

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

## RESEARCH ARTICLE

**Fonksiyonel Tahıllardan Chia'nın (*Salvia hispanica* L.) Kuraklık Koşullarına Uyum Mekanizmalarının Morfofizyolojik ve Biyokimyasal Açından Değerlendirilmesi****Morphophysiological and Biochemical Evaluation of Drought Adaptation Mechanisms in Chia (*Salvia hispanica* L.) as a Functional Cereal Crop**Sığnem ÖNEY BİROL<sup>1\*</sup>**Öz**

Dünya genelinde kuraklık, tarımsal üretimi sınırlayan en önemli çevresel faktörlerden biri olup ürün verimini ciddi şekilde azaltmaktadır. Bitkiler, bu strese morfolojik, anatomik, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeyde verdikleri yanıtlarla kuraklıkla başa çıkma mekanizmalarını devreye sokmaktadır. Chia (*Salvia hispanica* L.), içerdiği yüksek düzeyde yağ asidi, protein ve antioksidan bileşenlerle "fonksiyonel gıda" sınıfında yer alan yeni nesil bir tahıldır. Bu çalışmada, kuraklık stresinin chia bitkisinde morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal adaptasyon mekanizmaları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Tarla kapasitesine göre %0, %25, %50 ve %100 sulama uygulamaları şeklinde su stresi seviyeleri belirlenmiş ve bitkilerin gelişim özellikleri bu stres seviyelerine göre karşılaştırılmıştır. Morfolojik açıdan, %100 sulama grubunda bitki boyu, yaprak alanı ve taze ağırlık gibi büyümeye yönelik parametrelerde anlamlı artış gözlemlenirken, %50 sulama uygulamasında ana kök uzunluğunun diğer gruplardan bağımsız olarak en yüksek değere ulaştığı tespit edilmiştir. Biyokimyasal bulgular, su eksikliğinin prolin ve malondialdehit (MDA) düzeylerini artırdığını; ayrıca reaktif oksijen türlerini düzenleyen antioksidan enzimlerden süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve askorbat peroksidaz (APX) aktivitelerini yükselttiğini göstermiştir. Bu durum, chia bitkisinin hem osmotik hem de oksidatif stresle başa çıkabilmek için çok yönlü savunma mekanizmaları geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Su stresinin arttığı %0 ve %25 tarla kapasitesinde, prolin ve MDA birikiminde belirgin artış gözlenmiş; aynı zamanda antioksidatif savunma sistemine ait SOD, CAT ve APX aktiviteleri de yükselmiştir. Korelasyon analizleri, prolin ile antioksidan enzimler arasında pozitif bir ilişki olduğunu ve MDA ile büyüme parametreleri arasında negatif korelasyonlar bulunduğunu göstermiştir. Bu bulgular, sürdürülebilir tarım hedefleri doğrultusunda, kuraklık stresine karşı dayanıklılığı yüksek türlerin, özellikle chia gibi alternatif yağlı tohumlu bitkilerin önemli bir araştırma odağı olması gerektiğini vurgulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Adaptasyon, Antioksidan enzimler, Morfoloji, Oksidatif hasar, *Salvia hispanica*, Su stresi

<sup>1\*</sup>**Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Sığnem Öney Birol, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, 15030, Burdur, Türkiye. E-mail: [sobirol@mehmetakif.edu.tr](mailto:sobirol@mehmetakif.edu.tr)  ORCID: 0000-0002-0828-5739.

**Atıf:** Öney Birol, S. (2025). Fonksiyonel tahıllardan chia'nın (*Salvia hispanica* L.) kuraklık koşullarına uyum mekanizmalarının morfofizyolojik ve biyokimyasal açıdan değerlendirilmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22(4): 1086-1099.

**Citation:** Öney Birol, S. (2025). Morphophysiological and biochemical evaluation of drought adaptation mechanisms in chia (*Salvia hispanica* L.) as a functional cereal crop. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 22(4): 1086-1099.

©Bu çalışma Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi tarafından Creative Commons Lisansı (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) kapsamında yayınlanmıştır. Tekirdağ 2025

---

## Abstract

Drought is one of the most critical environmental constraints limiting agricultural productivity worldwide and has a significant negative impact on crop yield. Plants respond to drought stress by activating a variety of tolerance mechanisms at the morphological, anatomical, physiological, biochemical, and molecular levels. Chia (*Salvia hispanica* L.) is a next-generation functional grain, rich in fatty acids, protein, and antioxidant compounds. This study aimed to evaluate the effects of drought stress on the morphophysiological and biochemical adaptation mechanisms in chia plants. Four irrigation levels were established to simulate different levels of water stress: 0%, 25%, 50%, and 100% of field capacity. Growth parameters were compared among these treatments. Morphologically, the 100% irrigation group showed significant increases in plant height, leaf area, and fresh weight. However, the 50% irrigation group exhibited the longest taproot length, indicating a distinct root adaptation strategy under moderate water stress. Biochemical findings showed that water deficit increased proline and malondialdehyde (MDA) levels, as well as the activities of antioxidant enzymes regulating reactive oxygen species, including superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and ascorbate peroxidase (APX). This indicates that chia plants develop multifaceted defense mechanisms to cope with both osmotic and oxidative stress. Particularly under 0% and 25% field capacity, proline and MDA accumulation was more pronounced, with significant upregulation of antioxidant enzyme activities. Correlation analysis revealed a positive association between proline and antioxidant enzyme activities, while MDA levels showed a negative correlation with growth parameters. These results emphasize the importance of focusing on drought-resilient crops, especially alternative oilseed species like chia as a key research target in the pursuit of sustainable agricultural practices.

**Keywords:** Adaptation, Antioxidant enzymes, Field capacity, Morphology, Oxidative damage, *Salvia hispanica* L.

## 1. Giriş

İklim değişikliği, doğal süreçlerin yanı sıra insan faaliyetlerinin etkisiyle uzun vadede meydana gelen iklimsel farklılıklar olarak tanımlanmaktadır (Chandio ve ark., 2021). 1850–1982 yılları arasında kara ve okyanus yüzey sıcaklıkları her on yılda ortalama 0.06 °C artarken, 1982 yılı sonrasında bu artış yaklaşık üç katına çıkarak 0.20 °C'ye ulaşmıştır. Bu durum, hızlı nüfus artışı, sera gazı salınımı ve fosil yakıt tüketimi ile birlikte küresel ısınmayı insanlığın en büyük çevresel tehditlerinden biri haline getirmiştir. Bitkiler, çevrelerinde meydana gelen ani ya da uzun süreli değişimlere karşı oldukça hassas canlılardır. Sıcaklık dalgalanmaları, ışık yetersizliği, su kıtlığı, tuzluluk, ağır metal birikimi ve patojen baskısı gibi çevresel olumsuzluklar, bitki organizması tarafından "stres" olarak algılanmaktadır (Zhu, 2016). Bitkiler bu tür abiyotik veya biyotik stres faktörlerine maruz kaldığında, dış sinyaller hücre zarındaki reseptörler aracılığıyla algılanmakta ve hücre içi sinyal iletim yolları aktive edilmektedir (Fujita ve ark., 2006). Bu sinyaller, stres koşullarına uygun fizyolojik ve moleküler yanıtların başlatılmasını desteklerken, bitki metabolizmasında dengenin bozulması, özellikle reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini tetikleyerek oksidatif stresin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Stresin şiddeti, süresi ve bitkinin gelişim evresi, verdiği yanıtın karakterini oluşturmaktadır ki stresin algılanması ve ona karşı verilen yanıt, bitkinin gen ifadesi, hücresel metabolizma, büyüme prosesleri ile ürün veriminde meydana gelen değişiklikler aracılığıyla (Verma ve ark., 2022) hayatta kalma başarısını ve adaptasyon kapasitesini belirleyen temel biyolojik süreçler olarak belirtilmektedir (Mittler, 2002).

