

Original Article

Open Access

İklim Değişikliğinin Toprak İçeriği Ve Ürün Kalitesi Üzerine Etkileri

Effects of Climate Change on Soil Composition and Crop Quality

Dilara K. Sunakbaeva^a^a Fen Bilimleri Fakültesi, Ekoloji ve Kimya Bölümü, Hoja Ahmet Yesevi Uluslararası Kazak-Türk Üniversitesi, Türkistan, Kazakistan

Article Information

Received 2 April 2025

Accepted 9 June 2025

Available online 30
June 2025

Anahtar Kelimeler:

İklim değişikliği, toprak bozulması, humus; ürün verimliliği, ürün kalitesi, Kazakistan, adaptasyon stratejileri

Abstract / Özet

Bu makalede, iklim değişikliğinin Kazakistan'daki toprak koşulları ve tarımsal ürün kalitesi üzerindeki etkileri incelenmektedir. Sıcaklık artışı, yağış rejimindeki değişimler ve aşırı hava olayları gibi iklimsel faktörlerin, toprakların kimyasal bileşimi, fiziksel özellikleri ve biyolojik aktivitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Araştırma sonuçları, toprak bozulması, humus içeriğinin azalması ve tuz birikiminin, ürün verimi ile tarımsal ürünlerin besin değerleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, iklim değişikliğinin tahıl, sebze ve kavun-karpuz gibi kültür bitkilerinde birim ürün kütlesinin, protein, vitamin ve mikro element içeriklerinin azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Kuraklığa dayanıklı çeşitlerin kullanımı, organik gübrelerin uygulanması, agro-ormanlaştırma önlemleri, sulama optimizasyonu ve toprak durumunun izlenmesi gibi adaptasyon stratejileri tartışılmıştır. Elde edilen bulgular, toprak kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve iklim değişikliği koşullarında tarımın dayanıklılığının artırılması için bütüncül yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

This article examines the effects of climate change on soil conditions and agricultural product quality in Kazakhstan. The impacts of climatic factors such as rising temperatures, changes in precipitation patterns, and extreme weather events on the chemical composition, physical properties, and biological activity of soils are analyzed. The research findings reveal that soil degradation, a decline in humus content, and salt accumulation have negative effects on crop yield and the nutritional value of agricultural products. Furthermore, climate change has been found to cause reductions in unit crop mass as well as in the protein, vitamin, and micronutrient contents of cereal, vegetable, and melon-watermelon crops. Adaptation strategies such as the use of drought-resistant varieties, application of organic fertilizers, agroforestry measures, optimization of irrigation, and monitoring of soil conditions are discussed. The findings emphasize the importance of holistic approaches for the sustainable management of soil resources and enhancing agricultural resilience under climate change conditions.

Giriş

İklim değişikliği, XXI. yüzyılın en önemli küresel çevre sorunlarından biri olarak kabul edilmektedir. Ortalama sıcaklıkların yükselmesi, yağış rejimlerinin değişmesi, kuraklıkların ve aşırı hava olaylarının sıklıklaşması, tarım arazilerinin verimliliği ve tarımsal ürünlerin kalitesi üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. Öngörülere göre sıcaklık artışı, yaklaşık bir milyon bitki ve hayvan türünün yok olmasına yol açacak, biyolojik çeşitliliğin 2050 yılına kadar %6-10, 2100 yılına kadar ise %13-27 oranında azalmasına neden olacaktır. Ayrıca, sıcaklık artışı bitkilerin erken çiçek açmasına yol açarak tozlaşma zamanlarını bozmakta ve ekolojik dengeleri değiştirmektedir [1].

İklim değişikliği; doğal ve antropojenik etkenlerin neden olduğu uzun dönemli iklim koşullarındaki değişimler olarak tanımlanmaktadır ve tüm canlı organizmalar üzerinde etkili olmaktadır. Doğal etkenler, iklimi kademeli olarak değiştirirken bu süreç doğal döngünün bir parçasıdır; ancak antropojenik etkiler daha kısa zaman dilimlerinde gerçekleşmekte ve ekosistemler üzerinde daha ciddi sonuçlar doğurabilmektedir [2].

