

BÖLÜM 6

BİTKİLERDE STRES DİRENCİNİ ARTIRMADA PROLİN BİRİKİMİNİN ETKİLERİ

Dr. Fatma Belkıs ESİMEK¹

Dr. Esra BULUNUZ PALAZ^{2*}

Uzm. Biyolog Sümeyye ADALI³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031382>

¹ Alata Bahçe Kùltürleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Mersin, Türkiye, belkisdolek@hotmail.com

^{2*} Doğü Akdeniz Geçit Kuşığı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Kahramanmaraş, Türkiye. bulunuzesra@hotmail.com

³ Doğü Akdeniz Geçit Kuşığı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Kahramanmaraş, Türkiye, sumeyye.adali@tarimorman.gov.tr

GİRİŞ

Bitki metabolizmasını, gelişimini, büyümesini engelleyen veya etkileyen herhangi olumsuz durum ve etmen stres olarak kabul edilir (Lichtenthaler 1998). Bitkiler yaşamları boyunca birçok stres faktörü ile karşılaşmaktadırlar. Bu stres faktörleri, bitkiler üzerindeki genellikle etkilerini genellikle eş zamanlı olarak gerçekleştirmektedirler. Biyotik (diğer organizmalarla rekabet, patojen vb.) ve abiyotik (radyasyon, tuzluluk, kuraklık, don veya yüksek sıcaklık vb.) stresler ekonomik önemi olan tahıllar dahil olmak üzere tüm bitkilerin normal yaşam süreçlerinde değişikliklere neden olmaktadır. Tüm bu stres etmenleri bitkilerin normal fonksiyonlarını değiştirir, biyosentetik kapasitelerini azaltır ve bitkinin ölümüne yol açabilecek zararlara neden olabilir (Lichtenhaler, 1996).

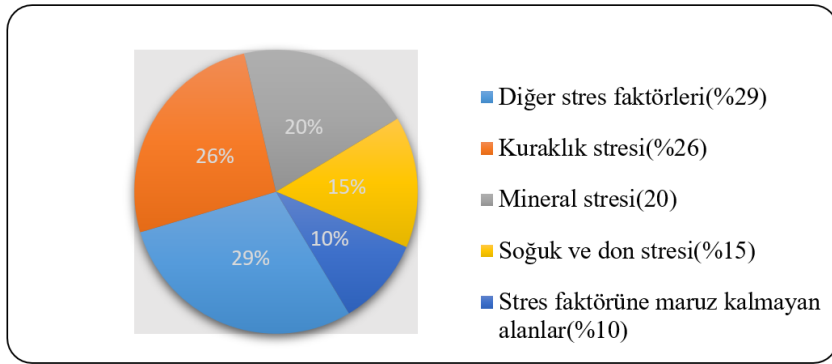
Blum (1986)'a göre, Dünya üzerindeki tarımsal kullanılabilir alanlar stres faktörlerine göre sınıflandırıldığında doğal stres faktörlerinden olan kuraklık stresi %26'lık oran ile en büyük dilimi oluşturmaktadır. Bunu %20 ile mineral stresi ve %15 ile soğuk ve don stresi takip etmektedir. Bunların dışında kalan diğer tüm stresler %29'luk bir pay alırken, yalnızca %10'luk bir alan herhangi bir stres faktörüne maruz kalmamaktadır (Şekil 1).

1. STRES FAKTÖRLERİ

Günümüz koşullarında bitkilerin çevresel stres faktörlerine karşı fizyolojik tepkileri ve özellikle küresel ısınma karşısında kaçınılmaz olan su kıtlığı ve buna bağlı olarak gelişen ozmotik stresin

iyileştirilmesi konularında çalışmalar hız kazanmıştır. Stres uyarısı, bitki hücre zarlarındaki reseptörler tarafından tanınmaktadır ve üretilen herhangi bir sinyal, spesifik genlerin aktivasyonu ile kademeli olarak iletilir ve yükseltilir. Bu gen ifadeleri ise strese karşı bitkinin tepkisidir. Bu sinyalleşme süreci enzimler ve reseptörler tarafından etkinleştirilir veya devre dışı bırakılır.