Tarımsal üretim; sıcaklık, yağış ve rüzgâr gibi iklim faktörleri ile zararlılar ve hastalıkların yayılımından ciddi biçimde etkilenmektedir (McClelland ve ark., 2025). Dünya genelinde, kuraklık tarımsal üretimi kısıtlayan en önemli faktörlerden biri olup, ürün verimini olumsuz etkilemektedir. Bitkiler kuraklık stresine; morfolojik, anatomik, biyokimyasal, fizyolojik ve moleküler seviyede yanıtlar vermek suretiyle kuraklık tepki mekanizmalarını harekete geçirmektedirler (Yang ve ark., 2021). Spesifik olarak, kuraklık stresi ile karşılaşan bitkide öncelikle büyüme ve gelişme parametrelerinde, klorofil ve çözünür protein miktarında azalma meydana gelirken prolin ve şeker gibi osmolitlerin miktarında artış gözlemlenmektedir (Bogati ve Walczak, 2022). Su eksikliği, ayrıca bitkilerde reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini de tetikleyerek lipid peroksidasyonuna ve oksidatif hasara neden olmaktadır (Xiong ve ark., 2002). Bu oksidatif stres, hücre zarlarının, proteinlerin ve DNA'nın hasar görmesine yol açarak bitkinin büyüme kapasitesini kısıtlamaktadır. Bitkiler de, bu hasarı indirmek için antioksidan savunma sistemlerini aktive etmek suretiyle, süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve peroksidaz (POD) gibi enzimatik bileşenlerle ROS'ini nötralize ederek hücresel hasarı önlemeye çalışmaktadırlar (Apel ve Hirt, 2004). Ayrıca, kuraklık koşullarında prolin ve çözünür şeker gibi osmotik düzenleyicilerin birikimi, hücrelerin su potansiyelini dengeleyerek stres koşullarında hayatta kalmalarına destek olmaktadır (Yancey, 2005).

Yaklaşık 10.000 yıldır temel gıda olarak tüketilen tahıllar, bugün küresel kalorinin %50'sinden fazlasını sağlamaktadır (Ahmar ve ark., 2023; Mallikarjuna ve ark., 2022; Vishnoi ve Goel, 2024). Bu nedenle, Yeşil Devrim sonrası biyoteknolojik gelişmelerle birlikte iklim değişikliğine bağlı verim kayıplarını azaltmaya yönelik çalışmalar, tarımsal araştırmaların öncelikli konusu olmuştur (Taniushkina ve ark., 2024). Aztek kabileleri tarafından uzun yıllardır kullanılmakta olan Chia (*Salvia hispanica* L.) Lamiaceae familyasının *Salvia* cinsine ait bir türdür. Geleneksel olarak Meksika ve Amerika Birleşik Devletleri'nin güneybatısında, daha sınırlı ölçüde ise Güney Amerika'da tüketilmektedir; ancak Avrupa'da, Avrupa Birliği tarafından ilk kez 2009 yılında ekmek üretiminde kullanımıyla yeni gıda olarak onaylanmış; daha sonra farklı gıdalarda kullanımı da kabul edilmiş ve 2017 yılında yürürlüğe giren Komisyon Uygulama Tüzüğü (EU 2017/2470) kapsamında, 2015/2283 sayılı Yeni Gıdalar Yönetmeliği doğrultusunda oluşturulan Birlik Listesi'ne resmen dahil edilmiştir (European Commission, 2017). Chia tohumları, içerdiği yağ, protein, antioksidanlar ve diyet lifi nedeniyle (Bushway ve ark., 1981; Taga ve ark., 1984; Ayerza ve Coates, 2002) yalnızca bir besin kaynağı olarak değil, aynı zamanda ilaç ve boya yapımında da önemli bir yere sahiptir. Chia tohumun ağırlığının yaklaşık %25–38'i yağdan oluştuğu ve bilinen diğer doğal kaynaklara oranla  $\alpha$ -linolenik asit (yaklaşık %60) içeriğinin diğer tahıllar arasında en yüksek değere sahip olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca, tohumlarının %19–23'ü protein içerdiğinden dolayı, geleneksel tahıllar olan buğday (*Triticum aestivum* L.), mısır (*Zea mays* L.), pirinç (*Oryza sativa* L.), yulaf (*Avena sativa* L.) ve arpadan (*Hordeum vulgare* L.) daha yüksek düzeyde protein sağlayıcısı oldukları vurgulanmaktadır (Coates ve Ayerza, 1996). Bunun yanı sıra chia tohumları higroskopiktir, suyla temas ettiklerinde ağırlıklarının 12 katına kadar sıvıyı emerek tohum kabuğunu kaplayan müsilajimsi bir jel tabakası üretmektedir (Geneve ve ark., 2017).

Bu çalışmada hidrofilik bir tür olan Chia bitkisinin değişen iklim koşulları altında oluşan su eksikliğinin sebep olduğu kuraklık faktörünün fizyolojik ve biyokimyasal (malondialdehit (MDA), prolin, katalaz (CAT), askorbik asit peroksidaz (APX), süperoksit dismutaz (SOD) ve toplam protein içeriği) yanıtları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve kurak ve yarı kurak bölgelerde tarımı teşvik edilen potansiyel bir yağlı tohum bitkisi olan chianın, iklim değişikliği ile birlikte artan su stresi koşullarında dayanıklılığının anlaşılmasına katkıda bulunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Bitki materyalinin çimlendirilmesi, saksılarda yetiştirilmesi ve su eksikliği stresinin uygulanması

Çalışmada kullanılan chia tohumları üreticiden temin edilmiştir. Tohumların çimlendirilmesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümünde bulunan iklim odasında, 25°C standart sıcaklık ve %50 nem ortamında karanlıkta 12x12 cm petri kaplarında gerçekleştirilmiştir. Tohumların çimlenmesinden sonra, 7. günde fideler, 15 cm ağız çaplı ve 12 cm yüksekliğinde, içerisinde ticari torf bulunan (Klasmann TS1) saksılara aktarılarak yetiştirilmiştir. Yetiştirme işlemi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümünde bulunan iklim odasında, 18 saat ışık / 6 saat karanlık, 25°C standart sıcaklık ve %50 nem ortamında gerçekleştirilmiştir.

Tohum çimlendirilmesi aşaması başlamadan önce saksıların tarla kapasitesini hesaplamak amacıyla saksıların her birine 68 gr ( $\pm 4$  gr) ticari torf doldurulmuş ve drenaj deliklerinden su gelene kadar her bir saksı sulanmıştır. Saksıların üzerleri alüminyum folyo ile kapatıldıktan sonra iklim odasında 24 saat boyunca bekletilerek suyun buharlaşmadan toprak tarafından tamamen çekilmesi sağlanmış olup, ağırlıkları tekrar ölçülmüştür. Her bir saksının ağırlığı 124 gr ( $10 \pm$  gr) olarak ölçülmüştür. Saksıların üzeri açıldıktan sonra iklim odasında tamamen kuruyana kadar bekletilmiş ve toprak tamamen kuruduktan sonra saksıların ağırlıkları tekrar ölçülmüştür ve aradaki fark tarla kapasitesi olarak hesaplanmıştır. Buna göre, belirlenen su miktarı esas alınarak, %100, 75, 50 ve 25 sulama olmak üzere tarla kapasitesi seviyeleri toplam 4 gruba ayrılmıştır. Tüm uygulama gruplarına ait bitkiler eksilen miktar kadar su saksılara eklenerek saksılar belirlenen tarla kapasitelerinde tutulmuşlardır. Her saksıya tek bitki olmak üzere her uygulama grubuna ait toplamda 10 bitki olacak şekilde bitkiler yetiştirilmiştir (Şekil 1). Bitkiler, Farooq ve ark. (2009)'un çalışmalarında uyguladıkları sulama yönteminin kısmen modifiye edilmesi şeklinde sulanmıştır. Yetiştirilen bitkilere su eksikliği stresi uygulamasının, bitkinin hangi gelişimsel döneminde yapılacağı Silva ve ark. (2018) 'nin çalışmalarında uyguladıkları yöntemle göre düzenlenmiştir.

