Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 31 (2), 295-310
Mustafa Kemal University Journal of Agricultural Sciences, 31 (2), 295-310
https://dergipark.org.tr/tr/pub/mkutbd
e-ISSN: 2667-7733

ARAŞTIRMA MAKALESİ **RESEARCH ARTICLE**

İki parmak darı (*Eleusine coracana* L.) genotipinin kuraklığa olan tepkilerinin fide devresinde incelenmesi

Examining in the seedling period of the responses to drought of two finger millet (*Eleusine coracana* L.) genotypes

Büşra AKIN[1], Merve BAYHAN[1]✉, Mehmet YILDIRIM[1], Celalettin BARUTÇULAR[2]

[1]*Dicle Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Diyarbakır, Türkiye*
[2]*Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Adana, Türkiye.*

ARTICLE INFO

Article history:
Received / Geliş: 17.12.2025
Accepted / Kabul: 13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Çimlenme
Kuraklık
Parmak darı
PEG solüsyonu

Keywords:
Germination
Drought
Finger millet
PEG solution

✉Corresponding author/Sorumlu yazar:
Merve BAYHAN
mervebayhan21@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, agronomik özellikler yönünden ümitvar olan iki parmak darı (*Eleusine coracana* L.) genotipinin (USA-2022/97-97 ve USA-2022/81-81) farklı kuraklık seviyeleri altında çimlenme ve erken dönem fide gelişimi üzerine tepkileri incelenmiştir. Kuraklık stresi, polietilen glikol (PEG-6000) kullanılarak 0 (kontrol), -0.4, -0.8 ve -1.2 MPa osmotik potansiyellerinde oluşturulmuştur. Çimlendirme işlemleri tesadüf parsellerinde bölünmüş parseller deneme desenine göre 5 tekerrürde gerçekleştirilmiştir. Varyans analiz sonuçlarına göre çimlenme gücü ve sürgün kuru ağırlığı hariç tüm özelliklerde genotip (G), uygulama (U) ve G × U etkileşimi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Artan kuraklık şiddeti, her iki genotipte de çimlenme performansı, fide büyümesi ve biyokütle birikimini önemli ölçüde azaltmıştır. Özellikle -1.2 MPa stres seviyesinde çimlenme gücü %39'a kadar düşmüş; sürgün ve kök uzunluğu ile yaş ve kuru ağırlıklarda %50'den fazla azalma meydana gelmiştir. Genotipler karşılaştırıldığında, USA-2022/97-97 genotipi hafif-orta düzey stres koşullarında daha yüksek çimlenme, sürgün ve kök gelişimi değerleri sergileyerek morfolojik açıdan daha stabil bir performans göstermiştir. Kök uzunluğu ve kök biyokütlesinin stres koşullarında daha iyi korunması, kuraklığa adaptasyonda kök sisteminin belirleyici rolünü vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, parmak darısında kuraklık toleransının genotipe özgü olduğunu ve erken dönem çimlenme ile fide gelişimine ait fizyolojik ve morfolojik özelliklerin, genotipik farklılıkların ortaya çıkarılmasında seçim kriterleri olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

ABSTRACT

In this study, the responses of two promising finger millet (*Eleusine coracana* L.) genotypes (USA-2022/97-97 ve USA-2022/81-81) to different drought stress levels during germination and early seedling growth were investigated. Drought stress was induced using polyethylene glycol (PEG-6000) at osmotic potentials of 0 (control), -0.4, -0.8, and -1.2 MPa. Germination experiments were conducted with five replications according to a split-plot experimental design arranged in a randomized complete block design. According to the results of the analysis of variance, genotype (G), treatment (T), and G × T interaction effects were statistically significant for all traits, except for germination percentage and shoot dry weight. Increasing drought severity significantly reduced germination performance, seedling growth, and biomass accumulation in both genotypes. At the highest stress level (-1.2 MPa), germination percentage decreased by up to 39%, while shoot and root length as well as fresh and dry weights were reduced by more than 50%. Comparative evaluation of the genotypes revealed that USA-2022/97-97 exhibited higher germination capacity, shoot growth, and root development under mild to moderate stress conditions, indicating greater morphological stability. The better maintenance of root length and root biomass under drought stress highlights the crucial role of the root system in drought adaptation.

Makale Uluslararası Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 Lisansı kapsamında yayınlanmaktadır. Bu, orijinal makaleye uygun şekilde atıf yapılması şartıyla, eserin herhangi bir ortam veya formatta kopyalanmasını ve dağıtılmasını sağlar. Ancak, eserler ticari amaçlar için kullanılamaz.
© Copyright 2022 by Mustafa Kemal University. Available on-line at https://dergipark.org.tr/tr/pub/mkutbd

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

OPEN ACCESS

Cite/Atıf Akın, B, Bayhan, M., Yıldırım, M., & Barutçular, C. (2026). İki parmak darı (*Eleusine coracana* L.) genotipinin kuraklığa olan tepkilerinin fide devresinde incelenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 31*(2), 295-310. https://doi.org/10.37908/mkutbd.1843950

GİRİŞ

Kuraklık, yağışların uzun yıllar ortalamasının belirgin biçimde altına düşmesi sonucu su kaynakları ve ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler oluşturan, hidrolojik dengenin bozulmasına yol açan önemli bir doğal olaydır. Küresel ölçekte yaygın olarak görülmesine rağmen, iklim değişikliği ile birlikte kuraklığın sıklığı, süresi ve şiddeti artmış; yağış rejimlerindeki düzensizlikler bu olgunun öngörülemezliğini daha da belirgin hâle getirmiştir (Anonymous, 2021; Varshney ve ark., 2018). Yavaş gelişen bir ekstrem olay olmasına karşın, uzun süreli ve geniş çaplı etkileri nedeniyle kuraklık; tarım, gıda güvenliği ve ekosistem sürdürülebilirliği açısından en yıkıcı doğal afetlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Mishra & Singh, 2010; Wilhite & Pulwarty, 2018). Kuraklık, tarımsal üretimi sınırlayan en kritik abiyotik stres faktörlerinden biri olup bitkilerin fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri üzerinde doğrudan etkilidir. Su kısıtı altında fotosentetik aktivitenin azalması, stomatal iletkenliğin düşmesiyle karbon alımının sınırlandırılması, klorofil kaybı, ozmotik dengenin bozulması ve reaktif oksijen türlerinin birikimi bitkilerde büyüme geriliği ve verim kayıplarına yol açmaktadır (Chaves ve ark., 2003; Gill & Tuteja, 2010; Lobell ve ark., 2015). Bununla birlikte bitkiler, morfolojik, fizyolojik ve moleküler düzeylerde geliştirdikleri çok yönlü adaptasyon mekanizmaları sayesinde kuraklığın olumsuz etkilerini hafifletmeye çalışmaktadır. Bu süreçte kuraklıkla ilişkili genlerin (DREB, NAC, WRKY, LEA ve HSP gibi) aktive edilmesi, hücresel hasarın sınırlandırılması ve su dengesinin korunmasında önemli rol oynamaktadır (Seki ve ark., 2007; Tardieu, 2012; Zhang ve ark., 2022).

İklim değişikliğinin giderek artan baskısı altında, kuraklığa dayanıklı bitki genotiplerinin belirlenmesi ve geliştirilmesi gıda güvenliğinin sağlanmasında temel stratejilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda darı, yüksek su kullanım verimliliği ve kurak koşullara adaptasyon yeteneği ile dikkat çeken tahıl gruplarından biridir. Poaceae familyasına ait olan darı türleri, özellikle Afrika ve Asya'nın yarı kurak bölgelerinde yaygın olarak yetiştirilmekte olup, çoğunlukla C4 fotosentez mekanizması sayesinde yüksek sıcaklık ve düşük su mevcudiyetinde fotosentetik etkinliklerini sürdürebilmektedir (Muthamilarasan & Prasad, 2015; Sharma ve ark., 2014; Wambi ve ark., 2021). Darı türleri, yüksek ısı toleransı, düşük yağış rejimlerine adaptasyon, tuzluluk ve düşük toprak verimliliğine dayanıklılık gibi özellikleri nedeniyle iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı stratejik öneme sahiptir (Wambi ve ark., 2021). Kısa büyüme periyotları ve düşük su tüketimleri sayesinde marjinal tarım alanlarında güvenilir bir üretim alternatifi sunarlar. Özellikle parmak darı (*Eleusine coracana* L.), yüksek kalsiyum, demir, diyet lifi ve fenolik bileşikler içeriği nedeniyle "nutrasötik tahıl" olarak tanımlanmakta ve beslenme açısından buğday ve pirince kıyasla daha üstün bazı özellikler sergilemektedir (Devi ve ark., 2014; Sharma ve ark., 2023). Hem insan gıdası hem de hayvan yemi olarak değerlendirilmesi, darıyı sosyo-ekonomik açıdan önemli bir ürün hâline getirmiştir. Son yıllarda genomik araçların gelişmesiyle birlikte darı türlerinde kuraklık, ısı ve besin noksanlıklarına tolerans gibi özelliklerin genetik temellerinin aydınlatılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Hittalmani ve ark., 2017; Varshney ve ark., 2017).

