

Yükseltilmiş Karbondioksit (CO₂) Seviyelerinin Yaprakbitleri (Aphididae) Üzerindeki Biyolojik ve Ekolojik Etkileri: Güncel Bir Derleme

Şeyma KAYA KORKMAZ¹*, Mehmet KARACAOĞLU²

¹Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Bingöl University, Bingöl, Türkiye

²Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Malatya Turgut Ozal University, Malatya, Türkiye

*Corresponding author e-mail: skayakorkmaz@bingol.edu.tr

Ö Z E T

MAKALE BİLGİSİ

Atmosferdeki karbondioksit (CO₂) seviyeleri, insan faaliyetleri nedeniyle hızla artmakta; bu artış iklim sistemiyle birlikte kara ekosistemlerini de doğrudan etkilemektedir. Karbondioksitin sera gazı etkisi, yaşam için gerekli sıcaklık dengesini sağlarken, artan seviyeleri bitki fizyolojisinde değişimlere neden olmaktadır. Yükselen CO₂ seviyesi, fotosentezi artırarak bitki büyümesini teşvik etmekte; ancak karbonhidrat birikimini artırıp protein içeriğini azaltarak bitkinin besin değerini düşürmektedir. Bu bileşim değişiklikleri, özellikle floemden beslenen yaprakbitleri (Hemiptera: Aphididae) gibi fitofag böcekleri doğrudan etkilemektedir. Karbondioksit maruz kalan bitkilerde yaprak sertliği, kütikula kalınlığı ve ikincil metabolit üretimindeki artış, yaprak bitlerinin yaşam döngüsü ve beslenme davranışını değiştirebilir. Ancak bu etkiler, türler arasında farklılık gösterdiğinden genelleme yapmak zordur. Bu derlemede, artan CO₂ seviyelerinin yaprakbitlerinin biyolojisi ve ekolojisi üzerindeki etkileri incelenmiş; gelişim süresi, üreme kapasitesi, yaşam süresi ve popülasyon dinamiklerindeki değişimlerin tarımsal üretim ve entegre zararlı yönetimi açısından yaratabileceği riskler tartışılmıştır.

Geliş:
21.07.2025
Kabul:
21.11.2025

Anahtar Kelimeler: Yükseltilmiş karbondioksit (CO₂), Yaprakbitleri (Aphididae), İklim değişikliği, Bitki-böcek etkileşimi

Biological and Ecological Effects of Elevated Carbon Dioxide (CO₂) Levels on Aphids (Aphididae): A Current Review

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO₂) levels in the atmosphere are rapidly increasing due to human activities; this increase directly affects land ecosystems as well as the climate system. While the greenhouse gas effect of CO₂ provides the temperature balance necessary for life, its increased levels cause changes in plant physiology. Elevated CO₂ promotes plant growth by increasing photosynthesis; however, it decreases the nutritional value of the plant by increasing carbohydrate accumulation and decreasing protein content. These compositional changes directly affect phytophagous insects, especially phloem-feeding aphids (Aphididae). The increase in leaf stiffness, cuticle thickness and secondary metabolite production in plants exposed to carbon dioxide can alter the life cycle and feeding behaviour of aphids. However, these effects vary among species, making generalisations difficult. In this review, the effects of increasing CO₂ levels on the biology and ecology of aphids are examined, and the risks that changes in development time, reproductive capacity, life span and population dynamics may pose for agricultural production and integrated pest management are discussed.

Keywords: Elevated carbon dioxide (CO₂), Aphids (Aphididae), Climate change, Plant-insect interaction

ARTICLE INFO

Received:
21.07.2025
Accepted:
21.11.2025

Cite this article as: Kaya Korkmaz, Ş. ve Karacaoğlu, M. (2025). Yükseltilmiş Karbondioksit (CO₂) Seviyelerinin Yaprakbitleri (Aphididae) Üzerindeki Biyolojik ve Ekolojik Etkileri: Güncel Bir Derleme. *Manas Journal of Agriculture Veterinary and Life Sciences*, 15(2), 304-310. <https://doi.org/10.53518/mjavl.1747409>

