

Arpada Tuz Stresinin Hafifletilmesinde Mikorizanın Etkisi

Çiğdem KÜÇÜK^{1*}, Hala AKSOY²

Öz

Bu çalışma, arpa tuz stresini iyileştirmede mikorizanın rolünü belirlemek amacıyla serada yürütülmüştür. Denemede ticari olarak satılan mikoriza kullanılmıştır. Bitkilere üç tuz düzeyi (0, 100 ve 200 mM NaCl) sulama suyu ile uygulanmış ve ekimden 8 hafta sonra bitkiler hasat edilmiştir. Farklı tuz düzeyleri ile sulanan mikoriza ile aşıllı arpa bitki boyu, yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları, kök uzunluğu, yaprakların klorofil ve prolin içerikleri, kök bölgesi enzimlerinden dehidrogenaz ve alkalın fosfataz enzim aktiviteleri incelenmiştir. Tuz dozlarının arpa gelişimi üzerine olumsuz etkileri belirlenmiştir. Mikoriza aşılmasının tuzun neden olduğu olumsuz etkiyi azalttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikoriza, arpa (*Hordeum vulgare* L.), Tuzluluk.

The Effect of Mycorrhiza in Alleviating Salt Stress in Barley

Abstract

In this study was conducted in greenhouse to determine the role of mycorrhiza in improving salt stress in barley. Commercially available mycorrhiza was used in the experiment. Three salt levels (0, 100 and 200 mM NaCl) were applied to the plants with irrigation water and the plants were harvested 8 weeks after planting. Plant height, plant and root dry weights, root length, chlorophyll and proline contents of leaves, dehydrogenase and alkaline phosphatase enzyme activities from root zone enzymes were investigated. The negative effects of salt doses on barley growth were determined. It has been determined that mycorrhiza inoculation reduces the negative effect caused by salt.

Keywords: Mycorrhiza, Barley (*Hordeum vulgare* L.), Salinity.

¹ Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji, Şanlıurfa, Türkiye, ckucuk@harran.edu.tr

² Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji, Şanlıurfa, Türkiye, halaaljumaa93@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 07.11.2023

Kabul/Accepted: 07.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Son yıllarda yoğun olarak hissedilen iklim değişikliği; sıcaklık artışı, yağış oranının düşük olması, artan tuzlanma ve toprak erozyonu, dünya çapında tarım ve gıda güvenliği üzerinde baskı oluşturmaktadır (Ait-El-Mokhtar ve ark., 2020). İklim değişikliği bitkisel üretimi olumsuz etkilemektedir (Hasanuzzaman ve ark., 2020). 2050 yılında dünya nüfusunun 9 milyarı aşacağı tahmin edildiğinden, gıda talebinde iki katı artması beklenmektedir (Lynch ve ark., 2021). Tarımın bu talebi karşılaması ve iklim tehlikeleriyle baş etmesi gerekmektedir (Lynch ve ark., 2021). Toprak tuzluluğu, arazi verimliliğini tehdit eden küresel bir sorundur, 2050 yılına kadar tüm ekilebilir alanların yaklaşık % 50'sinin tuzluluktan etkileneceği tahmin edilmektedir (Butcher ve ark., 2016). Tarım alanlarında bilinçsiz sulama ve tuzlu su kullanımı, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde toprağın tuzlanmasına yol açan faktörler arasında yer almaktadır (Malhi ve ark., 2021). Toprağın tuzlanması bitki büyümesini ve verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Tuzluluk bitkilerde; yaprak su potansiyelinin azalmasına, iyonik dengesizliğe ve hücre hasarlarına neden olabildiği gibi, reaktif oksijen türlerinin (ROS) daha fazla birikmesine neden olmakta, protein sentezini, enzimatik aktiviteleri ve fotosentezi olumsuz etkilemektedir (Ait-El-Mokhtar ve ark., 2019). Tuzlu toprakların verimsizliği; tuzluluğun toksisitesine, organik madde ve N, P, K başta olmak üzere minerallerin düşük bulunabilirliğine bağlanabilir (Ben-Laouane ve ark., 2021). Bu nedenle, ekonomik kayıpların üstesinden gelmek, gıda güvenliğini artırmak ve tarımın sürdürülebilirliğini sağlamak için özellikle de tahılların tuzluluğa verdiği tepkileri anlamak önemlidir (Mukhopadhyay ve ark., 2021).

Ülkemizde ekiliş alanı ve üretim miktarı bakımından 2.sırada olan arpa hemen hemen her yerde yetiştirilmekte olup; İç Anadolu ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi özellikle; Şanlıurfa, Diyarbakır ve Mardin'de arpa tarımı Türkiye'nin toplam arpa tarımı yapılan alanların yaklaşık % 60'nı oluşturmaktadır (TUİK, 2020). Arpa, tahıllar arasında tuza karşı yüksek seviyede toleranslıdır. Bitkilerin çoğu gelişme dönemlerinde tuza karşı farklı toleranslılık göstermekte olup, arpanın çimlenme ve fide oluşum dönemlerinde hassas olduğu açıklanmıştır (Benlioğlu ve Özkan, 2015). Tuza dayanıklı yeni çeşitlerin piyasaya sürülmesi ve tuzluluğun bitki sağlığı üzerindeki toksik etkilerini azaltmak için geleneksel yetiştirme, bitki genetik mühendisliği kullanılarak çeşitli stratejiler geliştirilmiştir (Wani ve ark., 2020). Ancak bu tekniklerin ilerlemesi yavaş olmuştur ve stres toleransının genetik belirleyicilerinin tanımlanması ise oldukça zordur. Ayrıca bu uygulamalar çiftçiler için her zaman mali açıdan uygun olmamaktadır (Hasanuzzaman ve ark., 2020). Bunun için arbüsküler mikorizal mantarlar gibi biyostimülantların/biyogübrelerin kullanımı, bitkileri çevresel streslere karşı desteklemek için umut verici biyolojik stratejiler haline gelmiştir (Anlı ve ark., 2020; Boutasknit ve ark., 2021).