Birçok çalışmada parmak darı genotiplerinin değişen mannitol seviyeleri ile oluşturulan farklı kuraklık stresi seviyelerine karşı fizyolojik ve biyokimyasal tepkileri incelenmiştir (Hema ve ark., 2014; Mude ve ark., 2020; Mukami ve ark., 2019; Ramakrishna ve ark., 2018). Tarla koşullarında salkım çıkışından tane dolumuna kadar 36 günlük kuraklık stresine maruz bırakılan 16 parmak darı çeşidi üzerinde yapılan bir çalışmada, kuraklık stresinin verime katkıda bulunan özellikleri azalttığı ve tane veriminde %36,6'lık bir düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. Bitki yaprak sıcaklığı kuraklık stresinin belirlenmesinde kullanılabilecek en önemli fizyolojik özellik olarak saptanmıştır (Krishna ve ark., 2021). Kuraklık stresi seviyeleri arttıkça, darı çeşitlerinin çimlenmesi ve erken fide büyümesi önemli ölçüde azalırken, kök büyümesi artmıştır (Mukami ve ark., 2019). Bazı çalışmalar, parmak darısının kuraklık altında prolin, şekerler ve antioksidanlar gibi çeşitli ozmolitleri biriktirdiğini göstermiştir (Mwangoe ve ark., 2022). Bu ozmolitler, hücrelerin su potansiyelini düşürerek su alımını kolaylaştırmakta ve hücre içi yapılarını korumaktadır. Ayrıca, kuraklığa dayanıklılıkla ilişkili genlerin ekspresyonundaki değişikliklerde parmak darısının kuraklık stresine karşı adaptasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Keba ve ark., 2022). Parmak darısının kuraklığa dayanıklılığı genetik çeşitlilikten yararlanılarak geliştirilebilir. Farklı parmak darısı çeşitleri, kuraklığa karşı farklı düzeylerde dayanıklılık

gösterebilmektedir (Madhavilatha & Subba Rao, 2015). Parmak darısı genotipleri arasında gözlenen genetik çeşitlilik, kuraklığa dayanıklı yeni çeşitlerin geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu doğrultuda, geleneksel ıslah yöntemleri ile modern moleküler ve biyoteknolojik yaklaşımların birlikte kullanılması, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada etkili bir yol olarak değerlendirilmektedir (Madhavilatha & Subba Rao, 2015; Varshney ve ark., 2017).

Parmak darı (*Eleusine coracana* L.), Türkiye tarımında geleneksel olarak yetiştirilen bir tahıl türü olmamakla birlikte, özellikle artan kuraklık riski ve iklim değişikliği kaynaklı üretim belirsizlikleri nedeniyle son yıllarda "alternatif kuru tarım bitkisi" olarak dikkat çekmektedir. Yüksek sıcaklık ve düşük su mevcudiyetine karşı gösterdiği tolerans, kısa gelişme süresi ve düşük girdi gereksinimi, bu türün Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu ve Doğu Anadolu'nun yarı kurak agroekolojik bölgelerinde potansiyel bir adaptasyon adayı olmasını sağlamaktadır (Bandyopadhyay ve ark., 2017; Goron & Raizada, 2015; Upadhyaya ve ark., 2011). Buna rağmen, Türkiye'de parmak darısı üzerine yürütülen modern tarla denemeleri ve adaptasyon çalışmalarının oldukça sınırlı olduğu, yerel üretim altyapısının, uygun genotiplerin ve tohum temin sisteminin henüz gelişmediği bildirilmektedir (Dağtekin ve ark., 2020). Bu kısıtlara rağmen parmak darısının geniş genetik çeşitliliği, düşük girdiyle üretilebilirliği ve marjinal koşullara adaptasyon kapasitesi, Türkiye'de kuraklığa dayanıklı tahıl çeşitlendirilmesi açısından önemli bir araştırma ve geliştirme alanı oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, iki parmak darı (*Eleusine coracana* L.) genotipinin farklı kuraklık seviyeleri altında çimlenme ve erken fide gelişim tepkilerini inceleyerek kuraklık toleransı bakımından üstün genotipi belirlemektir. Araştırmanın ülkemizde kurak ve yarı kurak bölgelerde parmak darının alternatif bir tahıl adayı olarak değerlendirilmesine bilimsel temel oluşturması, kuraklığa dayanıklı üretim seçeneklerinin geliştirilmesine katkı sağlaması ve henüz sınırlı olan parmak darısı araştırmalarına erken dönem fizyolojik performans verileri sunması beklenmektedir.

MATERYAL ve METOD

Çalışma 2024 yılında Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi bünyesinde bulunan bitki büyütme kabininde ışıklı ortamda yürütülmüştür. Araştırmada ABD-Ulusal bitki gen bankası, USDA'dan temin edilen 2 farklı parmak darı genotipi (USA-2022/81-81 ve USA-2022/97-97) materyal olarak kullanılmıştır. Bu genotipler, çok sayıda parmak darı ile yürütülen projenin ön değerlendirme sonuçlarına göre, uygun salkım çıkarma süresi, yüksek verim ve yatmaya dayanıklık gibi özelliklere sahip olmaları nedeniyle seçilmiştir. Deneme, ele alınan genotipler ana parselleri, polietilen glikol (PEG-6000) ile oluşturulan 4 farklı osmotik basınç (0 Mpa (kontrol), -0.4 Mpa, -0.8 Mpa ve -1.2 Mpa) ortamı alt parselleri oluşturacak şekilde, Tesadüf Parsellerinde Bölünmüş Parseller Deneme Desenine göre 5 tekerrürlü olarak kurulmuştur. Çimlendirme işlemi içerisinde filtre kâğıdı olan 12 cm'lik cam petri kaplarında her genotipten 50 tohum kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çimlendirme 24 ^{0}C±1'lik sabit ortam sıcaklığındaki çimlendirme kabininde 18/6 saat gün uzunluğunda 8 gün süreyle yürütülmüştür (Anonymous, 1996).

Kuraklık stresi Micheal & Kaufimann (1973)'e göre 200 ml saf su içerisinde polietilen glikol (PEG-6000) çözeltisi kullanılarak; 0 Mpa (kontrol), -0.4 Mpa, -0.8 Mpa ve -1.2 Mpa dozlarında oluşturulmuştur (Çizelge 1). Hazırlanan çözeltilerden her bir petri kabına 20 ml uygulanmıştır.

Çizelge 1. Polietilen glikol (PEG-6000) ile oluşturulan kuraklık stresi seviyelerine ait bilgiler
Table 1. Creating drought stress levels by using polyethylene glycol (PEG-6000)

Uygulama dozları	**PEG-6000 g/L**
Kontrol	saf su
-0.4 MPa	178 g/L
-0.8 MPa	262 g/L
-1.2 MPa	326 g/L

Araştırmada çimlendirmeye bırakılan tohumlarda, çimlenen tohum sayısının yüzde değeri çimlendirmenin 3. gününde çimlenme hızı (%-ÇH) ve 8. gününde çimlenme gücü (%-ÇG) olarak saptanmıştır. Bununla birlikte çimlendirmenin 8. gününde tohum ile ilk yaprağın çıktığı son mesafe çim kını uzunluğu (cm-ÇKU); sürgünün tohuma bağlandığı yerden yaprağın uç noktasına kadar olan mesafe sürgün uzunluğu (cm-SU); kökün tohum ile bağlandığı yerden en uzun kökün uç noktasına kadar olan mesafe kök uzunluğu (cm-KU); sürgünün tohuma bağlandığı yerden ayırarak tartılmasıyla sürgün yaş ağırlığı (g-SYA) ve kökün tohuma bağlandığı yerden ayırarak tartılmasıyla kök yaş ağırlığı (g-KYA) değerleri belirlenmiştir. Daha sonra yaş ağırlığı ölçülen sürgün ve kökler, 70 ^{0}C'lik etüvde 48 saat kurutulmuş ve ardından hassas terazide tartılarak sürgün kuru ağırlığı (g-SKA) ve kök kuru ağırlığı (g-KKA) değerleri bulunmuştur. Ayrıca kökçük ve sürgün uzunluklarının toplamının çimlenme yüzdesi ile çarpılmasıyla çimlenme güç indeksi (%-ÇGİ) değerleri belirlenmiştir (Dhanda ve ark., 2004). Araştırmaya ilişkin varyans analizleri ve gruplandırmalar JMP 17 istatistik paket programı kullanılarak tesadüf parsellerinde bölünmüş parseller deneme desenine göre gerçekleştirilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada iki parmak darı (*Eleusine coracana* L.) genotipinin (USA-2022/97-97 ve USA-2022/81-81) farklı kuraklık seviyeleri altında çimlenme ve erken dönem fide gelişim tepkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, uygulanan PEG dozlarının bütün özelliklerde önemli değişimlere neden olduğunu ve genotiplerin su stresine farklı düzeylerde duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Varyans analiz sonuçlarına göre çimlenme gücü ve sürgün kuru ağırlığı hariç tüm özelliklerde genotip (G), uygulama (U) ve genotip × uygulama etkileşimi (G × U) bakımından istatistiksel olarak önemli farklılıklar bulunmuştur. Bu durum, incelenen özelliklerin büyük çoğunluğunun kuraklık stresine genotipik olarak farklı tepkiler verdiğini ve su stresine toleransın genotipe özgü bir özellik olduğunu desteklemektedir (Çizelge 2).

