerinde) yıllık ortalama konsantrasyonların $30-50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve hatta daha yüksek derecede olduğu PM'yi simüle ettiği görülmektedir. Bu yüksek PM konsantrasyonları, bu bölgelerdeki kurak topraklardan ve çöllerden gelen ve sınırlar boyunca taşınan rüzgarla savrulan tozdan kaynaklanmaktadır. Şekil 6'da da TROPOMI troposferik NO_2 ve ona karşılık gelen EMEP simülasyonlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu model sonuçları, EMEP modeli tarafından hem mekânsal alanda hem de yıl boyunca NO_2 VCD'nin tutarlı bir şekilde düşük tahmin edildiğini göstermektedir (EMEP Status Report, 2024 ; Bhatti,2024).



Şekil 6. TROPOMI ve EMEP Simülasyonlarının Karşılaştırılması (NO_2)

LRTAP (Uzun Menzilli Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi), bölgedeki hava kirliliği emisyonlarında, özellikle kükürt için, önemli bir düşüşe katkıda bulunmuş ve ekonomik büyüme ile hava kirliliği eğilimleri giderek birbirinden ayrılmıştır. Türkiye, LRTAP Sözleşmesi kapsamında ulusal toplam ve sektörel emisyonlara ilişkin verileri raporlamaktadır (Thunis, 2021). 1990 ile 2019 arasındaki toplam emisyonlar da Şekil 7'de gösterilmiştir.



From the emissions of Table 2-1, Figure 2-1 shows the 1990-2019 trends in total.

Şekil 7. 1990 - 2019 Yılları için Ulusal Toplam SO₂, NO_x, NMVOC, NH₃, CO ve PM10 Emisyonları Değişimi

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

‘Sınır ötesi hava kirliliği’ atmosferde bir ülkeden veya bölgeden diğere taşınan ve bu süreçte meteorolojik faktörlerle sıklıkla kimyasal dönüşüm geçiren kirliliği ifade etmektedir. Kat edilen mesafeler ve meydana gelen kimyasal değişimler sonucunda, hangi emisyon kaynağının (örneğin bir fabrikadan gelen kükürt dioksit emisyonları) hangi konumda başka bir konumda belirli bir etkiye (örneğin bir gölde artan asitlik) yol açtığını belirlemek çok zordur. Türkiye, Birleşmiş Milletler Uzun Vadeli Sözleşmesi’ni, 1983’te Sınır Ötesi Hava Kirliliği (CLRTAP) ve 1985’te EMEP Protokolünü kabul ederek emisyon verilerini yıllık olarak rapor etmek zorundadır. EMEP simülasyon modelleri incelendiğinde, kış sıcaklıkları, özellikle kuzeydoğu, orta ve güneybatı Avrupa ve güneybatı Kazakistan olmak üzere neredeyse tüm Avrupa’da, 2000-2021 ortalamasından daha yüksek seviyede olmuştur. Ancak, İzlanda, kuzey İskandinavya ve Türkiye’de ise normalden daha soğuk geçmiştir. Batı, Güneybatı, Güneydoğu ve Orta Avrupa, Türkiye ve Doğu Kazakistan, 2022’de 2000-2021 ortalamasına göre çok daha az yağış almıştır. PM2.5 konsantrasyonları, Benelüks, Polonya, Macaristan (PM2.5 10 ila 15 µg/m³ arasında) ve Po Vadisi ve Batı Balkanlar, Polonya’nın güney sınırı ve Türkiye’deki 20 µg/m³ ‘ün üzerindeki sıcak noktalar hariç, Avrupa EMEP alanının çoğunda 10 µg/m³ ‘ün altında kalmıştır. Model tarafından hesaplanan yıllık ortalama PM10 değerlerinin de, Po Vadisi, Polonya, Benelüks, Batı Balkanlar, Türkiye ve Orta Asya’daki sınırlı alanlar hariç, çoğunlukla WHO AQG-2005 ve

