



TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME DERGİSİ

<http://dergi.toprak.org.tr>



Farklı sulama suyu uygulamalarının kudret narı (*Momordica charantia* L.) bitkisinde çimlenme ve fide gelişimi ile mineral alımına etkileri

Ahmet İlker LEVENT, Kadir Ersin TEMİZEL*

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Samsun

Öz

Bu çalışma, kudret narı (*Momordica charantia* L.) bitkisinde çimlenme ve sürgün gelişimi ile mineral alımı üzerine farklı düzeylerde çözünmüş oksijen ve tuz içeren sulama uygulamalarının etkilerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Deney; kontrol grubu olarak çeşme suyu (N), farklı tuzluluk düzeyleri (düşük: T1, orta: T2, yüksek: T3), farklı çözünmüş oksijen düzeyleri (düşük: O1, orta: O2, yüksek: O3) ve bir kombinasyon (yüksek: T3, yüksek: O3) oluşan gruplarda yürütülmüştür. Deney kapsamında; bitki fizyolojisini yansıtan büyüme parametreleri olarak fide ve kök uzunlukları, yaprak alanı, yaprak çevresi, yaprak uzunluğu ve yaprak genişliği gibi morfolojik ölçümler ile birlikte, bitki biyokütlesini belirlemek amacıyla kök ve yaprakların yaş ve kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Ayrıca, toprak, kök ve yaprakların Fe, Cu, Mn, Zn gibi mineral içerikleri analiz edilmiştir. Elde edilen tüm veriler, istatistiksel olarak ANOVA ve Tukey testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, orta düzey çözünmüş oksijen (O2) uygulaması, kök ve yaprak gelişimi ile mineral birikimi açısından en başarılı sonucu vermiştir ($p < 0.05$). Buna karşılık, yüksek tuzluluk (T3) ve T3O3 grupları, gelişimini belirgin şekilde baskılamış, bazı bitkilerde yaprak gelişimi gözlenmemiştir. Toprak ve bitki analizleri, sulamanın sadece su temini değil, mineral dengesi ve alınabilirliği üzerinde de önemli etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, kudret narı fideleri için en uygun sulama koşulunun orta düzey çözünmüş oksijen içeren su olduğu, yüksek tuzluluk veya yüksek oksijen seviyelerinin ise bitki gelişimini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, tıbbi bitki yetiştiriciliğinde sulama suyu kalitesinin (özellikle oksijen ve tuz içeriğinin) kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bulguların farklı çevresel koşullarda tekrarlanması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sulama suyu kalitesi, çözünmüş oksijen, tuzluluk, kudret narı, bitki gelişimi.

Effects of different irrigation water applications on germination, seedling development and mineral uptake in bitter melon (*Momordica charantia* L.)

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of different levels of dissolved oxygen (DO) and salinity in irrigation water on the germination, shoot development, and mineral uptake in bitter melon (*Momordica charantia* L.). The experiment was conducted across various groups: tap water as the Control (N), different salinity levels (low: T1, moderate: T2, high: T3), different dissolved oxygen levels (low: O1, moderate: O2, high: O3), and a combination (T3O3) of high salinity and high dissolved oxygen. Growth parameters reflecting plant physiology were measured, including shoot and root lengths, and leaf morphology (area, perimeter, length, and width). Additionally, plant biomass was determined by measuring the fresh and dry weights of roots and leaves. Furthermore, the mineral contents (Fe, Cu, Mn, and Zn) in the soil, roots, and leaves were analyzed. All obtained data were statistically evaluated using ANOVA and Tukey tests. The findings revealed that the moderate dissolved oxygen (O2) treatment yielded the most successful results in terms of root and leaf development and mineral accumulation ($p < 0.05$). Conversely, the high salinity (T3) and the T3O3 combination groups significantly suppressed plant development, with leaf development being absent in some plants. Soil and plant analyses demonstrated that irrigation is not merely a means of water supply but also significantly influences mineral balance and bioavailability. In conclusion, the optimal irrigation condition for bitter melon seedlings was determined to be water containing moderate dissolved oxygen, while high salinity or high DO levels negatively affected plant development. These findings indicate that the quality of irrigation water (especially its oxygen and salt content) is of critical importance in medicinal plant cultivation. Replication of these findings under different environmental conditions is recommended.

Keywords: Irrigation water quality, dissolved oxygen, salinity, bitter melon (*Momordica charantia*), plant growth.

© 2025 Türkiye Toprak Bilimi Derneği. Her Hakkı Saklıdır

* Sorumlu yazar:

Tel. : 0 (535) 225 8260
E-posta : ersint@omu.edu.tr

Makale Türü: ARAŞTIRMA MAKALESİ

Geliş Tarihi : 10 Ekim 2025 e-ISSN : 2146-8141
Kabul Tarihi : 11 Aralık 2025 DOI : 10.33409/tbbdd.1800321

Giriş

Tarım sektörü, yalnızca temel gıda ihtiyacını karşılayan bir üretim alanı olmanın ötesinde, günümüzde sağlık, ekonomi ve çevreyle doğrudan ilişkili stratejik bir sektör haline gelmiştir (Özsan ve Onus, 2023). Tıbbi bitkiler hem yüksek ekonomik değerleri hem de doğal tedavi yöntemlerine olan ilginin artmasıyla, tarımsal üretimde önemli bir yer edinmeye başlamıştır (Pongkitwitoon, 2019). Katma değeri yüksek bu bitkiler; ilaç, kozmetik, gıda ve alternatif tıp alanlarında yaygın olarak kullanılmakta olup, özellikle iklim ve biyoçeşitlilik açısından zengin ülkelerde üretimlerinin artırılması, çiftçilere alternatif gelir kaynakları sunmakta ve kırsal kalkınmayı desteklemektedir. Bu bitkiler arasında yer alan kudret narı (*Momordica charantia*), tıbbi özelliklerinin yanı sıra yüksek ekonomik değeriyle dikkat çeken bir kültür bitkisidir. Sürdürülebilir tarım açısından, kültüre alınan bitkilerin sonraki üretim dönemleri için sağlıklı bir şekilde çoğaltılması büyük önem taşımaktadır (Naïtchéde ve ark., 2023).

Kudret narı (*Momordica charantia*), Kabakgiller (*Cucurbitaceae*) familyasına ait, tropik ve subtropik bölgelerde yaygın olarak yetiştirilen tıbbi bir bitkidir. Meyve, yaprak ve tohumları; antimikrobiyal, antioksidan, antidiyabetik, antienflamatuvar ve antikanserojen etkileri nedeniyle geleneksel tıpta geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu biyolojik özellikleri sayesinde farmasötik ve gıda endüstrisinde katma değeri yüksek bir ürün olarak öne çıkmaktadır (Joseph ve Jini, 2013).

Ancak kudret narının üretiminde en sık karşılaşılan sorunlardan biri, tohumların düşük çimlenme oranlarıdır. Sert tohum kabuğu ve çevresel streslere duyarlılık, çimlenmeyi sınırlayan temel faktörlerdendir (Fonseka ve ark., 2011). Bu nedenle farklı ön işlem yöntemleri, ıslatma teknikleri ve ortam koşullarının çimlenme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Özellikle tuzluluk stresi, çimlenme ve fide gelişimi üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Atta ve ark., 2023). Öte yandan, oksijenli su (hidrojen peroksit, H_2O_2) uygulamalarının, tohum kabuğunu yumuşatarak oksijen alımını kolaylaştırdığı ve çimlenme süresini kısaltabileceği bildirilmektedir (Jisha ve ark., 2013). Kudret narı gibi hassas türlerde, su kalitesi ve ortam koşullarının çimlenme performansına etkisi oldukça kritik olup, bu alanda yapılan çalışmalar değerli bulgular sunmaktadır (Ali ve ark., 2025).

Su kaynaklarının yetersizliği ve sulama suyu kaynaklı yüksek tuzluluk, bitki gelişimini kısıtlayan başlıca çevresel stres faktörlerindendir (Temizel ve ark., 2014). Toprakta biriken tuzlar, tohumun su alımını engelleyerek osmotik baskı oluşturur ve çimlenmeyi olumsuz etkilemektedir (Atta ve ark., 2023). İyon toksisitesi, özellikle sodyum (Na^+) ve klor (Cl^-) iyonlarının birikimi yoluyla hücre metabolizmasını olumsuz etkileyerek tohumların çimlenme başarısını düşürmektedir (López-Méndez ve ark., 2024). Bu stresin etkisiyle, birçok bitki türünde çimlenme yüzdesi, hızı ve fide gelişimi anlamlı ölçüde azalmaktadır (Khan ve ark., 2022).

Tuz stresine karşı çimlenme sürecini desteklemek amacıyla yapılan çalışmalarda, H_2O_2 gibi oksijen taşıyıcıların düşük konsantrasyonlarda uygulanmasının umut verici sonuçlar doğurduğu görülmektedir. H_2O_2 , tohum zarının geçirgenliğini artırarak embriyoya oksijen taşınmasını kolaylaştırmakta; aynı zamanda antioksidan savunma sistemlerini uyararak stres koşullarında çimlenmeyi desteklemektedir (Hasanuzzaman ve ark., 2020). Ancak yüksek dozlarda toksik etkiler oluşturabileceği için doz optimizasyonu büyük önem taşımaktadır (Thomas, 2025). H_2O_2 aynı zamanda bitki hücrelerinde sinyal iletiminde rol alan reaktif oksijen türlerinden biri olup, kontrollü kullanımda bitkisel savunma sistemlerini tetikleyerek çimlenme başarısını artırabilmektedir (Barba-Espin ve ark., 2011).