Büyüme ile ilgili işlevlerin örneğin stomatal iletkenlik, yaprak su potansiyeli, bağıl su içeriği ve CO₂ asimilasyonunun mikoriza aşılmasından etkilendiği açıklanmıştır (He ve ark., 2017). Mikoriza aşılması bitkinin kuru madde birikimini iyileştirmiş, su alımını artırmış, kuraklık ve tuzluluk gibi streslere karşı bitki tolerans kazandırmıştır. Mikorizanın çeşitli biyolojik ekosistemlerde bitki büyümesi için kullanılması, büyümenin teşvik edilmesi ve verimin arttırılmasına büyük ölçüde katkıda bulunduğu açıklanmıştır (He ve ark., 2017). Toprak tuzluluğunun, küresel gıda güvenliği için ciddi bir tehdit oluşturan ve gittikçe artan bir çevresel sorun olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Tuzluluk stresinin, bitki gelişimi ve asimilasyon oranını etkileyerek bitkilerin büyümesini baskıladığı ve bunun sonucunda ürün veriminin azaldığı bilinmektedir (Raza ve ark., 2022). Tarımı yapılan bitkilerin birçoğunun kurak koşullarda iyi bir performans gösterememesi nedeniyle, stres koşullarında üretimi yapılan bitkilerde gelişme ve verim performanslarının artırılması önemli bir çalışma alanını oluşturmaktadır. Ülkemiz tarımında önemli yere sahip olan arpanın, yetişme ortamında bulunan tuz konsantrasyonları ile mikorizanın, bitki gelişimi ve rizosferdeki bazı enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri sera koşullarında incelenmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Materyal

Çalışmada bitki materyali olarak; Şanlıurfa'da tarımı yaygın olarak yapılan arpa (*Hordeum vulgare* L.) Akhisar-98 çeşidi kullanılmıştır. Mikorizal fungus ise ticari gübre olarak satılan bayiden temin edilmiştir.

2.2. Metod

Arpa tohumları %10 sodyum hipokloritte 5 dakika yüzey sterilizasyonundan sonra distile su ile 5 kez yıkanmış, filtre kağıtları üzerinde tohumların fazla suları alınmıştır. 121 °C'de 1 atm basınçta 15 dakika otoklavda 3 gün arka arkaya steril edilen toprak, 2 kg'lık saksılara doldurulmuştur. Mikoriza ile aşılınmamış (kontrol) ve mikoriza uygulaması ile bunların NaCl kombinasyonları (0,100, 200 mM NaCl) uygulanmıştır. Tesadüf parselleri deneme desenine göre 3 tekerrürlü olarak serada kurulan denemede kullanılan toprak; killi bünyeye sahip olup; 7.71 pH, %0.07 N, %1.62 organik madde içeriğine sahip olup kireç % 22.08 ve EC 0.86 ds/m'dir. Mikorizal fungus ekim öncesi tohum yatağının altına gelecek şekilde saksılara verilmiş (5g/kg), yüzey sterilizasyonu yapılan tohumlar ekilmiştir. Osmotik şoktan kaçınmak için, tuzun farklı dozları çimlenme sonrası sulama suyu ile verilmiştir. Çimleninceye kadar çeşme suyu ile, çimlendikten sonra gelişme süresince

bitkiler, farklı konsantrasyonlarda tuz içeren çeşme suyu ile sulanmıştır. Çimlendikten 8 hafta sonunda hasat edilmiştir.

2.2.1. Araştırmada incelenen özellikler

Bitki boyu: Kök boğazından bitkinin en uç noktası arasındaki mesafe ölçülmüş, cm olarak kaydedilmiştir.

Kök uzunluğu: Hasat sonunda kökler topraktan arındırılmak için önce çeşme suyu ile daha sonra distile su ile yıkanmış, uzunlukları cetvelle ölçülmüştür.

Yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları: Hasat sonrasında yeşil aksam ve kökler kesilerek hassas terazide tartılmış, yeşil aksam ve kök yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Tartılan örnekler kese kağıtları içerisinde sabit ağırlığa gelinceye kadar 70 °C’de kurutulmuş, tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

Klorofil tayini: Hasat sırasında 2 g taze yaprak örneği 5 ml aseton:su (%80 v/v) karışımında homojenize edilerek, filtreden geçirilmiştir. Filtrat, 663 nm ve 645 nm’de spektrofotometrede okunmuştur. Toplam klorofil mg/l olarak hesaplanmıştır (Arnon 1949).