Çizelge 2. İki parmak darı genotipinin değişen kuraklık seviyelerinde incelenen özelliklere ait kareler ortalaması değerlerini gösteren varyans analiz tablosu

Table 2. Variance analysis table showing the mean square values of the traits examined in two finger millet genotypes under varying drought levels

VK	SD	ÇH	ÇG	ÇKU	KU	SU	SYA	SKA	KYA	KKA	ÇGİ
G	1	810.27 **	40.00 öd.	4.19256 **	2.24861 **	1.47456 *	0.03963 **	0.0000324 öd.	0.03158 **	0.00066 **	58379.3 **
U	3	12026.5 **	6285.07 **	2.19632 **	1.16399 **	21.078 **	0.28724 **	0.00071 **	0.14376 **	0.00179 **	485803 **
G x U	3	99.7887 **	23.7333 öd.	0.98553 **	0.27321 **	1.31622 *	0.00519 *	0.00016 **	0.01839 **	0.00224 **	25604.9 **
Hata	24	16.86	14.07	0.084301	0.053622	0.29303	0.001589	0.000017	0.000735	0.000014	87652.2
DK (%)		7.60	5.13	11.01	10.49	17.15	14.31	12.99	17.72	13.90	17.52

*: P≤0.05 ve **: P≤0.01 hata sınırları içerisinde istatistiksel olarak önemli, öd.: istatistiksel olarak önemli değildir. VK: Varyasyon kaynakları, G: Genotip, U: Uygulama, G x U: Genotip ve uygulama interaksiyonu, DK: Değişim katsayısı, SD: Serbestlik derecesi, ÇH: Çimlenme hızı, ÇG: Çimlenme gücü, ÇKU: Çim kını uzunluğu, KU: Kök uzunluğu, SU: Sürgün uzunluğu, SYA: Sürgün yaş ağırlığı, SKA: Sürgün kuru ağırlığı, KYA: Kök yaş ağırlığı, KKA: Kök kuru ağırlığı, ÇGİ: Çimlenme güç indeksi.

Çimlenme hızı (ÇH), kuraklık stresine karşı genotiplerin en hızlı tepki veren özelliklerinden biridir. Çalışmada ÇH bakımından iki genotip arasında anlamlı farklılık bulunmuş ve USA-2022/97-97 genotipinin tüm kuraklık seviyelerinde daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür (Çizelge 3). Doz artışına paralel olarak ÇH'deki

azalmanın anlamlı olması, kuraklığın çimlenme sürecini doğrudan baskıladığını göstermektedir. Özellikle -1.2 MPa uygulamasında gözlenen keskin düşüş, embriyonik metabolizmanın su potansiyeli düşüşüne duyarlılığını ortaya koymaktadır. USA-2022/97-97 genotipi, tüm stres seviyelerinde daha yüksek çimlenme hızı göstermiş ve stres altında çimlenme fizyolojisinin daha stabil kaldığını göstermiştir. G × U etkileşiminin anlamlı olması, genotiplerin stres altındaki çimlenme davranışlarının benzer olmadığını ve 97-97 genotipinin bu fizyolojik süreçte daha etkin su kullanımı veya osmoprotektif mekanizmalara sahip olabileceğini düşündürmektedir. Çimlenme oranındaki düşüş kontrole göre hesaplandığında özellikle -0.8 MPa seviyesinde USA-2022/97-97 genotipinde %38.61, USA-2022/81-81 genotipinde %39.10 oranında azalma gerçekleşmiştir (Şekil 1). Bu durum genotiplerin tüm stres seviyelerinde geçerli olmamakla beraber, kuraklık stresine benzer tepki verdiğini göstermektedir.

Çimlenme gücü (ÇG) değerleri de çimlenme hızı değerlerine paralel olarak kontrole göre kuraklık şiddeti arttıkça azalmıştır (Çizelge 3). Kontrol uygulamasında %97.6 olan ÇG değeri -1.2 MPa kuraklık şiddetinde %56.96 oranında azalarak %39.0'a düşmüştür (Şekil 1). ÇG'de meydana gelen düşüşler, stresin erken büyüme aşamalarındaki enerji kullanımını sınırladığını göstermektedir. Bu bulgu, Mukami ve ark. (2019) ile Mude ve ark. (2020) tarafından PEG ile oluşturulan kuraklık stresi altında parmak darı çimlenme oranlarının azaldığını bildiren çalışmalarla örtüşmektedir. Genotip etkisinin önemsiz olması, iki genotipin potansiyel çimlenme kapasitesinin benzer olduğunu; ancak uygulama etkisinin önemli olması, su potansiyeli düştükçe tohum metabolizmasının baskılandığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, ÇG'nin genotipten ziyade çevresel streslerin baskın etkisi altında olduğunu göstermektedir. Ayrıca, genotipler arasında çimlenme hızındaki düşüş oranları benzer olsa da (Şekil 1), USA-2022/97-97 genotipinin -0.8 MPa stres seviyesinde daha yüksek ÇG sergilemesi, bu genotipin erken fide aşamasında kuraklığa karşı daha dayanıklı olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, Rakkammal ve ark. (2023) tarafından belirtilen genotip farklılıklarına dayalı kuraklık toleransı bildirimleriyle uyumludur.

Çizelge 3. İki parmak darı genotipinin değişen kuraklık seviyelerinde incelenen özelliklerine ait ortalama değerler
Table 3. Average values of characteristics examined in two finger millet genotypes under varying drought levels

Özellikler	**Uygulama dozları**										
	Genotip	**Kontrol**		**-0.4 MPa**		**-0.8 MPa**		**-1.2 MPa**		**Ortalama**	
ÇH (%)	USA-2022/97-97	92.40	a	78.00	b	56.40	d	6.77	f	58.39	a
	USA-2022/81-81	80.80	b	62.00	c	49.20	e	5.57	f	49.39	b
	Ortalama	86.60	a	70.00	b	52.80	c	6.17	d	53.89	
	AÖF	G: 3.9928, U: 3.7821, G x U: 5.3477									
ÇG (%)	USA-2022/97-97	97.60		85.60		73.20		42.00		74.60	
	USA-2022/81-81	97.60		82.80		74.00		36.00		72.60	
	Ortalama	97.60	a	84.20	b	73.60	c	39.00	d	73.60	
	AÖF	G: öd., U: 3.4546, G x U: öd.									
ÇKU (cm)	USA-2022/97-97	2.834	a	2.164	b	1.752	c	1.022	cd	1.943	a
	USA-2022/81-81	1.368	de	1.612	e	1.118	e	1.08	e	1.295	b
	Ortalama	2.101	a	1.888	a	1.435	b	1.053	c	1.619	
	AÖF	G: 0.1518, U: 0.2657, G x U: 0.3769									
KU (cm)	USA-2022/97-97	1.850	a	1.384	b	1.164	bc	0.832	d	1.307	a

	USA-2022/81-81	0.933	cd	1.010	cd	1.038	cd	0.352	e	0.833	b	
	Ortalama	1.391	a	1.197	ab	1.101	b	0.592	c	1.070		
	AÖF	G: 0.2323, U: 0.2121, G x U: 0.3007										
SU (cm)	USA-2022/97-97	5.512	a	3.330	cd	3.098	cd	1.446	e	3.346	a	
	USA-2022/81-81	4.120	b	3.666	bc	2.900	d	1.164	e	2.962	b	
	Ortalama	4.816	a	3.498	b	2.999	b	1.305	c	3.154		
	AÖF	G: 0.3174, U: 0.4985, G x U: 0.7045										
SYA (g)	USA-2022/97-97	0.4988	a	0.3954	b	0.2708	c	0.0746	e	0.3099	a	
	USA-2022/81-81	0.4016	b	0.3556	b	0.1662	d	0.0644	e	0.2469	b	
	Ortalama	0.4502	a	0.3755	b	0.2185	c	0.0695	d	0.2784		
	AÖF	G: 0.0309, U: 0.0366, G x U: 0.0519										
SKA (g)	USA-2022/97-97	0.0374	b	0.0346	b	0.0354	b	0.0224	cd	0.0324		
	USA-2022/81-81	0.0346	b	0.0440	a	0.0262	c	0.0178	d	0.0306		
	Ortalama	0.0360	a	0.0393	a	0.0308	b	0.0201	c	0.0315		
	AÖF	G: öd., U: 0.0068, G x U: 0.0053										
KYA (g)	USA-2022/97-97	0.3904	a	0.2152	b	0.0652	c	0.0534	c	0.1810	a	
	USA-2022/81-81	0.2064	b	0.1918	b	0.0652	c	0.0360	c	0.1248	b	
	Ortalama	0.2984	a	0.2035	b	0.0652	c	0.0447	c	0.1529		
	AÖF	G: 0.0240, U: 0.0249, G x U: 0.0353										
KKA (g)	USA-2022/97-97	0.0300	b	0.0268	b	0.0108	d	0.0580	a	0.0314	a	
	USA-2022/81-81	0.0162	c	0.0538	a	0.0102	d	0.0130	cd	0.0233	b	
	Ortalama	0.0231	c	0.0403	a	0.0105	d	0.0355	b	0.0273		
	AÖF	G: 0.0044, U: 0.0035, G x U: 0.0049										
ÇGi (%)	USA-2022/97-97	720,53	a	403,98	c	311,88	de	95,70	f	383,0202	a	
	USA-2022/81-81	493,16	b	386,50	cd	292,16	e	54,63	f	306,6139	b	