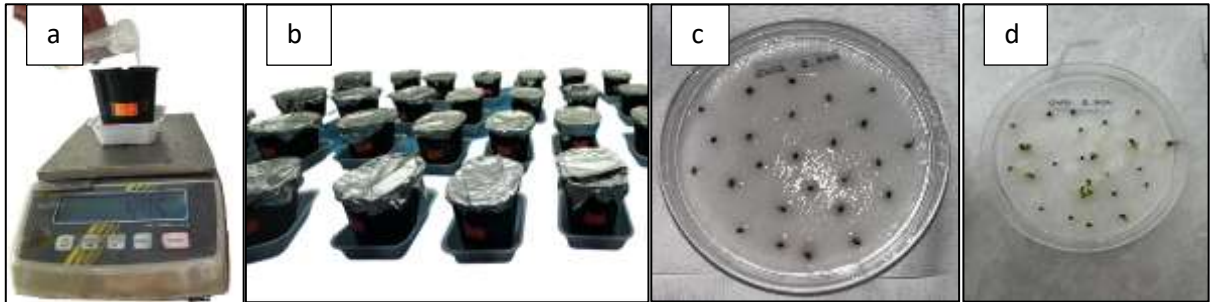


Figure 1. Calculation of pot's field capacity (a), grouping of plants based on field capacity levels (b), and germination stages (c, d)

### Şekil 1. Saksıların tarla kapasitelerinin hesaplanması (a), bitkilerin tarla kapasitesi seviyesinin hesaplanmasından sonra gruplara ayrılması (b) ve çimlendirme aşamaları (c, d)

### 2.2. Morfolojik karakterlerin değerlendirilmesi

Morfolojik ölçümler, her bitki grubundan 10 birey ile gerçekleştirilmiştir. Bitki boyu (cm) (kök ucundan en üst yaprak ucuna), saçak kök sayısı, primer (ana) kök uzunluğu (cm), (kök ucundan gövde başlangıcına kadar), gövde çapı (en kalın noktadan), yaprak sayısı, yaprak alanı ve taze ağırlık olarak ölçümlenmiştir (Şekil 2).



Figure 2. Germination of chia seeds, transplantation into pots, plant growth, and morphological measurements following water deficit stress application (BioRender, 2025)

**Şekil 2.** Chia tohumlarının çimlendirilmesi, saksılara ekimi, yetiştirilmesi ve su eksikliği stresi uygulamasının ardından morfolojik ölçümlerin yapılması (BioRender, 2025)

### 2.3. Biyokimyasal parametrelerin belirlenmesi

#### 2.3.1. Prolin miktarı

Prolin miktarı, Bates ve ark. (1973)'nin protokolüne göre, 200 mg yaprak dokusu 1 mL %3'lük 5-sülfosalisilik asit içinde homojenize edilmiştir. Homojenat 2 mL mikrosantrifüj tüplerine aktarılmış ve üzerine 400 µL ekstrakt, 400 µL ninhidrin ve 400 µL asetik asit karıştırıldıktan sonra 100 °C'de 1 saat inkübe edilmiştir. Reaksiyon buz üzerinde durdurulduktan sonra 800 µL toluen eklenmiş ve vortekslenmiştir. Faz ayrışması için tüpler oda sıcaklığında 5 dakika bekletilmiş ve 520 nm dalga boyunda EPOC mikroplate reader ile okunmuştur. Prolin içeriği, bilinen miktarlardaki L-prolin (Sigma) standardı ile karşılaştırılarak µg g<sup>-1</sup> taze ağırlık cinsinden hesaplanmıştır.

#### 2.3.2. Malondialdehit miktarı (MDA)

200 mg yaprak dokusu %0.1'lik trikloroasetik asit (TCA) içinde 1 mL hacminde homojenize edilmiş ve 4 °C'de 10000 g'de 20 dakika santrifüj edilmiştir. Üst fazdan alınan 1 mL'lik süpernatant, %0.5 tiyobarbitürik asit (TBA) içeren %20 TCA çözeltisinden 2.5 mL ile karıştırılarak 95 °C'de 15 dakika inkübe edilmiştir. Karışım buz üzerinde soğutulduktan sonra 4000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilmiştir. Elde edilen süpernatanın absorbansı 450 nm, 532 nm ve 600 nm dalga boylarında ölçülmüştür. MDA içeriği aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır:  $C (\mu\text{mol L}^{-1}) = 6,45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0,56 \times A_{450}$  (Chen ve ark., 2000).

#### 2.3.3. Süperoksit dismutaz (SOD), Katalaz (CAT) ve Askorbat peroksidaz (APX) enzim aktivitesi

Antioksidan enzim seviyelerinin belirlenmesi amacıyla enzim ekstraksiyonu ve hazırlığı +4 °C'de gerçekleştirilmiştir. 200 mg taze yaprak dokusu, 5 mL soğuk sodyum fosfat tamponu (50 mM, pH 7.8) içinde homojenize edilmiştir. Elde edilen homojenatlar 10500 rpm'de 20 dakika santrifüj edildikten sonra;

**SOD aktivitesi**, Beauchamp ve Fridovich (1971) yöntemine göre 3 mL'lik reaksiyon karışımı 15 W'lık floresan lamba ışığı altında 10 dakika inkübe edildikten sonra 10 dakika karanlıkta bekletilmiş ve absorbans 560 nm'de ölçülmüştür.

**CAT aktivitesi**, 200 mg taze yaprak dokusunun, 5 mL buz içinde 50 mM sodyum fosfat tamponu (pH 7.8) homojenize edilmiş, santrifüjden sonra H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözeltisinin parçalanmasına bağlı olarak 240 nm'deki absorbans düşüşü 3 dakika boyunca takip edilerek ölçüm yapılmıştır (Beers ve Sizer, 1952).

**APX aktivitesi**, Kato ve Shimizu (1987) yöntemine göre, 50 µL enzim ekstraktı, 1 mL 50 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7), 250 µL 0.5 mM askorbik asit ve 200 µL 0.1 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile karıştırılmış ve reaksiyon süresince



290 nm'deki absorbans azalışı 4 dakika boyunca kinetik olarak ölçülmüştür (kontrol olarak %30 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılmıştır).

#### 2.3.4. Total protein miktarı

Tarla kapasitesine göre 4 gruba ayrılarak yetiştirilen bitkilerin protein miktarının belirlenebilmesi için, yaklaşık 300 mg yaprak dokusu 2 mM Na-EDTA ve %1 PVP içeren 4 ml 50 mM potasyum fosfat Buffer çözeltisi (pH:7.0) içinde homojenize edildikten sonra, 4 °C sıcaklıkta 10.000 rpm'de 10 dakika boyunca santrifüjlenmiştir. Yapraktan protein içeriği; Bradford (1976) yöntemine göre belirlenmiştir. Bu amaçla Bio-Rad ekstraksiyon kiti kullanılarak; her küvete 1x boya reaktifi eklenmiş ve vorteksleme yapılarak 5 dk oda sıcaklığında bekletilmiştir. 595 nm'de okumalar yapıldıktan sonra toplam protein miktarı mg/ml taze ağırlık olarak ifade edilmiştir.

#### 2.3.5. İstatistiksel değerlendirme

Çalışmada RStudio programı morfolojik ve biyokimyasal parametrelerin değerlendirilmesi için “agricolae” paketi ve korelasyon analizleri için “corrplot” paketi kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmeler one way ANOVA, Duncan's multiple range testine göre değerlendirilmiştir ( $p \leq 0.05$ ).