Yaprakta Prolin İçeriği (mg prolin/g yaprak):Yaprak örnekleri (0.5 g) üzerine % 3’lük sülfosalisilik asit ilave edilip ezilmiştir. Filtre kağıdından süzülen içeriğe; asit ninhidrin ve asetik asit eklenmiştir. İçerik 1 saat 80°C’de su banyosunda tutulduktan sonra tüpler buz banyosunda bekletilmiştir. İçeriğe toluen eklenip vortekste karıştırılmıştır. Süpernatantların, 520 nm’de okunmuştur (Bates ve ark., 1973).

Kök bölgesi Dehidrogenaz aktivite: Hasat sırasında kök bölgesinden alınan toprak örnekleri üzerine glikoz ve 2,3,5-trifeniltetrazolium klorid eklenmiş, 1 gün boyunca 25 °C’de inkübe edilmiştir (Pepper 1995). İçerik santrifüjlendikten sonra elde edilen süpernatant standart trifenil formazan serisine karşılık 485 nm’de spektrofotometrede okunmuştur (Pepper, 1995).

Alkalin fosfataz aktivite: Hasat sırasında ayrı ayrı her bir uygulamanın kök bölgesinden alınan toprak örneğine (1g) üzerine tolüen, fosfat tamponu (pH 8), p-nitrofenilfosfat eklenmiş, 1 saat 37°C de inkübe edilmiştir. Süre sonunda açığa p-nitrofenol, standart (PNPP’den hazırlanan) kullanılarak, 410 nm’de spektrofotometre kullanılarak belirlenmiştir (Tabatabai ve Bremner, 1969).

İstatistik analiz: Elde edilen sonuçlar JMP istatistik programında analiz edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Tuz stresi koşullarında, mikorizal fungi stresin temel biyoyileştiricisi olarak işlev görmüş, bitkileri stresin olası zararlarına karşı koruduğu belirtilmiştir (Zong ve ark., 2023). Mikorizal aşılamanın tuz stresine karşı bitkilerin dirençliliğini arttırdığı yapılan çalışmada da rapor edilmiştir

(Zong ve ark., 2023). Mikorizal mantarların, konakçı bitkilerin stresli koşullar altında gelişmesini kolaylaştırarak fotosentez oranının artmasına yardımcı oldukları açıklanmıştır (Birhane ve ark., 2012). Bitki türlerinin yaklaşık % 90'ı arbusküler mikoriza ile ortaklık kurabilmektedir (Zong ve ark., 2023). Mikoriza tarafından bitki kökleri ile hif ağının oluşturulması, köklerin geniş bir toprak yüzey alanına erişimini önemli ölçüde artırarak bitki büyümesinde iyileşmeye neden olduğu belirlenmiştir (Bowles ve ark., 2016). Tuz stresinin uygulanması arpanın büyüme parametrelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, mikoriza aşılammış bitkilerde tuz stresine maruz kalma, mikoriza uygulanmış bitkilerle karşılaştırıldığında arpanın kuru ağırlığını azaltmıştır. Mikoriza uygulaması, yeşil aksam kuru ağırlığını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Maksimum iyileşme, orta (100 mM) ve yüksek tuzlulukta (200 mM) bitkilerle karşılaştırıldığında yeşil aksam kuru ağırlığını sırasıyla %52.5 ve %19.2 oranında arttırmıştır. Benzer şekilde mikoriza uygulamaları tuz stresini hafifletmiş kök ağırlığını kontrole göre arttırmıştır (Şekil 1). Arpa kök kuru ağırlığı en yüksek mikoriza ve 100 mM NaCl'nin birlikte uygulanması ile alınırken, en düşük kök kuru ağırlığı ise mikoriza uygulanmayan 200 mM NaCl uygulamasında belirlenmiştir (Tablo 1). Mikoriza uygulamaları ve farklı NaCl dozlarının arpa kök ağırlıkları üzerine etkileri farklılık göstermiştir.

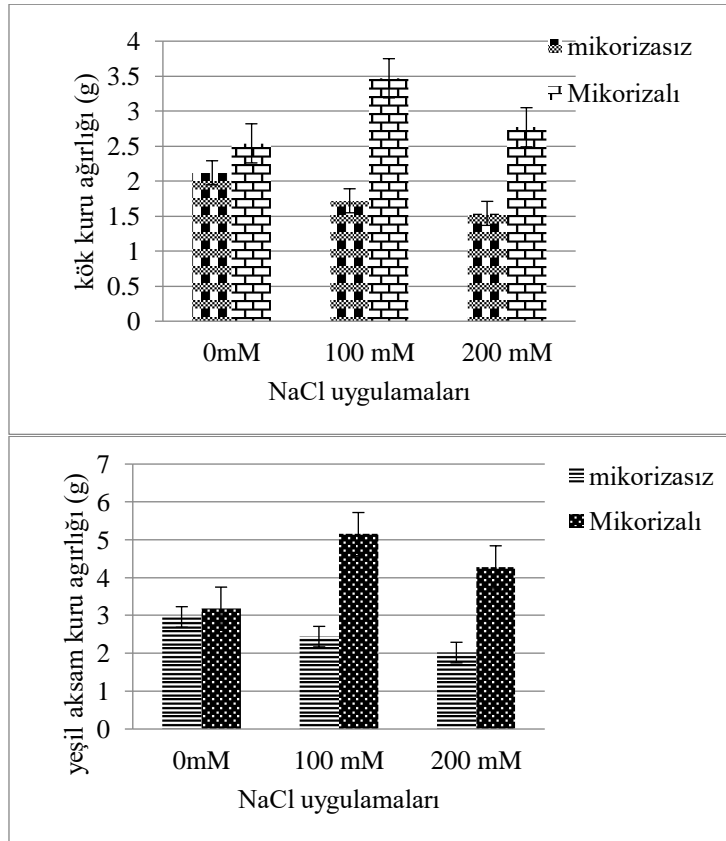
Tablo 1. Mikoriza ve farklı NaCl dozlarının arpanın bazı özelliklerine etkileri.