GİRİŞ

Güneşten gelen kısa dalga boylu ışınlar yeryüzünü ısıtmakta ve yeryüzü tarafından emilen bu enerji, tekrar atmosfere yansıtılmaktadır. Bu enerjinin bir kısmı, atmosferde bulunan sera gazları tarafından tutulmakta ve böylece yeryüzünün sıcaklığı korunmaktadır. Bu doğal süreç "sera gazı etkisi" olarak adlandırılmakta ve gezegenimizin yaşanabilir sıcaklık aralığında kalmasını sağlamaktadır (Alper ve Anbar, 2007). Ancak atmosferdeki sera gazı yoğunluğundaki artış, özellikle sanayi devrimi sonrası insan faaliyetleriyle hız kazanmış ve küresel ısınmaya yol açmıştır. Öyle ki, son 15 yılda ölçülen ortalama sıcaklık değerleri, son 150 yılın ortalamasından 1.1°C daha yüksek olarak kaydedilmiştir. Karbondioksit (CO₂), bu süreçte en etkili gazlardan biridir. Sanayi devriminden önce 280 ppm seviyelerinde olan atmosferik CO₂ konsantrasyonu, 2010 yılında 379 ppm'e ulaşmış ve bu yüzyılda iki katına çıkabileceği öngörülmektedir (Revelle, 1982; Anonim, 2023).

Yükselen atmosferik CO₂ düzeylerinin bitkiler üzerindeki etkileri, özellikle C3 fotosentez yoluna sahip bitkilerde dikkat çekici değişimlere neden olmaktadır. Fotosentez hızında meydana gelen artış bitki gelişimini teşvik etmekte; bu durum, yaprak karbon konsantrasyonunun yükselmesine, protein oranının azalmasına ve dolayısıyla bitkisel besin kalitesinin düşmesine yol açmaktadır. Ayrıca, yükselen CO₂ seviyesi bitkilerde yapısal savunma mekanizmalarını da tetiklemekte; karbon bazlı yapısal savunmalar, yaprak sertliği, kütikula kalınlığı ve fenolik bileşik üretimi gibi değişimlerle sonuçlanmaktadır (DeLucia ve ark., 2012; Ekele ve ark., 2025; Fajer, 1989; Hamann ve ark., 2021; Khan ve ark., 2025; O'Connor ve ark., 2024; Robinson ve ark., 2012; Stiling ve Cornelissen, 2007; Welti ve ark., 2020).

Bu fizyolojik ve kimyasal değişimlerin, bitkilerle doğrudan etkileşimde olan fitofag böcekler üzerindeki etkileri son yıllarda yoğun olarak araştırılmaktadır. Yükselen CO₂ seviyeleri, yalnızca bitki morfolojisini ve besin içeriğini değil; aynı zamanda bu bitkilerle beslenen yaprakbitleri (Hemiptera: Aphididae) gibi floem emici böceklerin biyolojisini, davranışlarını ve popülasyon dinamiklerini de etkilemektedir. Yaprakbitleri, doğrudan floeme penetre olarak beslendikleri ve hızlı döl sürelerine sahip oldukları için bitkideki değişimlere en hızlı tepki veren fitofag böcek gruplarından biri olarak öne çıkmaktadır (Pritchard ve ark., 2007).

Öte yandan, bu etkiler yalnızca yaprak bitleriyle sınırlı kalmayıp, onların doğal düşmanları olan avcı türler üzerinde de dolaylı etkiler yaratmaktadır (Najar-Rodriguez ve ark., 2024; Yan ve ark., 2020; Zavala ve ark., 2017). Bu bağlamda, artan CO₂ seviyelerinin ekosistem içindeki trofik etkileşimleri nasıl şekillendirdiğini anlamak, gelecekteki çevresel senaryolara yönelik etkili tarımsal mücadele stratejileri geliştirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Bu derleme çalışmanın amacı, yüksek atmosferik CO₂ konsantrasyonlarının yaprakbitlerinin fizyolojisi, davranışı ve popülasyon dinamikleri üzerindeki etkilerini literatür ışığında değerlendirmek; bu değişimlerin entegre zararlı yönetimi ve tarımsal üretim üzerindeki olası sonuçlarını tartışmaktır.

ARTAN KARBONDİOKSİTİN BİTKİLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Küresel ölçekte artan insan faaliyetleri, atmosferdeki CO₂ seviyelerinin hızla yükselmesine neden olmuş ve bu durum, geri dönüşü zor çevresel sonuçlar doğuran küresel bir kriz hâline gelmiştir. 1760'lı yıllarda İngiltere'de başlayan Sanayi Devrimi ile birlikte CO₂ emisyonlarında belirgin bir artış gözlenmiş; özellikle ulaşım, sanayi ve enerji sektörlerinin gelişimi bu artışı daha da hızlandırmıştır.