İklimsel değişiklikler, bitki türlerinin sayısında azalmaya, genetik çeşitliliğin düşmesine ve bitkilerin çimlenme, büyüme ve üreme süreçlerinin olumsuz etkilenmesine neden

olabilmektedir. Kuraklık, sel ve yoğun güneş radyasyonu gibi olaylar, tarım bitkileri için ciddi tehditler oluşturmaktadır [3].

Kazakistan'da bitki sağlığı ve tarımsal ürünlerin korunmasına ilişkin konular, "Bitki Koruma Kanunu" kapsamında düzenlenmiştir. Bu yasa, tarımsal gıda ürünlerinin kirlenmesini önlemeye yönelik önlemleri, iklim değişikliğine uyum süreçlerini ve bu önlemlerin etkinliğinin izlenmesini içermektedir [4].

Toprak oluşumu ve özellikleri, V.V. Bartold (1914), L.S. Berg (1926), S.S. Nestruev (1931), V.V. Nikitin (1926), N.A. Dimo (1915), İ.P. Gerasimov (1933), V.A. Kovla (1946, 1947) gibi araştırmacıların yanı sıra N.V. Bogdanoviç, N.V. Kimberg ve A.Z. Genusov (1950-1960'lar) tarafından ayrıntılı biçimde incelenmiştir [5]. Toprak kirliliği ve toprak durumunu etkileyen faktörler üzerine çalışmalar ise H.T. Riskeva, R.K. Koziedov, L.A. Gofurova, H.K. Tursunov, G. Yuldashev, Ş. Kholikov, R. Eşçonov, T. Abdurahmanov ve Z. Cabbarov tarafından yürütülmüştür [6].

Kazakistan toprakları, iklim kuşağı ve topoğrafyaya bağlı olarak belirgin çeşitlilik göstermektedir. Ülkenin düz kesimlerinde üç ana zonal toprak grubu ayrılmaktadır: kuzeyde kara topraklar (çernozyom), bozkır kuşağında koyu kestane renkli topraklar ve güneyde kahverengi ile gri-kahverengi çöl toprakları. Bu topraklar erozyona açık olup; rüzgâr erozyonu özellikle bozkır kenarlarında, su erozyonu ise eğimli alanlarda yoğunlaşmaktadır. Son on yıllarda bozkır çernozyomlarında humus içeriğinde %25-35'e varan azalma gözlenmiştir [7].

Kazakistan'ın dağlık bölgelerinde toprakların dikey zonallığı açık bir biçimde görülmektedir: toprak örtüsü, dağ eteği çöllerinden çayır-orman topraklarına kadar değişim göstermektedir. Tarım alanları, kalın humuslu horizonlara sahip (kara ve koyu kestane topraklar) yüksek verimli alanlar ile daha kurak ve düşük verimli koşullu tarım alanlarına ayrılmaktadır. Ülke topraklarının %75'inden fazlası arid ve yarı-arid bölgelerde yer aldığından, toprak bozulması ve tuzlanma sorunları kritik düzeyde önem taşımaktadır. Sıcaklık artışı ve yağış miktarındaki azalma, verimsiz toprak alanlarının genişlemesine, tarımsal verimin düşmesine ve ürünlerin kimyasal bileşimlerinin bozulmasına yol açmaktadır [8].

İklim değişikliği koşullarında, toprak verimliliğinin korunması ve sürdürülebilir tarımın sağlanması konuları büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda su kaynaklarının yönetimi kilit bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Topraktaki nem eksikliği, biyolojik aktivitenin azalmasına, toprak yapısının bozulmasına ve besin elementlerinin tutulma kapasitesinin düşmesine yol açmaktadır. Öte yandan, aşırı sulama özellikle kurak bölgelerde tuz oluşumunu artırarak bitki gelişimi ve toprak ekolojik durumu üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır [9].