| NaCl (mM) | *Mikoriza uygulaması | Yeşil aksam kuru ağırlığı (g/bitki) | Kök kuru ağırlığı (g/bitki) | Bitki boyu (cm) | Kök uzunluğu (cm) | Toplam klorofil (mg/g taze ağı.) | Prolin (mg/g taze ağı.) |
|-------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 0 | -M | 2.96c [#] | 2.12c | 25.3b | 8.7e | 5.09c | 0.98e |
| | +M | 2.93c | 2.64b | 31a | 20.7a | 5.89a | 1.52d |
| 100 | -M | 2.78c | 1.89d | 32.3a | 13.3d | 2.79e | 2.29c |
| | +M | 6.18a | 3.47a | 31.7a | 17.7bc | 5.70b | 3.78a |
| 200 | -M | 2.76c | 1.80d | 10.3c | 16c | 2.51f | 3.19b |
| | +M | 3.63b | 2.77b | 26b | 8.6e | 4.42d | 3.79a |
| LSD(<0.001) | | 0.246 | 0.148 | 4.612 | 2.258 | 0.105 | 0.102 |

*-M: mikoriza uygulanmamış, +M: mikoriza uygulanmış; [#]Farklı harf ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark önemlidir (p≤0.05)

Yapılan bir çalışmada; tuzlu koşullar altında; mikoriza ile aşılammış *Allium sativum* (soğan) bitkilerinin yaprak alanı indeksi, yeşil ve kuru aksam ağırlıklarında artış belirlenmiştir (Borde ve ark., 2010). Mikorizanın bitkiler üzerindeki olumlu etkisinin tuzluluk stresine bağlı olmadığını, faydalı etkilerinin tuz stresinin varlığına bakılmaksızın ortaya çıktığı yapılan bir çalışmada belirtilmiştir (Wang ve ark., 2018). Tuz stresine maruz kalan bitkilerde; sodyum, klorür gibi spesifik iyonların toksik etkileri fotosentez, solunum, protein sentezi gibi normal fizyolojik süreçleri bozmakta, bitkilerde Na⁺ ve Cl⁻'nin yüksek alımı ile besin dengesizliği meydana geldiğinden mikorizal aşılama tuzun olumsuz etkisini azaltmaktadır (Wang ve ark., 2018). Buna karşın özellikle stres koşullarında mikorizanın, köklere göre daha iyi topraktan yararlanılabilecek P alımını artırdığını ve böylece bitki

gelişimine katkı sağladığı açıklanmıştır (Chandrasekaran, 2022). Bu çalışmada da; 100 mM NaCl ve mikorizanın birlikte uygulanması; tuz stresi uygulanmamış mikoriza aşılmalı bitkilerle karşılaştırıldığında yeşil aksam ve kök kuru ağırlığını artırmıştır. Çalışmamızda, tuz stresine maruz kalan arpanın bitki boyu mikoriza aşılması ile yüksek tuz düzeyinde artmıştır (Tablo 1). Tuz stresine maruz kalan bitkilerle karşılaştırıldığında mikoriza uygulamasının bitki boyunda artış olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar, mikoriza ile aşılınmış narenciye ağaçlarında yaprak alanının arttığını açıklamışlardır (Alqarawi ve ark., 2014). Kumar ve ark. (2022) ise mikoriza aşılmasının baklanın tuz stresine karşı toleransını arttırdığını, bitki kuru aksam ağırlığını ve bitki boyunun mikoriza ile aşılı olanlarda daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacıların bulguları bizim sonuçlarımızı desteklemektedir. Sonuçlarımız, arpada mikoriza uygulamasının tuz stresini bitki büyümesi üzerinde olumlu ve önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Tuzluluk stresinin fotoassimilasyonu azaltarak, fotosentetik pigmentlerin azalmasına, dolayısıyla bitki gelişiminin azalmasına neden olduğu bildirilmiştir (Abeer ve ark., 2016). Tuzluluk bitkisel üretimi, verimi azaltmaktadır. Mikorizal simbiyoz, farklı çevresel koşullara sahip çevrelerde bitkilere yardımcı olmaktadır (Beltrano ve ark., 2013). Mikorizal kolonizasyonun bitki gelişimini arttırdığı rapor edilmiştir (Beltrano ve ark., 2013).