Karbondioksit, bitkilerde fotosentezin temel substratlarından biri olup, atmosferdeki düzeyinin artması doğrudan fotosentez hızında artışa yol açmaktadır. Bu durum, bitki büyümesini teşvik ederken, bitkisel dokulardaki karbon ve azot oranlarını da değiştirmektedir. Birçok araştırma, yükseltilmiş CO₂ seviyelerinde yetiştirilen bitkilerin yapraklarında karbon konsantrasyonunun arttığını; buna karşılık protein başta olmak üzere karbon dışı elementlerin oranlarında azalma görüldüğünü ortaya koymuştur (Hamman ve ark., 2021). Örneğin, yüksek CO₂ koşullarında yetiştirilen buğdayda protein içeriğinde %65'e varan azalma bildirilmiş, pirinçte ise çinko ve demir konsantrasyonlarında %50'nin üzerinde düşüşler tespit edilmiştir (Loladze, 2014; Myers ve ark., 2014). Bu değişimler, tarımsal ürünlerin besin değerinde ciddi kayıplara yol açarak halk sağlığı açısından gelecekte önemli tehditler oluşturma potansiyeline sahiptir (Ekele ve ark., 2025).

Ayrıca, yapılan güncel çalışmalar, artan CO₂ seviyelerinin özellikle C3 fotosentez mekanizmasına sahip bitkilerde büyüme ve gelişmeyi olumlu etkilediğini bildirmektedir (Cai ve ark., 2016). Bununla birlikte, karbon

bazı yapısal savunma mekanizmaları da bu koşullarda güçlenmekte; bitkilerin kuraklık, tuzluluk gibi abiyotik stres faktörlerine karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. Yükselen CO₂ seviyeleri, bitki topluluklarının tür bileşiminde önemli değişimlere yol açmaktadır. Bu koşullarda istilacı bitki türleri ve tarla yabancı otları daha baskın hale gelirken, hızlı büyüyen türler ve atmosferik azotu bağlayabilen türler rekabet avantajı kazanmaktadır. Ayrıca kapalı tohumlu bitkiler (angiosperm), açık tohumlu bitkilere (gymnosperm) kıyasla daha yaygın hâle gelmekte; odunsu bitkiler otsu bitkilere oranla daha baskın olmakta ve C3 fotosentez mekanizmasına sahip bitkiler, C4 bitkilere göre daha avantajlı bir konum elde etmektedir (Jin ve ark., 2019; Ekele ve ark., 2025; Khan ve ark., 2025). Bu değişimlerin bir sonucu olarak, spesifik türlerin yaygınlığı da artış göstermektedir. Bu ekolojik kaymalar, bitki topluluklarının yapısını ve işlevlerini uzun vadede değiştirebilecek nitelikte kritik sonuçlar doğurabilir. Ancak benzer yapısal değişimlerin biyotik stres faktörlerine karşı etkili olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, yükseltilmiş CO₂ seviyeleri, bitki-mikroorganizma-böcek etkileşimleri gibi ekosistem ilişkilerinde karmaşık sonuçlar doğurabilmektedir (DeLucia ve ark., 2012; Fajer, 1989; Hamann ve ark., 2021; Lee ve ark., 2001; Mohan ve ark., 2006; O’Conor ve ark., 2024; Pinto ve ark., 2014; Robinson ve ark., 2012; Roy ve ark., 2024; Stiling ve Cornelissen, 2007; Welti ve ark., 2020; Ziska ve ark., 2019).

ARTAN KARBONDİOKSİTİN YAPRAKBİTLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Atmosferdeki karbondioksit seviyelerinin insan kaynaklı faaliyetler nedeniyle hızlı bir şekilde artması, yalnızca küresel iklim sistemlerinde değil, kara ekosistemlerinde yer alan bitki ve böcek etkileşimlerinde de çok yönlü değişimlere neden olmaktadır. Özellikle floem özsuyu ile doğrudan beslenen yaprakbitleri bu çevresel değişkenlere karşı oldukça hassas bir grup olarak değerlendirilmektedir. Yaprakbitleri hem yaygınlığı hem de tarımsal önemi açısından, yükseltilmiş CO₂ seviyelerine karşı verilen fizyolojik ve davranışsal tepkilerin araştırılmasında model organizma işlevi görmektedir (Pritchard ve ark., 2007).