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Su eksikliği stresinin morfolojik özellikler üzerine etkileri

Bu çalışmada chia (*Salvia hispanica* L.) bitkisine ait morfolojik karakterizasyon, farklı sulama seviyelerinde (%0, %25, %50, %100 tarla kapasitesi) uygulanan su eksikliği şartlarında değerlendirilmiştir. Grup 1 (%0 sulama), Grup 2 (%25 sulama), Grup 3 (%50 sulama) ve Grup 4 (%100 sulama) uygulamaları şeklinde temsil edilmiştir. Bitkinin su eksikliği verdiği morfolojik yanıtlar bitki boyu, saçak kök sayısı, primer kök uzunluğu, gövde çapı, yaprak sayısı, yaprak alanı ve taze ağırlık parametreleri ölçülünerek karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. One-way ANOVA ve Duncan's multiple range testi sonucunda tüm parametrelerde gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunmuştur ( $p \leq 0.05$ ) (Şekil 3).

Şekil 3'e göre, tam sulama (100%) uygulanan grupta tüm morfolojik parametrelerde istatistiksel olarak en yüksek ortalamalar elde edilmiştir ( $p \leq 0.05$ ). Özellikle bitki boyu (70.34 cm), yaprak alanı (89.31 cm<sup>2</sup>) ve taze ağırlık (41.84 g) bu grupta maksimum düzeyde gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, tam sulamanın chia bitkisinde hücre uzaması, fotosentezi ve su dengesini optimize ederek biyokütle artışını desteklediği şeklinde yorumlanabilir ve literatür ile uyumlu bulgular göstermektedir (Balkan, 2019; Silva ve ark., 2018; Baginsky ve ark., 2016). Benzer şekilde, Sandoval-Oliveros ve Paredes-López (2013) chia'nın fizyolojik performansının çevresel koşullara duyarlılığını vurgulamış ve optimum koşullarda biyokimyasal bileşen üretiminin de arttığını rapor etmişlerdir. Yine, su eksikliğinin uygulandığı özellikle %0 ve %25 konsantrasyonlarda, morfolojik yapıda azalma tespit edilmiştir. Kuraklık koşulları, gövde çapı ve primer kök uzunluğu gibi özelliklerde büyümeyi sınırlayıcı etki göstermiştir. Bununla birlikte, orta düzeyde (%50) su stresi uygulanan grupta primer kök uzunluğunun da 28.52 cm ile en yüksek değere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, kuraklık koşullarında chia bitkisinin suya ulaşmak için daha derine kök salma stratejisini devreye soktuğunu düşündürmektedir (Comas ve ark., 2013; Baginsky ve ark., 2016; Silva ve ark., 2018). Chia fidelerinin tarla kapasitesine göre sulama konsantrasyonları arttıkça saçak kök sayısı ve gövde çapının da düzenli bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Bu durum, bitkinin hem su/nutrient alım kapasitesi hem de yapısal dayanıklılığı açısından önem taşıdığını vurgulayan Tyree ve Zimmermann (2002) ile uyumlu bulgular göstermiştir. Sonuç olarak elde edilen morfolojik bulgular, chia bitkisinin optimum morfolojik gelişim için tam sulamaya gereksinim duyduğunu, ancak orta düzeyde su stresine karşı da belirli adaptasyon mekanizmaları geliştirebildiğini göstermiştir.

Yapılan çalışmada, 7 farklı morfolojik özelliğin (bitki boyu, saçak kök sayısı, primer kök uzunluğu, gövde çapı, yaprak sayısı, yaprak alanı ve taze ağırlık) sulama konsantrasyonlarına göre varyasyonlarını ve aralarındaki ilişkilerini belirlemek amacıyla tek bileşen analizi (PCA), yapılmıştır (Şekil 4). Buna göre, PC1 bileşeni (en yüksek varyansı açıklayan bileşen), yaprak sayısı (0.42), yaprak alanı (0.42), taze ağırlık (0.42), bitki boyu (0.42) ve saçak kök sayısı (0.40) ile yüksek düzeyde ilişkili bulunmuştur. PC2 bileşeni ise sadece primer kök uzunluğu ile yüksek ve negatif ilişki göstermiştir (-0.97). Bu da, primer kök uzunluğunun diğer morfolojik özelliklerden bağımsız olarak varyasyon gösterdiğini ve özellikle %50 sulama grubunda su stresine karşı özgün bir adaptasyon tepkisi geliştirdiğini göstermektedir (Şekil 4). Yani primer kök uzunluğu, diğer parametrelerden yapısal olarak ayrılan,

çevresel strese doğrudan tepki veren bir özellik olarak belirlenmiştir ve literatür ile uyumludur (Comas ve ark., 2013). Sonuç olarak; yaprak ile ilişkili tüm büyüme parametreleri (sayısı, alanı, taze ağırlık), pozitif korelasyon gösterirken, primer kök uzunluğu, diğer tüm parametrelerden bağımsız ve su stresi altında farklılaşmakta, gövde çapı ise üçüncü bileşende negatif yük ile ayrılmaktadır. Bu durum ise, gövde çapının su eksikliği altında mekanik destek ve iletim sistemi açısından kuraklığa adaptasyon göstermek için özgün bir varyasyon modeli geliştirdiğini düşündürmektedir (Şekil 5).

