

Sahil çamı fidanlarında kuraklık stresine karşı silikon bazlı gübrelemenin etkisi

Safa Balekoğlu^{a,*} 

Öz: İklim değişikliğinin neden olduğu kuraklık olaylarının sıklığı ve şiddetinin artması, orman ekosistemlerinin sürdürülebilirliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu bağlamda, fidanlı aşamasında çevresel streslere dirençli bireylerin yetiştirilmesi, ormancılık uygulamalarında öncelikli bir hedef haline gelmiştir. Bu çalışmada, sahil çamı (*Pinus pinaster* Aiton) üzerinde, silikon (Si) bazlı gübrelemenin fizyolojik ve morfolojik tepkiler aracılığıyla kuraklık toleransını artırma potansiyeli araştırılmıştır. Araştırma kapsamında, 1+1 yaşlı sahil çamı fidanlarına 0, 5, 10, 15 ve 30 g dozlarında silikon bazlı gübre uygulanmış; dört haftalık kuraklık koşullarında fizyolojik [Fotosentetik aktivite (F_v/F_m), minimum floresans (F_o), maksimum floresans (F_m), bağıl su içeriği (RWC), nem içeriği (MC)], morfolojik (çap ve boy artımı, gürbzlük indisi) ve görsel stres tepkileri değerlendirilmiştir. İki yönlü varyans analizi, işlem (kuraklık/sulama) $\times$ doz etkileşiminin F_v/F_m ($p=0,009$), F_o ($p=0,021$), F_m ($p=0,044$) ve MC ($p=0,044$) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlar, 5–15 g aralığında silikon uygulanan fidanların kuraklık altında daha yüksek fotosentetik verimlilik (F_v/F_m), su tutma kapasitesi (RWC, MC) ve görsel puanları sergilediğini göstermiştir. Buna karşın, yüksek dozlar (30 g) bazı fizyolojik parametrelerde olumsuz etkiler oluşturmıştır. Morfolojik parametrelerde kısa vadede belirgin farklar gözlenmemiş olsa da büyüme eğilimleri orta dozların daha dengeli bir gelişim sağladığını göstermektedir. Bu araştırma, sahil çamı gibi, kuraklığa toleranslı türlerde fidanlı aşamasında silikon bazlı gübrelemenin fizyolojik dayanıklılığı artırarak stres yönetimi için uygulanabilir bir strateji olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Abiyotik stres, Bağıl su içeriği, Görsel değerlendirme, Gürbzlük indisi, Klorofil floresansı

Effect of silicon-based fertilization against drought stress in maritime pine seedlings

Abstract: The increase in the frequency and severity of drought events caused by climate change poses a serious threat to the sustainability of forest ecosystems. In this context, raising resistant individuals to environmental stresses at the nursery stage has become a priority target in forestry practices. In this study, the potential of silicon (Si)-based fertilizer to increase drought tolerance through physiological and morphological responses in maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) was investigated. Within the scope of the research, silicon was applied to 1+1-year-old maritime pine seedlings at doses of 0, 5, 10, 15 and 30 g; physiological [Photosynthetic activity (F_v/F_m), minimum fluorescence (F_o), maximum fluorescence (F_m), relative water content (RWC), moisture content (MC)], morphological (diameter and height increase, sturdiness quotient) and visual stress responses were evaluated under four-week drought conditions. Two-way analysis of variance revealed that treatment (drought/irrigation) $\times$ dose interaction had statistically significant effects on F_v/F_m ($p=0,009$), F_o ($p=0,021$), F_m ($p=0,044$) and MC ($p=0,044$). The results showed that seedlings treated with silicon in the range of 5–15 g exhibited higher photosynthetic efficiency (F_v/F_m), water holding capacity (RWC, MC) and visual scores under drought. In contrast, high doses (30 g) had negative effects on some physiological parameters. Although no significant differences were observed in the morphological parameters in the short term, growth trends showed that medium doses provided more balanced development. The present study suggests that silicon-based fertilizer at the nursery stage may be a viable strategy for stress management by increasing physiological resistance in drought-tolerance species such as maritime pine.

Keywords: Abiotic stress, Relative water content, Visual assessment, Sturdiness quotient, Chlorophyll fluorescence

1. Giriş

İklim değişikliği, 21. yüzyılın en önemli çevresel sorunlarından biri haline gelmiştir. Uzun yıllar boyunca sürdürülen bilimsel araştırmalar, küresel iklim değişikliğinin temel nedeninin insan faaliyetleri kaynaklı sera etkisi olduğunu ortaya koymuştur (Metz vd., 2007). Farklı kaynaklardan elde edilen çok sayıda kanıt, iklim değişikliğinin etkilerinin giderek şiddetlendiğini göstermekte; mevcut eğilimler doğrultusunda bu şiddetin gelecekte daha da artacağı öngörülmektedir (Hartmann vd., 2022; Kemp vd., 2022). İklim değişikliği, ağaçların büyüme ve gelişme süreçlerini doğrudan etkilediği gibi (McDowell ve

Allen, 2015; Colangelo vd., 2021), aynı zamanda özellikle bitki sağlığı üzerinde dolaylı etkiler de yaratmaktadır (Tai vd., 2019; Korolyova vd., 2022).

Devam eden küresel ısınmanın, Akdeniz Havzası'nda yıllar arası yağış ve sıcaklık değişkenliğini artırmasının yanı sıra, bölgedeki yağış miktarında belirgin bir azalmaya, sıcaklık değerlerinde artışa ve aşırı kurak dönemlerin daha sık yaşanmasına neden olması beklenmektedir (Meehl ve Tebaldi, 2004; Giorgi ve Lionello, 2008). Küresel iklim değişikliğinin etkileri, özellikle Akdeniz havzası gibi hassas ekosistemlerde giderek daha belirgin hale gelmekte, artan sıcaklıklar ve azalan yağışlar, orman ekosistemlerini tehdit eden kuraklık olaylarının sıklığında ve şiddetinde artışa

✉ ^a İstanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Forestry, Silviculture Department, 34473, Bahçeköy, Sarıyer, İstanbul, Türkiye

@ ^{*} **Corresponding author** (İletişim yazarı): safa.balekoglu@iuc.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 05.06.2025, **Accepted** (Kabul tarihi): 01.09.2025



Citation (Atf): Balekoğlu, S., 2025. Effect of silicon-based fertilization against drought stress in maritime pine seedlings. Turkish Journal of Forestry, 26(3): 252-261.
DOI: [10.18182/tjf.1715300](https://doi.org/10.18182/tjf.1715300)

neden olmaktadır (Allen vd., 2015; Hammond vd., 2022). Bu durum, özellikle genç fidanların büyüme ve hayatta kalmasını etkileyen, fizyolojik stres koşullarını artıran bir faktördür. Fidanların ilk gelişim dönemlerinde yaşadıkları su stresi, türlerin ekolojik başarısını doğrudan şekillendirmektedir (Çalışkan vd., 2023). Bu nedenle, iklim değişikliğine karşı dirençli, kuraklığa toleranslı fidanların yetiştirilmesi günümüzde fidanlık uygulamaları açısından öncelikli hale gelmiştir.

Sağlıklı ve sürdürülebilir orman ekosistemlerinin kurulması ve korunması için yüksek kaliteli fidan üretimi hayati öneme sahiptir. Fidanlıklar, farklı türlerin yetiştirilmesi, adaptasyon süreçlerinin izlenmesi ve ekolojik dengeyi destekleyen türlerin çoğaltılması açısından kritik rol oynar. Aynı zamanda erozyonla mücadele, iklim değişikliğine uyum sağlama, biyolojik çeşitliliğin artırılması ve kırsal kalkınmaya katkı sağlama gibi çok yönlü faydalar sunar. Dolayısıyla ormancılık faaliyetlerinin başarısı, büyük ölçüde fidanlıkların genetik kapasitesine ve yetiştirilen fidanların kalitesine bağlıdır (Boydak ve Çalışkan, 2015; 2021; Çalışkan ve Boydak, 2017; Perry vd., 2025).

Fidanlık uygulamaları, ormanların sağlıklı ve sürdürülebilir bir şekilde devamı için temel yapı taşlarından biridir. Fidanların dikim öncesindeki farklı gelişim dönemlerinde gerçekleştirilen bakım (Güner vd., 2012), sulama (Deligöz, 2009) ve gübreleme gibi uygulamalar, onların arazi koşullarına adaptasyon yeteneklerini ve çevresel stres faktörlerine karşı dayanıklılıklarını etkilemektedir. Özellikle besin elementi takviyeleri (Çiçek vd., 2022), fidanların kök gelişimi, fotosentetik etkinliği, su tutma kapasiteleri ve genel fizyolojik dayanıklılıkları üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda, gübreleme stratejilerinin optimize edilmesi ve çevresel stres koşullarına dayanıklılığı artıracak şekilde yönlendirilmesi, sürdürülebilir orman yönetimi açısından kritik bir uygulama alanıdır (Ayan, 2007; Guntzer vd., 2012; Zhu ve Gong, 2014; Perry vd., 2025).