Ortalama	606,84	a	395,24	b	302,02	c	75,17	d	344,8171
AÖF	G: 37.09, U: 55.78, G x U: 78.88								

*Aynı harf grubuna giren ortalamalar arasında önemli farklılık yoktur (P<0.05). Genotip ortalamaları arasındaki genel farklılıklar sağdaki en son sütünda, dozlara ait farklılıklar her özelliğe ait ortalama sütununda, Genotip ve uygulama interaksiyonu her özelliğe ait satır ve sütunlarda gösterilmektedir. AÖF: Asgari önemli farklılık, G: Genotip, U: Uygulama, G x U: Genotip ve uygulama interaksiyonu, ÇH: Çimlenme hızı, ÇG: Çimlenme gücü, ÇKU: Çim kını uzunluğu, KU: Kök uzunluğu, SU: Sürgün uzunluğu, SYA: Sürgün yaş ağırlığı, SKA: Sürgün kuru ağırlığı, KYA: Kök yaş ağırlığı, KKA: Kök kuru ağırlığı, ÇGİ: Çimlenme güç indeksi.

Çim kını uzunluğu (ÇKU) tohum vigorunun güçlü bir göstergesi olup, özellikle erken toprak çıkış başarısını belirler. Farklı kuraklık şiddeti seviyelerinde ÇKU sırasıyla 1.053 ile 1.888 cm arasında değişmiş ve ÇKU değerlerinin kontrole göre kuraklık şiddeti arttıkça azaldığı belirlenmiştir (Çizelge 3). Kuraklık toleransı yönünden genotipler arasında kuraklık şiddeti seviyelerinde önemli farklılıklar görülmüştür. Ancak ÇKU'daki düşüş kontrole göre hesaplandığında -0.8 MPa seviyesinde USA-2022/97-97 genotipinde %38.1 oranında azalma meydana gelirken, USA-2022/81-81 genotipinde %18.2 oranında azalma gerçekleşmiştir (Şekil 1). Her iki genotipte de stresle birlikte azalma görülmesine rağmen, USA-2022/97-97 genotipinin kontrol ve hafif stres (-0.4 MPa) seviyelerinde üstün performans göstermesi, genç fidelerin büyüme hızını sürdürme kapasitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir.

Sürgün uzunluğu (SU), su stresine karşı hızlı gerileyen bir diğer büyüme parametresidir. Hem genotip hem uygulama hem de G×U etkileşimlerinin anlamlı olması, sürgün büyümesinin hem genetik hem çevresel faktörlerden güçlü şekilde etkilendiğini göstermektedir. -1.2 MPa kuraklık stresinde SU kontrole göre 3 kattan daha fazla azalmıştır (Çizelge 3). -0.8 MPa ile -1.2 MPa kuraklık şiddetinde SU sırasıyla 2.99 ve 1.30 cm seviyelerinde gerçekleşmiştir. SU'daki düşüş kontrole göre hesaplandığında -0.8 MPa seviyesinde USA-2022/97-97 genotipinde %43.2 oranında azalma meydana gelirken, USA-2022/81-81 genotipinde %29,6 oranında azalma gerçekleşmiştir (Şekil 1). SU özelliğinde USA-2022/97-97 genotipinin kuraklık stresine, USA-2022/81-81 genotipine göre azalma yönüyle hassas olmakla birlikte, USA-2022/97-97 genotipinin sürgün uzunluğunun kontrolden genotipik olarak yüksek olması kuraklık stresinde USA-2022/81-81 genotipine göre avantaj sağlamıştır. Stres altında USA-2022/97-97 genotipinin daha yüksek SU değerini koruması, hücre genişlemesi ve uzaması ile ilişkili turgor basıncının bu genotipte daha iyi korunmuş olabileceğini göstermektedir. Bu durum su kullanım etkinliği ile de ilişkili olabilir (Hatfield & Dold, 2019).

Kök uzunluğu (KU), kuraklık toleransında en kritik morfolojik uyum göstergelerinden biridir. Bu çalışmada -1.2 MPa kuraklık stresinde KU kontrole kıyasla 2 kattan daha fazla azalmıştır. -0.4 MPa ile -0.8 MPa kuraklık şiddetinde KU sırasıyla 1.20 ve 1.10 seviyelerinde gerçekleşmiştir (Çizelge 3). Ancak KU oranındaki düşüş kontrole göre hesaplandığında -0.8 MPa seviyesinde USA-2022/97-97 genotipinde %37.0 oranında azalma meydana gelirken, USA-2022/81-81 genotipinde %11.2 oranında azalma gerçekleşmiştir (Şekil 1). Her iki genotipte de kök uzunlukları azalmış olsa da 97-97 genotipi tüm uygulamalarda belirgin şekilde daha uzun kökler geliştirmiştir. Bu farklılık, genotipin su arama kapasitesinin daha yüksek olduğuna, lateral kök oluşumu veya kök büyümesini düzenleyen hormon dengesinin stres altında daha az baskılandığına işaret etmektedir. KU'nda G×U etkisinin anlamlı olması, kök gelişiminin doğrudan genotipe özgü adaptif bir mekanizma olduğunu göstermektedir. Kök uzunluğu, genotiplerin kuraklık stresine adaptasyon farklılıklarını belirlemede önemli bir özellik olarak öne çıkmıştır. Bu bulgu, Ajithkumar & Panneerselvam (2014) tarafından darıda kök uzunluğunun artışının bir uyum stratejisi olduğuna dair sonuçlarla kısmen çelişmekle birlikte, genotip özelinde farklılıklar olabileceğini desteklemektedir.

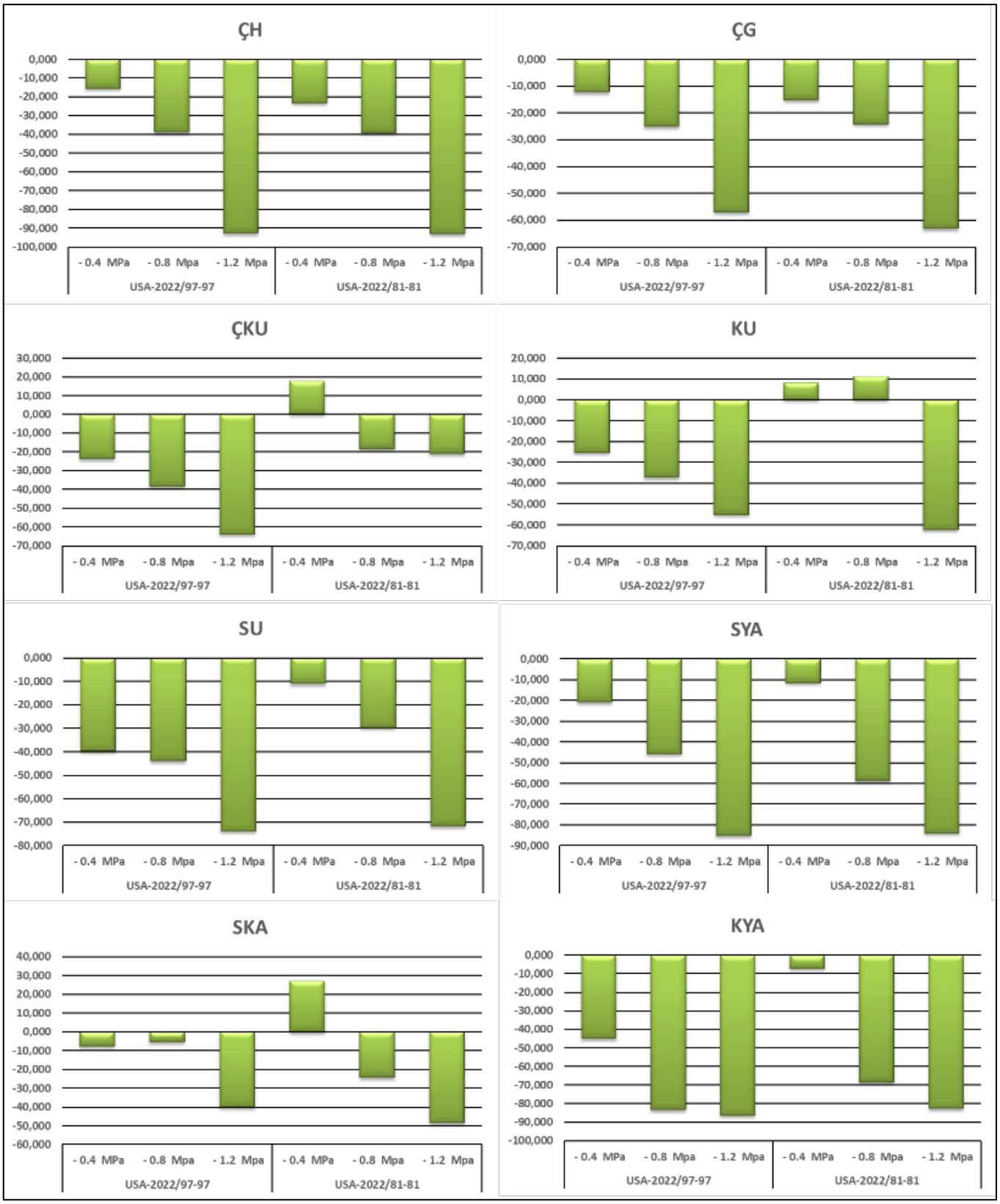
Sürgün yaş ağırlığı (SYA) değerindeki düşüş, sürgün dokusundaki su kaybı ve biyokütle birikimindeki azalmayı yansıtmaktadır. SYA, tüm stres seviyelerinde azalmakla birlikte -0.4 ile -0.8 MPa kuraklık şiddetinde 0.38 ve 0.22 g seviyesinde gerçekleşmiştir (Çizelge 3). SYA'ındaki düşüş kontrole göre hesaplandığında -0.8 MPa seviyesinde USA-2022/97-97 genotipinde %45.7 oranında azalma meydana gelirken, USA-2022/81-81 genotipinde %58.6 oranında azalma gerçekleşmiştir (Şekil 1). -0.8 MPa seviyesinde her iki genotipte %80'den fazla azalma gerçekleşmiştir. Genel olarak SYA yönünden kuraklık streslerinde genotipler arasında farklılık oluşması ve USA-2022/81-81 genotipinin