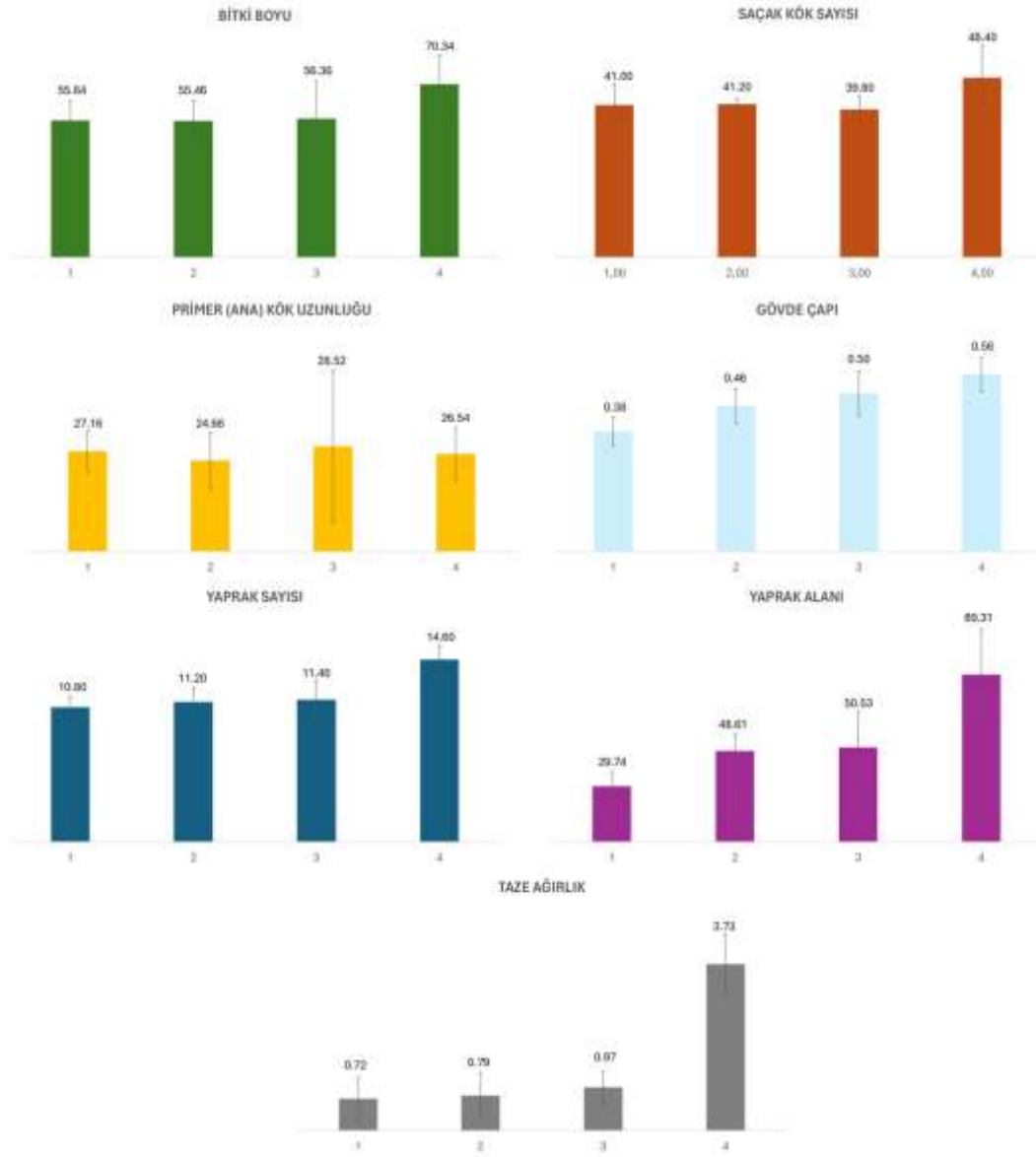


Figure 3. Mean  $\pm$  standard deviation values of morphological parameters of chia (*Salvia hispanica* L.) under water stress conditions applied to different irrigation groups (1: 0%, 2: 25%, 3: 50%, 4: 100% field capacity)

Şekil 3. Chia (*Salvia hispanica* L.) bitkisinde farklı sulama gruplarına (1: %0, 2: %25, 3: %50, 4: %100 tarla kapasitesi) uygulanan su stresi koşullarında morfolojik parametrelerin ortalama  $\pm$  standart sapma değerleri

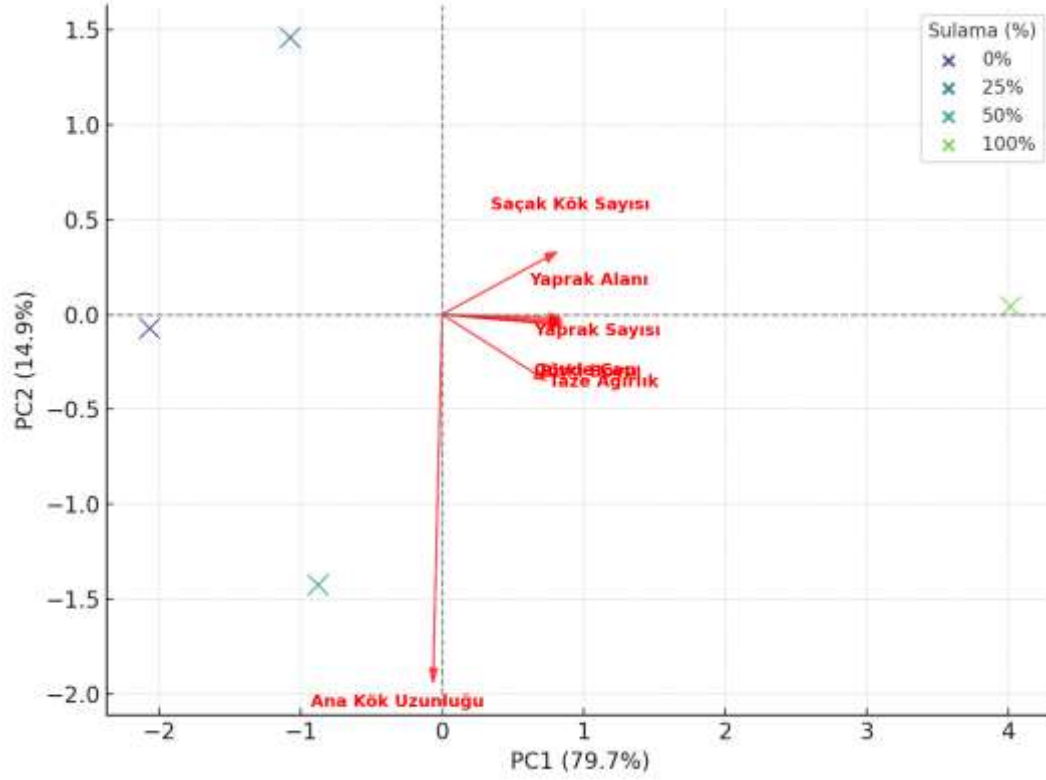


Figure 4. Principal Component Analysis (PCA) biplot of seven morphological traits of chia (*Salvia hispanica* L.). (PC1 (79.7%) and PC2 (14.9%) together explain 94.6% of the total variance)

**Şekil 4. Chia (*Salvia hispanica* L.) bitkisinin yedi morfolojik özelliğine ait ana bileşen analizi (PCA) biplotu. (PC1 (%79.7) ve PC2 (%14.9) toplam varyansın %94.6'sını açıklamaktadır)**



Figure 5. Morphological characteristics of chia seedlings grown under different irrigation levels based on field capacity

**Şekil 5. Tarla kapasitesine bağlı Farklı sulama seviyeleri altında yetiştirilen chia fidelerinin morfolojik yapıları**

### 3.2. Su eksikliği stresinin biyokimyasal aktivite üzerine etkileri

Tarla kapasitesi su eksikliği stresi koşullarında yetiştirilen chia fidelerinin stresle mücadelesinde verdiği biyokimyasal yanıtlar prolin MDA, SOD, CAT, APX ve total protein miktarında meydana gelen değişimlerin değerlendirilmesi ile ortaya konulmuştur (Şekil 6).