Geleneksel gübreleme uygulamaları çoğunlukla azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) gibi makro besin elementlerine odaklanmaktadır. Ancak son yıllarda, mikro elementlerin ve yarı-esas minerallerin bitki direnci üzerindeki etkileri giderek daha fazla araştırılmaktadır (Semenova vd., 2024). Özellikle silikon (Si), uzun yıllar boyunca bitkiler için zorunlu olmayan bir element olarak değerlendirilmiş olsa da yapılan araştırmalar silikonun bitki fizyolojisinde çeşitli işlevleri yerine getirdiğini ortaya koymuştur (Yan vd., 2018; Sourı vd., 2021). Silikon, bitki dokularında birikerek hücre çeperlerini güçlendirmekte, su kaybını azaltmakta, fotosentetik etkinliği artırmakta ve antioksidan savunma sistemlerini aktive ederek stres toleransını yükseltmektedir. Bu özellikleri sayesinde, silikon uygulamalarının kuraklık stresi altındaki bitkilerde önemli ölçüde koruyucu etkiler oluşturduğu gösterilmiştir (Ahmed vd., 2014; Coskun vd., 2016).

Sahil çamı (*Pinus pinaster* Ait.), Batı Akdeniz havzasına özgü yaygın bir orman ağacı olup, kıyı kesimlerden yüksek dağlara kadar ılıman-sıcak yerlerde yayılış göstermektedir. Gölgeye toleransı düşük olan bu tür genellikle silisli ve kumlu toprakları tercih etmektedir. Sahil çamı ekolojik olarak çok yönlü olup büyüme özellikleri, yaz kuraklığına ve kireçtaşı substratlara adaptasyon açısından özellikler gösterir. Doğal olarak, iklim üzerinde okyanus etkisi olan sıcak ılıman bölgelerde, özellikle de yıllık yağışın 600 mm'den fazla olduğu nemli ve yarı nemli alanlarda yetişir. Buna rağmen, yeterli atmosferik nem olması koşuluyla, yıllık sadece 400

mm yağış alan bölgelerde yayılış göstermesi mümkündür. Hızlı büyümesi potansiyeli sayesinde, toprak koruma, bozulmuş alanların yeniden ağaçlandırılması ve kumulların stabilizasyonu için, plantasyonlarda yoğun olarak kullanılmıştır. Ayrıca geleneksel olarak terebentin ve reçine elde etmek için reçine ekstraksiyonunda da kullanılmaktadır (Abad Viñas vd., 2016).

Silikon, her ne kadar zorunlu olmayan bir besin elementi olarak sınıflandırılrsa da bitkiler için birçok fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeyde fayda sağladığı açıkça ortaya konmaktadır (Coskun vd., 2016). Sahil çamı hızlı büyüme gösteren, fakir yetiştirme koşullarda dahi gelişim gösterebilen, ancak kuraklık stresine karşı hassasiyet gösterebilen bir türdür. Akdeniz iklim kuşağında yaygın olarak bulunan bu tür, iklim değişikliğine bağlı su kıtlığı sorunlarına karşı önemli bir adaptasyon potansiyeli sunmaktadır (Camarero vd., 2015; Caminero vd., 2018). Dolayısıyla, sahil çamı fidanlarında silikon bazlı gübreleme uygulamalarının incelenmesi hem teorik hem de uygulamalı ormancılık açısından bilimsel öneme sahiptir. Bu çalışmada, sahil çamı (*Pinus pinaster*) fidanlarında silikon bazlı gübrelemenin fizyolojik ve morfolojik açıdan gelişimleri ve kuraklık toleransı üzerindeki etkileri araştırılarak, fidanlık uygulamalarında kullanılabilecek yeni stratejilere ışık tutulması amaçlanmaktadır. Böylelikle, orman kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve iklim değişikliğine uyum çabaları kapsamında önemli bir katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve yöntem

Çalışma, Göktürk Orman Fidanlığında açık alan fidanlık koşullarında yürütülmüştür. Fidanlık, İstanbul, Eyüpsultan ilçesinde deniz seviyesinden 36 m yükseklikte, 41°10'40"N, 28°52'58"E koordinatlarında olup, yıllık ortalama yağış miktarı 800 mm, sıcaklık 15,1 °C, haziran, temmuz ve ağustos aylarının en yüksek sıcaklıklarının ortalaması sırasıyla 27,5 °C, 29,0 °C ve 29,5 °C'dir. Denemede fidanlıktan temin edilen repikajlı 2 yaşında ve 2,5 L hacmindeki kaplarda yetiştirilmiş toplam 150 adet sahil çamı fidanları kullanılmıştır. Fidanların yetiştirildiği kap harcı özellikleri şu şekildedir: %64,6 kum, %17,8 toz, %17,6 kil, 7,12 pH, 161,7 EC (µS/cm), %0,51 CaCO₃, %6,1 organik maddedir.

2.1. Deneme deseni ve gübreleme süreci

Deneme, tesadüfi parseller deneme desenine göre üç yinelemeli olarak kurulmuştur. Toplamda, 10 fidan x 3 yineleme x 5 doz x 2 grup (sulanen ve sulanmayan) = 300 fidan araştırmada kullanılmıştır.

Deneme başlangıcına kadar tüm fidanlar günlük olarak sulanmıştır. 100 ml su (kaplardan sızmaları önlemek için küçük miktar seçilmiştir) içerisinde 0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g silikon bazlı gübre (Almina; Türkiye menşeli jeotermal biyomalzeme) çözündürülmüştür. 1 Mayıs 2024 itibarıyla suda çözündürülmüş gübreler fidanların kök boğazı etrafına uygulanmıştır. Gübre içeriği; SiO₂ (%52,50), CaO (%8,10), SO₃ (%3,70), MgO (%3), Fe₂O₃ (%1,10), aljinik asit (%1,10) şeklindedir.

Gübrelemeden sonraki ilk ay boyunca fidanlara günlük tarla kapasitesince sulama uygulanmıştır. 1 Haziran 2024 itibarıyla, kuraklık grubundaki fidanlarda sulama kesilerek dört hafta süren kuraklık uygulaması başlatılmıştır. Kuraklık denemesi süresince, fidanların doğal yağıştan etkilenmemesi

amacıyla, gerekli durumlarda üzerlerinin şeffaf plastik örtülerle kapatılması planlanmıştır. Ancak deneme süresi boyunca herhangi bir yağış gerçekleşmediğinden, bu örtülerin kullanımına ihtiyaç duyulmamıştır.

2.2. Fizyolojik ölçümler

Kuraklık dönemi sonunda, her doz grubundan 5'er fidan (toplam 50 adet) üzerinde, klorofil floresans ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla, fidanlar ölçüm öncesi 30 dakika karanlıkta adapte edilmiş, ardından öğle saatlerinde (12:30-13:30) OS30P klorofil florometresi (OptiScience) ile ölçüm gerçekleştirilmiştir.

Fotosistem II (PSII) maksimum kuantum verimi, Maxwell ve Johnson (2000) tarafından önerilen formül (1) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$F_v/F_m = (F_m - F_o) / F_m \quad (1)$$

Burada F_v/F_m fotosentetik aktivite, F_o minimum floresansı ve F_m maksimum floresansı göstermektedir.

Klorofil floresans ölçümü yapılan fidanların bağıl su içeriği (RWC, %) kuraklık döneminin sonunda sulanan ve sulanmayan gruplarda farklı dozlara tabi tutulan 5'er fidan üzerinde belirlenmiştir (5 fidan x 5 doz x 2 grup). Fidanlardan örneklenen sürgün örneklerinin taze ağırlığı (FW) tespit edilmiştir. Daha sonra, örnekler saf su dolu kaba batırılmış ve tamamen doymuş hale gelene kadar karanlıkta 4°C'de bir gün bekletilmiştir. Daha sonra, örneklerin doymuş ağırlık (SW) belirlenmiştir. Tüm örnekler sabit bir ağırlığa ulaşana kadar 65°C'de kurutma fırınında iki gün tutulmuş ve bu noktada örneklerin kuru ağırlıkları (DW) saptanmıştır. Sürgün örneklerinin bağıl su içeriği (RWC) ve nem içeriği (MC) aşağıdaki denklemler kullanılarak Barrs ve Weatherley (1962) protokolüne göre hesaplanmıştır (2, 3):

$$RWC (\%) = (FW - DW) / (SW - DW) \times 100 \quad (2)$$

$$MC (\%) = (FW - DW) / DW \times 100 \quad (3)$$

2.3. Görsel değerlendirme

Temmuz 2024'te kuraklık uygulaması sonunda fidanlarda gözlenen doku hasarı ve solma semptomları, üç dereceli görsel bir skalaya göre (tamamen sağlıklı fidan gözlenmediği için skala üç basamakla sınırlandırılmıştır) değerlendirilmiştir.