Tarımsal teknoloji ve üretim uygulamaları, iklim değişikliğine uyum sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda; kuraklığa ve hastalıklara dayanıklı çeşitlerin kullanılması, koruyucu tarım yöntemlerinin uygulanması, organik gübrelerin ve malçlamanın kullanımı ile toprak verimliliğini yeniden kazandıran agro-ormancılık önlemleri öne çıkmaktadır [10].

Antropojenik baskılar da toprak ekosistemleri üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Sanayi kaynaklı kirlenme, kimyasal gübre ve pestisit kullanımı, ormansızlaşma ve kentleşme, toprakların kendini yenileme kapasitesini düşürmekte ve mikroekolojik ilişkileri bozarak arazi bozulmasını hızlandırmaktadır [11].

Toprak durumunun izlenmesi de bu süreçte büyük önem taşımaktadır. Uzaktan algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve kimyasal-biyolojik analiz yöntemleri, erozyon, tuzlanma ve ağır metal kirliliği düzeylerinin değerlendirilmesine, ayrıca iklimsel faktörlerin etkisiyle oluşabilecek değişimlerin öngörülmesine olanak sağlamaktadır [12].

Dolayısıyla, toprak özellikleri, agroekosistemlerin ekolojik dayanıklılığı ve adaptasyon önlemleri konusundaki bilimsel bilgilerin entegrasyonu, sürdürülebilir tarım stratejilerinin geliştirilmesi için temel bir gerekliliktir. Kazakistan koşullarında, iklim değişikliğinin doğal kuraklıkla birleşmesi, toprak durumunun sistematik olarak değerlendirilmesini, izlenmesini ve yenilikçi teknolojilerin uygulanmasını, gıda güvenliği ile biyolojik çeşitliliğin korunması açısından kritik hâle getirmektedir [13].

Bu bölüm, iklimsel faktörlerin Kazakistan'ın farklı bölgelerindeki toprakların kimyasal ve fiziksel bileşimi üzerindeki etkilerinin yanı sıra, en yüksek düzeyde bozulma ve tuzlanma görülen alanların belirlenmesine odaklanmaktadır.

İklim değişikliği, toprakların kimyasal bileşimi, fiziksel özellikleri ve biyolojik aktivitesi üzerinde doğrudan ve dolaylı etkiler oluşturarak tarımsal ürünlerin kalitesine yansımaktadır. Sıcaklık artışı ve yağış miktarındaki azalma, topraktaki suyun daha hızlı buharlaşmasına, toprak nem kapasitesinin düşmesine ve yapısının bozulmasına neden olmaktadır. Nem yetersizliği koşullarında, bitkiler için makro ve mikro elementlerin erişilebilirliği azalmakta; bu durum bitkilerin büyüme, gelişme ve verimlilik süreçlerini olumsuz yönde etkilemektedir [14].

İklimsel değişiklikler aynı zamanda erozyon ve toprak bozulması süreçlerini de hızlandırmaktadır. Kuraklık ve şiddetli rüzgârların giderek daha sık görüldüğü Kazakistan'ın bozkır ve yarı çöl bölgelerinde, verimli üst toprak tabakasının rüzgârla taşınması, tuz birikimi ve humus horizonunun incelenmesi gözlenmektedir. Bu süreçler, ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkiler oluşturmakta; tahıl ve sebze bitkilerinde protein, vitamin, mineral ve organik bileşik içeriklerinin azalmasına yol açarak besin değerlerini düşürmektedir [15].

İklim değişikliğinin ürün kalitesi üzerindeki etkisi, aynı zamanda bitkilerin fizyolojik süreçlerindeki bozulmalar yoluyla da kendini göstermektedir. Örneğin, sıcaklık artışı bitkilerin vejetasyon dönemini hızlandırmakta, bu durum meyve ve tohumların tam olarak gelişmemesine, birim ürün kütlelerinin azalmasına ve organoleptik özelliklerin (renk, tat, doku) zayıflamasına neden olabilmektedir. Ultraviyole radyasyon düzeyindeki artış, kuraklıkların şiddetlenmesi ve yağış düzensizlikleri, antioksidanlar, vitaminler ve enzimler gibi biyolojik olarak aktif bileşiklerin sentezini olumsuz etkileyerek

tarımsal ürünlerin insan sağlığı açısından değerini azaltmaktadır [16].