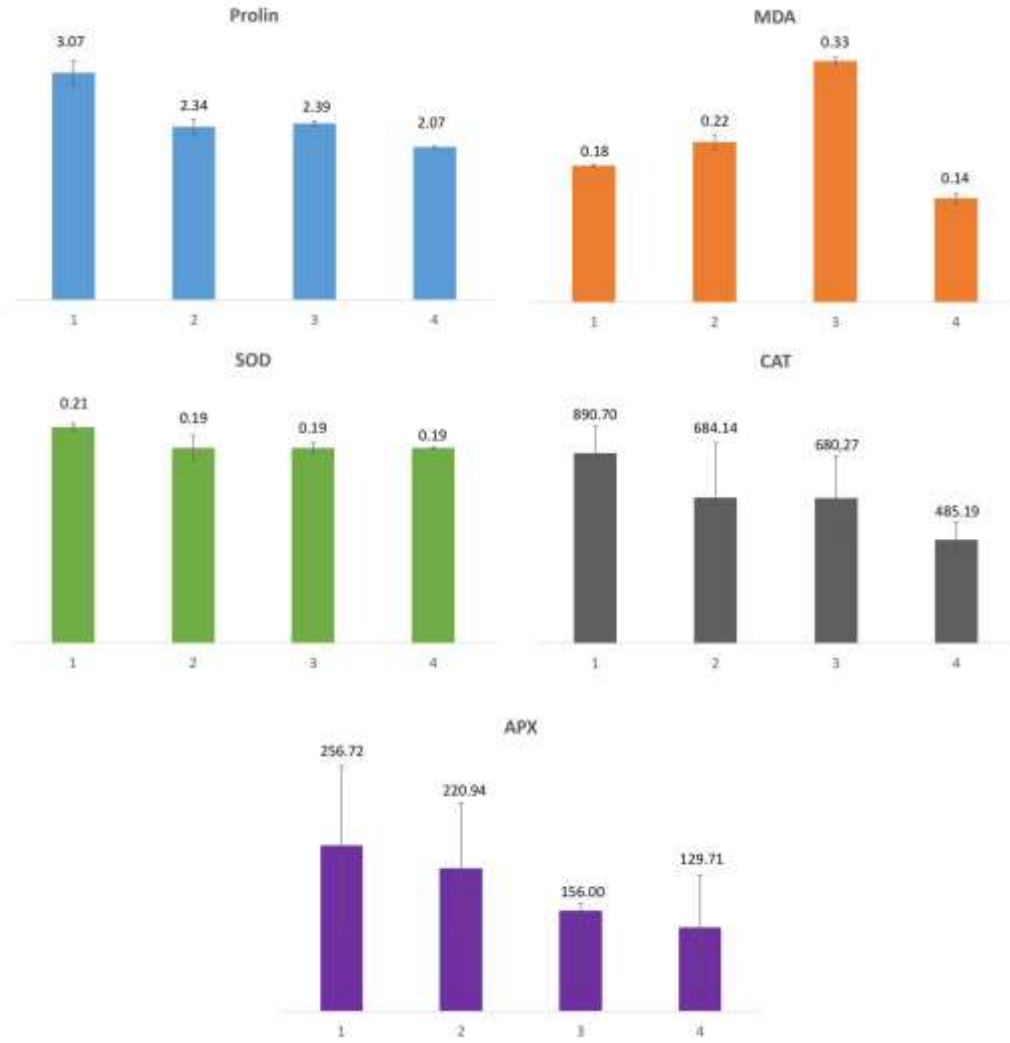


Figure 6. Mean  $\pm$  standard deviation values of proline, MDA, SOD, CAT, and APX levels in chia (*Salvia hispanica* L.) under water stress conditions applied to different irrigation groups (1: 0%, 2: 25%, 3: 50%, 4: 100% field capacity)

**Şekil 6. Chia (*Salvia hispanica* L.) bitkisinde farklı sulama gruplarına (1: %0, 2: %25, 3: %50, 4: %100 tarla kapasitesi) uygulanan su stresi koşullarında prolin, MDA, SOD, CAT ve APX düzeylerinin ortalama  $\pm$  standart sapma değerleri**

Chia fidelerinde, tarla kapasitesi uygulaması ile prolin, MDA ve antioksidan enzim (CAT ve APX) aktivitelerinde artış şeklinde gözlenmiştir. Şöyle ki, prolin düzeyi, Grup 1’de (tam su kısıtlaması) en yüksek değere ulaşarak  $3.07 \mu\text{mol g}^{-1}$  olarak belirlenmiştir. Bu değer, diğer gruplardan istatistiksel olarak anlamlı şekilde yüksektir ve artan su kısıtı ile birlikte prolin birikiminin de arttığını göstermektedir. Literatürde de belirtildiği üzere, serbest prolin bitkilerde osmotik düzenleme, zar stabilitesi ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) nötralizasyonu gibi çok yönlü roller üstlenmektedir (Hayat ve ark., 2012). Bu da, yapılan çalışmada prolinin osmotik düzenleyici ve strese yanıtta önemli bir role sahip olduğunu desteklemektedir. MDA, çoklu doymamış yağ asitlerinin peroksidasyonu sonucu oluşan son ürünlerden biri olup, bitkilerdeki stres derecesini belirlemede yaygın ve güvenilir bir biyobelirteç olarak kullanılmaktadır (Morales ve Munné-Bosch, 2019). Yapılan çalışmada malondialdehit (MDA) seviyesinde meydana gelen en yüksek artış, Grup 3’te (%50 sulama) gözlenmiş ve  $0.33 \mu\text{mol g}^{-1}$  FW (*taze ağırlık*) seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, özellikle orta düzeyde su stresi uygulamasında lipid peroksidasyonunun arttığını ve hücre zarlarının oksidatif hasara uğradığını göstermiştir. En düşük MDA seviyesi ise tam sulama yapılan Grup 4’te gözlenmiştir ( $0.14 \mu\text{mol g}^{-1}$ ) ki bu da stres ile ilişkili enzimatik aktivitenin tam kapasite sulama koşulları altında minimum seviyede faaliyet gösterdiğini doğrulamaktadır.

Kuraklık stresi altında bitkilerde ortaya çıkan fizyolojik ve biyokimyasal savunma mekanizmaları büyük ölçüde enzimatik sistemler tarafından yönetilmektedir. Özellikle reaktif oksijen türlerinin (ROS) temizlenmesinden sorumlu olan antioksidatif enzimler, stres koşulları ortaya çıktığında ilk tetiklenen savunma unsurları arasında yer almakta ve bu türlerin zararlı etkilerini azaltmada kritik rol oynamaktadırlar. Süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve askorbat peroksidaz (APX) gibi enzimler, bitki hücrelerinin redoks durumunun korunmasında ve hücre hasarının önlenmesinde başlıca görevli bileşenler olarak gösterilmektedir (Shao ve ark., 2007; Ali ve Alaurainy, 2006; Szabados ve Savouré, 2010; Du ve ark., 2014). Çalışmada, su stresine karşı mücadelede chia fidelerinin verdiği yanıtın belirlenmesinde kullanılan antioksidan savunma sistemine ait enzimlerden süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesi, tüm gruplarda benzer seviyelerde ölçülmüş olup, Grup 1’de  $0.21 \text{ U mg}^{-1}$  protein ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu değer diğer gruplarla kıyaslandığında hafif bir artış eğiliminin olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde katalaz (CAT) aktivitesi Grup 1’de belirgin şekilde yükselmiş ve  $890.70 \text{ U mg}^{-1}$  protein olarak ölçülürken Grup 4’te en düşük seviyeye ( $485.19 \text{ U mg}^{-1}$ ) inmiştir. Aynı şekilde, askorbat peroksidaz (APX) aktivitesi de en yüksek seviyeye Grup 1’de ( $256.72 \text{ U mg}^{-1}$  protein) ulaşmış, su kısıtının azalmasıyla birlikte en düşük seviyeye Grup 4’te ( $129.71 \text{ U mg}^{-1}$ ) gerilemiştir. Bu durum, chia bitkisinin su stresi altında hem osmotik dengeyi sağlama hem de reaktif oksijen türlerini temizleyerek hücre zarını koruma yönünde savunma mekanizmalarını aktif hale geçirmek suretiyle hem osmotik hem de oksidatif stresle baş etmeye çalıştığını ortaya koymaktadır.

Şekil 7’de verilen korelasyon matrisi, chia bitkisinin morfolojik ve biyokimyasal parametreleri arasında anlamlı ilişkiler bulunduğunu göstermiştir. Özellikle prolin ile antioksidatif enzimler (SOD:  $r = 0.78$ , CAT:  $r = 0.63$ , APX:  $r = 0.48$ ) arasında pozitif korelasyonlar gözlenmiş, bu da su stresi koşullarında bu bileşiklerin birlikte aktive olduğunu göstermiştir. Prolinin, hem osmotik stres tepkisi hem de antioksidatif savunmanın bir parçası olarak işlev gördüğü bir kez daha elde edilen bulgular ile doğrulanmıştır. Diğer yandan, MDA ile yaprak sayısı (YS), yaprak alanı (YA) ve taze ağırlık (TA) arasında negatif korelasyonlar gözlenmiştir (MDA–YA:  $r = -0.69$ , MDA–TA:  $r = -0.54$ ), bu da oksidatif zararın artmasının büyüme parametreleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermiştir. Ayrıca gövde çapı (GÇ) ile prolin ve tüm antioksidatif enzimler arasında güçlü negatif korelasyonlar tespit edilmiştir (GÇ–PROLIN:  $r = -0.78$ , GÇ–CAT:  $r = -0.64$ ). Sonuç olarak bulgular, chia bitkisinin morfolojik büyümesini koruyabilmesi için stresle mücadele süreçlerinde görevli enzimatik aktiviteyi savunma süreçlerine yönlendirdiğini göstermiştir. Chia’nın antioksidatif savunma sisteminin önemi, literatürde de güçlü şekilde vurgulanmaktadır. Özellikle Muñoz ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda, chia tohumlarının hem gıda hem de ilaç ve boya hammaddesi olarak kullanıldığını, yüksek yağ (yaklaşık %25–38),  $\alpha$ -linolenik asit (yaklaşık %60) ve protein (%19–23) içeriği ile diğer tahıllardan ayrıştığını göstermiştir. Bu özellikler, chia’yı hem besinsel açıdan üstün hem de çevresel stres koşullarına dirençli bir tür haline getirmektedir (Balkan ve Gençtan, 2013; Ixtaina ve ark., 2008; Coates ve Ayerza, 1996).