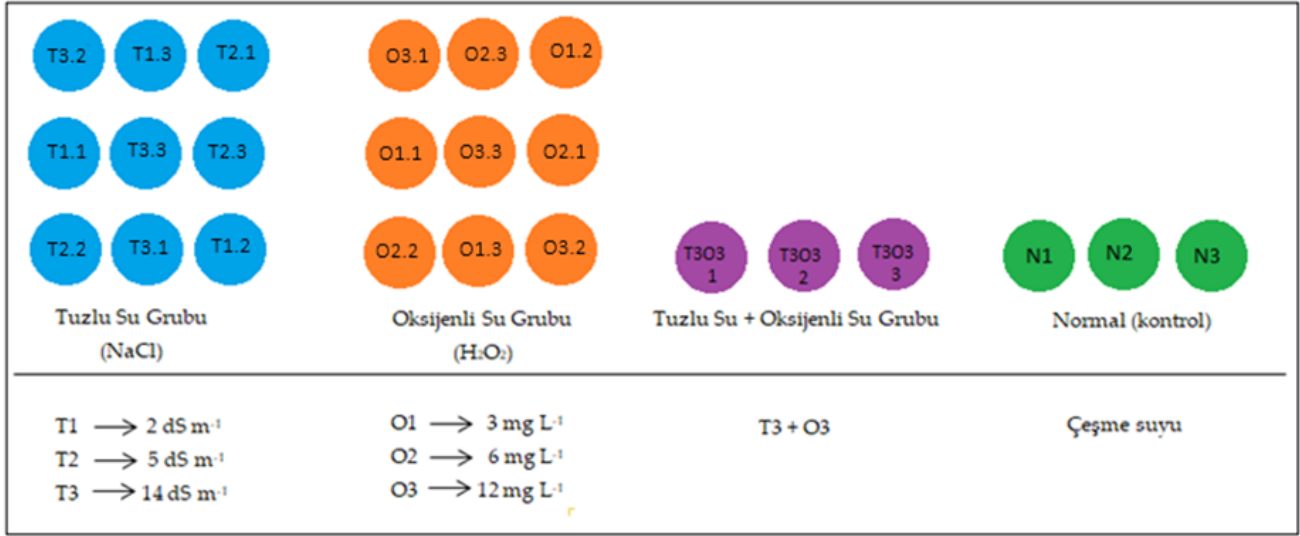
Bu çalışma, tıbbi bitkilerden ekonomik değeri yüksek olan kudret narı (*Momordica charantia*) tohumlarının çimlenme ve fide performansını artırmaya yönelik farklı sulama suyu uygulamalarının etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Özellikle tuz stresi gibi çevresel faktörlerin tohum çimlenmesi üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurularak, farklı tuz konsantrasyonları ve çözünmüş oksijen uygulamalarının çimlenme üzerindeki iyileştirici potansiyelleri ve sonrasında fideleme dönemindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bu iki faktörün birlikte kullanıldığı koşullarda kudret narı tohumlarının tepkileri değerlendirilerek, türün kültüre alınması ve sonraki üretim aşamalarında çoğaltılması açısından faydalı bilgiler elde edilmesi hedeflenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, Kudret Narı (*Momordica charantia*) tohumlarının çimlenme ve fide oluşumu performansı üzerine farklı tuz seviyeleri ve çözünmüş oksijen uygulamalarının etkisini belirlemek amacıyla yürütülmüştür. Deneme; Ondokuzmayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü laboratuvarlarında, 2025 yılı mayıs-haziran aylarını kapsayan dönemlerde uygulanmıştır. Çalışma iki

aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada tohumların çimlendirilmesi, sonrasında çimlenen tohumların fideleme dönemini içermektedir.

Çimlendirme denemesinde, tesadüfi parseller deneme desenine göre 3 tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Tohumlara; 3 farklı tuz uygulaması, 3 farklı oksijen uygulaması, 1 yüksek değerde tuz + yüksek değerde oksijen uygulaması, 1 çeşme suyu uygulaması yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Deneme şematik tasarımı.

Çimlendirme döneminde her gruba verilen dozlar 50 ml'lik çözeltilerde hazırlanarak uygulanmıştır. Tuz (NaCl) uygulamasında kullanılan dozlar sırasıyla (T1: 2 dS m⁻¹, T2: 5 dS m⁻¹, T3: 14 dS m⁻¹), Oksijen (H₂O₂) uygulamasında kullanılan dozlar sırasıyla (O1: 3 mg L⁻¹, O2: 6 mg L⁻¹, O3: 12 mg L⁻¹), Tuz (NaCl) + Oksijen (H₂O₂) uygulamasında kullanılan doz (T3+O3: T3 ve O3 karışımları eklenmiştir), Kontrol uygulamasında çeşme suyu (N: 0.38 dS m⁻¹) kullanılmıştır.

Deney, sabit 24 C sıcaklık ve %100 bağıl nem koşullarının sağlandığı kontrollü bir iklimlendirme dolabında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kudret narı tohumları, doğal formda ve ön işlem görmemiş olarak temin edilmiştir. Tohumların kısa sürede çimlenmesi için dış sert kabukları soyularak işleme tabi tutulmuştur. Tohumlar 9 cm çapındaki cam pedri kaplarına konulmuştur. Her bir kaptaki 2 adet tohum bulunmaktadır. Denemede toplam 48 adet tohum değerlendirmeye alınmıştır. Tüm çözeltiler 50 ml'lik şişelerde hazırlanmış ve her pedli kaba 10 ml olacak şekilde uygulanmıştır. Tohumlar iklimlendirme dolabında pedli kaplarının üzeri cam kapak ile kapalı olarak 2 hafta boyunca çimlenmeye bırakılmıştır. Bu süre içerisinde tohumların çimlenmeleri belirli aralıklarla gözlemlenmiştir. Çimlenme aşamasında tohumların fotoğrafları çekilerek bilgisayar ortamında AutoCAD programı kullanılarak kök uzunlukları ölçülmüştür (Fiorani ve Schurr, 2013). Su içeriğindeki doymuş oksijen oranlarının ölçümü için; Exttech DO600 cihazı kullanılmıştır.

Çalışmanın 2. aşamasında; çimlenen ve kök gelişimi gösteren tohumlar, her biri 150 gram hacminde toprak içeren plastik bardaklara ekilmiştir. İlk aşamada her kaba 65 ml ilgili çözelti uygulanmış sonrasında sulama uygulamaları düzenli aralıklarla her fideye aynı grupta yer aldığı çözelti ile uygulanarak devam edilmiştir. Bu aşamada fidelere 1 defa 0.05g NPK (20-20-20) gübre uygulaması yapılmıştır (Taiz ve Zeiger, 2010). Kudret Narı fidelerinin bitki boyları düzenli aralıklarla fideleme dönemi sonuna kadar ölçümlenmiştir. Her saksıda yaprakların, alan, çevre, uzunluk, genişlik, klorofil ölçümleri alınmış ve yaprak yaş ve kuru ağırlıkları tartılmıştır. Fide köklerinin fide sökümünden sonra yaş ve kuru ağırlık ölçümleri yapılmıştır.

Her konuya ait bitki örnekleri (yeşil aksam ve kök) ve toprak örnekleri 65 °C'de sabit ağırlığa ulaşınca kadar havalandırılmalı etüvde kurutulmuş ve homojen şekilde öğütülmüştür. Bitki örneklerinden analiz için uygun miktarda kuru materyal alınmış ve porselen krozelere tartılmıştır. Örnekler 550 °C'de 4-8 saat süreyle kül fırınında yakılmış, elde edilen kül %3'lük HCl ile çözündürülmüş ve hacim 10 ml'ye tamamlanmıştır. Çözeltilerde Fe, Cu, Mn ve Zn derişimleri atomik absorpsiyon spektrofotometresi (AAS) ile ppm cinsinden belirlenmiştir (Paul ve ark., 2024). Kök örneklerinde Fe ölçümleri için AAS öncesi SF10 seyreltme uygulanmış olup, ölçülen değerler SF10 katsayısı ile çarpılarak gerçek çözelti derişimleri elde edilmiştir. Toprak örneklerinde ise aynı yöntem uygulanmış ve her örnek için yaklaşık 0,30 g kuru materyal

kullanılmıştır. Elde edilen çözeltilerde Fe, Cu, Mn ve Zn derişimleri AAS ile ölçülmüş ve değerler ppm cinsinden verilmiştir. Toprak örneklerinde AAS öncesi SF2 seyreltme uygulanmış olup, ölçülen değerler SF2 katsayısı ile çarpılarak gerçek çözelti derişimleri elde edilmiştir.