- 1 = Terminal sürgün tamamen solmuş (ölmek üzere),
- 2 = Orta derecede solmuş, sarı-kahverengi iğne yapraklar,
- 3 = Hafif solmuş, genel olarak yeşil iğne yapraklar.

2.4. Morfolojik ölçümler

Fidan boyu (FB, cm) ve kök boğazı çapı (KBÇ, mm) ölçümleri, gübreleme öncesi (1 Mayıs 2024), kuraklık başlangıcında (1 Haziran 2024) ve sonunda (1 Temmuz 2024) dijital kumpas ve cetvel yardımıyla ölçülmüştür (her bir işlem grubunda aynı fidanlar üzerinde: 10 fidan x 3 yinleme x 5 doz = 150). Gürbüzlük indisi (Gİ) ise, $Gİ = FB \text{ (cm)} / KBÇ \text{ (mm)}$ formülü ile hesaplanmıştır. Kuraklık grubu tüm fidanların boy ve çap artımları, aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (4, 5):

$$KBÇ_{\text{artım (mm)}} = KBÇ_{\text{mayıs (mm)}} - KBÇ_{\text{haziran (mm)}} \quad (4)$$

$$FB_{\text{artım (cm)}} = FB_{\text{mayıs (cm)}} - FB_{\text{haziran (cm)}} \quad (5)$$

2.5. İstatistiksel analiz

Kuraklık uygulaması ve farklı dozlarda silikon gübrelemesinin fizyolojik özellikler üzerindeki etkisini belirlemek için iki-yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmış ve ANOVA modeli aşağıda verilmiştir (6):

$$Y_{ij} = \mu + D_i + K_j + DK_{ij} + e_{ij} \quad (6)$$

Y_{ij} gözlenen değer, μ genel ortalama, D_i doz etkisi, K_j uygulama etkisi (kontrol ve kuraklık grubu), DK_{ij} doz ve uygulama etkisinin etkileşimi, e_{ij} hatayı göstermektedir.

Temmuz ayında kuraklık denemesinden hemen sonra kuraklık grubundaki fidanlar üzerindeki doz etkisine ait görsel değerlendirme verileri, silikon dozları arasındaki farklılıklar Ki-kare testi ile analiz edilmiştir.

Kuraklık grubundaki fidanların çap, boy, gürbüzlük indisi, çap ve boy artım değerleri üzerinde farklı silikon doz uygulamasının etkisini görmek için de tek-yönlü ANOVA kullanılmıştır. Tek-yönlü ANOVA modeli aşağıda verilmiştir (7):

$$Y_i = \mu + D_i + e_i \quad (7)$$

Y_i gözlenen değer, μ genel ortalama, D_i doz etkisi, e_i hatayı göstermektedir. Dozlar arası farkların karşılaştırılması için Duncan post-hoc testi ($p < 0,005$) uygulanmıştır. Ayrıca kontrol ve kuraklık grubundaki aynı doz gruplarının karşılaştırılması bağımsız örneklem t testi ile analiz edilmiştir. Bütün analizler SPSS 17.0 istatistik yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

3.1. Kuraklığa karşı fizyolojik tepkiler

İki yönlü varyans analizi sonuçlarına göre, doz ile işlem (kontrol, kuraklık) arasındaki etkileşim, F_v/F_m ($p = 0,009$), F_o ($p = 0,021$) ve F_m ($p = 0,044$) parametreleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki göstermiştir (Şekil 1). T testi sonuçlarına göre F_v/F_m açıdan kontrol ve kuraklık grubundaki tüm doz gruplarında anlamlı farklar elde edilmiştir. F_o değerleri t testi sonuçlarında 5 g, 10 g ve 15 g doz gruplarında anlamlı fark çıkmıştır. F_m değerleri t testi sonuçlarında ise 15 g ve 30 g doz gruplarında anlamlı farklar elde edilmiştir.

Tek yönlü varyans analizi sonuçlarına göre, kontrol grubu F_v/F_m değerlerinde anlamlı farklılıklar bulunmazken ($p = 0,672$), kuraklık grubunda ise anlamlı farklılıklar bulunmuştur ($p = 0,015$). Kontrol grubundaki fidanların ortalama F_v/F_m değerleri 0,75 iken, kuraklık grubunda 0 g ve 30 g doz verilen fidanların ortalama F_v/F_m değerleri 0,34 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca kuraklık grubunda 5 g, 10 g ve 15 g doz verilen fidanların ortalama F_v/F_m değerleri ise 0,59 olarak bulunmuştur. Kuraklık grubunda F_o ve F_m değerleri açısından varyans analizine göre anlamlı farklılıklar çıkmamıştır (Şekil 1). Ancak kontrol grubunda, Duncan testine göre dozlar istatistiksel olarak farklı gruplarda yer almış ve en yüksek F_o değeri (294) 30 g doz verilen fidanlarda, en düşük F_o değeri (177) doz verilmeyen fidanlarında tespit edilmiştir. Kuraklık grubunda ise, doz grupları arasında anlamlı fark bulunmazken en yüksek F_o değeri (363) 5 g doz verilen fidanlarda, en düşük F_o değeri (211) 30 g doz verilen fidanlarda tespit edilmiştir (Şekil 1).

Kontrol grubunda, varyans analizi sonucunda F_m açısından doz grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu tespit edilmiş olup, en yüksek F_m değeri (1160) 30 g doz verilen fidanlarda, en düşük F_m değeri (673) doz verilmeyen fidanlarda belirlenmiştir (Şekil 1).

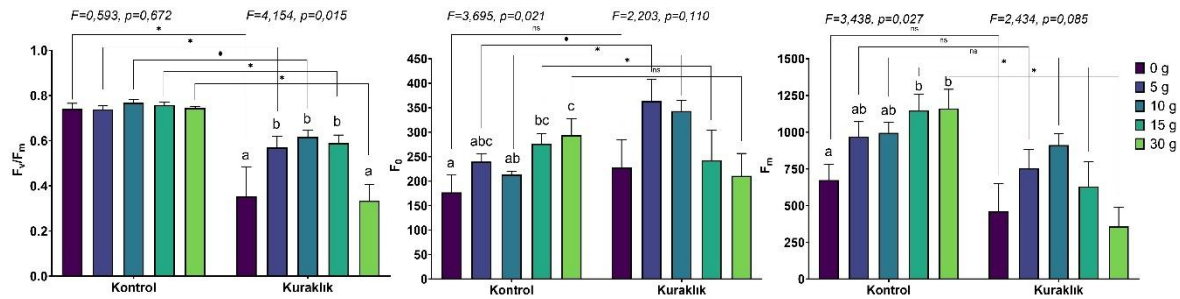
Kuraklık grubunda ise, varyans analizine göre F_m açısından doz grupları istatistiksel olarak farklılaşmış, en yüksek F_m değeri (462) 10 g doz verilen fidanlarda, en düşük F_m değeri (358) 30 g doz verilen fidanlarda tespit edilmiştir (Şekil 1).

İki yönlü varyans analizi sonuçlarına göre, doz ile işlem (kontrol, kuraklık) arasındaki etkileşim, RWC ($p = 0,166$) açısından anlamlı değilken, MC ($p = 0,044$) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki göstermiştir (Şekil 2). Kontrol grubunda ortalama RWC değerleri doz sırasına göre (0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g) sırasıyla %91, %91, %91, %91 ve %93 olarak bulunmuştur. Kuraklık grubunda RWC

değerlerinde varyans analizi sonucuna göre anlamlı fark çıkmamış olup en düşük RWC %79 olarak doz verilmeyen fidanlarda, en yüksek RWC %88, %87, %90 ve %87 olarak sırasıyla 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g doz verilen fidanlarda elde edilmiştir (Şekil 2).

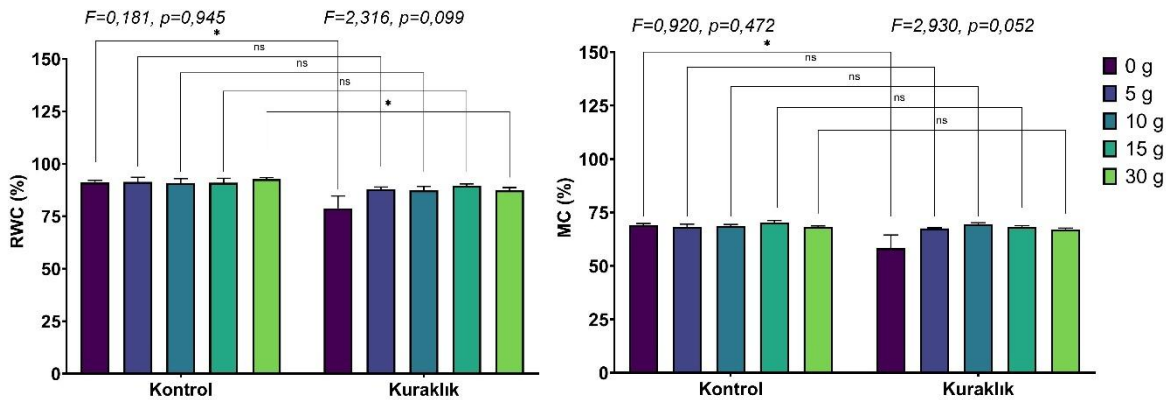
Kontrol ve kuraklık grubu MC değerleri varyans analizi sonuçlarına göre doz grupları arasında fark elde edilmemiştir. Kontrol grubunda ortalama MC değerleri doz sırasına göre (0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g) sırasıyla %69, %68, %69, %70 ve %68 olarak bulunmuştur. Kuraklık grubunda ise, en düşük MC %58 olarak doz verilmeyen fidanlarda, en yüksek MC %68, %69, %68 ve %67 olarak sırasıyla 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g doz fidanlarda belirlenmiştir (Şekil 2).