Stres Faktörleri



Şekil 1. Dünya üzerindeki ekilebilir alanlarda görülen stres faktörleri (Blum, 1986)

2. BİTKİLERDE BİYOTİK VE ABİYOTİK STRES KOŞULLARINDA PROLİN BİRİKİMİ

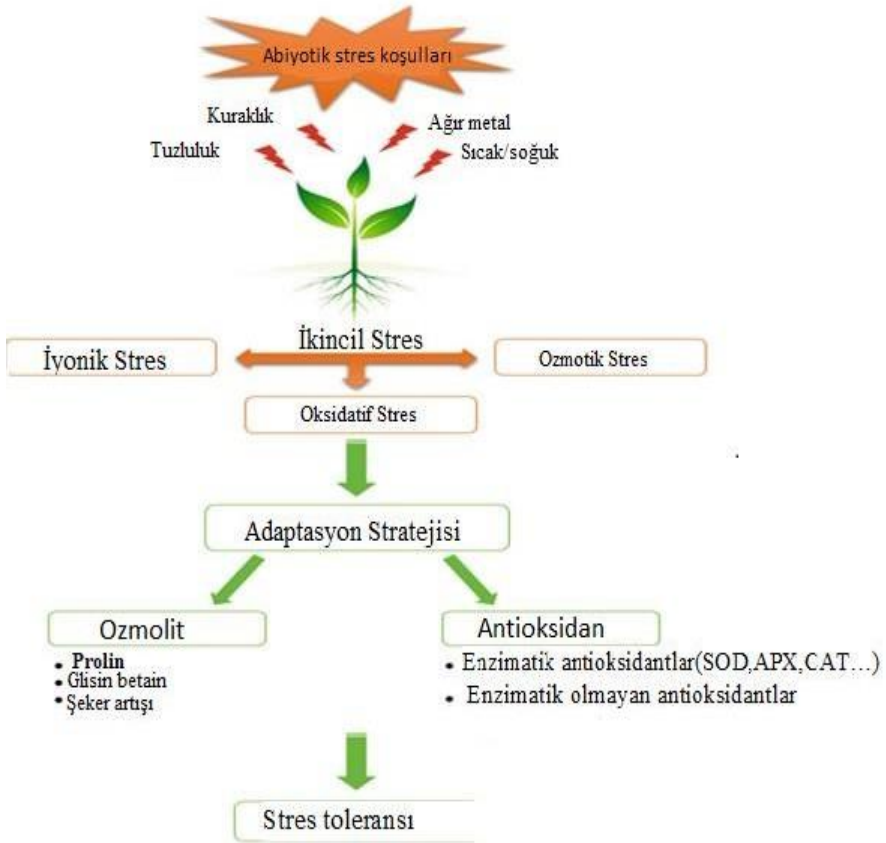
Bir osmolit veya ozmoprotektan olarak sınıflandırılan prolin, çeşitli organizmalar tarafından stresle mücadele etmek için kullanılan önemli bir moleküldür. Yürütülen çalışmalar, prolin metabolizmasının mitokondride reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumunu artırarak sinyal yollarını etkilediğini göstermiştir. Prolinin stres adaptasyonundaki işlevi genellikle su stresini dengeleme yeteneği ile açıklanmaktadır. Prolin metabolizmasına bağlı olarak artan ROS

üretiminin, bitkilerde aşırı duyarlılık verilen tepkilerde, solucanlarda yaşam süresinin uzatılmasında, hayvanlarda tümör baskılanmasında ve hücrelerin hayatta kalmasında rol oynadığı yapılan çalışmalarla açıklanmıştır. Kuraklık, soğuk ve tuz stresi toprakta aşırı tuz birikmesine neden olur ve bu da ozmotik stresin artmasıyla sonuçlanır. Toprağın su potansiyeli ve suyun köklerden sürgünlere akışı azalır. Meydana gelen ozmotik stres stomaların kapanmasına, fotosentez hızının azalmasına ve büyümenin engellenmesine neden olur (Trovato ve ark. 2008).

Bitki hücreleri, kuraklık, tuzluluk gibi stres faktörlerini tolere edebilmek amacıyla çeşitli organik maddelerin sentezi ve birikimi gibi stratejiler kullanmaktadır. Stres esnasında sentezi ve birikimi gerçekleşen moleküller arasında mannitol, threoz, galaktinol gibi şeker alkolleri; glisin, betain ve prolin gibi aminler sayılabilir (Hayat ve ark., 2012; Yaish., 2015). Bitkinin abiyotik strese karşı toleransında prolin birikimi önemli bir role sahiptir. Bitkilerde prolin biyosentezi ilk olarak 1952 yılında *E. Coli* vasıtasıyla açıklanmıştır (Vogel ve Davies 1952). Prolin akademik çalışmalarda Pro veya P olarak kısaltılarak yazılır. Protein sentezi için kullanılan 21 amino asitten biri olmasından dolayı prolinin bitki gelişiminde aktif rol oynadığı geçtiğimiz yüzyıl sonunda bilimsel bir gerçek olarak kabul edilmiştir. Normal yetiştirme şartlarında bazı bitki türlerinin organlarında büyük miktarlarda prolin tespit edilmiştir. Benzer şekilde, bitkilerin çiçek, meyve ve tohumlarında prolin biyosentez genleri bildirilmiştir. Vegetatif ve generatif organlar arasındaki prolin konsantrasyonu farkı