Deney verileri, her grup için üç tekrar üzerinden analiz edilmiştir. Kök ve fide boyları, farklı ölçüm zamanlarında aynı tohumlar izlendiği için tekrarlanan ölçümler ANOVA (repeated measures ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Diğer parametreler, örneğin yaprak yaş ve kuru ağırlıkları ile bitki ve toprak element içerikleri üzerinde tek yönlü ANOVA uygulanmıştır. Gruplar arasındaki anlamlı farklılıklar Tukey HSD testi ile belirlenmiştir. Ayrıca, deney bulgularının görselleştirilmesi için grafikler oluşturulmuş, bazı parametreler arasında ilişkilerin incelenmesi amacıyla regresyon ve korelasyon analizleri yapılmıştır. Tüm istatistiksel analizler ve grafikler SPSS 25.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve anlamlılık seviyesi $p < 0.05$ olarak kabul edilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Farklı sulama suyu uygulamalarının kudret narı tohumlarının çimlenme ve fide gelişimine olan etkilerini belirlemek amacıyla yürütülen bu çalışma kapsamında, her iki gelişim aşaması için kapsamlı morfolojik, fizyolojik ve besin elementi analizleri gerçekleştirilmiştir. Çimlenme aşamasında tohumların kök uzunlukları izlenmiş ve ölçülmüştür. Daha sonra fideleme aşamasına geçilmiş olup, bu dönemde fidelerin büyüme ve fizyolojik gelişimleri yakından izlenmiştir. Bu kapsamda; bitki boyu, yaprak alanı (boyu, çevresi, genişliği), yaş ve kuru ağırlıkları ile klorofil içeriği gibi bitkisel parametreler ölçülmüş ve ek olarak toprak pH değeri belirlenmiştir. Ayrıca, yapraklar, kökler ve toprak örneklerinden Fe, Cu, Mn ve Zn mikro element içerikleri belirlenmiştir. Bulgular, bu iki aşama ve mikro element analizleri için ayrı ayrı sunulmuş ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir; kök ve fide boyları ölçümleri için tekrarlanan ölçümler ANOVA, diğer parametreler için tek yönlü ANOVA uygulanmış, ilişkilerin incelenmesinde regresyon ve korelasyon analizleri kullanılmıştır.

Kök uzunlukları

Kudret narı tohumlarının çimlenme döneminde kök uzunluklarının zaman içindeki değişimi (Çizelge 1) ve farklı sulama uygulamalarının bu değişime etkisi, tekrarlı ölçümler varyans analizi (Repeated Measures ANOVA) ile değerlendirilmiştir.

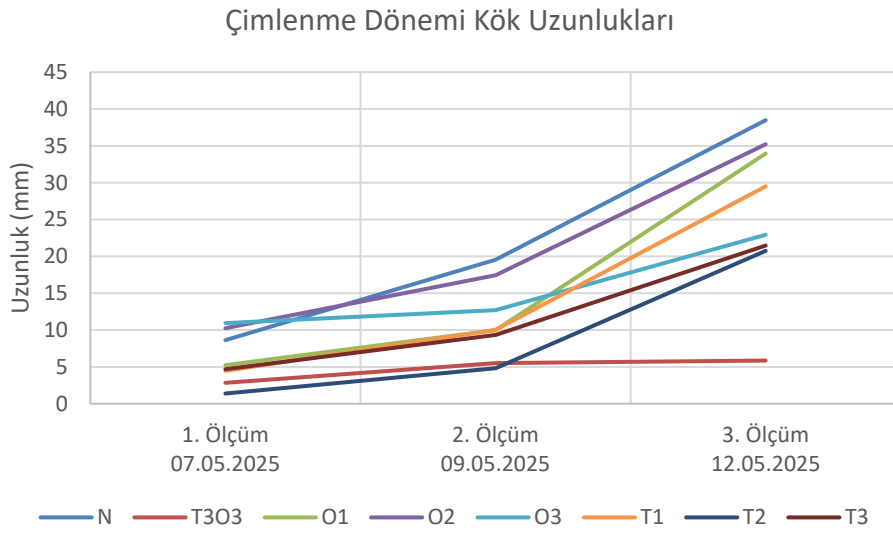
Çizelge 1. Deneme gruplarına göre kök uzunluklarının ortalama ve standart sapma değerleri (mm).

Deney Grupları	1.Ölçüm (07.05.2025) Ortalama $\pm$ SD (mm)	2.Ölçüm (09.05.2025) Ortalama $\pm$ SD (mm)	3.Ölçüm (12.05.2025) Ortalama $\pm$ SD (mm)
N	8.63 $\pm$ 10.08 ^a	19.54 $\pm$ 21.77 ^a	46.18 $\pm$ 27.72 ^b
T303	2.84 $\pm$ 1.52 ^a	5.51 $\pm$ 3.27 ^a	11.72 $\pm$ 12.41 ^b
O1	5.24 $\pm$ 3.90 ^a	9.98 $\pm$ 7.63 ^a	50.93 $\pm$ 10.68 ^b
O2	10.25 $\pm$ 10.06 ^a	17.45 $\pm$ 14.22 ^a	52.83 $\pm$ 15.27 ^b
O3	10.94 $\pm$ 7.39 ^a	12.70 $\pm$ 7.93 ^a	28.66 $\pm$ 17.40 ^b
T1	4.46 $\pm$ 4.88 ^a	10.04 $\pm$ 12.07 ^a	44.26 $\pm$ 29.72 ^b
T2	1.39 $\pm$ 0.88 ^a	4.81 $\pm$ 3.41 ^a	24.90 $\pm$ 9.46 ^b
T3	4.69 $\pm$ 3.87 ^a	9.34 $\pm$ 5.49 ^a	21.47 $\pm$ 4.63 ^b

Aynı satırdaki farklı harflerle gösterilen değerler ölçüm zamanları arasındaki istatistiksel farklılığı göstermektedir (Bonferroni düzeltmeli Tekrarlı Ölçümler ANOVA, $p < 0.05$). Uygulama grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır ($p > 0.05$).

Analiz sonuçlarına göre, kök uzunlukları üzerinde zaman faktörünün (günler arası) etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($F = 13.38$, $p < 0.001$). Bu durum, bitkilerin kök uzunluklarının çimlenme süresi boyunca günlere bağlı olarak anlamlı şekilde arttığını göstermektedir. Bonferroni düzeltmeli çoklu karşılaştırmalar, 1. ölçüm ile 3. ölçüm ($p < 0.001$) ve 2. ölçüm ile 3. ölçüm ($p < 0.002$) arasında anlamlı artış olduğunu ortaya koymuş; bu da kök gelişiminin hızlandığını göstermektedir.

Gruplar arasında yapılan karşılaştırmada anlamlı bir fark bulunmamıştır ($F = 1.53$, $p = 0.158$). Şekil 2, grupların gelişim eğilimlerinde bazı görsel farklılıklar olabileceğini göstermektedir; ancak bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı düzeye ulaşmamıştır. Gruplar içindeki standart sapma değerlerinin yüksek olması, tohumların stres koşullarına verdiği yanıtlar arasındaki doğal biyolojik farklılıkları yansıtmaktadır ve bitki gelişimi çalışmalarında sık görülen bireysel değişkenliğin normal bir sonucudur.



Şekil 2. Kudret narı tohumlarının çimlenme döneminde kök uzunluklarının günlere göre değişimi.

Kök Biyokütlesi (Yaş ve Kuru Ağırlık)

Kudret narı fidelerinin kök yaş ve kuru ağırlıkları üzerine farklı oksijen ve tuz stresi uygulamalarının etkileri yüksek derecede anlamlı bulunmuştur (yaş ağırlık: $F = 8.48$, $p < 0.001$; kuru ağırlık: $F = 12.91$, $p < 0.001$). Bu anlamlı farklılıkların kaynağı, orta oksijen (O2) ve düşük tuz (T1) koşullarının kök gelişimini maksimum düzeyde desteklemesi, buna karşın yüksek stres uygulamalarının biyokütleyi ciddi biçimde kısıtlamasıdır.

Çizelge 2. Gruplara ait ortalama kök yaş ve kuru ağırlık değerleri ile standart sapmaları (g).

Deney Grupları	Yaş Ağırlık Ortalama $\pm$ SD (g FW)	Kuru Ağırlık Ortalama $\pm$ SD (g DW)
N	0.31 $\pm$ 0.03 ^{ab}	0.030 $\pm$ 0.00 ^{abc}
T303	0.07 $\pm$ 0.13 ^d	0.003 $\pm$ 0.01 ^c
O1	0.23 $\pm$ 0.06 ^{ab}	0.026 $\pm$ 0.01 ^{abc}
O2	0.41 $\pm$ 0.08 ^a	0.043 $\pm$ 0.01 ^a
O3	0.30 $\pm$ 0.02 ^{ab}	0.017 $\pm$ 0.00 ^{bc}
T1	0.41 $\pm$ 0.10 ^a	0.035 $\pm$ 0.01 ^{ab}
T2	0.20 $\pm$ 0.06 ^{bc}	0.024 $\pm$ 0.01 ^{abc}
T3	0.16 $\pm$ 0.01 ^c	0.017 $\pm$ 0.00 ^{bc}

Kök yaş ağırlığı açısından Tukey HSD testi, O2 ve T1 uygulamalarının en yüksek yaş ağırlığına (0.41 g) ulaştığını ve bu değerlerin özellikle yüksek tuz (T3) ve çoklu stres (T303) uygulamalarına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek olduğunu göstermiştir ($p < 0.05$).

Kök kuru ağırlığı analizleri de bu eğilimi kesin olarak teyit etmiştir. Kuru ağırlıkta en yüksek ortalama sahip gruplar O2 (0.04 g) ve T1 (0.035 g) olurken, en düşük ortalama çoklu stres uygulanan T303 grubunda (0.003 g) ölçülmüştür. Yapılan karşılaştırmalar, T303 grubunun ortalamasının, en yüksek kuru madde birikimine sahip O2 ve T1 grupları başta olmak üzere, diğer grupların büyük çoğunluğundan anlamlı biçimde farklı olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, kök yaş ağırlığında olduğu gibi, çoklu stres koşullarının kudret narı fidelerinin kuru madde birikimini en güçlü şekilde baskıladığını teyit etmektedir.