RWC değerleri t-testi sonuçlarına göre 0 g ve 30 g doz gruplarında anlamlı farklar tespit edilmiştir. MC değerleri t-testi sonuçlarına göre sadece doz verilmeyen (0 g) grupta anlamlı fark bulunmuştur.



Şekil 1. Kontrol ve kuraklık gruplarında farklı silikon bazlı gübre dozlarının (0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g) sahil çamı fidanlarında fotosentetik aktivite (F_v/F_m), minimum floresans (F_o) ve maksimum floresansa (F_m) etkisinin tek yönlü ANOVA sonuçları ($n=5$). Her işlem grubunda ilgili karakter bakımından aynı harfi taşıyan doz grupları Duncan post hoc testi açısından farklı değildir ($p<0,05$). * kontrol ve kuraklık grubundaki doz grupların t-test sonuçlarına göre anlamlı olduğunu ($p<0,05$), ns ise anlamlı olmadığını göstermektedir. "I" standart hata çubuklarını işaret etmektedir.

Figure 1. One-way ANOVA results ($n=5$) for the effects of different silicon-based fertilizer doses (0 g, 5 g, 10 g, 15 g and 30 g) on photosynthetic activity (F_v/F_m), minimum fluorescence (F_o) and maximum fluorescence (F_m) in maritime pine seedlings in the control and drought groups. Dose groups with the same letter for the relevant characters in each treatment group were not different according to the Duncan post hoc test ($p<0.05$). * indicates that the dose groups in the control and drought groups were significant according to the t-test results ($p<0.05$), while ns non-significant. "I" indicates standard error bars.

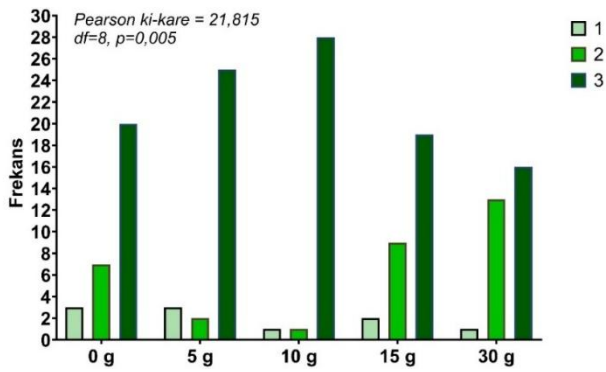


Şekil 2. Kontrol ve kuraklık gruplarında farklı silikon bazlı gübre dozlarının (0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g) sahil çamı fidanlarında bağıl su içeriği (RWC) ve nem içeriğine (MC) etkisinin tek yönlü ANOVA sonuçları ($n=5$). * kontrol ve kuraklık grubundaki doz grupların t-test sonuçlarına göre anlamlı olduğunu ($p<0,05$), ns ise anlamlı olmadığını göstermektedir. "I" standart hata çubuklarını işaret etmektedir.

Figure 2. One-way ANOVA results ($n=5$) for the effects of different silicon-based fertilizer doses (0 g, 5 g, 10 g, 15 g and 30 g) on relative water content (RWC) and moisture content (MC) in maritime pine seedlings in the control and drought groups. * indicates that the doses in the control and drought groups are significant according to the t-test results ($p<0.05$), while ns non-significant. "I" indicates standard error bars.

3.2. Görsel değerlendirmeler

Farklı dozlardaki görsel puanların dağılımı Şekil 3 ve Çizelge 1'de verilmiştir. Kuraklığa maruz bırakılan fidanlarda doz etkilerinin görsel değerlendirmesi kuraklık sonu temmuz ki-kare testi ile gerçekleştirilmiştir. Ki-kare testi sonuçlarına göre, temmuz ayında kuraklıktan hemen sonra gübre dozları ile görsel değerlendirme arasında istatistiksel bir ilişki bulunmuştur (Pearson ki-kare = 21,815, df=8, p=0,005). Kuraklık sonunda yapılan görsel değerlendirmede, doz verilmeyen fidanların %66,7'si "3" kategorisinde iken 5 g ve 10 g doz verilen fidanların sırasıyla %83,3 ve %93,3 olarak "3" kategorisinde olduğu belirlenmiştir (Çizelge 1). 15 g ve 30 g doz verilen fidanların %63,3 ve %53'ü "3" kategorisindedir.



Şekil 3. Kuraklık sonunda farklı silikon bazlı gübre dozlarının (0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g) sahil çamı fidanlarında görsel değerlendirme ile ilişkisinde Pearson ki-kare testi ve görsel kategorilerin dozlara göre frekansları (n=30). 1 = Terminal sürgün tamamen solmuş (ölmek üzere), 2 = Orta derecede solmuş, sarı-kahverengi iğne yapraklar, 3 = Hafif solmuş, genel olarak yeşil iğne yapraklar.

Figure 3. Visual evaluation of different silicon-based fertilizer doses (0 g, 5 g, 10 g, 15 g and 30 g) on maritime pine seedlings at the end of drought. Pearson chi-square test and visual categories according to dose frequencies (n=30). 1 = Terminal shoot completely wilted (dying), 2 = Moderately wilted, yellow-brown needles, 3 = Slightly wilted, mostly green needles.

3.3. Kuraklığa karşı morfolojik tepkiler

Farklı doz uygulanmış sahil çamı fidanlarda Mayıs (gübrelemenin başladığı ay), Haziran (gübrelemeden 1 ay sonra) ve Temmuz (1 aylık kuraklık sonrası) ayı kök boğazı çapı (mm) ve boy (cm) değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre söz konusu aylarda çap ve boy açısından anlamlı farklılıklar bulunmamıştır. Gübrelemenin başlangıcı Mayıs ayında kök boğazı çapı ortalama değerleri (mm) 0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g doz

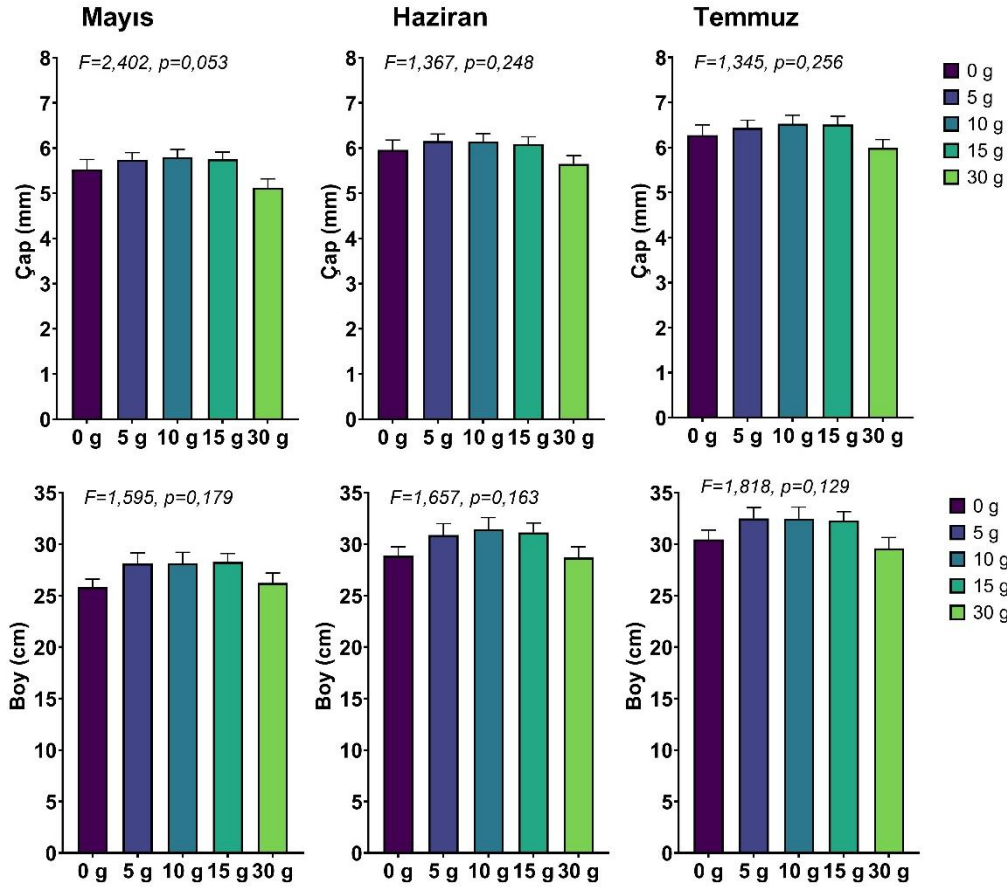
gruplarında sırasıyla 5,52 mm, 5,74 mm, 5,80 mm, 5,76 mm ve 5,12 mm olarak tespit edilmiştir. Gübrelemeden 1 ay sonraki farklı doz gruplarındaki fidanların ortalama kök boğazı çapları sırasıyla 5,96 mm, 6,16 mm, 6,15 mm, 6,09 mm ve 5,65 mm bulunmuştur. Kuraklığa maruz bırakıldıktan dört hafta sonraki ortalama kök boğazı çap değerleri ise sırasıyla 6,28 mm, 6,44 mm, 6,53 mm, 6,51 mm ve 5,99 mm olmuştur. Gübrelemenin başlangıcında 0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g doz gruplarında ortalama boy değerlerine bakıldığında sırasıyla 25,8 cm, 28,1 cm, 28,2 cm, 28,3 cm ve 26,2 cm bulunmuştur. Gübrelemeden 1 ay sonra boy değerleri sırasıyla 28,9 cm, 30,9 cm, 31,4 cm, 31,2 cm ve 28,7 cm olmuştur. Kuraklığa maruz bırakıldıktan dört hafta sonra fidanların boy değerleri sırasıyla 30,5 cm, 32,5 cm, 32,5 cm, 32,3 cm ve 29,6 cm olarak saptanmıştır (Şekil 4).