USA-2022/97-97 genotipine göre hassas görünmesi normal koşullarda da sürgün yaş ağırlığı değerinin düşük olmasından kaynaklanabilir. Buna karşın USA-2022/97-97 genotipinin yüksek SYA değerlerini koruması, sürgün dokularında daha iyi su tutma kapasitesine veya stres altında daha düşük metabolik zarar birikimine işaret etmektedir. Aynı zamanda bu genotipin fotosentetik etkinliğinin de stres altında daha az baskılanmış olabileceği düşünülmektedir.

Sürgün kuru ağırlığı (SKA), stres altında karbon birikimi kapasitesini yansıtır. Genotipler arasında fark oluşmamasına rağmen G×U etkileşiminin anlamlı olması, kuru madde üretiminin stres şiddetine verilen tepkinin genotipe göre farklılaştığını göstermektedir (Çizelge 3). USA-2022/97-97 genotipinde -0.4 ile -0.8 MPa kuraklık stresinde fazla azalma görülmemiştir, ancak -1.2 MPa'da düşüş %40.1'e yükselmiştir (Şekil 1). USA-2022/81-81 genotipinde -0.4 MPa'da artış gözlenirken diğer kuraklık seviyelerinde daha fazla azalma meydana gelmiş ve daha hassas olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle hafif stres (-0.4 MPa) seviyelerinde 97-97 genotipinin SKA'sını daha iyi koruması, karbon kullanım etkinliği ve metabolik dayanım açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Kök yaş ağırlığı (KYA) değerleri, köklerin su tutma kapasitesi ve kök dokusundaki canlılık düzeyini göstermektedir. Stresle birlikte her iki genotipte de keskin düşüş görülmüştür (Çizelge 3). Ortalama değerler dikkate alındığında iki genotip arasında KYA bakımından belirgin farklılıklar bulunduğu ve USA-2022/97-97 genotipinin, tüm uygulamalarda daha yüksek KYA değerleri gösterdiği, USA-2022/81-81 genotipinin ise her stres seviyesinde daha düşük değerler verdiği belirlenmiştir. Bu bulgu, USA-2022/97-97 genotipinin kök büyümesi ve su tutma kapasitesi bakımından genetik olarak daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Kuraklık seviyelerinin etkisine bakıldığında PEG ile oluşturulan osmotik stresin kök yaş ağırlığını doğrudan ve güçlü şekilde etkilediğini göstermektedir. Kontrolden (-0 MPa), -1.2 MPa stresine doğru KYA değeri belirgin şekilde azalmaktadır. Ayrıca G x U etkileşiminin anlamlı olması, genotiplerin stres seviyelerine aynı şekilde tepki vermediğini göstermektedir. USA-2022/97-97, stres arttıkça düşüş yaşasa da her stres düzeyinde nispeten daha yüksek KYA değerlerini korumuştur. USA-2022/81-81, özellikle -1.2 MPa'da çok düşük değerlere gerilemiş ve USA-2022/97-97 genotipine göre daha fazla kayıp yaşamıştır. Bu durum, kök yaş ağırlığının kuraklık toleransı açısından ayırt edici bir özellik olduğunu ve USA-2022/97-97 genotipinin stres altında kök sisteminin işlevsel bütünlüğünü sürdürdüğünü, su alım kapasitesini koruduğunu ve kök zar geçirgenliğinin stres altında daha iyi ayarlandığını düşündürmektedir.

Kök Kuru Ağırlığı (KKA) değerleri incelendiğinde, genotipler ve uygulamalar arasında belirgin farklılıkların olduğu görülmektedir (Çizelge 3). USA-2022/97-97 genotipi genel olarak daha dengeli bir performans sergilemiş olsa da özellikle –1.2 MPa uygulamasında en yüksek KKA değerine ulaşarak stres koşullarında kök kuru biyokütlesini artırma yeteneği göstermiştir. Bu durum, ağır stres altında kök sisteminin kuruma direncini koruyabilen veya kök büyümesini yeniden düzenleyebilen bir adaptasyon mekanizmasını işaret etmektedir. USA-2022/81-81 genotipi ise –0.4 MPa uygulamasında en yüksek değeri vermiş olsa da diğer uygulamalarda daha düşük KKA değerleri ile daha değişken bir tepki göstermiştir. Genotip × uygulama etkileşiminde görülen bu farklı tepkiler, iki genotipin kuraklık stresine yanıt olarak kök kuru madde birikimini farklı stratejilerle düzenlediğini ortaya koymaktadır. Ortalamalar incelendiğinde hafif stres koşullarının (–0.4 MPa) genel olarak en yüksek kök kuru ağırlığını sağladığı, buna karşılık daha yüksek stres seviyelerinin kök kuru biyokütlesini önemli ölçüde azalttığı anlaşılmaktadır. Genotip (G), uygulama (U) ve genotip × uygulama (G × U) etkileşiminin KKA üzerinde anlamlı etkiye sahip olması, kök kuru madde üretiminin hem genetik yapıdan hem de stres şiddetinden güçlü biçimde etkilendiğini doğrulamaktadır. Bu bulgular genel olarak USA-2022/97-97 genotipinin stres koşullarında daha stabil ve dayanıklı bir kök yapısı geliştirdiğini desteklemektedir.



Şekil 1. İki parmak darı genotipinin değişen kuraklık seviyelerinde incelenen özelliklerine ait ortalama değerlerin kontrole göre % değişimleri

Figure 1. Percentage changes in the mean values of the examined traits of two finger millet genotypes under varying drought levels compared to the control

*(Kontrol değeri 100 olarak kabul edilmiş ve diğer dozlar kontrol ile kıyaslanmıştır). ÇH: Çimlenme hızı, ÇG: Çimlenme gücü, ÇKU: Çim kını uzunluğu, KU: Kök uzunluğu, SU: Sürgün uzunluğu, SYA: Sürgün yaş ağırlığı, SKA: Sürgün kuru ağırlığı, KYA: Kök yaş ağırlığı.

Çimlenme güç indeksi (ÇGİ) değerlerine bakıldığında, hem genotip hem uygulama hem de G×U etkileşimlerinin ÇGİ üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiş olup, bu durum genotiplerin su stresine verdikleri tepkilerin uygulama seviyelerine bağlı olarak değiştiğini açıkça ortaya koymuştur (Çizelge 2). Kontrol koşullarında en yüksek ÇGİ değerleri kaydedilirken, stres düzeyinin –0.4 MPa'dan –1.2 MPa'ya yükselmesiyle birlikte ÇGİ'de kademeli ve belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Özellikle –1.2 MPa uygulaması, ÇGi'de dramatik bir düşüşe neden olmuş ve çimlenme süreçlerinin şiddetli su stresi altında ciddi şekilde sınırlandığını ortaya koymuştur. USA-2022/97-97 genotipinin tüm stres seviyelerinde USA-2022/81-81 genotipine kıyasla daha yüksek ÇGİ değerleri gösterek kuraklığa daha toleranslı bir performans sergilediği belirlenmiştir. Öte yandan, USA-2022/81-81 genotipinde özellikle –1.2 MPa seviyesinde gözlenen keskin ÇGİ düşüşü, bu genotipin yüksek şiddetli kuraklık stresine karşı daha hassas bir çimlenme tepkisi sergilediğini ve kuraklığa daha hassas bir genotip olduğunu ortaya koymuştur (Çizelge 3).