Genel olarak bulgular, orta oksijen ve düşük tuz koşullarının kök gelişimini ve buna bağlı kuru madde sentezini desteklediğini; buna karşın yüksek tuz ve çoklu stres uygulamalarının kök biyokütlesini hem yapısal hem de su içeriği açısından ciddi biçimde sınırlandırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, çoklu stres koşulları altında kök biyokütlesinde azalma olduğu daha önce de raporlanmıştır (Angon ve ark., 2022).

Fide Uzunluğu

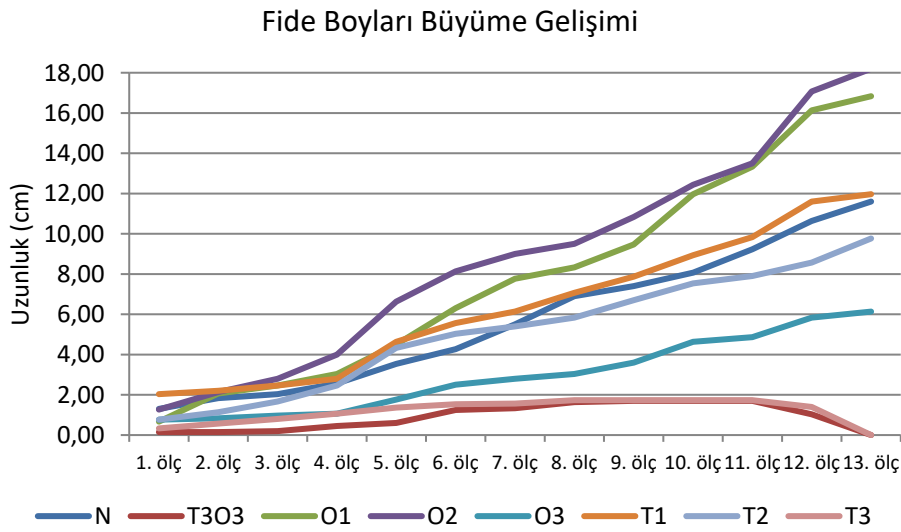
Her grupta çimlenen tohumlar bardaklara aktarılmış ve fide uzunlukları deneme süresi boyunca toplam 13 farklı günde ölçülmüş; 13. ölçüm denemenin son gününde gerçekleştirilmiştir. Farklı uygulamaların fide uzunlukları üzerine etkisi, tekrarlı ölçümler varyans analizi (Repeated Measures ANOVA) ile

değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre hem gruplar arası fark (Faktör A: $F = 44.34$, $p < 0.001$) hem de günler arası fark (Faktör B: $F = 25.73$, $p < 0.001$) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bonferroni düzeltilmeli eşleştirilmiş t-testi ($\alpha = 0.00064$), özellikle yüksek tuz uygulaması (T3) ve çoklu stres grubu (T3O3) ile kontrol (N), O1, O2, O3, T1 ve T2 grupları arasında anlamlı farklılıklar olduğunu göstermiştir. Fide boyu ortalamaları T3 ve T3O3 gruplarında en düşük düzeyde gerçekleşirken, en yüksek değerler oksijenli su uygulamalarında (özellikle O2 ve O1) ve kontrol grubunda gözlenmiştir (Çizelge 3) (Şekil 3).

Çizelge 3. Grupların seçili ölçüm zamanlarındaki (ilk, ortanca, son) fide uzunluğu ortalama ve standart sapma (cm) değerleri.

Deney Grupları	1.Ölçüm (13.05.2025) Ortalama $\pm$ SD (cm)	7.Ölçüm (22.05.2025) Ortalama $\pm$ SD (cm)	13.Ölçüm (03.06.2025) Ortalama $\pm$ SD (cm)
N	1.30 $\pm$ 0.56 ^a	5.50 $\pm$ 2.25 ^d	11.60 $\pm$ 4.43 ^c
T3O3	0.15 $\pm$ 0.15 ^e	1.34 $\pm$ 0.55 ^f	0
O1	1.47 $\pm$ 0.59 ^a	7.77 $\pm$ 1.57 ^b	16.83 $\pm$ 1.33 ^b
O2	1.27 $\pm$ 0.15 ^b	9.00 $\pm$ 0.78 ^a	18.20 $\pm$ 0.50 ^a
O3	0.77 $\pm$ 0.65 ^c	2.80 $\pm$ 2.55 ^e	6.13 $\pm$ 5.37 ^e
T1	2.03 $\pm$ 0.35 ^a	6.14 $\pm$ 1.96 ^c	11.97 $\pm$ 1.76 ^c
T2	0.77 $\pm$ 0.06 ^c	5.40 $\pm$ 0.40 ^d	9.77 $\pm$ 0.95 ^d
T3	0.34 $\pm$ 0.35 ^d	1.57 $\pm$ 0.74 ^f	0

Bu bulgular, yüksek tuz stresinin (T3) ve tuz-oksijen kombinasyonunun (T3O3) fide gelişimini belirgin şekilde sınırladığını ortaya koymaktadır. Tuz stresinin büyümeyi baskılaması, literatürde de yaygın olarak bildirildiği üzere, Na^+ ve Cl^- iyonlarının osmotik dengeyi bozması, hücre uzamasını azaltması ve metabolik süreçleri yavaşlatmasıyla ilişkilidir (Tavakkoli ve ark., 2010). Buna karşılık, oksijenli su uygulamalarında gözlenen yüksek fide uzunlukları, kök bölgesindeki çözünmüş oksijen artışının sürgün uzamasını desteklediğini göstermektedir. Genel olarak, kudret narı fidelerinin tuzluluğa karşı duyarlı bir büyüme eğilimine sahip olduğu; buna karşın çözünmüş oksijen uygulamalarının fide gelişimini olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır.



Yaprak Alanı, Çevresi, Boyu ve Genişliği

Deney kapsamında, farklı uygulamaların yaprak gelişimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla; yaprak alanı, yaprak çevresi, yaprak boyu ve yaprak genişliği ölçümleri alınmıştır (Çizelge 4). Her grup için ölçümler fidelerdeki yapraklardan elde edilerek ölçümlenmiş, ortalama ve standart sapmalar hesaplanmıştır. Bu ölçümler, ilgili uygulamaların bitki gelişimi üzerindeki etkilerini karşılaştırmak ve farklı oksijen ve tuz uygulamalarının yaprak morfolojisi üzerindeki rolünü ortaya koymak için kullanılmıştır.

Çizelge 4. Yaprak morfolojik özellikleri.

Deney Grupları	Yaprak Alanı Ortalama $\pm$ SD (cm ²)	Yaprak Çevresi Ortalama $\pm$ SD (cm)	Yaprak Boyu Ortalama $\pm$ SS (cm)	Yaprak Genişliği Ortalama $\pm$ SS (cm)
N	7.16 $\pm$ 2.90 ^{bc}	15.00 $\pm$ 3.32 ^c	3.15 $\pm$ 0.65 ^c	3.00 $\pm$ 0.58 ^c
T303	-	-	-	-
O1	15.46 $\pm$ 3.05 ^b	25.24 $\pm$ 2.26 ^b	4.53 $\pm$ 0.19 ^b	4.69 $\pm$ 0.15 ^{ab}
O2	20.89 $\pm$ 0.76 ^a	29.38 $\pm$ 0.91 ^a	5.48 $\pm$ 0.13 ^a	5.14 $\pm$ 0.10 ^a
O3	5.43 $\pm$ 0.01 ^c	14.85 $\pm$ 0.89 ^c	2.85 $\pm$ 0.00 ^c	2.96 $\pm$ 0.26 ^c
T1	10.81 $\pm$ 3.68 ^{bc}	18.59 $\pm$ 3.04 ^c	3.93 $\pm$ 0.61 ^{bc}	3.61 $\pm$ 0.60 ^{bc}
T2	10.34 $\pm$ 2.77 ^{bc}	16.52 $\pm$ 3.08 ^c	3.27 $\pm$ 0.45 ^c	3.90 $\pm$ 0.63 ^{bc}
T3	-	-	-	-

Yaprak alanı, çevresi, uzunluğu ve genişliği üzerine yapılan tek yönlü varyans analizleri (ANOVA), tüm parametrelerde uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulunduğunu göstermiştir ($p < 0.001$). Tüm morfolojik özellikler açısından en yüksek değerler O2 grubunda belirlenmiş, O1 grubu da benzer şekilde yüksek sonuçlar vermiştir. Buna karşılık O3 grubu en düşük değerleri gösterirken, yüksek tuzlu uygulamalarda (T3 ve T303) hiçbir yaprak gelişimi gözlenmemiştir. N, T1 ve T2 grupları ise orta düzeyde değerlere sahip olmuş ve çoğunlukla benzer istatistiksel gruplamalarda yer almıştır. Yaprak alanı açısından O2 grubunun öne çıkması, orta düzeydeki oksijen uygulamasının fotosentetik doku gelişimini desteklediğini göstermektedir. O1 grubu da nispeten yüksek yaprak alanı ile bu etkiyi takip etmiş, O3 grubundaki düşük değerler ise aşırı oksijenin yaprak morfolojisini sınırlayabileceğine işaret etmiştir. Bu durum, reaktif oksijen türlerinin (ROS) hücre bölünmesini baskılamasıyla açıklanabilir (Gill ve Tuteja, 2010). T3 ve T303 gruplarında yaprak gelişiminin tamamen durması, yüksek tuz stresi ve oksijen kombinasyonunun bitkinin yaprak oluşturma kapasitesini tümüyle bastırdığını göstermektedir. Yaprak çevresi de yaprak alanı ile paralel bir eğilim sergilemiş ve O2 grubunda en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu sonuç, orta düzey oksijenin yaprak büyümesini yalnızca boyut açısından değil, kenar gelişimi bakımından da desteklediğini ortaya koymaktadır. O1 grubu benzer şekilde yüksek çevre değerleri gösterirken, N, T1, T2 ve O3 grupları daha düşük ve benzer seviyelerde kalmıştır.