Gübre uygulaması ile fidanların gürbüzlük indisi değerlerinin istatistiksel anlamda değişmediği ortaya konmuştur. Tüm doz gruplarındaki fidanların ortalama gürbüzlük indisi değerleri Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında sırasıyla 4,95-5,08-5,01 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5).

Çizelge 1. Kuraklık sonunda farklı silikon bazlı gübre dozlarının (0 g, 5 g, 10 g, 15 g ve 30 g) sahil çamı fidanlarında görsel değerlendirme ile ilişkisinde Pearson ki-kare testi (Temmuz 2024, n=30). 1 = Terminal sürgün tamamen solmuş (ölmek üzere), 2 = Orta derecede solmuş, sarı-kahverengi iğne yapraklar, 3 = Hafif solmuş, genel olarak yeşil iğne yapraklar.

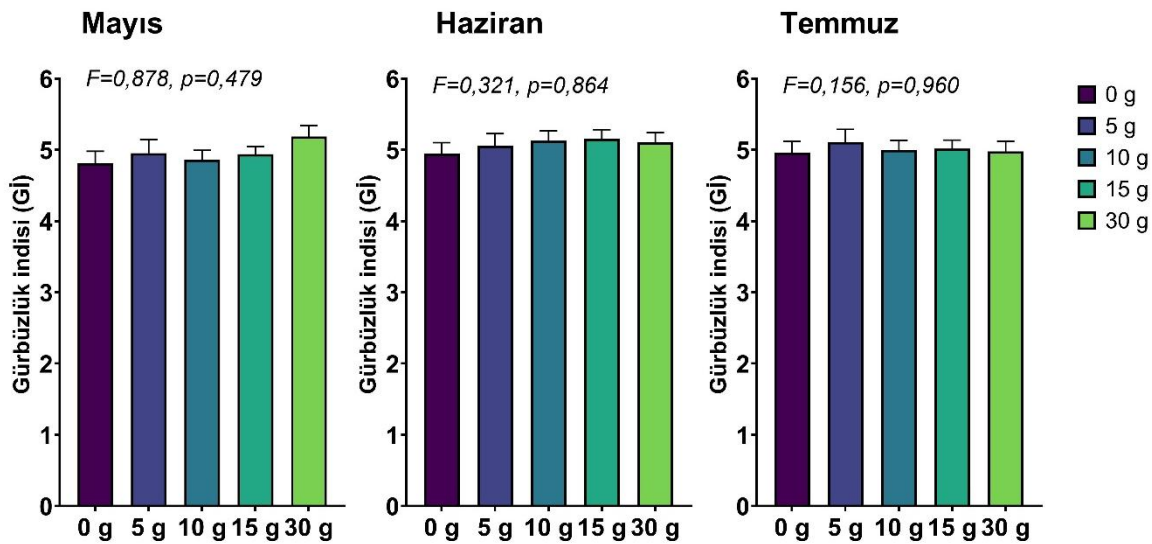
Table 1. Pearson chi-square test for visual assessment of different silicon-based fertilizer doses (0 g, 5 g, 10 g, 15 g and 30 g) on maritime pine seedlings at the end of drought (July 2024, n=30). 1 = Terminal shoot completely wilted (dying), 2 = Moderately wilted, yellow-brown needles, 3 = Slightly wilted, mostly green needles.

Doz		Görsel kategori		
		1	2	3
0 g	n	3	7	20
	Beklenen değer	2	6,4	21,6
	Gübre dozları içinde (%)	10,00	23,30	66,70
	Görsel kategori içinde (%)	30,00	21,90	18,50
	n	3	2	25
5 g	Beklenen değer	2	6,4	21,6
	Gübre dozları içinde (%)	10,00	6,70	83,30
	Görsel kategori içinde (%)	30,00	6,20	23,10
	n	1	1	28
	Beklenen değer	2	6,4	21,6
10 g	Gübre dozları içinde (%)	3,30	3,30	93,30
	Görsel kategori içinde (%)	10,00	3,10	25,90
	n	2	9	19
	Beklenen değer	2	6,4	21,6
	Gübre dozları içinde (%)	6,70	30,00	63,30
15 g	Görsel kategori içinde (%)	20,00	28,10	17,60
	n	1	13	16
	Beklenen değer	2	6,4	21,6
	Gübre dozları içinde (%)	3,30	43,00	53,00
	Görsel kategori içinde (%)	10,00	40,60	14,80



Şekil 4. Farklı silikon bazlı gübrelemenin mayıs (gübreleme başlangıcı), haziran (gübrelemeden 1 ay sonra) ve temmuz (kuraklık uygulamasından 1 ay sonra) aylarındaki ortalama kök boğazı çapları (mm) ve boyları (cm) ve tek yönlü ANOVA sonuçları (n=30). "I" standart hata çubuklarını işaret etmektedir.

Figure 4. Average root collar diameters (mm) and heights (cm) of different silicon-based fertilizer in May (beginning of fertilization), June (1 month after fertilization) and July (1 month after drought application) and one-way ANOVA results (n=30). "I" indicates standard error bars.



Şekil 5. Farklı silikon bazlı gübrelemenin mayıs (gübreleme başlangıcı), haziran (gübrelemeden 1 ay sonra) ve temmuz (kuraklık uygulamasından 1 ay sonra) aylarındaki ortalama gümbüzlük indisi değerleri ve tek yönlü ANOVA sonuçları (n=30). "I" standart hata çubuklarını göstermektedir.

Figure 5. Average sturdiness quotient values of different silicon-based fertilizer in May (beginning of fertilization), June (1 month after fertilization) and July (1 month after drought application) and one-way ANOVA results (n=30). "I" indicates standard error bars.

Yapılan varyans analizi sonuçlarına göre sadece Temmuz-Mayıs dönemi boy artımı açısından doz grupları arasında anlamlı farklar çıkmıştır.