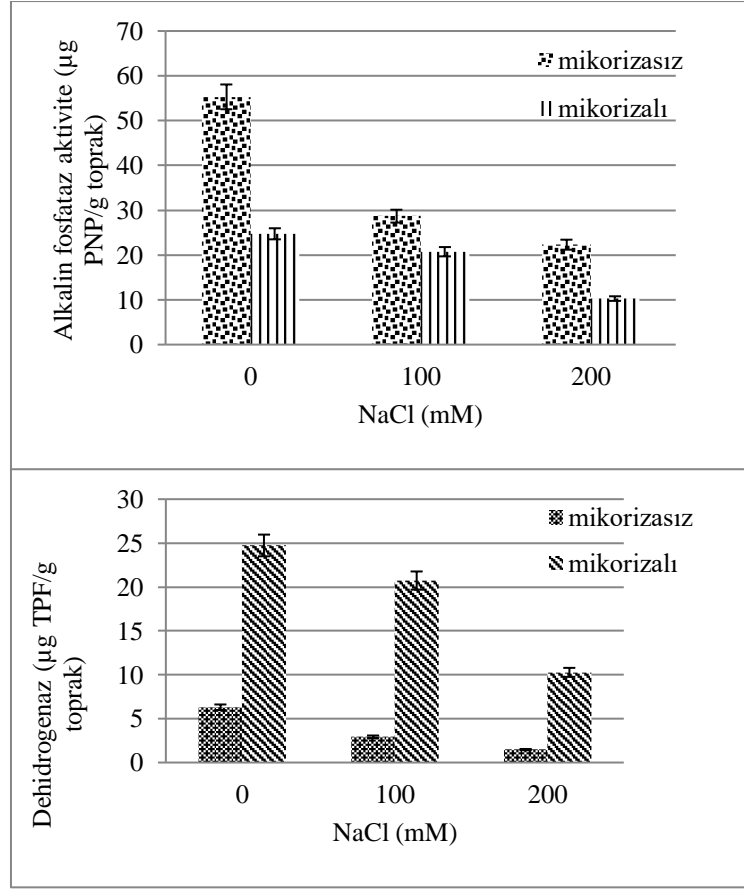
Şekil 1. Uygulamaların yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları üzerine etkileri

G.intraradices'in biber köklerinde kolonize olarak artan tuz düzeyine karşı biberin tuza toleranslılığını arttırdığı açıklanmıştır (Beltrano ve ark., 2013). Çeşitli araştırmacılar tarafından da

desteklendiği gibi (Ait-El-Mokhtar ve ark., 2019; Beltrano ve ark., 2013; Hashem ve ark., 2018), çalışmamızda mikoriza inokulasyonu ile klorofil içeriğinin arttığı belirlenmiştir (Tablo 1). Fakat araştırmacılar, farklı tuz düzeylerinde klorofil içeriklerinde farklı sonuçlar almışlar; farklılığın bitki türüne, tuzun uygulama dozuna göre değiştiğini açıklamışlardır. Mikorizal inokulasyonunun bakla (*Vicia faba* L.) (Hashem ve ark., 2014) ve *Sesbania sesban*'da (Abd-Allah ve ark., 2015) klorofil içeriklerini arttırdığı rapor edilmiştir. Mikorizanın klorofil içeriğini arttırması, mikorizal inokulasyon yapılan bitkilerdeki klorofil sentezinde magnezyum içeriğinin yüksek olmasına bağlanmıştır (Hashem ve ark., 2018). Mikorizal simbiyoz, antosiyaninlerin, klorofillerin, karotenoidlerin, toplam çözünür fenoliklerin, tokoferollerin ve çeşitli mineral besin maddelerinin birikmesine neden olmuştur (Baslam ve ark., 2011). Mikoriza uygulamaları ve tuz dozlarının arpa klorofil içeriğine etkileri Tablo 1'de verilmiştir. Mikoriza uygulaması, mikorizasız uygulamalara göre bitkide klorofil içeriğini arttırmıştır. Tuz dozunun artması ile klorofil içeriği azalmıştır. Savunma stratejisi olarak bazı bitkiler, hücrelerin osmatik potansiyelinin düzenlenmesiyle tuzluluğa direnç gösterirler. Bu bitkiler, yüksek tuz düzeylerinde prolin, betain, çözülebilir şeker veya aminoasit gibi düşük molekül ağırlıklı bileşikler depolarlar, stressiz koşullarda bu düşük molekül ağırlıklı bileşikler genellikle düşük konsantrasyonlarda bulunurlar (Beltrano ve ark., 2013). Sonuçlarımızdan da görüldüğü gibi, tuz stresine maruz kalan arpada prolin depolanmasının artması, Benhassaini ve ark. (2012) tarafından *Pictacia atlantica*'da, Ünal ve ark. (2014) tarafından arpada ve Abd-Allah ve ark. (2015) tarafından *Sesbania sesban*'da elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Tablo 1'de görüldüğü gibi; prolin içeriği uygulanan tuzun artan dozu ile artış göstermiştir. Stresli koşullarda, prolin depolanmasının aminoasit degradasyonu ve gen ekspresyonu kadar prolin metabolizmasının da etkilenmesinin sonucudur. Bitkiler stresli koşullara maruz kaldıklarında, prolin sentezleyen enzimlerin aktiviteleri düşmektedir (Abeer ve ark., 2016; Khan ve ark., 2015). Çalışmamızda, prolin içeriği mikorizalı ve mikorizasız bitkilerde tuz stresi ortamında artmıştır. Prolinin artması tuz stresi ile ilişkilidir. Tuz stresinde prolin birikmesi, dış çevre ile stoslün osmatik basıncını dengeler, hücreyi korur. Prolin depolanması ve tuz toleransı arasında pozitif korelasyon Sousa ve ark. (2022) tarafından da desteklenmiştir. Prolin koruyucu enzim aktivitesi olarak düşünülebilir. Ozmolitin depolanmasının membran yapısını koruduğu ve ROS'un neden olacağı zararı azalttığı da bildirilmiştir (Ahanger ve ark., 2015; Alqarawi ve ark., 2014).