Yükselen CO₂ seviyeleri, bitkilerde fotosentez hızını artırarak biyokütle üretimini teşvik etmekte, bu da gelişim hızını artırmaktadır. Ancak bu süreç, bitkilerin dokusal ve kimyasal bileşiminde önemli değişimlere yol açmaktadır. Literatürdeki birçok çalışmada, yüksek CO₂ ortamında yetiştirilen bitkilerde yaprak karbon konsantrasyonunun arttığı, buna karşılık karbon dışı elementlerin konsantrasyonlarında azalmaların meydana geldiği gösterilmiştir (Ekele ve ark., 2025; Hamann ve ark., 2021; Khan ve ark., 2025; Lee ve ark., 2001). Yapılan çalışmalarda afitlerin yüksek CO₂ oranları içeren bitkilerden beslendiklerinde kütlelerinin, kontrol denemelerindeki afitlerden %50’den daha az olduğu; çözünür karbonhidratlarının önemli ölçüde azaldığı fakat ağırlık başına düşen lipit miktarının arttığı, toplam enerji rezervlerinde bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir (Najar-Rodriguez ve ark., 2024).

Bitki yapısında meydana gelen değişimlerin, yaprakbitlerinin davranışsal tepkilerini şekillendirdiği bilinmektedir. Düşen besin kalitesi nedeniyle yaprak bitlerinin gelişim ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla daha yoğun ve sık beslenme eğilimi gösterdiği, bu davranışın ise enerji ihtiyacını artırdığı için genel yaşam sürelerini ve doğurganlıklarını sınırlandırdığı belirlenmiştir (Stiling ve Cornelissen, 2007). Ayrıca yaprak sertliği, kütikula kalınlığı ve sekonder metabolit üretimindeki artışların böceklerin beslenmesini hem mekanik hem de kimyasal düzeyde zorlaştırdığı vurgulanmıştır. Oehme ve ark. (2013) tarafından yürütülen bir çalışmada, 600 ppm CO₂ altında buğday bitkisinde fruktoz ve glukoz seviyelerinde artış gözlenirken, kolzada bu yönde bir değişiklik olmamış; buna bağlı olarak *Rhopalosiphum padi* (L.) (Homoptera: Aphididae)’nin büyüme oranı olumlu etkilenirken, *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae)’nin performansı olumsuz etkilenmiştir. Benzer şekilde, yükseltilmiş CO₂ ortamında 3 farklı yaprakbitinin rekabet ve etkileşimleri incelenmiş (750 ppm CO₂), üç buğday yaprakbiti türü arasındaki rekabetin mekânsal niş örtüşmesiyle azaldığı ve türler arası etkileşimin değiştiği rapor edilmiştir (Sun ve ark., 2009). Hughes ve Bazzaz (2001), 700 ppm CO₂ altında yaprakbitlerinin türlere özgü tepkiler verdiğini; *M. persicae* popülasyonunun arttığını, *Acyrtosiphon pisum* (Harris) (Homoptera: Aphididae)’un azaldığını, diğer türlerin (*Aphis nerii* (Boyer de Fonscolombe) (Homoptera: Aphididae), *Aphis oenotherae* (Oestlund) (Homoptera: Aphididae), *Aulacorthum solani* (Kaltenbach) (Homoptera: Aphididae)) ise etkilenmediğini bildirmiştir. Moreno-Delafuente ve ark. (2020), 800 ppm CO₂ altında buğday, Arpa Sarı Cücelik Virüsü (BYDV-PAV) ve vektör *R. padi* arasındaki etkileşimleri incelemiş; artan CO₂’nin bitki büyümesini ve C:N oranını artırarak yaprak bitinin doğurganlığını ve gelişme süresini azalttığını, ancak virüs enfeksiyonunun bu parametreleri ters yönde etkilediğini göstermiştir. Yan ve ark. (2020), *Medicago truncatula* üzerinde yükselen CO₂ seviyelerinin sekonder metabolitleri artırarak *A. pisum*’un iki farklı genotipi ve parazitoidi *Aphidius avenae* (Haliday) (Hymenoptera: Brachonidae) üzerinde genotipe özgü ve tritrofik etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Son olarak, Korkmaz