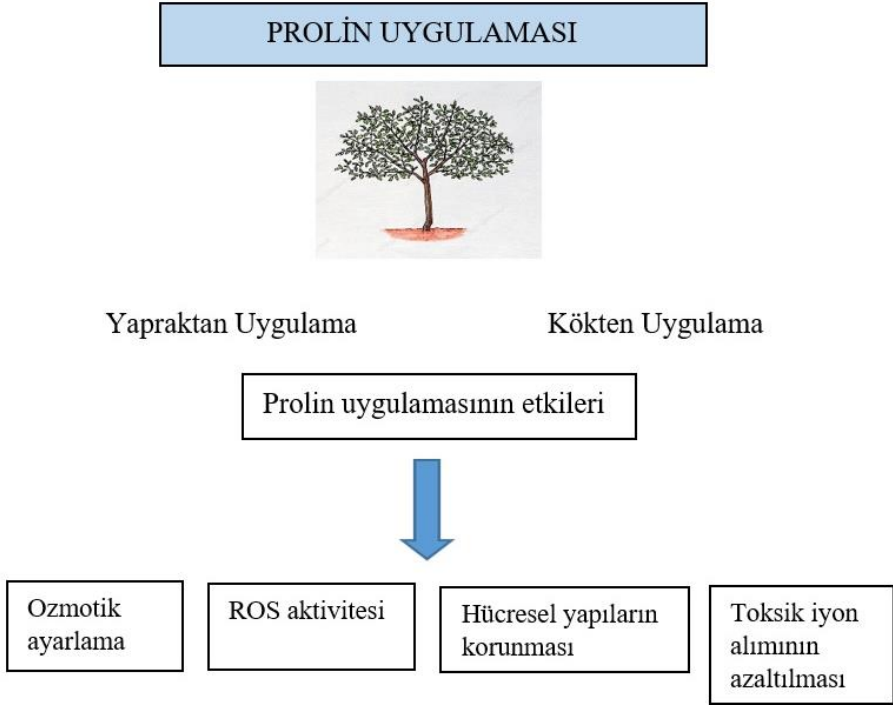
da prolinin bitki üremesinde özel bir rol oynayabildiğini gösterir. Yapılan araştırmalar kök uzaması, çiçek oluşumu, polen canlılığı ve embriyo gelişimi gibi bir dizi gelişimsel süreçte prolinin etkisini ortaya koymuştur. Bitkilerin çeşitli çevresel kısıtlamalara maruz kalması, bitki büyümesini ve verimi sınırlar. Bitki morfolojik, fizyolojik ve moleküler değişiklikler yoluyla sınırlamalara tepki verir. Prolin, proliddin iskeletinde beş karbon atomu taşıyan 20 α -amino asitten biri olup proteinlerin yapısında bulunmaktadır. Strese karşı toleransın oluşturulmasına önemli etki yaparak hücredeki membran bütünlüğünün ve ozmotik dengenin sağlanmasına yardımcı olur. Birikimi veya dışarıdan bitkiye uygulanması, stres koşulları altında bitki büyümesini ve gelişimini sürdürmek için birçok düzeyde ayarlamalar sağlamaktadır (Srivastava ve ark., 2017). Stres koşullarına maruz kaldığında, bitkiler bir dizi metabolit, özellikle de amino asitler biriktirir. Amino asitler geleneksel olarak proteinlerin öncüleri ve bileşenleri olarak kabul edilirler ve bitki metabolizması ve gelişiminde önemli bir rol oynarlar. Yapılan araştırmalar, prolin birikimi ile bitkinin strese girmesi arasında pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bir amino asit olan prolin, çeşitli stres koşullarına maruz kalan bitkilerde oldukça faydalı bir rol oynar. Osmolit olarak hareket etmesinin yanı sıra, prolin stres sırasında metal şelatör, antioksidatif savunma molekülü ve sinyal molekülü olarak rol alır. Osmolitler bitkinin kuraklık stresine toleransına yaprak içindeki su basıncını dengeleyerek, stoma iletkenliğini yükselterek ve fotosentezin devamlılığını sağlayarak olumlu katkıda bulunurlar. Kuraklık koşullarında ilk biriken molekül prolindir. Prolinin hücre içi