Toprak enzimleri toprak mikroorganizmaları tarafından salgılanır (Black 1982). Toprak biyokimyasal reaksiyonlarında katalizör görevi görürler ve topraktaki birçok önemli biyokimyasal süreçte yer alırlar (Ai ve ark., 2015). Başka bir deyişle, toprak enzimleri toprağın gelişimi ve değişiminde rol oynar ve toprak aktivitesinin önemli göstergeleridir (Du ve ark., 2018). Çalışmamızda; mikoriza ve farklı NaCl dozlarının rizosfer bölgesinde alkalın fosfataz aktiviteleri incelenmiştir. NaCl'nin artan dozları mikoriza ve mikorizasız uygulamalarda arpa rizosferinin alkalın

fosfataz enzim aktivitesini azaltmıştır (Şekil 2). En yüksek alkalin fosfataz enzim aktivitesi sadece mikorizalı uygulamadan alınmıştır. Farklı NaCl dozları ile birlikte mikoriza uygulamalarının arpa rizosfer bölgelerindeki dehidrogenaz enzim aktivitesindeki değişimler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Uygulamaların arpa rizosferindeki alkalin fosfataz aktivite ve dehidrogenaz aktiviteye etkileri.

Uygulanan NaCl dozlarının artışı ile rizosferdeki dehidrogenaz enzim aktivitesi azalmıştır. Mikoriza uygulaması, mikorizasız uygulamalar ile karşılaştırıldığında rizosferdeki dehidrogenaz aktiviteyi artırmıştır. Çalışmada, farklı dozlardaki tuz içeriği dehidrogenaz ve alkalin fosfataz enzim aktivitelerini önemli ölçüde etkilemiştir. Bunun nedeni tuzun toprak mikrobiyal popülasyonunu olumsuz etkilemesinden kaynaklanabilir, çünkü tuzluluk mikroorganizmalar için elverişsiz bir ortama neden olabilir. Singh ve ark. (2018) toprak tuzluluğunun, belirli iyonlardan (Na^+ ve Cl^-) kaynaklanan toksisiteler veya topraktaki aşırı tuzların ozmotik etkileri nedeniyle mikrobiyal popülasyonun azalmasına neden olduğu, bunun da mikrobiyal hücrelerde beslenme dengesizliklerine yol açabileceği ve sonuçta dehidrogenaz enzim üretimini azaltabileceği sonucuna varmıştır. Tuzluluğun neden olduğu su eksikliği, olağan hücresel faaliyetlerde dengesizliklere yol açmakta ve mikrobiyal hücreleri parçalamakta, topraklardaki enzim aktivitelerini düşürmektedir (Yan ve ark., 2015). Yapılan bir çalışmada; *Azotobacter* ve mikoriza uygulanmış toprakların dehidrogenaz, alkalin fosfataz, nitrojenaz ve fluorescein diasetat hidrolizinin yüksek olmasının yüksek mikrobiyal popülasyondan

kaynaklanabileceği açıklanmıştır (Aseri ve ark., 2008). Fosfataz aktivitenin yüksek olması, biyomas üretimindeki artış ve mobilize fosforun bitkiler tarafından alınmasına yardımcı olabileceği yapılan bir araştırmada açıklanmıştır (Tarafdar ve Gharu, 2006). Bu enzim aktiviteleri, toprak verimliliğinin bir ölçütü olarak değerlendirilebilir. Çünkü enzimler; karbon, azot ve fosfor gibi önemli besin elementlerinin mineralizasyonu ile ilişkilidir (Aseri ve ark., 2008).

4. Sonuç ve Öneriler

Farklı tuz dozlarının uygulandığı arpada iki mikoriza (mikorizalı ve mikorizasız) uygulamasının etkileri araştırılmıştır. Serada yürütülen denemede, tuz uygulamalarının bitki gelişimini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Mikoriza ile aşılama tuzun olumsuz etkisini azaltmıştır. Tuzun artan dozunun bitki gelişimini azalttığı, buna karşın mikoriza uygulaması ile arpa tuz stresini iyileştirdiği belirlenmiştir. Tuz stresi arpa klorofil sentezini azaltmıştır. Bununla birlikte, mikoriza inokulasyonunun tuz stresinin etkisini azalttığı görülmüştür. Uygulamaların rizosfer enzim aktivitelerinden olan alkalın fosfataz enzim aktivitesi ve dehidrogenaz enzim aktivitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Tuzun artan dozlarının rizosfer mikroorganizmaları ile de ilişkili olan enzimlerin aktivitelerini kontrole göre azalttığı tespit edilmiştir. Mikoriza uygulaması, mikorizasız uygulamalarla karşılaştırıldığında arpa rizosferinde dehidrogenaz aktivitenin arttığı saptanmıştır. Mikorizanın tuz stres koşullarında arpa üzerindeki etkisi farklılık göstermekle birlikte; 100 mM NaCl ve mikorizanın birlikte uygulanması, 200 mM NaCl ve mikoriza aşılmasına göre tuzun olumsuz etkisini azaltmada daha etkili olmuştur. Bu sonuçlar, tuz stresi altında arpa bitkisinin gelişimini artırmak için mikorizanın potansiyel kullanımını kanıtlamakta ve biyoteknolojik uygulamada bu simbiyotik birlikteliğin avantajından yararlanmanın yolunu açabilir.