Literatürde, şiddetli kuraklık koşullarında chia fidelerinde sürgün gelişiminin azaldığı, ancak kök gelişiminin göreceli olarak daha az etkilendiği; pigment içeriklerinde (klorofil ve karotenoidler) düşüş yaşandığı; predawn yaprak su potansiyeli ve stomatal iletkenliğin anlamlı şekilde azaldığı; ancak bağıl su içeriğinin değişmediği bildirilmektedir. Bununla birlikte, kuraklık stresine bağlı olarak yaprak yüzeyinde epikütiküler mum birikiminin arttığı ve prolin ile çözünür protein birikimi gibi osmoprotektif tepkimelerin aktive olduğu tespit edilmiştir. Bu fizyolojik ve biyokimyasal yanıtlar, chia’nın kurak koşullara adaptasyonunda etkili savunma mekanizmalarına sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Choukri ve ark., 2024). Chia tohumları, yüksek antioksidan kapasitesine sahip bileşikler içerdiğinden dolayı, bu bileşiklerin üretiminin kurak koşullarda artış gösterdiği ve bu sayede bitkinin su eksikliği altında hayatta kalmasını desteklediği belirtilmiştir (Abdollahi ve ark., 2022).

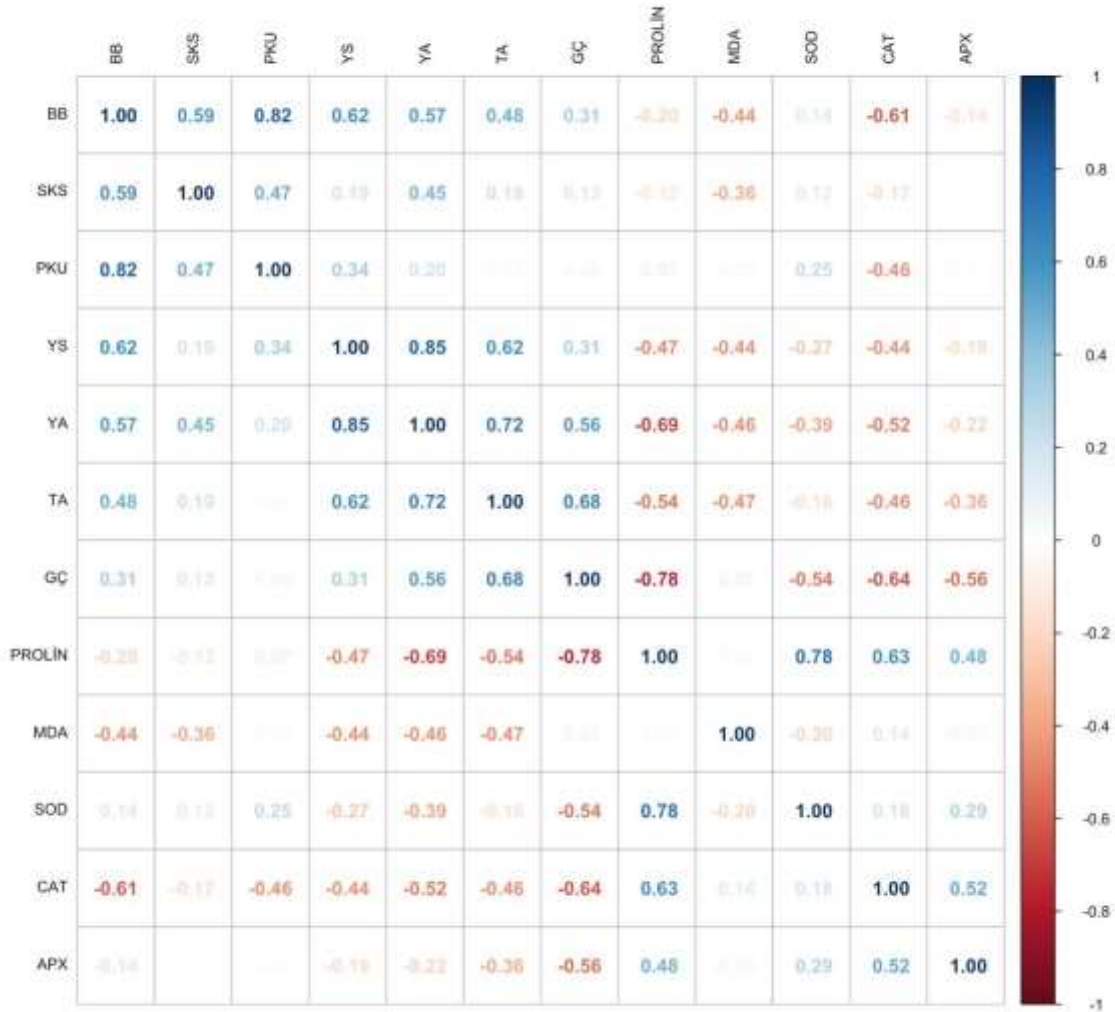


Figure 7. Pearson correlation matrix between morphological (PH: Plant Height, RFN: Root Fiber Number, PRL: Primary Root Length, SD: Stem Diameter, LN: Leaf Number, LA: Leaf Area, FW: Fresh Weight) and biochemical (proline, MDA, SOD, CAT, APX) parameters of chia (*Salvia hispanica* L.). Red indicates negative and blue indicates positive correlations

**Şekil 7. Chia (*Salvia hispanica* L.) bitkisinin morfolojik (BB: Bitki Boyu, SKS: Saçak Kök Sayısı, PKU: Primer (Ana) Kök Uzunluğu, GÇ: Gövde Çapı, YS: Yaprak Sayısı, YA: Yaprak Alanı, TA: Taze Ağırlık,) ve biyokimyasal (prolin, MDA, SOD, CAT, APX) parametreleri arasındaki Pearson korelasyon matrisi. (Kırmızı renk negatif, mavi renk pozitif korelasyon)**

#### 4. Sonuç

Küresel iklim değişikliğinin etkisiyle birlikte tarımsal üretimi tehdit eden en önemli abiyotik streslerden biri olan kuraklık, bitkilerin fizyolojik, morfolojik ve metabolik süreçlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada “süper gıda” olarak adlandırılan tahıl grubuna son yıllarda dahil edilen chia (*Salvia hispanica* L.) bitkisinde tarla kapasitesi şartlarında farklı sulama seviyeleri altında morfolojik, oksidatif ve antioksidatif tepkileri değerlendirilmiş ve su stresi düzeyine bağlı gelişim özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, chianın kuraklık stresi koşullarında hem osmotik düzenleme (prolin) hem de oksidatif stresle mücadele (MDA + enzimler) yollarını birlikte kullanarak çok

parametrelili bir savunma stratejisi geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, chia bitkisinin tam sulama ile optimal verim sağladığını, ancak orta düzey su kısıntısına da morfolojik olarak adaptasyon gösterebileceğini ortaya konulmuştur. Sonuç olarak chia, yarı kurak iklim koşullarında alternatif bir yağlı tohum bitkisi olarak değerlendirilebilecek potansiyele sahiptir. Bu çalışma, sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamında kuraklık toleransının artırılması yönünde chia gibi bitkiler üzerine odaklanmanın önemini vurgulamaktadır.

#### **Teşekkür**

Çalışmada kullanılan bitkilerin yetiştirilmesinde ve deneysel aşamalarda desteklerini esirgemeyen Nagehan GÜL ve Buket HÜRYILMAZ'a teşekkür ederim.

#### **Etik Kurul Onayı**

Bu çalışma için etik kuruldan izin alınmasına gerek yoktur.