konsantrasyonunda meydana gelen artışlar bu birikimi desteklemektedir (Yüksel ve Aksoy, 2017). Stresli bir ortamın bitkilerde aşırı prolin üretimine yol açtığını ve bunun da hücre turgorunu veya ozmotik dengeyi koruyarak stres toleransı kazandırdığını araştırmalar göstermektedir (Hayat, 2012). Prolin birikimi, çeşitli abiyotik streslere maruz kalan bitkilerde yaygın bir fizyolojik tepkidir. Prolin stres sırasında elektrolit sızıntısını önler ve ROS konsantrasyonlarını normal aralıklara getirmek stresten kaçınmayı sağlar (Kaur ve Asthır,2015). Bir amino asit olan prolin, NaCl stresi altında ozmotik regülasyonda rol oynadığı gibi, hücreler arası yapının ve proteinlerin bütünlüğünün korunması, sitozolik pH ayarlanması ve stres durumunda enzim aktivitelerinin harekete geçirilmesinde de rol oynamaktadır (Büyük ve ark., 2012). Yapıpraktan prolin uygulamasının ağır metal stresi altında etkili olduğu görülmüştür. Bitkilerde metallerin toksisitesini azaltarak bitkilerde koruyucu mekanizmayı harekete geçirir (Emamverdian ve ark., 2015). Prolin, DNA tarafından kodlanan 20 amino asitten biridir. Genetik kod olarak: CCU, CCC, CCA ve CCG şeklinde tanımlanır. Bitki tepkilerinde önemli rolü olan bir amino asittir. Birçok bitki ozmotik tepki olarak yüksek seviyelerde serbest prolini sitozol ve kloroplastlarda biriktirir. Moleküler bir şaperon olarak, prolin ayrıca protein bütünlüğünü koruduğu ve enzimi arttırdığı gösterilmiştir. Prolinin ayrıca bir antioksidan rolü taşıdığı öne sürülmektedir. Bitkilere dışarıdan ekzojen olarak uygulandığında strese maruz kalan prolin, büyümede artışa neden olur (Saibi ve Brini, 2020; Suprasanna ve ark.,2014).



Şekil 2. Abiyotik streslere karşı bitki tepkileri (Zouari, 2019).

Bitkilere yapraktan veya kök bölgesinden prolin uygulanması toksik ROS'u azaltarak bir antioksidatif savunma görevi görür. Oksidatif hasarları azaltır ve antioksidan enzimleri düzenler. Stres altındaki hücrelerin şişkinliğini koruyarak bitki-su ilişkilerini etkiler ve fotosentez hızını arttırır. Bitki büyümesini ve nihai mahsul verimini arttırır (Zouari, 2019) (Şekil 3).



Şekil 3. Prolin uygulamasının bitkiler üzerindeki yararlı etkileri (Zouari, 2019).

İklim değişikliği ve küresel ısınmanın neden olduğu birçok stres faktörüne karşı bitkinin başa çıkabilmesi için prolin uygulamaları ana anahtar olarak görülmektedir. Bitkilerin uygun olmayan çevre koşullarına uyum sağlamalarına yardımcı olmak, mahsul üretimini kabul edilebilir bir seviyede tutmak amacıyla bu konuda çalışmaların devamı önemlidir. Hücresel stres yanıtının yeni düzenleyici ve sinyal ağlarını ortaya çıkarmak için prolin moleküllerinin diğer metabolik enzimler ile etkileşimini ortaya koyacak çalışmaların devamı gerekmektedir. Türkiye’de ve yurtdışında otsu ve odunsu bitki türlerinde stres faktörlerine karşı prolin uygulamaları ile bu bitki türlerinin tepkisinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur.