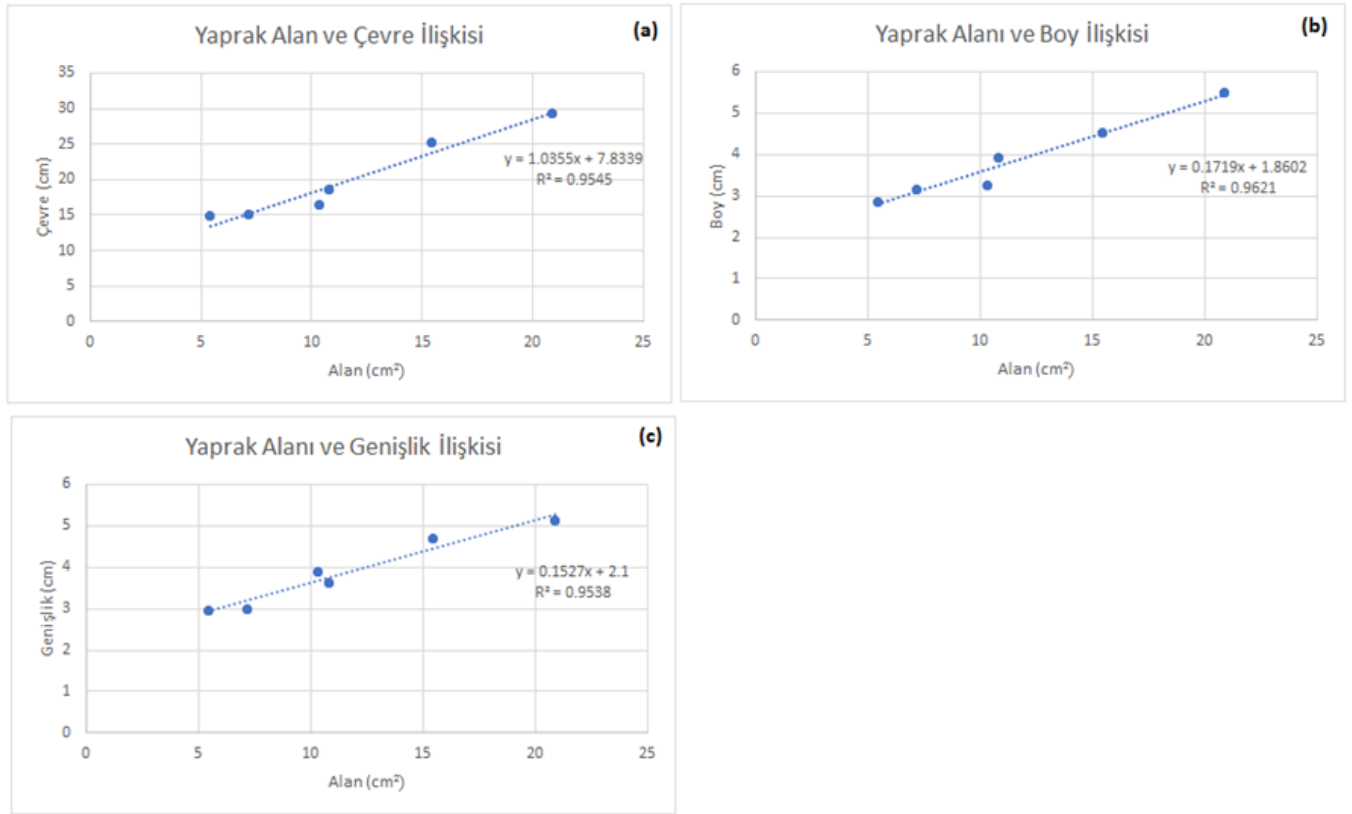
Yaprak genişliği ve uzunluğu da O2 ve O1 gruplarında en yüksek bulunmuş, özellikle O2 grubu her iki parametrede de tüm diğer gruplardan anlamlı şekilde ayrılmıştır. Bu durum, orta oksijen seviyesinin hem yatay (genişlik) hem de dikey (uzunluk) büyümeyi destekleyerek yaprak morfolojisine avantaj sağladığını düşündürmektedir. O3 grubundaki düşük yaprak boyutları ise oksijen fazlalığının hücre uzaması ve bölünmesi üzerinde baskılayıcı etki yapabileceğini göstermektedir.

Genel olarak, elde edilen bulgular orta düzey oksijen uygulamasının (O2) yaprak morfolojik özelliklerinin gelişimini desteklediğini, yüksek oksijenin (O3) ise bu gelişimi sınırlandırdığını ortaya koymaktadır. Tuz stresi koşullarında özellikle yüksek tuzlu uygulamalarda (T3 ve T303) yaprak gelişiminin hiç gerçekleşmemesi, bitkinin morfolojik büyümesini tamamen engellediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, oksijenin yaprak gelişimi için optimum seviyelerde faydalı, aşırı seviyelerde ise zararlı olabileceğini ortaya koymakta; aynı zamanda tuz stresinin bitki morfolojisi üzerindeki baskılayıcı etkisini de açıkça ortaya koymaktadır.

Uygulamaların Yaprak Özellikleri Üzerindeki Etkileri ve Özellikler Arası İlişkiler

Bu bölümde, farklı uygulamaların yaprak yapısına etkilerini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla yaprak morfolojik özellikleri (boy, genişlik, çevre ve alan) arasındaki ilişkiler korelasyon ve regresyon analizleri ile incelenmiştir. Bu analizler, uygulamaların yaprak boyutlarını nasıl şekillendirdiğini ve yaprak alanının temel boyutlardan ne ölçüde tahmin edilebildiğini ortaya koymaktadır (Şekil 4). Yaprak boyu, genişliği, çevresi ve alanı arasındaki ilişkiler Pearson korelasyon analizi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tüm değişkenler arasında pozitif ve yüksek düzeyde anlamlı ilişkiler bulunduğunu göstermektedir ($p < 0.001$). En güçlü ilişki yaprak alanı ile genişlik arasında ($r \approx 0.99$), bunu alan ile uzunluk arasındaki ilişki ($r \approx 0.98$) izlemiştir. Bu bulgular, yaprak alanının her iki boyut bileşeni tarafından güçlü şekilde belirlendiğini göstermektedir.

Yaprak alanını tahmin etmeye yönelik çoklu doğrusal regresyon analizinde yaprak uzunluğu ve genişliği bağımsız değişken olarak modele dahil edilmiştir. Model istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuş ($p < 0.001$) ve yaprak alanındaki varyansın yaklaşık %98'inin bu iki değişken tarafından açıklandığı belirlenmiştir ($R^2 = 0.98$). Her iki değişkenin modele anlamlı katkı verdiği, ancak yaprak genişliğinin etki büyüklüğünün daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Yaprak alanı ile morfolojik parametreler arasındaki ilişkilerin dağılım grafikleri: (a) Yaprak alanı – çevre, (b) Yaprak alanı – boy, (c) Yaprak alanı – genişlik. (Her bir grafikte gösterilen çizgi, doğrusal regresyon doğrusunu; R² değeri ise modelin açıklanaabilirlik oranını göstermektedir. Tüm ilişkiler p < 0.001 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır.)

Bu sonuçlar, yaprak alanını belirleyen temel morfolojik boyutların uzunluk ve genişlik olduğunu göstermektedir. Ayrıca, farklı uygulamaların yaprak yapısında oluşturduğu değişikliklerin, bu temel boyutlar üzerinden yaprak alanına yansıdığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, uygulamalar arasındaki yaprak morfolojisi farklılıklarının değerlendirilmesinde yalnızca iki ölçümün (uzunluk ve genişlik) yeterli ve güvenilir bir gösterge olduğu söylenebilir.

Yaprak Biyokütlesi (Yaş ve Kuru Ağırlık)

Farklı uygulamaların yaprak biyokütlesi üzerindeki etkileri, yaprak yaş ağırlığı ve kuru ağırlık verileri kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Gruplara ait ortalama yaprak yaş ve kuru ağırlık değerleri ve standart sapmaları (g).

Deney Grupları	Yaş Ağırlık Ortalama ± SD (g FW)	Kuru Ağırlık Ortalama ± SD (g DW)
N	0.093 ± 0.021 ^d	0.016 ± 0.003 ^b
T303	-	-
O1	0.215 ± 0.005 ^b	0.040 ± 0.001 ^a
O2	0.273 ± 0.003 ^a	0.050 ± 0.000 ^a
O3	0.095 ± 0.010 ^d	0.020 ± 0.002 ^b
T1	0.149 ± 0.030 ^c	0.034 ± 0.007 ^a
T2	0.171 ± 0.025 ^c	0.034 ± 0.004 ^a
T3	-	-

Yaprak yaş ağırlığı üzerine yapılan tek yönlü varyans analizi (ANOVA) sonucunda, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunmuştur (F = 41.22, p < 0.001). En yüksek yaprak yaş ağırlığı O2 grubunda ölçülmüş ve bu grup, tüm diğer gruplardan anlamlı şekilde farklı bulunmuştur. O2'yi, O1 ve T2 grupları takip etmiş; bu iki grup kendi aralarında kısmen benzerlik göstermiştir. T1 grubu, T2'ye göre daha düşük yaş ağırlığına sahipken, en düşük değerler N ve O3 gruplarında gözlenmiş ve bu iki grup arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır.