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları olarak aramızda herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederiz.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Planlama: Öney Birol, S.; Materyal ve Metod: Öney Birol, S.; Veri toplama ve İşleme: Öney Birol, S.; İstatistiki Analiz: Öney Birol, S.; Literatür Tarama: Öney Birol, S.; Makale Yazımı, İnceleme ve Düzenleme: Öney Birol, S.

### Kaynakça

- Abdollahi, M., Asgarian, M. and Fadaei, R. (2022). Drought-induced oxidative stress in *Salvia hispanica* (chia): Antioxidant responses and phenolic compounds. *Plant Physiology and Biochemistry*, 176: 170–178.
- Ahmar, S., Gill, R. A., Jung, K. H., Faheem, A., Qasim, M. U., Mubeen, M. and Zhou, W. (2023). A decade of omics approaches in cereals: Advanced strategies for crop improvement under changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1134567.
- Ali, A. and Alqurainy, F. (2006). Activities of Antioxidants in Plants under Environmental Stress. In: The Lutein-Prevention and Treatment For Age-Related Diseases, Ed(s): Motohashi, N., Transworld Research Network, Trivandrum, India.
- Apel, K. and Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55: 373–399.
- Ayerza, R. and Coates, W. (2002). Dietary levels of chia: influence on hen weight, egg production and sensory quality, for two strains of hens. *British Poultry Science*, 43(2): 283–290.
- Baginsky, C., Arenas, J., Escobar, H., Garrido, M., Valero, N. and von Baer, D. (2016). Growth and yield of chia (*Salvia hispanica* L.) under different irrigation levels and plant densities in the Mediterranean zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76(4): 432–437.
- Balkan, A. (2019). Agronomic performance of seeds of some bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars exposed to drought stress. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 16(1): 82–91. <https://doi.org/10.33462/jotaf.517132>.
- Balkan A. ve Gençtan T. (2013). Ekmeklik buğdayda (*Triticum aestivum* L.) osmotik stresin çimlenme ve erken fide gelişimi üzerine etkisi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 10: 44–52.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39: 205–207.
- Beauchamp, C. and Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44: 276–287.
- Beers, R. F. and Sizer, I. W. (1952). A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. *Journal of Biological Chemistry*, 195: 133–140.
- Bogati, K. and Walczak, M. (2022). The impact of drought stress on soil microbial community, enzyme activities and plants. *Agronomy*, 12(1): 189.
- Bushway, A. A., Belya, P. R. and Bushway, R. J. (1981). Chia seed as a source of oil, polysaccharide, and protein. *Journal of Food Science*, 46: 1349–1356.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72: 248–254.
- Chandio, A. A., Jiang, Y., Rehman, A. and Twumasi, M. A. (2021). Climate change and cereal production: Evidence from Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19): 23826–23838.
- Chen, W. P., Li, P. H. and Chen, T. H. H. (2000). Glycinebetaine increases chilling tolerance and reduces chilling-induced lipid peroxidation in *Zea mays* L. *Plant, Cell and Environment*, 23: 609–618.
- Choukri, A., Cheggour, M., El Khalil, H., Lamtaai, H., Filali-Maltouf, A., El Modafar, C. and Chakhchar, A. (2024). Investigating the morpho-physiological and biochemical traits of chia (*Salvia hispanica*) to drought stress. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 53(2): 349–366.
- Coates, W. and Ayerza, R. (1996). Production potential of chia North-Western Argentina. *Journal of Industrial Crops and Products*, 5: 229–233.
- Comas, L. H., Becker, S. R., Von Mark, V. C., Byrne, P. F. and Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4: 442.
- Du, F., Shi, H., Zhang, X. and Xu, X. (2014). Responses of reactive oxygen scavenging enzymes, proline and malondialdehyde to water deficits among six secondary successional seral species in Loess Plateau. *PLoS One*, 9(6): e98872.
- European Commission (2017). Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 of 20 December 2017 establishing the Union list of novel foods. Official Journal of the European Union, L351, 72–201. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2017/2470/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2017/2470/oj)
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. and Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1): 185–212.
- Fujita, M., Fujita, Y., Noutoshi, Y., Takahashi, F., Narusaka, Y., Yamaguchi-Shinozaki, K. and Shinozaki, K. (2006). Crosstalk between abiotic and biotic stress responses: A current view from the point of convergence in the stress signaling networks. *Current Opinion in Plant Biology*, 9(4): 436–442.
- Geneve, R. L., Hildebrand, D. F., Phillips, T. D., Al-Amery, M. and Kester, S. T. (2017). Stress influences seed germination in mucilage-producing chia. *Crop Science*, 57: 2160–2169.



- Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J. and Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling & Behavior*, 7(11): 1456–1466.
- Ixtaina, Y., Nolasco, S. M. and Tomas, M. C. (2008). Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Industrial Crops and Products*, 28: 286–293.
- Kato, M. and Shimizu, S. (1987). Chlorophyll metabolism in higher plants. VII. Chlorophyll degradation in senescing tobacco leaves; phenolic-dependent peroxidative degradation. *Canadian Journal of Botany*, 65: 729–735.
- Mallikarjuna, B. P., Sreevathsa, R. and Varshney, R. K. (2022). Genomics-assisted breeding for climate-resilient crops: Progress and prospects. *Theoretical and Applied Genetics*, 135(3): 751–776.
- McClelland, S. C., Bossio, D., Gordon, D. R., Lehmann, J., Hayek, M. N., Ogle, S. M., Sanderman, J., Wood, S. A., Yang, Y., and Woolf, D. (2025). Managing for climate and production goals on crop-lands. *Nature Climate Change*, 15(6): 642–649.
- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9): 405–410.
- Morales, M. and Munné-Bosch, S. (2019). Malondialdehyde: Facts and artifacts. *Plant Physiology*, 180: 1246–1250.
- Muñoz, L. A., Cobos, A., Diaz, O. and Aguilera, J. M. (2013). Chia seed (*Salvia hispanica*): An ancient grain and a new functional food. *Food Reviews International*, 29(4): 394–408.
- Sandoval-Oliveros, M. R. and Paredes-López, O. (2013). Isolation and characterization of proteins from chia seeds (*Salvia hispanica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(1): 193–201.
- Shao, H. B., Chu, L. Y., Wu, G., Zhang, J. H., Lu, Z. H. and Hu, Y. C. (2007). Changes of some anti-oxidative physiological indices under soil water deficits among 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes at tillering stage. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 54: 143–149.
- Silva, H., Arriagada, C., Campos-Saez, S., Baginsky, C., Castellaro-Galdames, G. and Morales-Salinas, L. (2018). Effect of sowing date and water availability on growth of plants of chia (*Salvia hispanica* L.) established in Chile. *PLoS One*, 13(9): e0203116.
- Szabados, L. and Savouré, A. (2010). Proline: A multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15(2): 89–97.
- Taga, M. S., Miller, E. E. and Pratt, D. E. (1984). Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 61: 928–931.
- Taniushkina, A. A., Ivanov, P. P. and Dmitriev, A. A. (2024). Harnessing plant biotechnology for food security under climate change. *Biotechnology Advances*, 64: 108180.
- Tyree, M. T. and Zimmermann, M. H. (2002). Xylem Structure and the Ascent of Sap. Springer Science & Business Media, New York, U.S.A.
- Verma, S., Rastogi, M., Anjali Mishra, J. and Verma, S. (2022). A Textbook of Stress Crop Production. B P International, West Bengal.
- Vishnoi, R. and Goel, A. (2024). Climate-smart agriculture and the role of cereal crops in global food systems. *Agricultural Systems*, 211: 103767.
- Xiong, L., Schumaker, K. S. ve Zhu, J. K. (2002). Cell signaling during cold, drought, and salt stress. *The Plant Cell*, 14(3): 165–183.
- Yancey, P. H. (2005). Osmotic regulation in the deep-sea: Origins of osmotic pressure in deep-sea organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 295: 171–185.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z. and Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3): 50.
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167(2): 313–324.