AQG-2021 tarafından önerilen düzeylerin altında olduğu tespit edilmiştir. NO_x derişimleri, kuzey Almanya, Hollanda, Belçika, Polonya ve kuzey İtalya'da en yüksektir. Bu ülkelerde ayrıca, Batı Avrupa'da Birleşik Krallık, Fransa ve Belçika'nın bazı bölgelerinde ve doğuda Türkiye, Gürcistan, Ermenistan, Azerbaycan ve Kırgızistan'da olduğu gibi, indirgenmiş nitrojen birikimleri de yüksektir.

KAYNAKLAR

- 1- World Health Organization. (2023). *Protecting health through ambient air quality management: a resource package for the WHO European Region* (No. WHO/EURO: 2023-6898-46664-67857). World Health Organization. Regional Office for Europe.
- 2- Grøntoft, T., & Roux, M. S. (2020). Convention on long-range transboundary air pollution. UN/ECE international co-operative programme on effects on materials, including historic and cultural monuments. Environmental data report. October 2017 to November 2018. *NILU rapport*.
- 3- Byrne, A. (2024). The Regulation of Short-Lived Climate Pollutants under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution and Its Gothenburg Protocol.
- 4- Byrne, A. (2024). The Regulation of Short-Lived Climate Pollutants under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution and Its Gothenburg Protocol.
- 5- EMEP Status Report. (2024). *“Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components”* Joint MSC-W & CCC & CEIP & CIAM Report.
- 6- EMEP Emission Report. (2023). EEA air pollutant emission inventory guidebook, Technical guidance to prepare national emission inventories.
- 7- UNECE Report. (2010). Hemispheric transport of air pollution.
- 8- UNECE Report. (2024). United Nations Economic Commission for Europe Environment Policy Report, EMEP protocol.
- 9- Tørseth, K., Aas, W., Breivik, K., Fjæraa, A. M., Fiebig, M., Hjellbrekke, A. G., ... & Yttri, K. E. (2012). Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(12), 5447-5481.
- 10- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
- 11- Laj, P., Klausen, J., Bilde, M., Plass-Duelmer, C., Pappalardo, G., Clerbaux, C., ... & Zardini, A. A. (2009). Measuring atmospheric composition change. *Atmospheric environment*, 43(33), 5351-5414.
- 12- SEI Report, (2021). Developing Regional Cooperation on Air Pollution in Northeast Asia.
- 13- Åström, S., Källmark, L., Yaramenka, K., & Grennfelt, P. (2021). European and Central Asian Actions on Air Quality: A regional summary of emission trends, policies, and programs to reduce air pollution.

- 14- Matthias, V., Arndt, J. A., Aulinger, A., Bieser, J., Denier van der Gon, H., Kranenburg, R., . & Quante, M. (2018). Modeling emissions for three-dimensional atmospheric chemistry transport models. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(8), 763-800.
- 15- United Nations. (2007). Economic Commission for Europe, Hemispheric transport of air pollution 2007.
- 16- Aljboor, S. O. O. (2024). Characterization of urban aerosols pollution during the COVID-19 crisis by particle induced X-ray emission spectroscopy.
- 17- Kumar, A., Scaife, A. A., Merryfield, W. J., Coelho, C. A., Kolli, R. K., Fröhlich, K., ... & Hovsepyan, A. (2024). World Meteorological Organization (WMO) Accredited Infrastructure to Support Operational Climate Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- 18- WMO Climate Report. (2024). State of the Climate in Asia.
- 19- Bhatti, T. T. (2024). State of the Climate Crisis and Priorities for COP-29.
- 20- Thunis, P., Crippa, M., Cuvelier, C., Guizzardi, D., de Meij, A., Oreggioni, G., & Pisoni, E. (2021). Sensitivity of air quality modelling to different emission inventories: A case study over Europe. *Atmospheric Environment: X*, 10, 100111.