O2 grubunda yaprak yaş ağırlığının en yüksek çıkması, bu koşulun yaprak dokusunun su içeriğini ve taze biyokütleyi en iyi şekilde koruduğunu göstermektedir. Orta düzeydeki O1 ve T2 grupları, düşük oksijen ve orta tuz stresinin yaprak gelişimini kısmen desteklediğini düşündürür. Buna karşılık, N ve O3 gruplarının düşük değerleri, kontrol koşulunun ve yüksek oksijenin yaprak biyokütlesi açısından avantaj sağlamadığını ortaya koymaktadır; özellikle O3'te reaktif oksijen birikiminin hücre genişlemesini ve su tutmayı olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir.

Yaprak kuru ağırlık verilerine uygulanan tek yönlü ANOVA sonuçları da gruplar arası farkın yüksek olduğunu doğrulamıştır ($F = 33.38$, $p < 0.001$). Grupların toplam varyansın %93.3'ünü açıkladığı ($\eta^2 = 0.933$) bu analizde, ortalamalar arasındaki farkın etki büyüklüğü ($f = 3.73$) çok büyük olarak belirlenmiştir. Tukey HSD testi sonuçlarına göre, kuru ağırlık ortalamaları istatistiksel olarak iki ana gruba ayrılmıştır. En yüksek kuru ağırlık değerleri (a) kümesinde yer alan O1, O2, T1 ve T2 gruplarında gözlenmiştir. Bu grupların kendi aralarındaki farklılıklar anlamlı bulunmazken; en düşük kuru ağırlık değerlerini içeren (b) kümesi ise N ve O3 gruplarından oluşmuştur ve bu iki grup da birbirlerinden anlamlı bir farklılık göstermemiştir.

Kuru ağırlık sonuçları (yaprak yapısısal madde birikimini yansıtır), grupların biyokütle oluşturma yeteneğini yaş ağırlık bulgularıyla paralel olarak desteklemektedir. (b) kümesindeki (O1, O2, T1, T2) grupların yüksek kuru ağırlık değerleri, bu uygulamaların yaprakta su içeriğinin yanı sıra organik madde (karbonhidrat, protein vb.) birikimini de teşvik ettiğini düşündürmektedir. Özellikle N ve O3 gruplarının en düşük kuru ağırlıkta yer alması, yüksek oksijen veya kontrol koşulunun yapısal madde sentezini en az destekleyen koşullar olduğunu net bir şekilde göstermektedir.

Yaprak klorofil oranları

Yaprak klorofil içeriği üzerine yapılan tek yönlü varyans analizi (ANOVA), gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir ($F = 1.185$, $p = 0.37$). Tüm grupların klorofil değerleri birbirine oldukça yakındır (ortalama aralığı: 27.98 – 31.71 SPAD birimi). Bu durum, uygulanan farklı oksijen ve tuz streslerinin, yapraklarda klorofil birikimi üzerinde belirgin bir etki yaratmadığını göstermektedir. T3 grubunda sınırlı yaprak gelişimi ve T3O3 grubunda hiç yaprak oluşmaması nedeniyle bu gruplar analizden çıkarılmıştır. Gruplar arası klorofil içeriği dağılımı, (Şekil 5) de görsel olarak sunulmuştur. Grafik, tüm grupların benzer aralıklarda değerler aldığını ve aykırı bir sapma olmadığını göstermektedir.



Şekil 5. Farklı uygulamalara göre yaprak klorofil içeriği (SPAD) dağılımı.

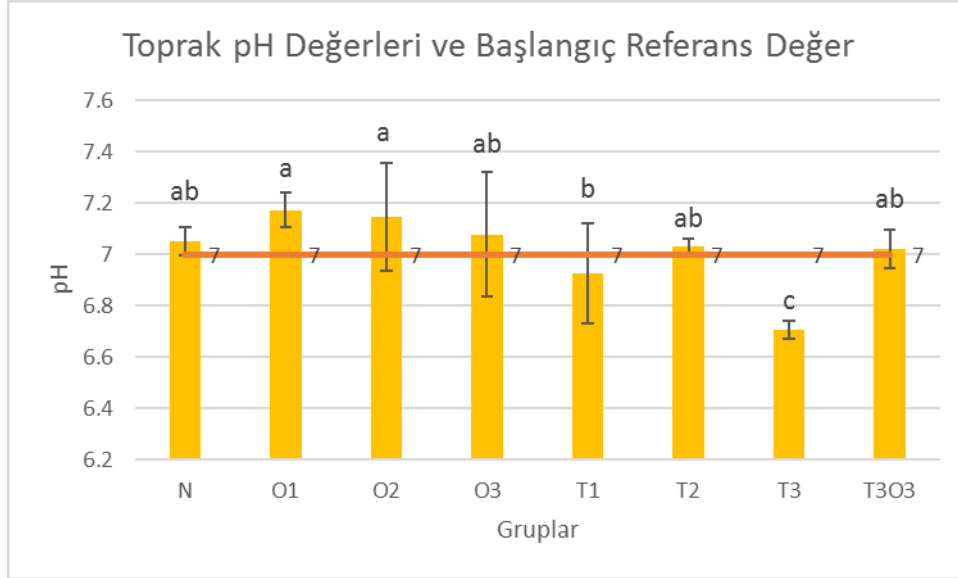
Klorofil içeriğinin stres koşullarında değişmemesi, kudret narı fidelerinin fotosentez kapasitesini korumaya öncelik verdiğini göstermektedir. Yaprak büyüklüğü azalsa bile, bitki mevcut yapraklardaki klorofil düzeyini sabit tutarak enerji üretimini sürdürmektedir. Bu bulgu, tuz stresine dayanıklı bitkilerde klorofil stabilitesinin korunduğunu gösteren çalışmalarla uyumludur (Ashraf ve Harris, 2013).

Toprak pH

Fidelerin gelişim sürecinin ardından, her grupta kullanılan toprak örneklerinin pH değerleri ölçülmüş ve farklı uygulamaların toprak pH ı üzerine etkisi tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçları, gruplar arasında toprak pH değeri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğunu göstermiştir ($F = 4.35$, $p < 0.05$). En yüksek pH değeri, O1 uygulamasında (7.17) ölçülmüştür. Bu grubu, istatistiksel olarak benzer değerlere sahip olan (O2, 7.15) ve (O3, 7.08) grupları takip etmiştir. Diğer tüm gruplar (N, T1, T2, T3), bu üç oksijenli gruptan istatistiksel olarak daha düşük pH değerlerine sahiptir. En düşük pH ise T3 grubunda (6.71) tespit edilmiş ve bu grup, diğer tüm gruplardan istatistiksel olarak anlamlı şekilde farklı bulunmuştur (Şekil 6). Uygulama öncesi başlangıç toprak pH değeri 7.00'dır.

Toprak pH'nın değişmesi, uygulanan streslerin toprağın kimyasını etkilediğini göstermiştir. Özellikle T3'teki düşüş, tuzun toprağı hafifçe asitleştirdiğini düşündürmektedir. Oksijen verilen gruplarda ise toprak biraz daha alkali kalmış ve bu da oksijenin toprak kimyasını farklı şekilde etkilediğini göstermiştir. Bu sonuç, bitkilerle toprak arasında güçlü bir etkileşim olduğunu hatırlamaktadır.



Şekil 6. Toprak pH değerleri dağılım grafiği

Köklerde belirlenen mikro element İçerikleri (Fe, Cu, Mn, Zn)

Fideleme döneminin sonunda yapılan kudret narı kök dokusu mikro element analizleri (Fe, Cu, Mn, Zn), uygulanan oksijen ve tuz seviyelerinin bitkinin mineral birikimi üzerinde belirgin ve farklılaşan etkileri olduğunu göstermiştir. Her gruba ait bitkilerin kök dokuları homojenleştirilerek tek bir kompozit örnek oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Bu nedenle, tablodaki değerler her grubun temsili konsantrasyonunu yansıtmakta olup, istatistiksel karşılaştırma yapılamamıştır. T3O3 grubunda ise yeterli kök oluşumu gerçekleşmediği için bu grup değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Çizelge 6. Kudret narı fide döneminde kök dokusundaki mikro element konsantrasyonları (Fe, Cu, Mn, Zn; ppm DW).

Deney Grupları	Fe (ppm DW)	Cu (ppm DW)	Mn (ppm DW)	Zn (ppm DW)
N	-	15	92	56
T3O3	-	-	-	-
O1	-	13	78	41
O2	-	21	96	60
O3	-	19	36	101
T1	-	5	50	28
T2	-	14	51	61
T3	-	14	50	58

Her gruba ait bitkilerin kök dokuları homojenleştirilerek tek bir kompozit örnek oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Bu nedenle, tablodaki değerler her grubun temsili konsantrasyonunu yansıtmaktadır; istatistiksel karşılaştırma yapılamamıştır.

Fe (Demir) konsantrasyonları tüm kök örneklerinde aşırı yüksek çıkmıştır. Bu durum, bitkinin yoğun Fe biriktirme eğilimi veya fizyolojik stres tepkimesi sonucu Fe'yi kökte tutma stratejisi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, bu kadar yüksek Fe değerleri, örnek hazırlama aşamasında kök yüzeyinde kalan toprak veya yetiştirme ortamı parçacıklarından kaynaklanan bir kontaminasyon olasılığını da akla getirmektedir. Analiz edilen diğer mikro elementlerin alım dinamiklerinin daha net yorumlanabilmesi amacıyla Fe verileri bu analize dahil edilmemiştir.