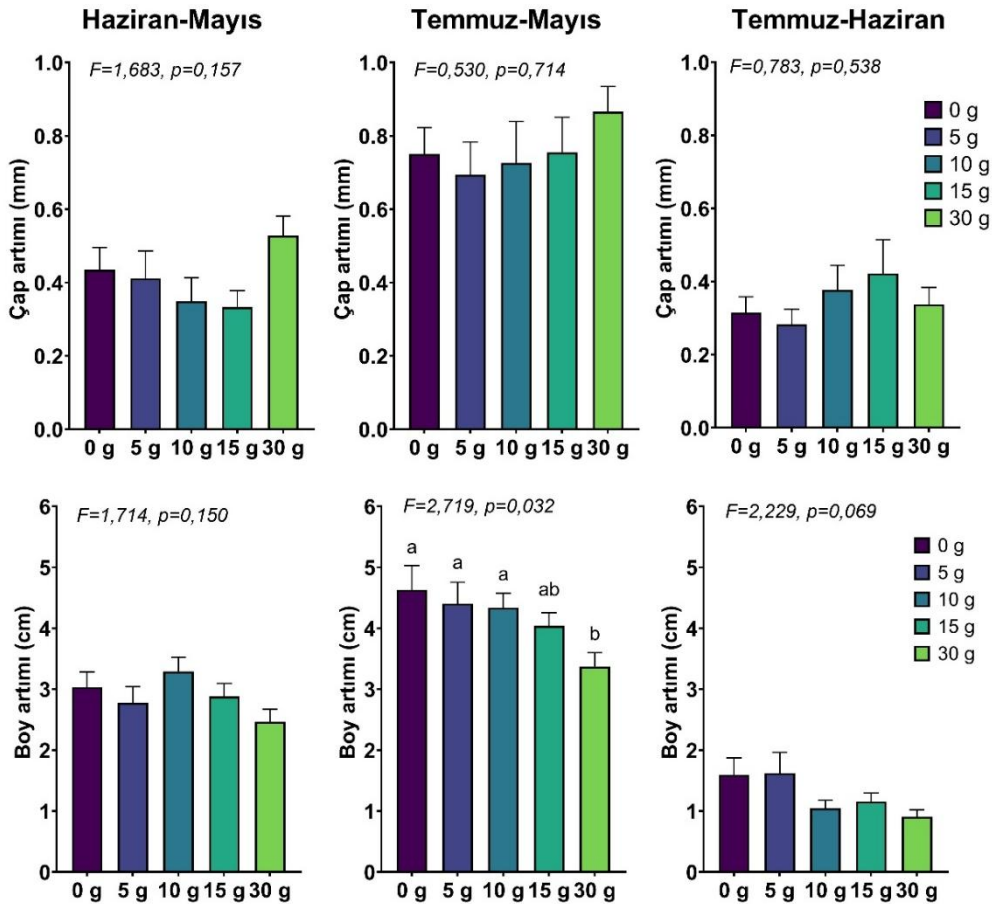
Kurak periyot döneminden önce mayıs ayında gübreleme ile haziran-mayıs dönemine bakıldığında çap artımı açısından 30 g doz verilen fidanlar en yüksek çap artımı (0,53 mm) yaptığı, en düşük çap artımının (0,33 mm) ise 15 g doz verilen fidanların yaptığı belirlenmiş ancak istatistiksel anlamda farklılık bulunmamıştır. Temmuz-mayıs döneminde tüm doz grupların ortalama çap artımı 0,76 mm olmuştur. Temmuz-haziran kurak dönemi kapsayan dönemde 15 g doz verilen fidanların en yüksek çap artımı (0,42 mm) yapmasına rağmen doz grupları arasında istatistiksel farklar tespit edilmemiştir (Şekil 6).

Boy artım değerlerine bakıldığında, haziran-mayıs döneminde, 30 g doz verilen fidanların en düşük boy artımı (2,5 cm) yaptığı, en yüksek (3,3 cm) ise 10 g doz verilen fidanların yaptığı izlenmiştir. Temmuz-haziran kurak periyottaki boy artım değerlerine bakıldığında yine 30 g doz verilen fidanların en düşük (0,9 cm) artım yaptığı, en yüksek artımı (1,6 cm) ise 0 g ve 5 g doz verilen fidanların yaptığı gözlenmiştir.

4. Tartışma

Fotosentez, kuraklıktan doğrudan etkilenen en önemli fizyolojik süreçlerden biridir (Chen vd., 2011; Liu vd., 2015; Balekoglul vd., 2023a). Klorofil floresan verimi (F_v/F_m), fotosentetik aktivitenin yapısını ve rolünü değerlendirmek için temel bir araç olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, sahil çamı fidanların F_v/F_m değerlerinin *Oryza sativa* (Zhou vd., 2007), *Citrullus lanatus* (Sanda vd., 2011) türlerinde belirlendiği gibi kuraklık stresinden etkilendiği bulunmuştur.

Çeşitli silisyum formları çevresel stres azaltıcı olarak kullanılmaktadır (Asgari vd., 2018; Verma vd., 2020). Si'nin bitkilerin gövde ve yapraklarının epidermal duvarlarında, damar dokularında birikebileceği belgelenmiştir (Rios vd., 2017; Younis vd., 2020). Silisyum, su emilimini, su taşınmasını iyileştirme yeteneğini (Yavas ve Aydın, 2017) ve antioksidan enzim aktivitelerini (Ma vd., 2016) ve fotosentetik yaprak gazı değişimini (Wang vd., 2019) artırabilir.



Şekil 6. Farklı silikon bazlı gübrelemenin haziran-mayıs (1 aylık gübreleme etkisi), temmuz-mayıs (iki aylık gübreleme etkisi) ve temmuz-haziran (1 aylık kurak periyottaki etkisi) dönemlerinde fidanlardaki çap ve boy artımları ve tek yönlü ANOVA sonuçları (n=30). Her işlem grubunda ilgili karakter bakımından aynı harfi taşıyan doz grupları Duncan post hoc testi açısından farklı değildir (p<0,05). "I" standart hata çubuklarını göstermektedir.

Figure 6. Diameter and height increment in seedlings with different silicon-based fertilizer treatments during June-May (effect of 1-month fertilization), July-May (effect of 2-month fertilization), and July-June (effect of 1-month dry period) and one-way ANOVA results (n=30). Dose groups bearing the same letter for the relevant trait in each treatment group were not different according to the Duncan post hoc test (p<0.05). "I" indicates standard error bars.

Kuraklık, fotosentez performansı, fotosistem II'nin maksimum kuantum verimi, pigment biyosentezi, besin alımı, iyonların taşınması ve solunum gibi fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmaları etkileyerek bitki gelişimini azaltır (Vilela vd., 2017; Hussain vd., 2018; Ahmad vd., 2019; Verma vd., 2020; Balekoglul vd., 2023b).

Fotosistem II'nin maksimum kuantum verimliliğini temsil eden F_v/F_m parametresi, stres düzeylerinin ve fotosentetik hasarın değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Murchie ve Lawson, 2013; Balekoglul vd., 2023a). Klorofil floresansı, fotosentezin temel mekanizmalarının, bitkilerin çevresel değişime verdiği tepkilerin, genetik çeşitliliğin ve ekolojik çeşitliliğin anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Balekoglul vd., 2023a). Öte yandan, kontrol grubunda uygulanan farklı silikon dozlarının F_v/F_m değerleri benzer ve yüksek seviyede kalmıştır. Bu durum, optimum sulama koşulları altında silikonun fotosentetik aktivite üzerinde doğrudan bir iyileştirici etki sağlamadığını göstermektedir. Ancak, aynı sulama koşullarında minimum (F_o) ve maksimum (F_m) floresans değerleri incelendiğinde, 30 g doz uygulanan fidanlarda bu değerlerin doz uygulanmayan fidanlara göre yaklaşık 1,5 kat daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu bulgu, silikonun fotosentetik süreçlerin temel bileşenleri üzerindeki potansiyel etkisine işaret etmektedir. Buna karşılık, kuraklık altında sahil çamı fidanların F_v/F_m açısından silikon bazlı gübreleme dozlarına bağlı olarak anlamlı farklılıklar oluşmuştur. Özellikle 5–15 g silikon bazlı gübre dozları, fotosentetik performansını artırarak kuraklık stresinin fizyolojik etkilerini hafifletmiştir. Bu bulgular, Oszako vd. (2023) tarafından *Pinus sylvestris* ve *Quercus robur* türlerinde yürütülen ve silikon uygulamasının büyüme, biyokütle ve fotosentetik performans üzerindeki olumlu etkilerini gösteren çalışma ile paralellik göstermektedir. Bu bulgu, silikonun fotosentetik aktivite stabilitesini koruyucu etkisini desteklemektedir (Xu vd., 2022). Nitekim Verma vd. (2021), Si'nin yapraktan uygulanmasının, kuraklığın olumsuz etkilerini hafiflettiğini ve fotosentez performansını artırdığını bulmuştur. Si'nin bu etkisinin, su dengesini iyileştirmesi ve stomaların kapanmasını optimize etmesiyle bağlantılı olduğu düşünülmektedir (Kalaji vd., 2018; Ahammed ve Yang, 2021).

Carneiro-Carvalho vd. (2023), kuraklık stresine karşı kestane fidanlarının dayanıklılığını artırmak amacıyla potasyum silikat gübrelemesinin etkilerini incelemiştir. Araştırma sonucunda gübre uygulanan kestane fidanlarında oksidatif stresin azaldığı, su kıtlığı koşullarına karşı daha dirençli hale geldiği bulunmuştur. Sonuç olarak, 10 mM dozunun en etkili seviye olduğu belirtilmiştir (Carneiro-Carvalho vd., 2023).