Bitkilerin su stresine verdiği yanıt fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmaların anlaşılması ve ürün stres toleransını belirlemede kullanılmaktadır (Bandyopadhyay ve ark., 2017). Parmak darısı germ plazmasının su stresine karşı taranması için mannitol (Mukami ve ark.,2019) veya polietilen glikol (PEG) (Bartwal & Arora,2017; Mude ve ark., 2020) kullanılarak oluşturulan kuraklık stresi koşullarında, fide aşamasında kuraklığa dayanıklılık göstergesi olarak ozmotik stres altında yaprak oransal su içeriği ve çimlenme oranının kullanılabileceği belirtilmiştir (Mude ve ark., 2020; Mukami ve ark., 2019). ÇH ve ÇG, su stresine verilen ilk adaptif tepkileri yansıtan temel fizyolojik göstergelerdir. Bu çalışmada, stres şiddetindeki artışla birlikte her iki parametrede de hızlı ve keskin düşüşler gözlenmiştir. Özellikle −1.2 MPa koşulunda çimlenme oranlarının dramatik düzeyde azalması, tohumun imbibisyon kapasitesinin, metabolik aktivasyonun ve enzimatik süreçlerin su kısıtı altında ciddi biçimde baskılandığını işaret etmektedir. Bu bulgular, kuraklık koşullarının çimlenme fizyolojisini olumsuz yönde etkilediğini bildiren çalışmalarla (Jaleel ve ark., 2009; Kumar ve ark., 2019; Nirmalakumari & Vetriventhan, 2010) uyumludur. Genotipler karşılaştırıldığında, USA-2022/97-97 kontrol ve orta düzey stres koşullarında daha yüksek çimlenme performansı sergilemiştir. Bu durum, genotipin tohum su alma kapasitesi, embriyo canlılığı veya stres altında hızlı metabolik aktivasyon gibi fizyolojik üstünlüklere sahip olabileceğini düşündürmektedir. Bu tür özelliklerin genotipe özgü varyasyon gösterdiği daha önce Upadhyaya ve ark. (2014) tarafından da vurgulanmıştır. Benzer şekilde bazı parmak darı genotiplerinin su stresine daha dayanıklı olduğu ve çimlenme süreçlerini daha stabil şekilde sürdürdüğü daha önce de bildirilmiştir (Ashraf & Foolad, 2005; Bhat ve ark., 2011).

KU, ÇKU ve SU erken fide gelişiminin kritik morfolojik parametreleri olup, su stresine yüksek duyarlılık göstermektedir. Çalışmada tüm bu özellikler stres düzeyi arttıkça önemli ölçüde azalmıştır. Kuraklık uygulamalarının artışı, özellikle sürgün gelişimini baskılamış, bu da su stresinin hücre genişlemesi ve turgor basıncını azaltmasından kaynaklanmaktadır (Fathi & Tari, 2016; Jaleel ve ark., 2009).

Buna karşın kök uzunluğunun nispeten daha az etkilenmesi veya hafif stres düzeylerinde artış gösterebilmesi, bitkilerin suya erişimi artırmak amacıyla kök sistemini derinleştirme eğiliminde olduğunu ifade eden literatürle uyumludur (Comas ve ark., 2013; Sharp ve ark., 2004). Çalışmamızda USA-2022/97-97 genotipinin KU ve SU bakımından uygulamalar arasında daha stabil bir performans göstermesi, bu genotipin erken dönem morfolojik adaptasyon kapasitesinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, toleranslı genotiplerin su stresine karşı büyüme mimarisini yeniden düzenleyerek daha avantajlı kök-sürgün ilişkileri geliştirdiğini belirten önceki çalışmalarla örtüşmektedir (Comas ve ark., 2013; Bagale ve ark., 2025; Kadam ve ark., 2015). Literatürde de benzer şekilde, kuraklık koşullarında fide gelişiminin belirgin biçimde gerilediği ve özellikle sürgün büyümesinin su kısıtına karşı daha duyarlı olduğu gösterilmiştir (Bagale ve ark., 2025; Kang ve ark., 2022; Shoaib ve ark., 2022) .

Darıda kuraklık sırasında kök uzunluğunda artış, sürgün uzunluğunda ise azalma bildirilmekte (Ajithkumar & Panneerselvam, 2014) ve daha iyi kök gelişimi kuraklığa uyum stratejilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Krishna

& Reddy (2021) kuraklık stresinin vejetatif aşamada kök uzunluğunu marjinal olarak artırdığını, kök kuru ağırlığı ve sürgün kuru ağırlığını ise önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir. Parmak darıda yaptığımız bu çalışmada ise bildirimlerden farklı olarak çimlenme döneminde incelenen özellikler yönünden kuraklık stresine bağlı olarak sürekli azalma gerçekleşmiştir.

Sürgün ve kök yaş–kuru ağırlıkları, fotosentetik etkinlik, karbon birikimi ve su kullanım verimliliğini yansıtan önemli parametrelerdir. Çalışmada artan kuraklık seviyesiyle birlikte hem sürgün hem de kök biyokütlesinde belirgin azalmalar gözlenmiştir. Özellikle −1.2 MPa koşullarında bitki biyokütlesinin ciddi oranda düşmesi, su stresinin karbon asimilasyonu ve doku gelişimi üzerindeki baskılayıcı etkisini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, Upadhyaya ve ark. (2014) ve Kumar ve ark., (2021) tarafından bildirilen sonuçlarla paralellik göstermektedir.

Su stresinin hücre bölünmesi, fotosentetik kapasite ve biyokütle oluşumunu sınırladığı bilinmektedir (Chaves ve ark., 2003; Flexas ve ark., 2004). Özellikle yüksek stres seviyelerinde biyokütledeki keskin düşüşler, su stresinin fizyolojik süreçlerdeki inhibe edici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. USA-2022/97-97 genotipinin hem sürgün hem de kök biyokütlesini stres altında daha yüksek seviyede koruması, bu genotipin daha iyi osmotik düzenleme kapasitesine ve metabolik dayanıklılığa sahip olabileceğini göstermektedir. Literatürde de stres toleranslı genotiplerin prolin birikimi, kök gelişiminin korunması ve düşük su potansiyellerinde büyüme sürdürülebilirliği gibi fizyolojik avantajlara sahip olduğu bildirilmiştir (Ashraf & Foolad, 2007; Farooq ve ark., 2009; Sankar ve ark., 2007). Kök yaş ve kuru ağırlığı bakımından USA-2022/97-97 genotipinin daha yüksek değerlere sahip olması, stres koşullarında kaynak tahsisinin kök bölgesine yönlendirildiğini ve bu genotipte daha etkin bir adaptif strateji geliştiğini düşündürmektedir. Kuraklık stresine karşı kök biyokütlesinin korunması veya artan kök/sürgün oranı, toleransın önemli fizyolojik göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Ajithkumar & Panneerselvam, 2014). KKA bakımından -0.4 MPa uygulamasında görülen artış, hafif su stresinin kök lignifikasyonunu veya kök dokusunun güçlenmesini tetiklediğini ifade eden çalışmalara paraleldir (Yamaguchi & Sharp, 2010). Bu durum, bitkinin hafif stres koşullarında su arayışını artırmak için kök sistemine daha fazla kaynak aktarmasıyla açıklanabilir. USA-2022/97-97 genotipinde uzunluk ve ağırlık ölçümlerinin normal olarak kontrol koşullarında USA-2022/81-81 genotipine göre oransal olarak yüksek olması kuraklık stresinde avantaj sağlamıştır. Bu nedenle parmak darıda kuraga dayanıklı genotiplerin belirlenmesinde yüksek çim kını uzunluğu, sürgün uzunluğu ve kök uzunluğu özellikleri kullanılabileceği gözlenmiştir.

Fide aşamasında kuraklık stresine toleransları açısından bazı parmak darı genotipleri arasında önemli farklar bulunduğu ve *Eleusine coracana* L.'de kuraklığa dayanıklılığı artırmak için potansiyel genetik kaynaklara yönelinmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Rakkammal ve ark., 2023). Bu bulgular, parmak darı genotiplerinin farklı kuraklık seviyelerine farklı tepkiler verdiğini göstermektedir. Özellikle sürgün uzunluğu ve sürgün kuru ağırlığı üzerindeki kuraklık etkisi belirgin bir şekilde görülmüştür. Bu nedenle, bitki yetiştiriciliğinde kuraklık stresine dayanıklı genotiplerin seçilmesi ve geliştirilmesi önemli olacaktır. Çalışma, artan kuraklık şiddetiyle birlikte çimlenme oranları, sürgün ve kök gelişimi ile biyokütle birikiminde önemli düşüşler olduğunu göstermiştir. Özellikle -1.2 MPa stres seviyesinde çimlenme gücünün %39'a kadar gerilemesi ve kök uzunluğu, sürgün uzunluğu, sürgün yaş ağırlığı ve kök yaş ağırlığı özelliklerinde %50'den fazla düşüş yaşanması (Şekil 1) parmak darının şiddetli kuraklık koşullarında ciddi olumsuz etkilere maruz kalabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca çimlenme performansı yönünden genotipler arasında belirgin farklılıklar bulunmadığı, USA-2022/97-97 genotipinin stres koşullarında daha fazla kayba uğraması özde dayanıklı olmadığını göstermiştir. Ancak incelenen özelliklere ait değerlerin kontrol koşullarında yüksek olması USA-2022/81-81 genotipine göre göreceli olarak kuraklık stresine daha mukavim olmasını sağlamıştır. Bu bulgular, kuraklığa dayanıklı parmak darı genotiplerinin ıslahında erken dönem fizyolojik ve morfolojik parametrelerin güvenilir birer seçim kriteri olabileceğini vurgulayan çalışmalarla tutarlıdır (Sehgal ve ark., 2018; Upadhyaya ve ark., 2014). Çalışmada ÇGİ'nin artan kuraklık stresine karşı yüksek duyarlılık göstermesi, çimlenme evresinin su kısıtı altında bitkinin en kırılgan fenolojik dönemlerinden biri olduğunu teyit etmektedir. Bu bağlamda, ÇGİ'nin genotipler arasında erken dönemde kuraklık toleransının ayrıştırılmasında güçlü ve ayırt edici bir indeks olduğu, özellikle

kuraklığa dayanıklı genotiplerin ön seleksiyonunda etkin bir değerlendirme kriteri olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Dhanda ve ark. (2004), çimlenme oranı, sürgün uzunluğu ve kökçük uzunluğunun bir bileşeni olan ÇGİ'nin artan stress koşullarında en fazla etkilenen özellik olduğunu bildirmiştir. ÇGi değerinin stres şiddeti arttıkça azaldığı farklı tahıl türleriyle yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir (Bilgili ve ark., 2018).