3. ODUNSU BİTKİ TÜRLERİNDE PROLİN UYGULAMALARI

Tuz stresine karşı PRO ve GB uygulamalarının Gemlik ve Memecik zeytin (*Olea europaea* L.) çeşidinin gelişimi üzerine etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla yürütülen bir çalışmada tuz stresi altındaki zeytin fidanlarına uygulanan osmoprotektanların yaprakların mikro element konsantrasyonlarında kontrole kıyasla artışa neden olduğunu belirtilmiştir. Benzer şekilde Bor elementi de pasif olarak alınan ve taşınan bir element olduğu için osmoprotektan uygulamalarına paralel olarak azalan stres düzeyi sonucu giderek artan dozlarda bitki tarafından alınmıştır (Küçük, 2013). Özden ve ark. (2011), tuza maruz kalan üzümde (*Vitis vinifera*) tuz varlığında artan prolin içeriğinin prolin uygulaması ile azaldığını ve uygulamanın stres koşullarına toleranslı bitki yetiştirmede etkili olacağını bildirmişlerdir. Üç turunçgil türünde (*C. reticulata*, *C. sinensis* ve *C. paradisi*) (0, 15, 20 mM) doz prolin uygulamasının etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, uygulamanın üç turunçgil türünde hem hidrojen peroksiti hem de lipit peroksidasyonunu azalttığını göstermiştir. -3°C'deki yüksek performanslı sıvı kromatografi kromatogramları, eksojen prolinin fenolik asitlerden klorojenik, gallik, p-kumarik ve ferulik asitin yanı sıra flavonoidlerden naringin, kersetin ve rutini artırdığını göstermiştir. Prolin konsantrasyonunun artmasıyla oksalik, sitrik ve askorbik asit miktarı artmış ancak tartarik asit miktarı azalmıştır. Düşük sıcaklık ve prolin uygulamaları, *C. reticulata*'da endojen prolin, katalaz ve APX düzeylerinin diğer iki türe göre daha yüksek olduğunu ve sıcaklığın düşmesiyle miktarlarının arttığını göstermiştir (Mohammadrezakhani, 2019).

Ahmet ve ark. (2010), çalışmalarında bir yaşında üç zeytin çeşidinde 50 mM prolin uygulamasında fotosentetik performanstaki değişiklikler, osmolit birikimi ve süperoksit dismutaz, askorbat peroksidaz, katalaz ve polifenol oksidaz aktiviteleri araştırılmıştır. Prolin uygulaması antioksidatif savunma sistemini iyileştirmiştir, fotosentetik aktivite ve bitki büyümesi artırmıştır. Aktaş ve Akça (2014), defne (*Laurus nobilis* L.) fidelerinde prolin uygulamasının hormon içeriği üzerindeki etkilerini ve kuraklık toleransının uyarılmasını yarı-kontrollü sera koşullarında çalışmıştır. Çalışmada su stresi koşullarında fidelere prolin uygulaması ile bağıl su içeriği ve taze ağırlığın korunduğu, yaprak fotokimyasal etkinliğinin arttığı ve fidelerin hayatta kalma oranının (%52) yükseldiği belirlenmiştir. Su stresi, defne fidelerinde absisik asit (ABA) içeriğinde ise artışa, içsel zeatin (Z), indol-3-asetik asit (IAA) ve giberellik asit (GA3) içeriğinde ise azalmaya neden olmuştur. Stres koşullarında fidelere prolin uygulaması oksin miktarını kontrole göre yaklaşık 2 kat artırmış, tarla kapasitesinde sulanan kontrol fidelerine dışarıdan prolin uygulanması IAA içeriğini %88 oranında azaltmıştır. Elde edilen veriler, prolin uygulaması ile defnenin fide döneminde kuraklığa toleransının oluşabileceğini ortaya koymaktadır. Bir diğer çalışmada kuraklık stresine karşı prolin uygulamasının karaçam tohumlarının çimlenmesine etkileri araştırmıştır. Çalışmada karaçam tohumları belirli konsantrasyonlarda (kontrol, 0,1 mM, 0,5 mM, 1 mM, 5 mM ve 10 mM) prolin solüsyonu içeren petri kaplarına ekilmiştir. Ekimden yedi gün geçtikten sonra çimlenme ortamına kuraklık stresi

uygulanmıştır. Çimlenme periyodunun sonunda elde edilen örneklerde kök boyu uzunluğu, nisbi su içeriği, taze ağırlık, çimlenme oranı, çimlenme hızı, prolin içeriği hidrojen peroksit, lipid peroksidasyonu ve bazı antioksidan enzim aktiviteleri (CAT, SOD, APX ve GPX) ölçülmüştür. Çalışmada elde edilen ulaşılan bulgular incelendiğinde belirli bir konsantrasyonda dışardan uygulanan prolinin (1 mM) kuraklık stresine karşı çimlenmeyi teşvik ederek büyüme ve gelişmeyi arttırdığı tespit edilmiştir (Kılıç, 2010).