Bağıl su içeriği (RWC) ve nem içeriği (MC) gibi fizyolojik parametreler, silikon bazlı gübre uygulamasının fidanların su tutma kapasitesini artırma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Ancak bu artış, istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık oluşturmamıştır. Bu durum, Si'nin hücre duvarında birikimi yoluyla transpirasyon kaybını azaltma ve osmotik düzenleyici bileşiklerin (örneğin prolin, çözünür şekerler) birikimini artırma etkisiyle ilişkili olabilir (Wang vd., 2015; Manivannan ve Ahn, 2017). Oszako vd. (2023), Si'nin yaprak yüzeyine uygulandığında yapısal bütünlüğü artırarak su tutulumunu desteklediğini ve fotosentetik etkinliği dolaylı olarak artırdığını bildirmiştir. Verma vd. (2021) yapraktan uygulanan Si ile kuraklık sonrası RWC değerlerinde artış

olması yapraktan uygulanan silikonun etkisine dikkat çekmiştir. Kuraklık sırasında yapraklara Si püskürtülmesiyle prolin kaybındaki azalmanın RWC'yi iyileştirdiği belirlenmiştir (Verma vd., 2021).

Oszako vd. (2023), çalışmasında Si uygulamasını yapraktan gerçekleştirilmişken, bu çalışmada silikon bazlı gübre granül formunda toprağa uygulanmıştır. Her iki uygulama yöntemi de olumlu etkiler sağlamış olmakla birlikte, yapraktan uygulamalarda Si'nin doğrudan fotosentetik organlara ulaşması nedeniyle daha kısa sürede fizyolojik tepki alındığı Oszako vd. (2023) tarafından belirtilmiştir. Öte yandan, toprak yoluyla uygulanan Si'nin özellikle kök gelişimi ve su alım kapasitesini desteklemesi açısından uzun vadede daha kalıcı ve etkili faydalar sağlayabileceği ifade edilmektedir (Vaculík vd., 2020).

Görsel değerlendirme bulguları, F_v/F_m değerlerinde gözlemlenen eğilimleri güçlü biçimde desteklemektedir. Özellikle 5 g ve 10 g silikon bazlı gübre dozları, görsel olarak da en sağlıklı fidanların elde edilmesini sağlamıştır. Buna karşılık, 30 g doz uygulamasının görsel değerlendirme bakımından da daha düşük performans göstermesi, yüksek dozun potansiyel olarak olumsuz etkilerini destekleyen bir bulgu niteliğindedir.

Mayıs (gübreleme başlangıcı), haziran (gübrelemeden 1 ay sonra) ve temmuz (kuraklık sonrası) aylarında kök boğazı çapı, boy, artım ve gürbüzlük indisi değerleri açısından silikon dozları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu durum, kısa süreli gübreleme ve kuraklık dönemi boyunca silikonun genel büyümeyi belirgin şekilde etkilemediğini göstermektedir. Büyüme artımları incelendiğinde, Haziran-Mayıs döneminde (gübrelemeden sonraki ilk ay, kuraklık öncesi), 30 g doz en yüksek çap artımını (0,53 mm) gösterirken, 10 g doz en yüksek boy artımını (3,3 cm) sağlamıştır. Temmuz-haziran kuraklık döneminde ise, 15 g doz en yüksek çap artımını (0,42 mm) ve 5 g doz en yüksek boy artımını (1,6 cm) göstermiştir, ancak bu artımlar doz grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık oluşturmamıştır. Oszako vd. (2023), silikon uygulamasının (yapraktan) *Pinus sylvestris* fidanlarında boy gelişimi üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını, ancak çap gelişimi üzerinde olumlu bir etki sağladığını belirlemiştir. Aynı çalışmada, *Quercus robur* fidanlarında ise silikon uygulamasının (yapraktan) boy artışı üzerinde etkili olduğu, ancak çap gelişimi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (Oszako vd., 2023).

Yahyaoglu ve Genç (2007)'e göre gürbüzlük indisinin $GI < 5$ 'ten küçük olması kaliteli fidana işaret etmektedir. Heras-Marcial vd. (2023), farklı dozlarda kontrollü salınımlı gübrelerin (örneğin, Multicote Agri) *Pinus patula* fidanlarının kök boğazı çapı, boy ve gürbüzlük indisi üzerinde olumlu etkileri olduğunu ifade etmektedir. Ancak bu çalışmada, sahil çamı fidanlarında silikon uygulamasının GI değerini değiştirmediği bulunmuştur.

5. Sonuç

Bu çalışma, sahil çamı fidanlarında farklı dozlarda uygulanan silikon bazlı gübrelemenin kuraklık stresine karşı fizyolojik ve morfolojik yanıtlar üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle orta düzeyde uygulanan silikon bazlı gübre dozlarının genel olarak (5–15 g) kuraklık koşullarında fotosentetik performansı artırarak (daha yüksek F_v/F_m , F_o ve F_m değerleri),

bağıl su ve nem içeriğini artırarak ve görsel stres semptomlarını azaltarak fidanların kuraklığa toleransını anlamlı düzeyde yükselttiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, sahil çamı gibi ekonomik ve ekolojik açıdan önemli bir türde, silisyum bazlı gübre uygulamasının, kuraklık gibi çevresel stres faktörlerine karşı etkili bir destekleyici strateji olabileceğini göstermektedir. Ancak elde edilen sonuçlar kısa vadeli olup, daha uzun bir gözlem süresi ile doğrulanması gerekmektedir. Fidanlık ve ağaçlandırma tekniklerinde daha nitelikli çıkarımların yapılabilmesi için, en az iki veya üç büyüme mevsimi süresince yapılacak ek arazi denemelerine ihtiyaç vardır. Bu tür çalışmalar, silisyumun ağaçlandırmalarda ve fidanlık uygulamalarında sürdürülebilir bir stres yönetimi aracı olarak kullanılabileceğini ortaya koyabilir.

Açıklama

Göktürk Orman Fidanlık Şefi Emre ÜLKER, Orman Yüksek Mühendisi Güven KAVRAZ ve fidanlık çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim. Almina gübresini bize sağladığı ve bu çalışmayı yürütme fırsatı sunduğu için Sayın Serhat KAYA'ya içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Yüksek lisans öğrencilerimden Sayın Ömer Buğra AVCI'ya çalışma boyunca sağladıkları teknik destekleri için minnettarım. Ayrıca, bu çalışmaya ilişkin değerli görüş ve yorumlarını paylaşan anonim hakemlere katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Abad Viñas, R., Caudullo, G., Oliveira, S., de Rigo, D., 2016. *Pinus pinaster* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: European Atlas of Forest Tree Species (Eds: San-Miguel-Ayan, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A.), Publications Office of the EU, Luxembourg, pp. 128-129.
- Ahammed, G.J., Yang, Y., 2021. Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165: 200-206.
- Ahmad, S., Kamran, M., Ding, R., Meng, X., Wang, H., Ahmad, I., Fahad, S., Han, Q., 2019. Exogenous melatonin confers drought stress by promoting plant growth, photosynthetic capacity and antioxidant defense system of maize seedlings. *PeerJ*, 7:e7793. <https://doi.org/10.7717/peerj.7793>
- Ahmed, M., Kamran, M., Asif, M., Qureshi, R., 2014. Growth, nutrient accumulation, and drought tolerance in crop plants with silicon application: A review. *Sustainability*, 14(8): 4525. <https://doi.org/10.3390/su14084525>
- Allen, C. D., Breshears, D. D., McDowell, N. G., 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8): 1-55.
- Asgari, F., Majd, A., Jonoubi, P., Najafi, F., 2018. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant physiology and biochemistry*, 127: 152-160.
- Ayan, S., 2007. Kaplı Fidan Üretimi. Fidan Standardizasyonu: Standart Fidan Yetiştirme Biyolojik ve Teknik Esasları (Ed., Yahyaoglu, Z., Genç, M.), Musa Genç Kitaplığı Bilimsel Yayınlar, ss: 301-352.
- Balekoglu, S., Caliskan, S., Dirik, H., Rosner, S., 2023a. Response to drought stress differs among *Pinus pinea* provenances. *Forest Ecology and Management*, 531, 120779.
- Balekoglu, S., Caliskan, S., Makineci, E., Dirik, H., 2023b. An experimental assessment of carbon and nitrogen allocation in *Pinus pinea* populations under drought stress and rewetting treatment. *Environmental and Experimental Botany*, 210, 105334.
- Barrs, H.D., Weatherley, P.E., 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15(3): 413-428.
- Boydak, M., Çalışkan, S., 2021. Ağaçlandırma. Ormançılığı Geliştirme ve Orman Yangınları ile Mücadele Hizmetlerini Destekleme Vakfı (OGEM-VAK) Yayını, CTA Tanıtım Baskı İstanbul.
- Boydak, M., Çalışkan, S., 2015. Afforestation in Arid and Semi-Arid Regions. The General Directorate of Combating Desertification and Erosion Publication, Ankara.
- Camarero, J. J., Gazol, A., Tardif, J. C., Conciatori, F., 2015. Attributing forest responses to global-change drivers: limited evidence of a CO₂-fertilization effect in Iberian pine growth. *Journal of Biogeography*, 42(11): 2220-2233.
- Caminero, L., Génova, M., Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., 2018. Growth responses to climate and drought at the southernmost European limit of Mediterranean *Pinus pinaster* forests. *Dendrochronologia*, 48: 20-29.
- Carneiro-Carvalho, A., Pinto, T., Gomes-Laranjo, J., Anjos, R., 2023. The potential of SiK® fertilization in the resilience of chestnut plants to drought—a biochemical study. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1120226. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1120226>.
- Chen, W., Yao, X., Cai, K., Chen, J., 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, 142: 67-76.
- Colangelo, M., Camarero, J.J., Gazol, A., Piovesan, G., Borghetti, M., Baliva, M., Gentilesca, T., Rita, A., Schettino, A., Ripullone, F., 2021. Mediterranean old-growth forests exhibit resistance to climate warming. *Science of The Total Environment*, 801: 149684.
- Coskun, D., Britto, D.T., Huynh, W. Q., Kronzucker, H.J., 2016. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 7: 1072.
- Çalışkan, S., Balekoğlu, S., Dirik, H.G., 2023. Orman ağaçlarında kuraklık stresi. İklim Değişikliği Orman Ekosistemlerinde Etkileri ve Yönetimi (Ed., Ayan, S.), Palme Yayın Dağıtım, Ankara, ss: 29-51.
- Çalışkan, S., Boydak, M., 2017. Afforestation of arid and semiarid ecosystems in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 41:317-330.
- Çiçek, N., Cengil, B., Yucedag, C., 2022. Bitki besin elementlerinin önemi ve orman fidanlıklarında gübrelemenin rolü. *Theoretical and Applied Forestry*, 2(1): 26-32.
- Deligöz, A., 2009. Anadolu karaçamı (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe) fidanlarında sulama programının hazırlanmasında bitki su potansiyeli değerlerinin kullanımı. Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 10(2): 51-65.
- Giorgi, F., Lionello, P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2): 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Guntzer, F., Keller, C., Meunier, J.D., 2012. Benefits of plant silicon for crops: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32: 201-213.
- Güner, Ş., Çömez, A., Karataş, R., Genç, M., 2012. Yetiştirme sıklığının Anadolu karaçamı fidanlarının dikim başarısına etkisi. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 62(2): 89-96.
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D.D., Allen, C. D., 2022. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1):1761.
- Hartmann, H., Bastos, A., Das, A. J., Esquivel-Muelbert, A., Hammond, W. M., Martinez-Vilalta, J., McDowell, N.G., Powers, J.S., Pugh, T.A.M., Ruthrof, K.X., Allen, C.D., 2022. Climate change risks to global forest health: emergence of unexpected events of elevated tree mortality worldwide. *Annual Review of Plant Biology*, 73(1): 673-702.