Araştırmadan elde edilen sonuçlar, genotiplerin farklı kuraklık seviyelerine farklı fizyolojik ve morfolojik stratejilerle yanıt verdiğini göstermektedir. Bu durum, kuraklık toleransının poligenik bir yapıya sahip olduğu ve çevresel koşullarla güçlü etkileşimler gösterdiği yönündeki görüşleri desteklemektedir. Farklı tahıl türleriyle yürütülen araştırmalarda da benzer şekilde genotipik varyasyonun su stresi altında belirginleştiği rapor edilmiştir (Campos ve ark., 2004; Cattivelli ve ark., 2008; Farooq ve ark., 2014; İstanbulluoğlu ve ark., 2023; Ozturk ve ark., 2021; Venuprasad ve ark., 2012).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, hem kuraklık stresinin erken gelişim evrelerindeki etkilerinin anlaşılmasına hem de stres toleransı yüksek genotiplerin belirlenmesine yönelik ıslah yaklaşımlarına bilimsel temel oluşturma niteliğindedir. Çalışmada incelenen iki parmak darı genotipininde erken gelişim dönemlerinde kuraklık stresine yüksek duyarlılık gösterdiği; ancak bu duyarlılığın her iki genotip arasında farklı düzeylerde ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. -1.2 MPa stres seviyesinde çimlenme gücü %39'a kadar düşmüş; sürgün ve kök uzunluğu ile yaş ve kuru ağırlıklarda %50'den fazla azalma meydana gelmiştir. USA-2022/97-97 genotipi hafif-orta düzey stres koşullarında daha yüksek çimlenme, sürgün ve kök gelişimi değerleri sergileyerek morfolojik açıdan daha stabil bir performans göstermiştir. Ayrıca USA-2022/97-97 genotipinin tüm stres seviyelerinde USA-2022/81-81 genotipine kıyasla daha yüksek ÇGİ değerleri gösterek kuraklığa daha toleranslı bir performans sergilediği belirlenmiştir. Kök uzunluğu ve kök biyokütlesinin stres koşullarında daha iyi korunması, kuraklığa adaptasyonda kök sisteminin belirleyici rolünü vurgulamaktadır. Bu sonuçlar: USA-2022/97-97 genotipinin, su stresine karşı daha etkin fizyolojik ve morfolojik yanıtlar verdiğini ve ilerleyen dönem fizyolojik ve agronomik değerlendirmeler için ümitvar bir aday olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışma parmak darısında kuraklık toleransı ıslah programlarında erken dönem fide gelişim parametrelerinin kullanılabilirliğini, kök büyümesi ve kök biyokütlesinin önemli seçim kriterleri olduğunu ve genotipik varyasyonun dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Özellikle çimlenme ve fide gelişim dönemindeki kuraklık tolerans mekanizmalarının aydınlatılması, yakın zamanda geniş alanlarda üretilme potansiyeli bulunan parmak darının kurak ve yarı kurak bölgelerdeki yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği ve üstün genotiplerin seçilebilme potansiyeli bulunduğunu göstermesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMA BEYANI

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

ARAŞTIRMACILARIN KATKI ORANI BEYANI

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

ETİK ONAY BEYANI

Bu makalede insan veya hayvan deneklerle herhangi bir çalışma bulunmaması nedeniyle etik onaya gerek duyulmamaktadır.

KAYNAKLAR

Ajithkumar, I. P., & Panneerselvam, R. (2014). ROS scavenging system, osmotic maintenance, pigment and growth status of Panicum sumatrense roth. under drought stress. *Cell Biochem Biophys, 68*(3), 587-95, https://doi.org/10.1007/s12013-013-9746-x

Anonymous, (1996). The Rules: International Rules for Seed Testing: ISTA, Zürih, İsviçre, https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing.html Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025

Anonymous, (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/ Erişim tarihi: 16 Ağustos 2025

Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2005). Pre-sowing seed treatment—A shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy, 88,* 223-271, https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88006-X

Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216, https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006

Bagale, S., Rebecca Oiza, E., & Linda Yuya, G. (2025). An overview of root traits and ideotypes for improving crop productivity and addressing agronomic challenges. *Rhizosphere*, 34, 101105, https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101105

Bandyopadhyay, T., Muthamilarasan, M., & Prasad, M. (2017). Millets for next generation climate-smart agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1266, https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01266

Bartwal, A., & Arora, S. (2017). Drought stress-induced enzyme activity and mdar and apx gene expression in tolerant and susceptible genotypes of *Eleusine coracana* (L.). *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 53(1), 41-49, https://doi.org/10.1007/s11627-016-9787-0

Bhatt, D., Negi, M., Sharma, P., Saxena, S. C., Dobriyal, A. K., & Arora, S. (2011). Responses to drought induced oxidative stress in five finger millet varieties differing in their geographical distribution. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *17*, 347-353, https://doi.org/10.1007/s12298-011-0084-4

Bilgili, D., Atak, M., & Mavi, K. (2018). Bazı ekmeklik buğday genotiplerinde NaCl stresinin çimlenme ve fide gelişimine etkisi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 23*(1), 85-96, https://izlik.org/JA97LH63MN

Campos, H., Cooper, M., Habben, J. E., Edmeades, G. O., & Schussler, J. R. (2004). Improving drought tolerance in maize: A view from industry. *Field Crops Research*, *90*(1), 19-34, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.003

Cattivelli, L., Rizza, F., Badeck, F. W., Mazzucotelli, E., Mastrangelo, A. M., Francia, E., Marè, C., Tondelli, A., & Stanca, A. M. (2008). Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research*, *105*(1–2), 1–14, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.07.0047

Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought—From genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, *30*(3), 239-264, https://doi.org/10.1071/FP02076

Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, *4*, 442, https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442

Dağtekin, Z., Hatipoğlu, R., & Yücel, C. (2020). Çukurova koşullarında bazı parmak darısı (*Eleusine coracana* (L.) Gertn) getotiplerinin ot verimi ve ot kaliteleri üzerine bir araştırma. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences, 4*(4), 793-807. https://doi.org/10.46291/ISPECJASvol4iss4pp79-805

Devi, P. B., Vijayabharathi, R., Sathyabama, S., Malleshi, N. G., & Priyadarisini, V. B. (2014). Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber: A review. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(6), 1021–1040, https://doi.org/10.1007/s13197-011-0584-9

Dhanda, S. S., Sethi, G. S., & Behl, R. K. (2004). Indices of drought tolerance in wheat genotypes at early stages of plant growth. *Journal of Agronomy and Crop Science, 190*(1), 6-12. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2004.00592.x

Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *33*(4), 331-349, https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development, 29*(1), 185-212, https://doi.org/10.1051/agro:2008021

Fathi, A., & Tari, D. B. (2016). Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences, 10*, 1-6. https://doi.org/10.3126/ijls.v10i1.14509

Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, *6*(3), 269-279, https://doi.org/10.1055/s-2004-820867

Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *48*(12), 909-930. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016

Goron, T.L. and Raizada, M. N. (2015). Genetic diversity and genomic resources available for the small millet crops to accelerate a New Green Revolution. *Frontiers in Plant Science, 6*, https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00157

Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science, 10,* 103. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103

Hema, R., Vemanna, R. S., Sreeramulu, S., Reddy, C. P., Senthil-Kumar, M., & Udayakumar, M. (2014). Stable Expression of mtlD gene ımparts multiple stress tolerance in finger millet. *PLoS ONE, 9*(6), e99110, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099110

Hittalmani, S., Mahesh, H., Shirke, M. D., Biradar, H., Uday, G., Aruna, Y., & et al. (2017). Genome and transcriptome sequence of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) provides insights into drought tolerance and nutraceutical properties. *BMC Genomics, 18,* 465, https://doi.org/10.1186/s12864-017-3850-z

İstanbulluoğlu, A., Başer, İ., & Moray, S. (2023). Deficit irrigation programs effects on yield in millet (*Panicum miliaceum* L.) in thrace region conditions. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, *26*(2), 307-313. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1007783

Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture and Biology, 11*(1), 100-105.