(2021) tarafından yapılan bir çalışmada, artan CO₂ (600–1000 ppm) ve sıcaklık seviyelerinin *M. persicae*'nin döl süresini uzattığı, net ve kalıtsal üreme gücünü artırdığı, fakat toplam yaşam süresini kısalttığı bildirilmiştir. Bu bulgular, yükseltilmiş CO₂'nin yaprak bitleri üzerinde tür, bitki ve çevresel koşullara bağlı olarak çok yönlü etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Yükseltilmiş atmosferik CO₂ seviyelerinin yalnızca yaprakbitleri gibi fitofag zararlıları değil, aynı zamanda bu zararlılarla beslenen doğal düşmanların biyolojisini ve etkinliğini de etkilediği bildirilmektedir. Yükselen CO₂ seviyeleriyle birlikte bitki besin kalitesinde meydana gelen düşüşler ve yaprakbiti popülasyonlarında gözlenen azalmalar, doğal düşmanların besin kaynaklarını hem nicelik hem de nitelik açısından sınırlandırmakta; bu durum, biyolojik mücadele etmenlerinin etkinliğinde azalmaya yol açabilmektedir (Klaiber ve ark., 2013; Moreno-Delafuente ve ark., 2021). Örneğin, *Brevicoryne brassicae* (L.) (Hemiptera: Aphididae) ile beslenen parazitoit *Diaeretiella rapae* (M'Intosh) (Hymenoptera: Braconidae)'nin 800 ppm CO₂ koşullarında daha yüksek ölüm oranlarına ve daha düşük parazitlenme kapasitesine sahip olduğu, ayrıca yavrularının daha erken çıktığı ancak ergin ömürlerinin daha kısa olduğu saptanmıştır (Klaiber ve ark., 2013). Aynı araştırma grubunun devam çalışmasında, 800 ppm CO₂ altında yetiştirilen *B. brassicae*'nin besin içeriğinde önemli değişimler olduğu, bu değişimlerin *D. rapae*'nin performansını ve yaşam süresini azalttığı saptanmıştır. Özellikle yaprakbitlerinin kütlelerinin %50'den fazla azaldığı, çözünür karbonhidratlarının düştüğü, enerji rezervlerinin azaldığı ve lipid oranlarının arttığı belirlenmiştir (Najar-Rodriguez ve ark., 2024). Benzer şekilde, 750 ppm CO₂ altında *Medicago truncatula* bitkisinde artan sekonder metabolitler, *A. pisum*'un iki genotipi (yeşil ve pembe) üzerinde farklı etkilere neden olmuş; buna bağlı olarak parazitoit *A. avenae*'nin parazitlenme başarısı ve biyolojik özellikleri genotipe göre değişiklik göstermiştir (Yan ve ark., 2020). Yüksek CO₂ seviyelerinin *Aphis gossypii* (Glover) (Hemiptera: Aphididae)'nin gelişimini yavaşlatmasına rağmen, parazitoit *Aphidius colemani* (Viereck) (Hymenoptera: Brachonidae)'nin parazitlenme oranını doğrudan etkilemediğini, ancak konukçu popülasyondaki olumsuz değişimin parazitoiti dolaylı olarak etkileyebileceğini bildirilmiştir (Moreno-Delafuente ve ark., 2021). Bu bulgular, iklim değişikliğiyle birlikte yükselen CO₂ seviyelerinin bitki-fitofag-doğal düşman etkileşimlerini derinden etkileyerek biyolojik mücadele stratejilerinin sürdürülebilirliğini tehdit edebileceğini göstermektedir. Moleküler düzeyde yapılan bazı çalışmalar ise, bu çevresel stresin yalnızca fizyolojik etkilerle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda evrimsel tepkileri de tetikleyebileceğini ortaya koymuştur. Örneğin, birkaç nesil boyunca yüksek CO₂ koşullarında yetiştirilen yaprakbitlerinde, ITS (internal transcribed spacer) bölgesine yönelik yapılan moleküler analizler, genetik düzeyde adaptif yanıtların geliştiğini ve beklenenden daha hızlı evrimsel süreçlerin tetiklendiğini göstermiştir (Karacaoğlu, 2021). Bu bulgular, atmosferdeki CO₂ artışının yalnızca kısa vadeli fizyolojik sonuçlar doğurmadığını, aynı zamanda böcek topluluklarının uzun vadeli evrimsel dinamiklerini de etkileyebileceğini göstermektedir.