4. OTSU BİTKİ TÜRLERİNDE PROLİN UYGULAMALARI

Embriyo kültüründe yetiştirilen fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) fideleri- nin kullanıldığı çalışmada NaCl (0, 50, 100 ve 150 mM), prolin (0, 5 ve 10 mM) ve NaCl + prolin kombinasyonlarının etkisi araştırılmıştır. Prolin ve NaCl + prolin kombinasyonuna maruz kalan dokularda protein içeriği oldukça yüksek bulunmuş ancak NaCl tek başına kök ve yaprak dokularında protein içeriğini azaltmıştır. Sonuçlar prolinin tuz stresinde enzim stabilize edici bir madde olarak rol oynayabileceğini göstermektedir (Demir ve Kocaçalışkan, 2001). Sıcaklık stresi altındaki bamya (*Abelmoschus esculentus* L) genotiplerinin morfo-fizyolojik, biyokimyasal ve su ile ilgili özellikleri üzerinde prolin uygulamalarının iyileştirici etkisini araştırmak için bir çalışma yürütmüşlerdir. Dört haftalık fidehayaller, bir büyüme odasının sıcaklığının 28/22 °C'den 45/35 °C'ye (gündüz/gece) kademeli olarak arttırılmasıyla ısı stresine maruz bırakılmış ve 2,5 mM prolin uygulanmıştır. Sonuçlar, sürgün uzunluğunda (%32,7), kök uzunluğunda (%58,9) ve taze sürgünde

(%85,7) maksimum artış olduğunu göstermiştir (Hüseyin ve ark., 2021). Güngör (2022), kısıtlı sulama koşullarında salisilik asit ve prolin uygulamalarının karpuzda verim, kalite ve bitki su tüketimi üzerine etkilerini araştırılmıştır. Bu amaçla, 5 farklı prolin dozu kullanılarak sera ortamında yetiştirilen karpuz bitkisine 3 farklı dışsal uygulama (K: Kontrol, SA: Salisilik Asit, P: Prolin) yapılmıştır. Dışsal uygulamalar bitkiyi toleranslı hale getirmiştir. Yenilikçi yetiştirme koşullarının, incelenen hem su kullanımına bağlı parametrelerde hem de fizyolojik parametrelerde kontrol konularına göre olumlu katkı sağladığı istatistiksel olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, salisilik asit ve prolinin kuraklık stresi koşulları altında bitki büyüme ve gelişmesini, bitki üretkenliğini, meyve kalitesini geliştirerek olumlu bir şekilde yansıtmıştır. Dört farklı sulama seviyesi ve prolin uygulamasının Fortuna çilek çeşidinin üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yüksek tünel koşulları altında yürütülen çalışmada yapraktan aralık ayından başlayarak ayda 1 kere olacak şekilde 5 kez 20 mM prolin uygulanmıştır. Ortalama meyve ağırlığı kısıtlı sulama seviyeleri olan %50 ve %75 sulama seviyelerinde prolin uygulamaları ile artış olduğu görülmüştür. Meyve dış renginde uygulanan prolinin olumsuz etkisi olmadığı tesbit edilmiştir. Sonuç olarak prolin uygulaması su stresi koşullarında olumlu etki göstermesinin yanı sıra farklı sulama suyu seviyelerinde de verimin artmasına neden olmuş ve kalite parametreleri değerlerinde olumsuz sonuçlar göstermemiştir (Aksoy, 2021). Koç (2013), çalışmasında biber bitkilerinde soğuğa toleransta prolin ve salisilik asit uygulamasının soğuğa tolerans üzerine etkisini araştırmıştır. En düşük

sıcaklıkta (4°C) ve en yüksek sıcaklıkta (24°C) prolin düzeyindeki maksimum artışların sırasıyla 24 mM prolin + 0,25 mM SA ve 24 mM prolin + 0,50 mM SA uygulamalarında olduğu gözlemlendi. Bulgular, prolin ve salisilik asit uygulamasının prolin ve protein birikimine yol açarak biber bitkisinin soğuğa toleransını artırdığını göstermiştir.

Maş fasulyesi bitkisinde (*Vigna radiata* L.) soğuk stresine karşı 6 saat süre ile uygulanan 5 mM ve 150 mM prolin dozu prolin içeriğinde artış, çimlenme yüzdesinde artış, hipokotil uzaması, lipid peroksidasyonunda azalma görülmüştür (Posmyk ve Janas, 2007). Shin ve ark. (2018), çalışmasında ıspanak bitkilerinde 10 mM prolinin uygulamasının soğuğa tolerans üzerine etkisi araştırılmıştır. Prolin birikiminin 2.6 kat arttığı görülmüştür. Prolin, arginaz, lizin ve prolin gibi amino asit üretiminin artması yoluyla donma toleransını arttırmıştır. Bununla birlikte, amino asit içerikleri açısından anlamlı bir fark görülmemiştir. Prolin uygulamasının börülcenin kuraklık toleransı üzerindeki etkisini araştırmak için yürüttüğü çalışmadan alınan sonuçlar su stresinin, verim ve verim bileşenlerinin, biyokütlenin, hasat indeksinin ve bitki boyunun azaldığını göstermiştir. Prolin uygulamasının normal ve su stresi koşullarında ölçülen özellikler üzerinde olumlu etkisi görülmüştür. En yüksek tohum verimi (1008. 20 mM prolin konsantrasyonunda 6 yapraklı ve çiçeklenme olmak üzere iki aşamada 50 mm buharlaştırma ve prolin püskürtme sonrası sulama ve ilaçlama kombinasyonu uygulamasında 96 g m⁻²) elde edilmiş ve en düşük tohum verimi (489,88 g m⁻²) elde edilmiştir (Sadeghipour, 2020). Pirinç (*Oryza sativa* L.) bitkisinde