O2 grubunda Cu (21 ppm) ve Mn (96 ppm) konsantrasyonları en yüksek seviyelerde tespit edilmiştir. Bu bulgu, orta düzey oksijen uygulamasının köklerin solunum ve enerji ihtiyacını karşılayarak Cu ve Mn alımını veya birikimini en verimli hale getirdiğini düşündürmektedir. Ancak, oksijen seviyesi yükseltildiğinde O3 grubunda Mn (36 ppm) konsantrasyonu en düşük seviyeye gerilerken, Zn (101 ppm) konsantrasyonu en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum, Zn'nin alım mekanizmasının Cu ve Mn'den farklı bir oksijen gereksinimi veya taşıyıcı protein hassasiyeti sergilediğine işaret etmektedir.

Tuzluluk uygulamalarının (T1, T2, T3) etkisi incelendiğinde, Manganez (Mn) konsantrasyonlarının tüm tuz gruplarında (~50 ppm) kontrol grubuna (N = 92ppm) kıyasla önemli ölçüde ve sabit bir şekilde baskılandığı gözlenmiştir. Bu bulgu, tuzluluk stresinin, seviyesinden bağımsız olarak, Mn alımını % 45 civarında azaltan güçlü bir inhibitör etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Düşük Tuz (T1) grubu, Cu (5 ppm) ve Zn (28 ppm) için de en düşük konsantrasyonları göstermiştir. Bu sonuç, düşük tuz seviyesinde (T1) bitkinin Cu ve Zn alımını artıracak herhangi bir adaptif mekanizmayı tetiklemediğini ve bu elementlerin yetersiz birikiminin devam ettiğini düşündürmektedir.

Tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde, köklerde mikro element birikiminin en iyi şekilde, ekstrem koşullara maruz kalmadan, daha ılımlı ortamlarda gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Köklerdeki aşırı Fe birikimi metodolojik bir hata veya bitkinin fizyolojik bir stres tepkimesi olarak yorumlanabilir. Genel olarak, optimal çözülmüş oksijen seviyesinin (O2) getirdiği verim ve Mn alımının tuzluluğa karşı yüksek hassasiyeti, fide döneminde kök ortamının özellikle sudaki O2 konsantrasyonu açısından titizlikle yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Toprakta belirlenen mikro element İçerikleri (Fe, Cu, Mn, Zn)

Deney süresince tüm gruplarda aynı başlangıç toprak örneği kullanılmıştır. Fide gelişimi döneminin sonunda, her gruptan alınan toprak örneklerinde Fe, Cu, Mn ve Zn içerikleri ölçülmüş (Çizelge 7) ve farklı uygulamaların toprakta mikro element dinamikleri üzerine etkisi tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir.

Çizelge 7. Kudret narı fide döneminde toprakta belirlenen mikro element konsantrasyonları (Fe, Cu, Mn, Zn; ppm DW).

Deney Grupları	Fe (ppm DW) Ortalama ± SD	Cu (ppm DW) Ortalama ± SD	Mn (ppm DW) Ortalama ± SD	Zn (ppm DW) Ortalama ± SD
N	8.16 ± 2.79 ^b	2.86 ± 0.45 ^{bc}	4.47 ± 2.93 ^d	1.63 ± 0.17 ^{bc}
T303	5.96 ± 0.77 ^c	2.92 ± 0.42 ^{bc}	8.63 ± 2.01 ^{ab}	1.49 ± 0.20 ^{cd}
O1	8.36 ± 1.84 ^b	3.10 ± 0.27 ^{bc}	4.26 ± 1.23 ^d	1.96 ± 0.24 ^{ab}
O2	9.56 ± 1.67 ^a	3.90 ± 0.38 ^a	5.94 ± 0.71 ^{cd}	2.22 ± 0.49 ^a
O3	8.96 ± 2.44 ^{ab}	3.62 ± 0.48 ^{ab}	6.98 ± 3.05 ^{bc}	1.59 ± 0.29 ^{bc}
T1	6.83 ± 0.70 ^{bc}	3.05 ± 0.30 ^{bc}	5.64 ± 1.94 ^{cd}	1.28 ± 0.11 ^d
T2	5.39 ± 1.02 ^c	2.56 ± 0.16 ^c	4.41 ± 0.12 ^d	1.38 ± 0.08 ^d
T3	9.43 ± 1.31 ^a	3.59 ± 0.13 ^{ab}	11.23 ± 0.43 ^a	1.47 ± 0.09 ^{cd}
Başlangıç	19.008	6.806	13.68	2.894

Fideleme dönemi sonunda topraktaki mikro element konsantrasyonlarında (Fe, Cu, Mn, Zn) belirgin değişiklikler gözlenmiştir. Başlangıçta Fe 19.01 ppm, Cu 6.81 ppm, Mn 13.68 ppm ve Zn 2.89 ppm seviyesindeyken, deneme sonunda Fe 5.39–9.56 ppm, Cu 2.56–3.90 ppm, Mn 4.26–11.23 ppm ve Zn 1.28–2.22 ppm aralığında ölçülmüştür. Tek yönlü ANOVA analizleri, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu göstermiştir (Fe: F=3.39, p<0.05; Cu: F=6.89, p<0.05; Mn: F=7.08, p<0.05; Zn: F=6.75, p<0.05). Tukey testi, O2 ve T3 gruplarının genellikle yüksek değerler gösterdiğini, T gruplarının özellikle T2'nin ise en düşük seviyelerde yer aldığını ortaya koymuştur.

Bu bulgular, sulama uygulamalarının topraktaki mikro elementlerin korunumu ve bitki tarafından kullanım dinamikleri üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermektedir. O2 ve T3 uygulamalarında ölçülen yüksek Fe, Cu ve Zn düzeyleri, bu koşullarda elementlerin toprakta daha fazla tutulduğunu veya bitki tarafından daha sınırlı tüketildiğini işaret etmektedir. Buna karşılık, diğer uygulamalarda gözlenen daha düşük seviyeler, bitkisel alımın artması ya da yıkanma kaynaklı kayıpların etkili olabileceğini düşündürmektedir. Bu sonuçlar, sulama stratejilerinin sadece su dengesini değil, aynı zamanda toprak mikro element statüsünü de önemli ölçüde şekillendirdiğini göstermektedir.

Yaprak dokusunda belirlenen mikro element konsantrasyonları (Fe, Cu, Mn, Zn)

Fideleme dönemi sonunda toplanan yaprak örneklerinde Fe, Cu, Mn ve Zn içerikleri analiz edilerek, farklı sulama uygulamalarının yaprakta mikro element birikimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. T3 ve T303 gruplarında yaprak gelişimi olmadığından bu gruplar analiz dışında bırakılmıştır (Çizelge 8).

Çizelge 8. Kudret narı fide döneminde yaprak dokusundaki mikro element konsantrasyonları (Fe, Cu, Mn, Zn; ppm DW).

Deney Grupları	Fe (ppm DW) Ortalama $\pm$ SD	Cu (ppm DW) Ortalama $\pm$ SD	Mn (ppm DW) Ortalama $\pm$ SD	Zn (ppm DW) Ortalama $\pm$ SD
N	441 $\pm$ 466 ^a	12 $\pm$ 1 ^a	91 $\pm$ 39 ^a	43 $\pm$ 3 ^a
T303	-	-	-	-
O1	170 $\pm$ 30 ^a	9 $\pm$ 2 ^a	60 $\pm$ 14 ^a	31 $\pm$ 5 ^a
O2	165 $\pm$ 23 ^a	9 $\pm$ 1 ^a	73 $\pm$ 2 ^a	33 $\pm$ 5 ^a
O3	-	12 $\pm$ 2 ^a	117 $\pm$ 33 ^a	49 $\pm$ 1 ^a
T1	314 $\pm$ 166 ^a	11 $\pm$ 3 ^a	90 $\pm$ 9 ^a	43 $\pm$ 15 ^a
T2	210 $\pm$ 94 ^a	10 $\pm$ 2 ^a	78 $\pm$ 12 ^a	30 $\pm$ 6 ^a
T3	-	-	-	-

Fe içeriği üzerine yapılan tek yönlü ANOVA analizi, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir ($F=0.81$, $p=0.55$). Ortalama değerler incelendiğinde, Kontrol (N) grubu (441 ppm) ile en yüksek, Orta Oksijen (O2) grubu (165 ppm) ise en düşük Fe içeriğine sahip görünmektedir. Bu istatistiksel anlamsızlık, Fe konsantrasyonundaki bu tür dalgalanmaların uygulanan O veya T streslerinden değil, yüksek deneysel varyasyondan kaynaklandığını veya bitkinin Fe alımını strese karşı başarılı şekilde tamponladığını işaret eder. Demir, bitkilerde yeşil rengin oluşumu ve ışık enerjisi kullanımında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, ileride demir miktarı ile yaprak yeşillik ölçümü (SPAD) gibi basit testlerin birlikte incelenmesi faydalı olabilir (Marschner, 2012).

Cu içeriği üzerine yapılan tek yönlü ANOVA analizi, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir ($F=1.51$, $p=0.26$). Ortalama Cu değerleri tüm uygulamalarda (9–12 ppm) dar bir aralıkta kalmıştır. En yüksek Cu içeriği (N) ve (O3) gruplarında (12 ppm) ölçülmüştür. Cu konsantrasyonlarının strese karşı bu kararlılığı, bu elementin alım mekanizmasının uygulanan oksijen ve tuz değişimlerine karşı dayanıklı olduğunu veya fizyolojik olarak yeterli seviyelerin bu dar aralıkta hızlıca korunduğunu düşündürmektedir. Elde edilen tüm Cu değerleri toksik seviyelerin çok altında kaldığından (Kabata-Pendias, 2011), bu seviyeler Kudret narı fidesi için yeterli ve güvenli sınırlar içindedir.