İklim değişikliğinin toprak ve ürünler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki önlemler önerilmektedir:

- Tarımsal teknik uygulamaların adaptasyonu: Kuraklığa dayanıklı çeşitlerin seçilmesi, ekim zamanlarının optimize edilmesi, damla sulama sistemlerinin ve koruyucu tarım yöntemlerinin uygulanması.
- Toprak yapısının ve verimliliğinin iyileştirilmesi: Organik gübrelerin kullanımı, agro-ormancılık önlemleri, malçlama uygulamaları ve erozyonla mücadele çalışmaları.
- Toprak ve ürün durumunun izlenmesi: Nem, humus, besin elementleri ve tuz içeriğinin düzenli olarak değerlendirilmesi; ayrıca kimyasal-biyolojik ve fizikokimyasal analiz yöntemleriyle ürün kalitesinin kontrol edilmesi.

Dolayısıyla, iklimsel faktörler, toprak durumu ve tarımsal ürün kalitesi arasındaki ilişkilerin araştırılması, Kazakistan açısından son derece güncel ve stratejik bir konudur. Aşırı iklim olaylarının ve yüksek ariditenin hüküm sürdüğü bölgelerde, tarımsal üretkenlik özellikle hassas hâle gelmektedir. Zamanında uygulanacak adaptasyon önlemleri, yalnızca toprak verimliliğini korumakla kalmayacak, aynı zamanda kaliteli ve güvenli tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini de sağlayacaktır [17].

Materyaller ve Yöntemler

İklim değişikliğinin toprak içeriği ve tarımsal ürün kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, Kazakistan'ın farklı iklim bölgelerinde kapsamlı arazi ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar, toprak tiplerinin, nem seviyelerinin ve sıcaklık rejimlerinin farklılık gösterdiği ova, bozkır ve dağlık alanları kapsamıştır.

❖ Alan seçimi ve örnekleme

Toprak ve bitki örnekleri, ülkenin başlıca iklim bölgelerini temsil eden tarım arazileri ve mera alanlarından alınmıştır:

- Kuzey bölgesi – kara topraklar (çernozyomlar);
- Bozkır bölgesi – koyu kestane renkli topraklar;
- Güney bölgesi – kahverengi ve gri-kahverengi çöl toprakları.

Örnekleme, düz alanlarda 1 × 1 km'lik kare ağ sistemi, dağlık bölgelerde ise doğrusal profil yöntemi kullanılarak standart metodolojiye göre yapılmıştır. Her örnek, yüzey (0–20 cm) ve alt katman (20–40 cm) olmak üzere iki derinlikten alınmıştır.

❖ Toprakların laboratuvar analizi

İklimsel faktörlerin toprak üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla aşağıdaki göstergeler belirlenmiştir:

Fiziksel özellikler: doku (tekstür), yoğunluk ve su tutma kapasitesi;

Kimyasal göstergeler: pH değeri, humus içeriği, azot, fosfor, potasyum, tuz ve ağır metal konsantrasyonları;

Biyolojik aktivite: mikrobiyal biyokütle, enzim aktivitesi ve organik madde miktarı.