Tüm bu veriler değerlendirildiğinde, artan atmosferik CO₂ seviyelerinin yaprakbitleri üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı etkiler yarattığı, bu etkilerin türler, hatta genotipler arasında değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Yaprakbitlerinin yükseltilmiş CO₂ koşullarına verdikleri yanıtların farklılık göstermesi, bu organizmaların ekolojik esnekliğini ve çevresel stres koşullarına adaptasyon yeteneğini ortaya koymakta; dolayısıyla, gelecekteki iklim senaryolarına yönelik zararlı tahmin modellerinin bu farklılıkları göz önünde bulundurarak geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Yükseltilmiş atmosferik CO₂ konsantrasyonlarının yaprakbitleri ve doğal düşmanları üzerindeki etkileri, ekosistem dinamikleri açısından çok katmanlı ve karmaşık sonuçlar doğurmaktadır. Bu derlemede sunulan literatür, artan CO₂ seviyelerinin öncelikle konukçu bitkilerde fizyolojik ve kimyasal değişimlere neden olduğunu; bu değişimlerin, yaprakbitlerinin biyolojisi, davranışları ve popülasyon dinamikleri üzerinde doğrudan etkiler yarattığını ortaya koymuştur (DeLucia ve ark., 2012; Welti ve ark., 2020). Yaprak dokularındaki protein ve karbon dışı besin maddelerinin azalması, yaprakbitlerinin besin kalitesinde düşüşe, buna bağlı olarak da gelişim sürecinde yavaşlama, vücut kütlelerinde azalma ve doğurganlıkta düşüşe yol açmaktadır (Najar-Rodriguez ve ark., 2024).

Bununla birlikte, yaprakbitlerinin çevresel stres faktörlerine karşı gösterdiği tür, genotip ve konukçu bitki bazlı farklılaşmalar, bu organizmaların yüksek ekolojik esnekliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bazı türler artan CO₂ koşullarına karşı gelişim ve üreme başarısını koruyabilirken, bazıları olumsuz yönde etkilenmekte ya da türler arası rekabet ilişkilerinde değişiklikler meydana gelmektedir (Hughes ve Bazzaz, 2001; Korkmaz, 2021;

Sun ve ark., 2009). Bu durum, gelecekteki iklim değişikliği senaryolarında türlerin göreceli yaygınlıklarının ve zararlılık potansiyellerinin yeniden şekillenebileceğini göstermektedir.

Dolaylı etkiler açısından değerlendirildiğinde ise, yaprakbitlerinin popülasyon yapısındaki değişimlerin, trofik düzeyde olduğu ve biyolojik mücadelede rol alan doğal düşman türlerinin biyolojisini ve etkinliğini doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır (Klaiber ve ark., 2013; Yan ve ark., 2020). Bazı araştırmalarla parazitoit türlerinin besin kalitesindeki düşüş nedeniyle gelişim süreçlerinde bozulmalar yaşadığı, hayatta kalma oranlarının düştüğü ve parazitlenme kapasitelerinin azaldığı belirlenmiştir (Najar-Rodriguez ve ark., 2024). Bu tür etkiler, entegre zararlı yönetimi programlarının gelecekte yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır.

Bunun yanı sıra, bazı moleküler çalışmalar yüksek CO₂ seviyelerine maruz kalan yaprakbitlerinde kısa zaman dilimlerinde genetik değişimler meydana geldiğini ve bu durumun adaptasyon ile ilgili evrimsel süreçleri tetikleyebileceğini ortaya koymuştur (Karacaoğlu, 2021). Bu bulgular, çevresel stres faktörlerinin yalnızca geçici fizyolojik değişimlere değil, aynı zamanda uzun vadeli popülasyon ve evrimsel süreçlere de etki ettiğini göstermesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, yüksek CO₂ seviyeleri, bitki-bitki zararlısı-doğal düşman etkileşimlerinde hem doğrudan hem de dolaylı yollarla çok boyutlu değişimlere yol açmaktadır. Bu değişimlerin kapsamı, tür, genotip ve çevresel faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Dolayısıyla, gelecekteki iklim değişikliği senaryolarında, zararlı yönetim stratejileri planlanırken bu biyotik bileşenlerin birbirleriyle olan ilişkileri sistem düzeyinde dikkate alınmalı; klasik biyolojik mücadele yaklaşımları, artan CO₂'nin doğuracağı ekolojik, fizyolojik ve genetik etkiler göz önüne alınarak yeniden yapılandırılmalıdır. Ayrıca, bu konuda yapılacak uzun vadeli, kontrollü ve moleküler düzeydeki çalışmalar, sürdürülebilir tarımsal üretim ve gıda güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

ETİK STANDARTLARA UYGUNLUK

Bu araştırma çalışması, araştırma ve yayınlama etiğine uygun bir şekilde yürütülmüştür. MJAVL'de yayınlanan makalelerin bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazarlara aittir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını tasdik ederler.