Kadam, N. N., Tamilselvan, A., Lawas, L. M. F., Quinones, C., Bahuguna, R. N., Thomson, M. J., Dingkuhn, M., Muthurajan, R., Paul, C. S., Xinyou, Y., & Jagadish, K. S. V. (2015). Genetic control of plasticity in root morphology and anatomy of rice in response to water deficit. *Plant Physiology, 174*(4), 2302-2315, https://doi.org/10.1104/pp.17.00500

Kang, J., Peng, Y., & Xu, W. (2022). Crop root responses to drought stress: molecular mechanisms, nutrient regulations, and ınteractions with microorganisms in the rhizosphere. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(16), 9310, https://doi.org/10.3390/ijms23169310

Keba, W., Tolemariam, T., & Mohammed, A. (2022). Evaluation of grain/seed yield and yield components of finger millet and three vetch species intercropped at various seeding ratios at Bako, Ethiopia. *Advances in Agriculture*, 1-10, https://doi.org/10.1155/2022/1608499

Krishna, S. S., Reddy, Y. A. N., & Kumar, R. L. R. (2021). Assessment of traits for grain yield under drought in finger millet. *Plant Physiology Reports*, *26*(1), 84-94, https://doi.org/10.1007/s40502-020-00561-1

Kumar, A., Kaur, A., Gupta, K., Gat, Y., & Kumar, V. (2021). Assessment of germination time of finger millet for value addition in functional foods. *Current Science, 120*(2), 406-413, https://doi.org/10.18520/cs/v120/i2/406-413

Liaqat, W., Barutçular, C., Altaf, M.T., & Baloch, F.S. (2025). Integrating millets into modern agriculture: a strategic pathway to advancing sustainability, climate resilience, and nutritional security. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 13*(2), 529-538. https://doi.org/10.24925/turjaf.v13i2.529-538.7273

Lobell, D. B., Hammer, G. L., Chenu, K., Zheng, B., McLean, G., & Chapman, S. C. (2015). The shifting influence of drought and heat stress for crops in northeast Australia. *Global Change Biology*, *21*(11), 4115-27, https://doi.org/10.1111/gcb.13022

Madhavilatha, L., & Subba Rao, M. (2015). Performance of elite finger millet cultures for grain yield, yield influencing traits and blast tolerance. *International Journal of Agricultural Science and Research*, *5*(1), 111-114, https://doi.org/10.5555/20153179416

Michel, B. E., & Kaufmann, M. R., 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology, 51*(5), 914-916, https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, *391*(1-2), 202-216, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Mude, L. N., Mondam, M., Vijayalakshmi, G., Sivakumar Pinjari, O. B., Reddy, Y.A.N., & Khan, P. S. S. V. (2020). Morpho-physiological and biochemical changes in finger millet [*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.] under drought stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *26*(11), 2151-2171. https://doi.org/10.1007/s12298-020-00909-9

Mukami, A., Ngetich, A., Mweu, C., Oduor, R. O., Muthangya, M., & Mbinda, W. M. (2019). Differential characterization of physiological and biochemical responses during drought stress in finger millet varieties. *Physiology and Molecular Biology of Plants, 25*(4), 837-846, https://doi.org/10.1007/s12298-019-00679-z

Muthamilarasan, M., & Prasad, M. (2015). Advances in setaria genomics for genetic improvement of cereals and bioenergy grasses. *Theoretical and Applied Genetics, 128*(1), 1-14. https://doi.org/10.1007/s00122-014-2399-3

Mwangoe, J., Kimurto, P., & Ojwang, P. (2022). Identification of drought tolerant finger millet (*Eleusine coracana* L.) lines based on morpho-physiological characteristics and grain yield. *African Journal of Plant Science, 16*, 47-60, https://doi.org/10.5897/AJPS2022.2225

Nirmalakumari, A., & Vetriventhan, M. (2010). Characterization of foxtail millet germplasm collections for yieldcontributing traits. *Electronic Journal of Plant Breeding, 1*(2), 140-147.

Ozturk, A., Erdem, E., Aydin, M., & Karaoglu, M. M. (2021). The effects of drought after anthesis on the grain quality of bread wheat depend on drought severity and drought resistance of the variety. *Cereal Research Communications, 50*, 105-116, https://doi.org/10.1007/s42976-021-00155-z

Rakkammal, K., Maharajan, T., Shriram, R. N., Jeevan Ram, P. S., Ceasar, S. A., & Ramesh, M. (2023). Physiological, biochemical and molecular responses of finger millet (*Eleusine coracana*) genotypes exposed to short-term drought stress induced by PEG-6000. *South African Journal of Botany, 155*, 45-59, https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.053

Ramakrishna, C., Singh, S., Raghavendrarao, S., & et al. (2018). The membrane tethered transcription factor EcbZIP17 from finger millet promotes plant growth and enhances tolerance to abiotic stresses. *Scientific Reports, 8*, 2148, https://doi.org/10.1038/s41598-018-19766-4

Sankar, B., Jaleel, C. A., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2007). Drought-induced biochemical modifications and proline metabolism in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. *Acta Botanica Croatica, 66*(1), 43-56.

Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K. H. M., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R. K., Hanumantha Rao, B., Nair, R. M., Prasad, P. V. V., & Nayyar, H. (2018). Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science, 9,* 1705. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705

Seki, M., Umezawa, T., Urano, K., & Shinozaki, K. (2007). Regulatory metabolic networks in drought stress responses. *Current Opinion in Plant Biology, 10*(3), 296-302. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.014

Sharma, P. C., Singh, D., Sehgal, D., Singh, G., Hash, C. T., & et al. (2014). Further evidence that a terminal drought tolerance QTL of pearl millet is associated with reduced salt uptake. *Environmental and Experimental Botany, 102*, 48-57, https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.01.013

Sharma, T., Thakur, N., Sharma, J., & Kumari, M. (2023). Millets: for food and nutritional security. *Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews Journal*, 421-430, https://doi.org/10.58321/AATCCReview.2023.11.04.421

Sharp, R. E., Poroyko, V., Hejlek, L. G., Spollen, W. G., Springer, G. K., Bohnert, H. J., & Nguyen, H. T. (2004). Root growth maintenance during water deficits: Physiology to functional genomics. *Journal of Experimental Botany*, *55*(407), 2343-2351, https://doi.org/10.1093/jxb/erh276

Shoaib, M., Banerjee, B. P., Hayden, M., Kant, S. (2022). Roots' drought adaptive traits in crop ımprovement. *Plants (Basel), 11*(17), 2256, https://doi.org/10.3390/plants11172256

Tardieu, F. (2012). Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: Just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany, 63*(1), 25-31, https://doi.org/10.1093/jxb/err269

Upadhyaya, H. D., Dwivedi, S. L., Sharma, S., & et al. (2014). Enhancement of the use and impact of germplasm in crop improvement. *Plant Genetic Resources*, *12*(1), 155-159. https://doi.org/10.1017/S1479262114000458

Upadhyaya, H. D., Ramesh, S., Shivali, S., Singh, S. K., Varshney, S. K., Sarma, N. D. R. K., Ravishankar, C. R., Narasimhudu, Y., Reddy, V. G., Sahrawat, K. L., Dhanalakshmi, T. N., Mgonja, M. A., Parzies, H. K., Gowda, C. L. L., & Singh, S. (2011). Genetic diversity for grain nutrients contents in a core collection of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) germplasm. *Field Crop Research, 121*, 42-52, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.017

Vadez, V., Hash, T., Bidinger, F. R., & Kholova, J. (2012). II 1.5 Phenotyping pearl millet for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology, 3,* 1-12, https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00386

Varshney, R. K., Singh, V. K., Kumar, A., Powell, W., & Sorrells, M. E. (2018). Can genomics deliver climate-change ready crops. *Current Opinion in Plant Biology*, *45,* 205-2011, https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.03.007

Varshney, R., Shi, C., Thudi, M., & et al. (2017). Pearl millet genome sequence provides a resource to improve agronomic traits in arid environments. *Nature Biotechnology, 35,* 969-976, https://doi.org/10.1038/nbt.3943

Venuprasad, R., Lafitte, H. R., & Atlin, G. N. (2012). Response to direct selection for grain yield under drought stress in rice. *Crop Science, 47*(1), 285-293. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0181

Wambi, W., Otienno, G., Tumwesigye, W., & Mulumba, J. (2021). Genetic and genomic resources for finger millet improvement: opportunities for advancing climate-smart agriculture. *Journal of Crop Improvement, 35*(2), 204–233, https://doi.org/10.1080/15427528.2020.1808133

Wilhite, D., & Pulwarty, R.S. (2017). Drought and Water Crises: Integrating Science, Management, and Policy, Second Edition (1st ed.).CRC Press, 1-18, https://doi.org/10.1201/b22009

Yamaguchi, M., & Sharp, R. E. (2010). Complexity and coordination of root growth at low water potentials: Recent advances from transcriptomic and proteomic analyses. *Plant, Cell & Environment, 33*(4), 590-603. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02064.x

Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., & Zhu, J. K. (2022). Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics, 23*, 104-119, https://doi.org/10.1038/s41576-021-00413-0