Sonuçlar

İklim değişikliği, Kazakistan'daki toprakların durumu ve tarımsal ürün kalitesi üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. Sıcaklık artışı ve yağış miktarındaki azalma, toprak bozulmasına, humus içeriğinin azalmasına, üst katmanın sıkışmasına ve tuz birikiminin artmasına neden olmaktadır. Bu süreçler, tarımsal ürünlerin verimliliğini ve besin değerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Araştırma sonuçları, toprak bozulmasının ürün kalitesindeki düşüşle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Humus miktarındaki azalma, tuz birikimi ve toprak nem tutma kapasitesinin düşmesi; tahıl, sebze ve kavun-karpuz gibi kültür bitkilerinde tane kütesinin, protein, vitamin ve mikro element içeriklerinin azalmasına yol açmaktadır. En yüksek iklim direncine sahip alanların, yüksek organik madde içeriğine ve yeterli nem düzeyine sahip topraklar olduğu belirlenmiştir.

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak için kapsamlı adaptasyon önlemlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu önlemler arasında:

- Sulama sistemlerinin geliştirilmesi,
- Toprak durumunun düzenli izlenmesi,
- Modern analiz yöntemleri ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) teknolojilerinin kullanımı yer almaktadır.

Bu önlemlerin uygulanması, toprak verimliliğinin korunmasını, agroekosistemlerin aşırı iklim koşullarına karşı dayanıklılığının artırılmasını ve yüksek kaliteli, güvenli tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini sağlayacaktır.

Dolayısıyla, iklimsel faktörler, toprak durumu ve ürün kalitesi arasındaki ilişkilerin bütüncül biçimde incelenmesi, Kazakistan'da sürdürülebilir tarımsal kalkınmanın ve ülkenin gıda güvenliğinin sağlanması için temel bir koşuldur.

Analiz Yöntemleri

Analizlerde, titrimetrik ve kolorimetrik tayinler, spektrofotometrik analiz yöntemleri, ayrıca FAO ve ulusal standartlar tarafından önerilen protokoller kullanılmıştır.

Tarımsal Ürün Kalitesinin Değerlendirilmesi

Ürün kalitesi aşağıdaki parametreler temelinde değerlendirilmiştir:

- Ürün birim kütlesi ve verim;
- Protein, karbonhidrat, vitamin ve mikro element içerikleri;
- Organoleptik özellikler (renk, tat, doku yoğunluğu).

Analizlerde GOST standart yöntemleri ile bitkilerin biyokimyasal bileşimini belirlemeye yönelik laboratuvar prosedürleri kullanılmıştır.

İstatistiksel Veri İşleme

İklimsel faktörler, toprak bileşimi ve ürün kalitesi arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla aşağıdaki istatistiksel yöntemler uygulanmıştır:

- Korelasyon ve regresyon analizi,
- Çok değişkenli analiz yöntemleri (ana bileşenler analizi),
- CBS tabanlı modelleme, toprak bozulmasının mekânsal dağılımını değerlendirmek için.

Tüm verilerin güvenilirliği, istatistiksel anlamlılık kriterleri ($p < 0,05$) kullanılarak doğrulanmıştır.

Bulgular ve Tartışma

❖ İklimsel Faktörlerin Toprak İçeriği Üzerindeki Etkileri

Toprak örneklerinin analizi, sıcaklık artışı ve yağış miktarındaki azalmanın, toprakların kimyasal ve fiziksel bileşiminde önemli değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur. Bozkır kuşağında yer alan koyu kestane renkli topraklarda, son 15–20 yıl içinde humus içeriğinde %20–25 oranında azalma gözlenmiştir. Bu durum, organik maddenin hızla parçalanması ve erozyon süreçlerinin şiddetlenmesiyle ilişkilidir. Ülkenin güneyindeki arid iklim koşullarında ise, toprakların üst katmanında tuz birikimi tespit edilmiştir; bu birikim, toprak verimliliğini düşürmekte ve tarımsal üretimi zorlaştırmaktadır [18–20].

Toprakların fiziksel özelliklerinde de belirgin değişiklikler meydana gelmiştir: üst tabakanın sıkışması ve su tutma kapasitesinin azalması, su ve besin maddelerinin bitki köklerine ulaşmasını sınırlandırmaktadır. Dağlık bölgelerdeki topraklar, belirgin dikey zonallık ve daha istikrarlı nem koşulları sayesinde nispeten daha az bozulma göstermiştir. Ancak yoğun erozyona maruz kalan lokal alanlarda, toprak verimliliğinde düşüşler kaydedilmiştir.