YAZAR KATKISI

Tüm yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- Alper, D. ve Anbar, A. (2007). Küresel ısınmanın dünya ekonomisine ve Türkiye ekonomisine etkileri. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 9(4), 15-54.
- Anonim. (2023). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2023 Synthesis Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Cai, C., Yin, X., He, S., Jiang, W., Si, C., Struik, P. C., ... & Pan, G. (2016). Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO₂ and temperature in FACE experiments. *Global change biology*, 22(2), 856-874. <https://doi.org/10.1111/gcb.13065>
- DeLucia, E. H., Nabity, P. D., Zavala, J. A., & Berenbaum, M. R. (2012). Climate change: Resetting plant-insect interactions. *Plant physiology*, 160(4), 1677- 1685. <https://doi.org/10.1104/pp.112.204750>
- Ekele, JU, Webster, R., Perez de Heredia, F., Lane, KE, Fadel, A., & Symonds, R.C. (2025). Current impacts of elevated CO₂ on crop nutritional quality: a review using wheat as a case study. *Stress Biology*, 5(1), 34. <https://doi.org/10.1007/s44154-025-00217-w>
- Fajer, E. D. (1989). The effects of enriched CO₂ atmospheres on plant-insect herbivore interactions: Growth responses of larvae of the specialist butterfly, *Junonia coenia* (Lepidoptera: Nymphalidae). *Oecologia*, 81(4), 514-520. <https://doi.org/10.1007/BF00378962>
- Hamann, E., Blevins, C., Franks, S. J., Jameel, M. I., & Anderson, J. T. (2021). Climate change alters plant-herbivore interactions. *New Phytologist*, 229(4), 1894- 1910. <https://doi.org/10.1111/nph.17036>
- Hughes, L., & Bazzaz, F. A. (2001). Effects of elevated CO₂ on five plant-aphid interactions. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 99(1), 87-96. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2001.00805.x>