tuzluluk stresine karşı 12 saat süre ile uygulanan 1,5 ve 10 mM prolin dozu, kök ve sürgün uzunluğunun ve klorofil konsantrasyonunun artmasını sağlamıştır (Deivanai ve ark, 2011). Ali ve ark. (2007), çalışmalarında iki mısır çeşidinin dört haftalık bitkileri %60 tarla kapasitesine eşdeğer nem içeriği korunarak su stresine maruz bırakılmıştır. Su stresi, her iki mısırın büyümesini ve fotosentetik kapasitesini azaltmıştır. Yapraktan 30 mM prolin uygulamasının diğer seviyeye kıyasla su stresi toleransını tetiklemede daha etkili olduğu ifade edilmiştir.

Çinko (Zn) uygulamalarının, reaktif oksijen türlerini (ROS) azaltabileceği, süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POD) ve katalaz (CAT) gibi antioksidan enzimlerin konsantrasyonunu ise arttırabileceği bilinmektedir. Çinko uygulamaları bitkilerde çeşitli fizyolojik değişikliklerin ve savunma mekanizmalarının etkinleştirilmesini sağlayarak, bitkilerde abiyotik streslere karşı stabilite sağlamaktadır. Yapılan birçok çalışma ile çinko uygulamalarının bitkilerde metabolik süreçlerin iyileştirilmesine destek olduğu tespit edilmiştir. Çinko uygulamaları, abiyotik stresi yönetmenin düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir yoludur. Ancak stres altındaki rolü konusunda daha detaylı araştırmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Aksoy, F., (2021). *Farklı Sulama Seviyeleri ve Prolin Uygulamasının Çilek Bitkisindeki Verim ve Morfo-Fizyolojisi Üzerine Etkileri*. Ç. Ü. Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü. Yüksek Lisans tezi, 77 sayfa
- Aktaş, L. (2015). Prolin Uygulamasının Defne Fidelerinin Kuraklık Toleransının Uyarılması Üzerine Etkileri. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 36(1), 17-27.
- Ali, Q., Ashraf, M., & Athar, H. U. R. (2007). Exogenously applied proline at different growth stages enhances growth of two maize cultivars grown under water deficit conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 39(4), 1133-1144.
- Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., Sensoy, S., Boukhriess, M., & Ben Abdullah, F. (2010). Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(7), 4216-4222.
- Blum, A., & Jordan, W. R. (1985). Breeding crop varieties for stress environments. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2(3), 199-238.
- Büyük, İ., Soydam-Aydın, S., & Aras, S. (2012). Bitkilerin stres koşullarına verdiği moleküler cevaplar. *Turkish Bulletin of Hygiene & Experimental Biology/Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji*, 69(2).
- Deivanai, S., Xavier, R., Vinod, V., Timalata, K., & Lim, O. F. (2011). Role of exogenous proline in ameliorating salt stress at early stage in two rice cultivars. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 7(4), 157-174.
- Demir, Y., & Kocaçalışkan, İ. (2001). Effects of NaCl and proline on polyphenol oxidase activity in bean seedlings. *Biologia Plantarum*, 44, 607-609.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., & Xie, Y. (2015). Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *The scientific world journal*, 2015.
- Güngör, A. (2022). *Farklı Su Kısıtı Koşullarında Salisilik Asit ve Prolin Uygulamalarının Karpuz Bitkisinin (Citrullus lanatus) Verim, Kalite Parametreleri ve Enzim Aktiviteleri Üzerine Etkisi*. Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., Doktora Tezi. 138 s.,