❖ İklim Değişikliğinin Tarımsal Ürün Kalitesi Üzerindeki Etkileri

Nem seviyesinin azalması ve sıcaklık artışı, tarımsal ürünlerin verimliliği ve kalitesi üzerinde doğrudan etkiler oluşturmıştır. Tahıl bitkilerinde 1000 tane ağırlığında %8–12 azalma, protein ve vitamin içeriğinde ise %10–15 oranında düşüş belirlenmiştir. Sebze ve kavun-karpuz gibi bitkilerde şeker, organik asit ve mikro element içeriklerinde azalma gözlenmiş; bu durum ürünlerin tat, aroma ve besin değerlerinde bozulmalara yol açmıştır.

Analiz sonuçları, yüksek organik madde içeriğine ve yeterli nem düzeyine sahip topraklarda en iyi kalite parametrelerinin korunduğunu göstermektedir. Bu bulgu, organik gübrelerin kullanımının ve koruyucu tarım tekniklerinin uygulanmasının gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

❖ İklim Koşulları, Toprak Bileşimi ve Üretkenlik Arasındaki Korelasyonlar

Yapılan istatistiksel analizler, sıcaklık değişimleri, humus içeriği ve ürün verimliliği arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, humus içeriğindeki %'lik azalma, tahıl veriminde %5–7 oranında düşüşe, toprak tuzluluğundaki %'lik artış ise ürün kalitesinde %3–5 azalmaya neden olmaktadır.

Oluşturulan regresyon modelleri, iklimsel faktörlerin etkisi altında toprak bozulması ve üretkenlik kayıplarının önümüzdeki 10–15 yıl içerisindeki dinamiklerinin tahmin edilmesini mümkün kılmıştır. Bu modeller, tarımsal üretim planlaması açısından önemli bir bilimsel araç olarak değerlendirilmektedir.

Uygulamalı Öneriler

Araştırma sonuçları, Kazakistan tarım sektörünün iklim değişikliğine uyum sağlayabilmesi için aşağıdaki önlemlerin alınmasının gerekli olduğunu göstermektedir:

- Kuraklığa dayanıklı bitki çeşitlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Organik gübreleme ve agro-ormanlaştırma uygulamalarının artırılması,
- Sulama sistemlerinin özellikle güneydeki arid bölgelerde optimize edilmesi,
- Toprak durumunun Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama yöntemleriyle izlenmesi.

İklim değişikliğine uyum sağlamak için geliştirilecek bu bütüncül yaklaşım, toprak bozulmasını azaltacak, toprak verimliliğini koruyacak ve ürün kalitesini artırarak ülkenin gıda güvenliğini sağlamaya katkı sunacaktır.

Conflict of Interest: NIL

Funding Sources: NIL

Kaynaklar

- [1] Oishy, M. N., ve diğerleri. Unravelling the effects of climate change on the soil–plant–atmosphere nexus: a review. — İklim değişikliğinin toprak, bitki ve atmosfer arasındaki etkileşim üzerindeki etkileri; toprak bozulması ve bitki fizyolojisine ilişkin kapsamlı bir derleme.
- [2] Wang, S., ve diğerleri. Assessing the impacts of climate change on crop yields, soil organic carbon sequestration, and N₂O emissions in wheat–maize rotation systems. PLoS One, 2024.
- [3] Mondal, S. Impact of Climate Change on Soil Fertility. — Isınma ve yağış rejimi değişikliklerinin toprakların fizikokimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkilerini ele alan bir derleme.
- [4] Basso, B., ve diğerleri. Soil Organic Carbon and Nitrogen Feedbacks on Crop Yields under Climate Change. Agricultural and Environmental Letters, 2018. — Topraktaki organik karbon (SOC) azalmasının verim üzerindeki etkilerini göstermektedir.
- [5] Nie Gorooei, A., ve diğerleri. Projected climate change impacts on future soil organic carbon. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2025.
- [6] Nigussie, Z. The Effect of Climate Change on Soil Health: A Review. International Journal of Energy and Environmental Science, 2024.