Yazarların katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abd-Allah, E.F., Abeer-Hashem, A.A., Alqarawi, A.H., Bahkali, and Mona, S., (2015). Enhancing growth performance and systemic acquired resistance of medicinal plant *Sesbania sesban* (L.) Merr using arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22, 274-283.
- Abeer, H., Alterami, A.S., Alqarawi, V.E., Abd-Allah, A.A., and Egamberdieva, D., (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance basil tolerance to salt stress through improved physiological and nutritional status. *Pakistan Journal of Botany*, 46, 37-45.
- Ahanger, M. A., Aharwal, R.M., Tomar, N.S., and Shrivastana, M., (2015). Potassium induces positive changes in nitrogen metabolism and antioxidant system of oat (*Avena sativa* L. cultivar Kent). *International Journal of Plant Sciences*, 10, 211-223.
- Ai, C., Liang, G., Sun, J., He, P., Tang, S., Yang, S., Zhou, W., and Wang, X., (2015). The alleviation of acid soil stress in rice by inorganic or organic ameliorants is associated with changes in soil enzyme activity and microbial community composition. *Biology and Fertility of Soils*, 51,465–477
- Ait-El-Mokhtar, M., Laouane, R. B., Anli, M., Boutasknit, A., Wahbi, S., and Meddich, A., (2019). Use of mycorrhizal fungi in improving tolerance of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seedlings to salt stress. *Scientia Horticulturae*, 253, 429– 438.
- Ait-El-Mokhtar, M., Baslam, M., Ben Laouane, R., Anli, M., Boutasknit, A., Mitsui, T., Wahbi, S., and Meddich, A., (2020), Alleviation of detrimental effects of salt stress on date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by the application of arbuscular mycorrhizal fungi and/or compost. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4,131.
- Alqarawi, A. A., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., Alshahrani, T. S., and Huqail, A.A., (2014). Effect of salinity on moisture content, pigment system, and lipid composition in *Ephedra alata* Decne. *Acta Biologica Hungarica*, 65(1), 61–71
- Anli, M., Baslam, M., Tahiri, A., Raklami, A., Symanczik, S., Boutasknit, A., Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Toubali, S., Ait Rahou, Y., Ait Chitt, Y., Oufdou, K., Mitsui, T., Hafidi, M., and Meddich, A., (2020). Biofertilizers as strategies to improve photosynthetic apparatus, growth, and drought stress tolerance in the date palm. *Frontiers in Plant Science*, 11,1-21.
- Aseri, G. K., Jain, N., Panwar, J., Rao, A.V., and Meghwal, P.R., (2008). Biofertilizers improve plant growth, fruit yield, nutrition, metabolism and rhizosphere enzyme activities of Pomegrate (*Punica granatum* L.) in Indian Thar Desert. *Scientia Horticulturae*, 117, 130-135.
- Arnon, D.T., (1949). Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1- 15.
- Bates, L. S., Waldern, R. P., and Teare, I. D., (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies, *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Baslam, M., Pascual, I., Sanchez-Diaz, M., Erro, J., Garcia-Mina, J.M., and Goicoechea, N., (2011). Improvement of nutritional quality of greenhouse-grown lettuce by arbuscular mycorrhizal fungi is conditioned by the source of phosphorus nutrition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 11129.
- Beltrano, J., Ruscitti, M., Arango, M.C., and Ronco, M., (2013). Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and p levels. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 13, 123-141.
- Benhassaini, H., Fetati, A., Kaddour Hocine, A., and Belkhodja, M., (2012). Effect of salt stress on growth and accumulation of proline and soluble sugars on plantlets of *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* used as rootstocks. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 16, 159-165.
- Ben-Laouane, R., Ait-El-Mokhtar, M., Anli, M., Boutasknit, A., Ait, Y., Rahou, A., Raklami, K., Oufdou, K., Wahbi, S., and Meddich, A., (2021). Green compost combined with mycorrhizae and rhizobia: a strategy for improving alfalfa growth and yield under field conditions. *Gesunde Pflanzen*. 73,193–207
- Benlioğlu, B., and Özkan, U., (2015). Bazı arpa çeşitlerinin (*Hordeum vulgare* L.) çimlenme dönemlerinde farklı dozlardaki tuz stresine tepkilerinin belirlenmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 24 (2), 109-114
- Birhane, E., Sterck, F., Fetene, M., Bongers, F., and Kuyper, T., (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. *Oecologia*, 169, 895–904.