Mn içeriği üzerine yapılan tek yönlü ANOVA analizi, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir ($F=2.26$, $p=0.11$). P değerinin anlamlılık sınırı olan 0.05'e yakın olması, marjinal bir fark eğilimi olduğunu gösterir. Ortalama değerlere göre, en yüksek Mn içeriği (O3) (117 ppm) grubunda, en düşük içerik ise (O1) (60 ppm) grubunda saptanmıştır. Mn'deki bu belirgin ortalama farkın istatistiksel olarak anlamlı sınıra ulaşmaması, deneysel varyasyonun rolünü işaret etse de, yüksek oksijenasyonun Mn alımını desteklediği yönünde güçlü bir biyolojik eğilim vardır. Mn alımı, toprak pH'ı, nem ve diğer çevresel faktörlerden de etkilenebildiği için, bu sonuçların genellenmesi için ilave çalışmalara ihtiyaç vardır (Marschner, 2012).

Yaprak çinko (Zn) içeriği üzerine yapılan tek yönlü Varyans Analizi (ANOVA) sonucunda, uygulama grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir ($F=3.47$, $p=0.0359$). Çinko'nun, uygulanan koşullara genel bir yanıt verdiğini gösteren bu bulgu, Zn alım mekanizmasının çevresel faktörlere karşı bir miktar hassasiyet gösterdiğini düşündürmektedir. Ancak, bu genel farkın kaynağını belirlemek için yapılan Tukey HSD çoklu karşılaştırma testi, $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyinde hiçbir grup çiftinin ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edememiştir (Tüm çiftler için $p > 0.05$). Bu durum, O3 grubu (49 ppm) gibi yüksek ortalama sahip gruplar ile en düşük ortalama sahip O1 ve T2 grupları arasındaki gözlemlenen farkın bile istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmediği anlamına gelmektedir. Gözlemsel olarak, düşük oksijen (O1) kaynaklı hipoksinin ve orta tuz (T2) kaynaklı tuzluluğun Zn alımını düşürdüğü görülürken, istatistiksel destek grubun yüksek varyansı nedeniyle zayıf kalmıştır. Zn alımındaki bu düşüşler, Zn'nin kofaktör olduğu enzim aktivitesini (özellikle karbonik anhidraz) ve oksin hormonu sentezini olumsuz etkileyerek fide gelişimini yavaşlatabilir. Zn alımının toprak pH'ı, organik madde ve diğer çevresel faktörlerden etkilenebildiği göz önüne alındığında, bu sonucun kesin olarak genellenmesi için daha geniş ve tekrarlı çalışmalara ihtiyaç vardır (Kabata-Pendias, 2011).

Sonuç

Bu çalışmada, kudret narı (*Momordica charantia* L.) bitkisinin erken gelişim döneminde farklı tuzluluk ve oksijen düzeylerini içeren sulama uygulamalarının etkileri değerlendirilmiştir. İncelenen fide gelişim parametreleri arasında özellikle sürgün uzunluğu, taze-kuru ağırlık ve mineral birikimi bakımından tuz ve oksijen düzeylerinin belirleyici olduğu görülmüştür. Kök uzunluğu açısından yapılan değerlendirmede ise uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Orta düzey oksijen uygulamalarının fide gelişimini desteklediği; buna karşılık yüksek tuzluluk düzeylerinin sürgün büyümesi, biyokütle artışı ve mineral birikimini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Tuzluluk arttıkça bitki gelişim göstergelerinde düşüş meydana gelmiş, orta oksijen uygulamaları (50 ml suya 3–6 damla oksijenli su) ise bitkinin mineral alımını ve gelişim performansını iyileştirmiştir.

Araştırma bulguları, kudret narı fidesi yetiştiriciliğinde sulama suyunun yalnızca miktarının değil, içerdiği tuzluluk ve oksijen düzeylerinin de dikkatle yönetilmesi gerektiğini göstermektedir. Uygulamada düşük tuzluluk düzeyleri (0.65–3.25 g L⁻¹) ile orta oksijen uygulamalarının birlikte kullanılması, fide büyümesini destekleyen uygun bir yaklaşım olarak önerilmektedir.

Bu çalışmada kontrol uygulaması olarak kullanılan çeşme suyunun elektriksel iletkenlik (EC) değeri 0.38 dS m⁻¹ olarak belirlenmiş olup, bu değer düşük tuzluluk düzeyinde olmakla birlikte, uygulamalar arasındaki tuzluluk etkilerinin değerlendirilmesinde temel bir referans düzeyi sağlamaktadır. Farklı toprak koşulları ve iklim özelliklerinde yapılacak benzer çalışmalarla bu bulguların desteklenmesi, kudret narı üretiminde daha etkili ve sürdürülebilir sulama stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Ali A, Ferdosi FH, Sarwar M, Anjum S, Mushtaq Z, Liaquat M, Abbas MT, Anees M, Tariq MR, Ashraf MI, Alasmari A, Mondol MSA, Abdi G, 2025. Inducing salt stress tolerance in bitter melon (*Momordica charantia*) through seed treatment with chitosan. *Front. Plant Sci*, 15, 1525561. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1525561>
- Angon PB, Mollah MR, Rahman MM, 2022. How do plants respond to combined drought and salinity stress? *Front. Plant Sci*, 13, 965390. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.965390>
- Ashraf M, Harris PJC, 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163–190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>
- Atta K, Mondal S, Gorai S, Singh AP, Kumari A, Ghosh T, Roy A, Hembram S, Gaikwad DJ, Mondal S, Bhattacharya S, Jha UC, Jespersen D, 2023. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Front. Plant Sci.*, 14, 1241736. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>
- Barba-Espín G, Diaz-Vivancos P, Job D, Belghazi M, Job C, Hernández JA, 2011. Understanding the role of H2O2 during pea seed germination: a combined proteomic and hormone profiling approach. *Plant Cell Environ*, 34(11), 1907–1919. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02386.x>
- Fiorani F, Schurr U, 2013. Future scenarios for plant phenotyping. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 64, 267–291. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120137>
- Fonseka HH, Wickramasinghe IP, Bandara DC, 2011. Studies on deterioration and germination of bitter melon seed (*Momordica charantia* L.) during storage. *Acta Hort.*, 898, 13–18. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.898.2>
- Gill SS, Tuteja N, 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Hasanuzzaman M, Bhuyan MHMB, Zulfiqar F, Raza A, Mohsin SM, Mahmud JA, Fujita M, Fotopoulos V, 2020. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Jisha KC, Vijayakumari K, Puthur JT, 2013. Seed priming for abiotic stress tolerance: An overview. *Acta Physiol. Plant.*, 35(5), 1381–1396. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1186-5>
- Joseph B, Jini D, 2013. Antidiabetic effects of *Momordica charantia* (bitter melon) and its medicinal potency. *Asian Pac. J. Trop. Dis.*, 3(2), 93–102. [https://doi.org/10.1016/S2222-1808\(13\)60052-3](https://doi.org/10.1016/S2222-1808(13)60052-3)
- Kabata-Pendias A, 2011. Trace elements in soils and plants (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Khan MA, Asaf S, Khan AL, Jan R, Kang SM, Lee IJ, 2022. Abiotic stress responses in plants: A review on seed germination and early seedling growth under stress conditions. *Plants*, 11(15), 1932. <https://doi.org/10.3390/plants11151932>
- López-Méndez AG, Rodríguez-Pérez JE, Mascorro-Gallardo JO, Sahagún-Castellanos J, Lobato-Ortiz R, 2024. Sodium chloride tolerance during germination and seedling stages of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) lines native to Mexico. *Horticulturae*, 10(5), 466. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050466>

- Marschner P, 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd Edition, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Naïtchédé LHS, Nyende AB, Runo S, Borlay AJ, 2023. Plant regeneration from embryogenic callus-derived from immature leaves of *Momordica charantia* L. *Heliyon*, 9(11), e22122. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22122>
- Özsan Kılıç T, Onus AN, 2023. A study on bitter gourd (*Momordica charantia* L.) callogenesis optimization based on hormone balance and explant types. *Int. J. Agric. Environ. Food Sci.*, 7(3): 633–638. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.17>
- Paul V, Pandey R, Solaiyappan M, Mukherjee P, 2024. Sample collection and digestion methods for elemental analysis of plant. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35285.64481>
- Pongkitwitoon B, 2019. In vitro cultures of medicinal plant *Momordica charantia* L. and their applications. *Isan J. Pharm. Sci.*, 15(1): 58-68. <https://doi.org/10.14456/ijps.2019.4>
- Taiz L, Zeiger E, 2010. *Plant Physiol.*, 5th Edition. Sinauer Associates.
- Tavakkoli E, Fatehi F, Rengasamy P, McDonald GK, 2010. Additive effects of Na⁺ and Cl⁻ ions on growth, physiological processes, and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under salinity stress. *J. Exp. Bot.*, 61(15), 4449–4459. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq251>
- Temizel KE, Odabaş MS, Şenyer N, Kayhan G, Bajwa S, Çalışkan O, Ergun E, 2014. Comparision of some models for estimation of reflectance of hypericum leaves under stress conditions. *Cent. Eur. J. Biol.*, 9(12): 1226-1234.
- Thomas P, 2025. Continuous injection of hydrogen peroxide in drip irrigation. *Agronomy*, 15(2), 385. <https://doi.org/10.3390/agronomy1502038>