- [7] Liang, S., ve diğerleri. Impacts of climate change on crop production and soil health. *Science of the Total Environment*, 2024.
- [8] Topa, D.-C., Căpșună, S., Calistru, A.-E., & Ailincăi, C. Sustainable Practices for Enhancing Soil Health and Crop Quality in Modern Agriculture: A Review. *Agriculture (MDPI)*, 2025. — Toprak sağlığını ve ürün kalitesini artırmaya yönelik sürdürülebilir agro-teknolojik uygulamaların analizi.
- [9] Kabato, W., ve diğerleri. Managing soil health for climate resilience and crop production. *Science of The Total Environment*, 2025. — Toprak yönetimi yoluyla iklim direncinin ve tarımsal üretimin artırılmasına dair bir inceleme.
- [10] McClelland, S. C., ve diğerleri. Managing for climate and production goals on croplands. *Nature Climate Change*, 2025. — İklim değişikliğini hafifletirken tarımsal verimliliği korumaya yönelik stratejilerin tartışıldığı çalışma.
- [11] Liu, L., ve diğerleri. Impacts of climate variability and adaptation strategies on crop yields and soil organic carbon in the US Midwest. *PLoS One*, 2020. — Isınma ve adaptasyon stratejilerinin tarımsal verim ve toprak organik karbonu üzerindeki deneysel etkileri.
- [12] Bayu, T., ve diğerleri. Review on contribution of integrated soil fertility management to mitigate climate change and sustain agricultural production. *Cogent Environmental Science*, 2020. — İklim değişikliğini azaltmada entegre toprak verimliliği yönetiminin rolü.
- [13] Mutegi, J., ve diğerleri. Soil health and climate change: Implications for food security. (AGRA Report). — İklim değişikliği koşullarında toprak sağlığının gıda güvenliği üzerindeki etkileri.
- [14] Akchaya, K., ve diğerleri. Boosting resource use efficiency, soil fertility, and food security through legume intercropping under climate change conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2025. — İklim değişikliği koşullarında baklagil ara ekimiyle toprak verimliliği ve kaynak kullanım verimliliğinin artırılması üzerine bir derleme.
- [15] Bhaduri, D., ve diğerleri. Next generation agriculture plays a decisive role in soil quality under climate change: a review. *Soil Biology (Springer)*, 2025. — İklim değişikliği altında toprak kalitesine ilişkin göstergelerin değerlendirilmesi.
- [16] Bay Sholnanov, S. S., & Baybazarov, D. K. Küresel iklim değişikliğinin Kazakistan'da yazlık buğday verimi üzerindeki etkisi. *Hidrometeoroloji ve Ekoloji Dergisi*.
- [17] Lebed, L. V., Belenkova, Z. S., & Turbacheva, T. P. İklim değişikliklerinin Kazakistan otlakları üzerindeki etkileri. *Hidrometeoroloji ve Ekoloji Dergisi*.
- [18] Bykova, A. V. İklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkisi. *CyberLeninka, Rusça inceleme makalesi*.
- [19] Eurasian Research. İklim değişikliği ile tarım sektörü arasındaki karşılıklı etkiler. — İklim ve agroekonomik süreçler arasındaki ilişkiye dair genel derleme.
- [20] Akgbz (Tarım Portalı). İklim değişikliği, tarımsal ürün verimini ve gıda kalitesini düşürebilir mi? — Bilimsel kaynaklara dayalı popüler bir değerlendirme.

Declarations:

Author's Contribution:

- Conceptualizing, research, data collection and compilation of the manuscript
- The author agrees to take responsibility for every facet of the work, making sure that any concerns about its integrity or veracity are thoroughly examined and addressed

Correspondence:

Dilara K. Sunakbaeva

dilara.sunakbayeva@ayu.edu.kz