- Heras-Marcial, M., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., Rodríguez-Trejo, D.A., 2023. Influence of fertilization on survival and growth of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. under nursery and field conditions. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 29(1): 3-14.
- Hussain, H.A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S.A., Men, S., Wang, L., 2018. Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in Plant Science*, 9: 393.
- Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., Meyer, L. A. (2007). Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC). Cambridge University Press.
- Kalaji, H.M., Bąba, W., Gediga, K., Goltsev, V., Samborska, I. A., Cetner, M.D., Dimitrova, S., Piszcz, U., Bielecki, K., Karmowska, K., Dankov, K., Kompała-Bąba, A., 2018. Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants. *Photosynthesis Research*, 136: 329-343.
- Kemp, L., Xu, C., Depledge, J., Ebi, K. L., Gibbins, G., Kohler, T. A., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H.J., Steffen, W., Lenton, T. M., 2022. Climate endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(34): e2108146119.
- Korolyova, N., Buechling, A., Duraciová, R., Zabihi, K., Turc'ani, M., Svoboda, M., Blaha, J., Swarts, K., Poláč'ek, M., Hradecký, J., Červenka, J., Nmc'ák, P., Schlyter, F., Jakuš, R., 2022. The last trees standing: Climate modulates tree survival factors during a prolonged bark beetle outbreak in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 322: 109025.
- Liu, H., Sultan, M.A.R.F., Liu, X., Zhang, J., Yu, F., Zhao, H., 2015. Physiological and comparative proteomic analysis reveals different drought responses in roots and leaves of drought tolerant wild wheat (*Triticum boeoticum*). *Plos One* 10: e0121852.
- Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y., Guo, T., 2016. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35: 1–10.
- Manivannan, A., Ahn, Y.K., 2017. Silicon regulates potential genes involved in major physiological processes in plants to combat stress. *Frontiers in Plant Science*, 8:1346.
- Maxwell, K., Johnson, G. N., 2000. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345): 659–668.
- McDowell, N.G., Allen, C.D., 2015. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change*, 5:669–672.
- Meehl, G.A., Tebaldi, C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st Century. *Science*, 305(5686):994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Murchie, E.H., Lawson, T., 2013. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(13): 3983–3998.
- Oszako, T., Kowalczyk, K., Zalewska, W., Kukina, O., Nowakowska, J. A., Rutkiewicz, A., Bakier, S., Borowik, P., 2023. Feasibility of using a silicon preparation to promote growth of forest seedlings: application to pine (*Pinus sylvestris*) and Oak (*Quercus robur*). *Forests*, 14(3): 1-18.
- Perry, A., Beaton, J. K., Stockan, J. A., Iason, G. R., Cottrell, J. E., Cavers, S., 2025. Tree nursery environments and their effect on early trait variation. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpaf011: 1-12.
- Rios, J.J., Martínez-Ballesta, M.C., Ruiz, J.M., Blasco, B., Carvajal, M., 2017. Siliconmediated improvement in plant salinity tolerance: the role of aquaporins. *Frontiers in Plant Science*, 8: 948.
- Sanda, S., Yoshida, K., Kumano, M., Kawamura, T., Munekage, Y.N., Akashi, K., Yokota, A., 2011. Responses of the photosynthetic electron transport system to excess light energy caused by water deficit in wild watermelon. *Physiologia Plantarum*, 142: 247–264.
- Semenova, N. A., Burmistrov, D. E., Shumeyko, S. A., Gudkov, S. V., 2024. Fertilizers based on nanoparticles as sources of macro- and microelements for plant crop growth: A review. *Agronomy*, 14(8): 1646.
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., Ahmad, P., 2021. Silicon and plants: current knowledge and future prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(3): 906-925.
- Tai, X., Mackay, D.S., Ewers, B.E., Parsekian, A.D., Beverly, D., Speckman, H., Brookd, P.D., Anderegg, W.R., 2019. Plant hydraulic stress explained tree mortality and tree size explained beetle attack in a mixed conifer forest. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 124(11): 3555-3568.
- Vaculík, M., Lukačová, Z., Bokor, B., Martinka, M., Tripathi, D. K., Lux, A., 2020. Alleviation mechanisms of metal (loid) stress in plants by silicon: a review. *Journal of Experimental Botany*, 71(21): 6744-6757.
- Verma, K. K., Song, X. P., Zeng, Y., Guo, D. J., Singh, M., Rajput, V. D., ... Li, Y. R., 2021. Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 166: 582-592.
- Verma, K.K., Song, X.-P., Li, D.M., Singh, M., Rajput, V.D., Malviya, M.K., Minkina, T., Singh, R.K., Singh, P., Li, Y.R., 2020. Interactive role of silicon and plant–rhizobacteria mitigating abiotic stresses: a new approach for sustainable agriculture and climate change. *Plants*, 9: 1055. <https://doi.org/10.3390/plants9091055>
- Vilela, R.D., Bezerra, B.K.L., Froehlich, A., Endres, L., 2017. Antioxidant system is essential to increase drought tolerance of sugarcane. *Annals of Applied Biology*, 171:451–463.
- Wang, S., Liu, P., Chen, D., Yin, L., Li, H., Deng, X., 2015. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. *Frontiers in Plant Science*, 6, 759: 1-10
- Wang, Y., Zhang, B., Jiang, D., Chen, G., 2019. Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 158: 117–124.
- Xu, J., Guo, L., Liu, L., 2022. Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 201:104974.
- Yahyaoglu, Z., Genç, M., 2007. Fidan Standardizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Orman Fakültesi Yayını, Isparta.
- Yan, G., Nikolic, M., Ye, M., Xiao, Z., Liang, Y., 2018. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 17, 2138–2150. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62037-4).
- Yavas, I., Aydın, U.N.A.Y., 2017. The role of silicon under biotic and abiotic stress conditions. *Turkish Journal of Agricultural Research*, 4: 204–209.
- Younis, A.A., Khattab, H., Emam, M.M., 2020. Impacts of silicon and silicon nanoparticles on leaf ultrastructure and TaPIP1 and TaNIP2 gene expressions in heat stressed wheat seedlings. *Biologia Plantarum*, 64(1): 343-352
- Zhou, Y., Lam, H.M., Zhang, J., 2007. Inhibition of photosynthesis and energy dissipation induced by water and high light stresses in rice. *Journal of Experimental Botany*, 58: 1207–1217.
- Zhu, Y., Gong, H., 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34: 455–472. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>