- Hare, P.D., Cress, W.A. (1997) Bitkilerde strese bağlı prolin birikiminin metabolik etkileri. *Bitki Büyüme Yönetmeliği*, 21:79–102
- Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant signaling & behavior*, 7(11), 1456-1466.
- Hussain, R., Ayyub, C. M., Shaheen, M. R., Rashid, S., Nafees, M., Ali, S., ... & Mora-Poblete, F. (2021). Regulation of osmotic balance and increased antioxidant activities under heat stress in *Abelmoschus esculentus* L. triggered by exogenous proline application. *Agronomy*, 11(4), 685.
- Kaur, G., & Asthir, B. J. B. P. (2015). Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia plantarum*, 59, 609-619.
- Kılıç, B. (2020). *Prolin ön uygulamasının kuraklık stresi koşullarındaki karaçam tohumlarının çimlenmesi üzerine etkilerinin araştırılması* (Master's thesis, Artvin Çoruh Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Koç, E. (2013). The effect of exogenous proline and salicylic acid application on proline and apoplastic protein in cold tolerance of pepper callus cultures. *International Journal of Agriculture and Biology*, 15(2).
- Küçük, S. (2013). *Yapraktan Glisin Betain ve Prolin Uygulamasının Tuz Stresi Altındaki Zeytin Bitkisine Etkilerinin İncelenmesi*. . ADÜ. Fen Bilimleri Ens., Y. Lisans Tezi. 93 s., Aydın.
- Lichtenthaler, H. K. (1996). Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *Journal of plant physiology*, 148(1-2), 4-14.
- Lichtenthaler, H. K. (1998). The stress concept in plants: an introduction. *Annals of the new York Academy of sciences*, 851, 187-198.
- Mohammadrezakhani, S., Hajilou, J., Rezanejad, F., & Zaare-Nahandi, F. (2019). Assessment of exogenous application of proline on antioxidant compounds in three Citrus species under low temperature stress. *Journal of Plant Interactions*, 14(1), 347-358.
- Özden, M., Dikilitaş, M., Gürsöz, S., & Bekir, A. K. (2014). 110r Anacı Üzerine Aşılı Şiraz Üzüm (*Vitis Vinifera* L.) Çeşidinin Nacl Ve Prolin

- Uygulamalarına Karşı Fizyolojik Ve Biyokimyasal Tepkileri. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 15(1), 1-9.
- Posmyk, M. M., & Janas, K. M. (2007). Effects of seed hydropriming in presence of exogenous proline on chilling injury limitation in *Vigna radiata* L. seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29, 509-517.
- Sadeghipour, O. (2020). Cadmium toxicity alleviates by seed priming with proline or glycine betaine in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Egyptian Journal of Agronomy*, 42(2), 163-170.
- Saibi, W., Brini, F., & Brini, F. (2020). Proline, a peculiar amino acid with astucious functions in development and salt tolerance process in plants. *J. Food Nutr. Metab*, 3, 1-8.
- Saibi, W., Feki, K., Yacoubi, I., & Brini, F. (2015). Bridging between proline structure, functions, metabolism, and involvement in organism physiology. *Applied biochemistry and biotechnology*, 176, 2107-2119.
- Shin, H., Oh, S., Kim, D., Hong, J. K., Yun, J. G., Lee, S. W., & Son, K. H. (2018). Induced freezing tolerance and free amino acids perturbation of spinach by exogenous proline. *Journal of Plant Biotechnology*, 45(4), 357-363.
- Srivastava, A., Gupta, M., & Srivastava, S. (2017). Os (VIII) Catalyzed Oxidative Cleavage of Pyrrolidine Ring in L-Proline by Sodium Periodate (NaIO₄) in Alkaline Medium.
- Suprasanna, P., Rai, A. N., Kumari, P. H., Kumar, S. A., & Kishor, P. K. (2014). Modulation of proline: implications in plant stress tolerance and development. In *Plant adaptation to environmental change: significance of amino acids and their derivatives* (pp. 68-96).
- Trovato, M., Maras, B., Linhares, F., & Costantino, P. (2001). The plant oncogene rolD encodes a functional ornithine cyclodeaminase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(23), 13449-13453.
- Vogel, H. J., & Davis, B. D. (1952). Glutamic γ -semialdehyde and Δ^1 -pyrroline-5-carboxylic acid, intermediates in the biosynthesis of proline¹, 2. *Journal of the American chemical Society*, 74(1), 109-112.

- Yaish, M. W. (2015). Proline accumulation is a general response to abiotic stress in the date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.). *Genet Mol Res*, 14(3), 9943-9950.
- Yüksel, B., & Aksoy, Ö. (2017). Su stresi koşullarında bitkilerde gözlenen değişimler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 10(2), 1-5.
- Zouari, M., Hassena, A. B., Trabelsi, L., Rouina, B. B., Decou, R., & Labrousse, P. (2019). Exogenous proline-mediated abiotic stress tolerance in plants: Possible mechanisms. *Osmoprotectant-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants: Recent Advances and Future Perspectives*, 99-121.