- Jin, J., Armstrong, R., & Tang, C. (2019). Impact of elevated CO₂ on grain nutrient concentration varies with crops and soils—A long-term FACE study. *Science of the Total Environment*, 651, 2641-2647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.170>
- Karacaoğlu, M. (2021). Intraspecific variation in the internal transcribed spacer (Its) region of green peach aphid *Myzus persicae* [(sulzer)(hemiptera: Aphididae)] under elevated atmospheric CO₂ pressure. *Applied Ecology and Environmental Research*, 19(3), 2565-2574.
- Khan, P., Aziz, T., Jan, R., & Kim, K. M. (2025). Effects of Elevated CO₂ on Maize Physiological and Biochemical Processes. *Agronomy*, 15(1), 202. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010202>
- Klaiber, J., Najar-Rodriguez, A. J., Dialer, E., & Dorn, S. (2013). Elevated carbon dioxide impairs the performance of a specialized parasitoid of an aphid host feeding on Brassica plants. *Biological Control*, 66(1), 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.03.006>
- Korkmaz, A. (2021). *Farklı sıcaklıklar ve artırılmış karbondioksit gazı (CO₂) düzeyinin şeftali yaprakbiti [Myzus persicae (Sulzer)(Hemiptera: Aphidae)]'nin biyolojisi üzerine etkilerinin araştırılması* (Master's thesis, Malatya Turgut Özal Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/Bitki Koruma Ana Bilim Dalı).
- Lee, T. D., Tjoelker, M. G., Ellsworth, D. S., & Reich, P. B. (2001). Leaf gas exchange responses of 13 prairie grassland species to elevated CO₂ and increased nitrogen supply. *New Phytologist*, 150(2), 405-418. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00095.x>
- Loladze, I. (2014). Hidden shift of the ionome of plants exposed to elevated CO₂ depletes minerals at the base of human nutrition. *elife*, 3, e02245. <https://doi.org/10.7554/eLife.02245>
- Mohan, J. E., Ziska, L. H., Schlesinger, W. H., Thomas, R. B., Sicher, R. C., George, K., & Clark, J. S. (2006). Biomass and toxicity responses of poison ivy (*Toxicodendron radicans*) to elevated atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(24), 9086-9089. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602392103>
- Moreno-Delafuente, A., Viñuela, E., Fereres, A., Medina, P., & Trębicki, P. (2020). Simultaneous increase in CO₂ and temperature alters wheat growth and aphid performance differently depending on virus infection. *Insects*, 11(8), 459. <https://doi.org/10.3390/insects11080459>
- Moreno-Delafuente, A., Fereres, A., Vinuela, E., & Medina, P. (2021). Elevated carbon dioxide reduces *Aphis gossypii* intrinsic increase rates without affecting *Aphidius colemani* parasitism rate. *Biological Control*, 163, 104741. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104741>
- Myers, S. S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A. D., Bloom, A. J., ... & Usui, Y. (2014). Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139-142. <https://doi.org/10.1038/nature13179>
- Najar-Rodriguez, A. J., Lacorazza, S., Klaiber, J., Avila, G. A., Zhang, J., Ma, C., & Ma, G. (2024). Long-term effects of elevated CO₂ on the nutrition provided to parasitoids by their herbivorous hosts. *Physiological Entomology*, 49(3), 244-252. <https://doi.org/10.1111/phen.12441>
- Oehme, V., Högy, P., Zebitz, C. P. W., & Fangmeier, A. (2013). Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on phloem sap composition of spring crops and aphid performance. *Journal of Plant Interactions*, 8(1), 74-84. <https://doi.org/10.1080/17429145.2012.736200>
- O'Connor, R. C., Blumenthal, D. M., Ocheltree, T. W., & Nippert, J. B. (2024). Elevated CO₂ counteracts effects of water stress on woody rangeland-encroaching species. *Tree Physiology*, 44(13), 46-57.
- Pinto, H., Sharwood, R. E., Tissue, D. T., & Ghannoum, O. (2014). Photosynthesis of C₃, C₃-C₄, and C₄ grasses at glacial CO₂. *Journal of Experimental Botany*, 65(13), 3669-3681. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru155>
- Pritchard, J., Griffiths, B., & Hunt, E. J. (2007). Can the plant-mediated impacts on aphids of elevated CO₂ and drought be predicted? *Global Change Biology*, 13(8), 1616-1629. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01401.x>
- Revelle, R. (1982). Carbon dioxide and world climate. *Scientific American*, 247(2), 35-43. <https://www.jstor.org/stable/24966657>
- Robinson, E. A., Ryan, G. D., & Newman, J. A. (2012). A meta-analytical review of the effects of elevated CO₂ on plant–arthropod interactions highlights the importance of interacting environmental and biological variables. *New Phytologist*, 194(2), 321-336. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04074.x>
- Roy, S., Kapoor, R., & Mathur, P. (2024). Revisiting Changes in Growth, Physiology and Stress Responses of Plants under the Effect of Enhanced CO₂ and Temperature. *Plant and Cell Physiology*, 65(1), 4-19. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcad121>
- Sun, Y. C., Chen, F. J., & Ge, F. (2009). Elevated CO₂ changes interspecific competition among three species of wheat aphids: *Sitobion avenae*, *Rhopalosiphum padi* and *Schizaphis graminum*. *Environmental entomology*, 38(1), 26-34. <https://doi.org/10.1603/022.038.0105>
- Stiling, P., & Cornelissen, T. (2007). How does elevated carbon dioxide (CO₂) affect plant–herbivore interactions? A field experiment and meta-analysis of CO₂-mediated changes on plant chemistry and herbivore performance. *Global Change Biology*, 13(9), 1823-1842. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01392.x>
- Welti, E. A. R., Roeder, K. A., De Beurs, K. M., Joern, A., & Kaspari, M. (2020). Nutrient dilution and climate cycles underlie declines in a dominant insect herbivore. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(13), 7271-7275. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920012117>
- Yan, H., Guo, H., Sun, Y., & Ge, F. (2020). Plant phenolics mediated bottom-up effects of elevated CO₂ on *Acyrtosiphon pisum* and its parasitoid *Aphidius avenae*. *Insect Science*, 27(1), 170-184. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12627>

- Zavala, J. A., Gog, L., & Giacometti, R. (2017). Anthropogenic increase in carbon dioxide modifies plant-insect interactions: Effects of elevated CO₂ on plantinsect interactions. *Annals of Applied Biology*, 170(1), 68-77. <https://doi.org/10.1111/aab.12319>
- Ziska, L. H., Blumenthal, D. M., & Franks, S. J. (2019). Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Science and Management*, 12(2), 79-88. <https://doi.org/10.1017/inp.2019.12>