- Borde, M., Dudhane, M., and Jite, P. K., (2010). AM fungi influences the photosynthetic activity, growth and antioxidant enzymes in *Allium sativum* L. under salinity condition. *Notulae Scientia Biologicae*, 2, 64–71.
- Boutasknit, A., Baslam, M., Ait-El-Mokhtar, M., Anli, M., Ben-Laouane, R., Ait-Rahou, Y., Mitsui, T., Douira, A., El Modafar, C., Wahbi, S., and Meddich, A., (2021). Assemblage of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and green waste compost enhance drought stress tolerance in carob (*Ceratonia siliqua* L.) trees. *Scientific Reports*, 11, 1-23.
- Bowles, T. M., Barrios-Masias, F. H., Carlisle, E. A., Cavagnaro, T. R., and Jackson, L. E., (2016). Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. *Science of the Total Environment*, 566, 1223–1234
- Butcher, K., Wick, A.F., Desutter, T., Chatterjee, A., and Harmon, J., (2016). Soil salinity: a threat to global food security. *Agronomy Journal*, 108, 2189-2200.
- Chandrasekaran, M. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced biomass, root morphological traits and nutrient uptake under drought stress: A meta-analysis. *Journal of Fungi (Basel)*, 8, 660.
- Du, Z., Zhu, Y., Zhu, L., Zhang, J., Li, B., Wang, J., Wang, J., Zhang, C., and Cheng, C., (2018). Effects of the herbicide mesotrione on soil enzyme activity and microbial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 571–578.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Parvin, Bhuiyan, K. T.F., Anee, T.I., Nahar, K., Hossen, M.S, Zulfiqar, F., Alam, M.M., and Fujita, M., (2020). Regulation of ROS metabolism in plants under environmental stress: a review of recent experimental evidence. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 1-44,
- Hashem, A., Abd-Allah, E.F., Alqarawi, G., Al-didamony, G., Al-Whibi, M., Egamberdieva, D., and Ahmad, P. (2014). Alleviation of adverse impact of salinity on faba bean (*Vicia faba* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi. *Pakistan Journal of Botany*, 46(6), 2003-2013
- Hashem, A., Alqarawi, A. A., Radhakrishnan, R., Al-Arjani, A. F., Aldehaish, H. A., and Egamberdieva, D., (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones and ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumis sativus* L. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25 (6), 1102–1114
- He, F., Sheng, M., and Tang, M., (2017). Effects of *Rhizophagus irregularis* on photosynthesis and antioxidative enzymatic system in *Robinia pseudoacacia* L. under drought Stress. *Frontiers in Plant Science*, 8, 183.
- Khan, M.I.R., Nazir, F., Asger, M., Per, T.S., and Khan, N.A., (2015). Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate cadmium-induced oxidative stress by improving proline and glutathione production in wheat. *Journal of Plant Physiology*, 173, 9-18
- Kumar, A., Yadav, A., Dhanda, P., Delta, A.K., Sharma, M., and Kaushik, P., (2022). salinity stress and the influence of bioinoculants on the morphological and biochemical characteristics of faba bean (*Vicia faba* L.). *Sustainability*, 14, 1-15.
- Lynch, J., Cain, M., Frame, D., and Pierrehumbert, R., (2021). Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1-9.
- Malhi, G.S., Kaur, M., and Kaushik, P., (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. *Sustainability*, 13, 1-21.
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H.S., Sharma, R.C., and Bolan, N.S., (2021). Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*.280, 1-15.
- Pepper, I.L., Gerba, C.P., and Brendecke, J.W., (1995). Brendecke: Environmental Microbiology, A Laboratory Manual. Academic Press, New York.
- Raza, A., Tabassum, J., Fakhar, A.Z., Sharif, R., Chen, H., Zhang, C., Ju, L., Fotopoulos, V., Siddique, K.H.M., Singh, R.K., Zhuang, W., and Varshney, R.K., (2022). Smart reprogramming of plants against salinity stress using modern biotechnological tools, *Critical Reviews in Biotechnology*, 1, 1-29.
- Singh, P., Chaudhary, O.P., and Mavi, M.S. (2018). Irrigation-induced salinization effects on soil chemical and biological properties under Cotton-Wheat rotation on loamy sand soil in Northwest India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 66, 386–391.
- Sousa, B., Rodrigues, F., Soares, C., Martins, M., Azenha, M., Lino-Neto, T., Santos, C., Cunha, A., and Fidalgo, F. (2022). Impact of combined heat and salt stresses on tomato plants—insights into nutrient uptake and redox homeostasis. *Antioxidants*, 11, 478
- Tabatabai, M.A., and Bremner, J.M., (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 1, 301–307.

- Tarafdar, J.C., and Gharu, A., (2006). Mobilization of organic and poorly soluble phosphates by *Chaetomium globosum*. *Applied Soil Ecology*, 32, 273-283.
- TUIK, (2020). Türkiye İstatistik Kurumu Erişim: http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001 [Erişim tarihi 07.05.2020].
- Ünal, B.T., Aktaş, L.Y., and Güven, A., (2014). Effects of salinity on antioxidant enzymes and proline in leaves of barley seedlings in different growth stages. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*. 20, 883-887.
- Wani, S.H., Kumar, V., Khare, T., Guddimalli, R., Parveda, M., Solymosi, K., Suprasanna, P., and Kishor, P.B.K., (2020). Engineering salinity tolerance in plants: progress and prospects. *Planta*, 251, 76.
- Wang, Y., Wang, M., Wu, A., and Huang, J. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nitrogen uptake of *Chrysanthemum morifolium* under salt stress. *PlosOne*, 13, 1-14.
- Yan, N., Marshner, P., Cao, W., Zuo, C., and Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3, 316–323.
- Zong, J., Zhang, Z., Huang, P., and Yang, Y., (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviates salt stress in *Xanthoceras sorbifolium* through improved osmotic tolerance, antioxidant activity, and photosynthesis. *Frontiers in Microbiology*, 3, 1-14.