

Prolin ve Stres Toleransındaki Önemi

Ali ERKUL*

Adnan Menderes Üniversitesi, Sultanhisar Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Seracılık Programı, Sultanhisar-Aydın, TÜRKİYE

Geliş Tarihi/Received: 15.05.2025

Kabul Tarihi/Accepted: 26.06.2025

ORCID ID

orcid.org/0000-0001-9211-7369

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aerkul@adu.edu.tr

Öz: Abiyotik stres bitkideki verim kaybının birinci nedenidir ve kültür bitkilerinde verimi % 50'den fazla azaltmaktadır. Bitkiler, abiyotik stres faktörlerinin neden olduğu hasara karşı korunmak amacıyla prolin, glisin betain, prolin betain, gliserol, mannitol ve sorbitol gibi uyumlu osmolitleri biriktirerek tepki gösterirler. Bitkilerde prolin birikiminin, olumsuz koşullar veya stres koşulları altında stres tolerans kapasitenin geliştirilmesinde önemli rol oynadığı ve osmoregülatör bir bileşik olarak görev yaptığı bildirilmiştir. Osmolit işlevinin yanında prolin bitkinin iç kısmında metal şelatörü, antioksidan savunma ve sinyal molekülü gibi üç fonksiyona sahiptir. Kuraklık, tuzluluk ve ağır metal stresi koşullarında bitkilerde prolin birikiminin arttığı çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Bu derlemede, prolinin biyosentezi hakkındaki mevcut literatür bilgileri özetlenmekte, prolinin kuraklık, tuzluluk ve ağır metal stresi gibi abiyotik stres koşullarına toleransa katkı mekanizmaları tartışılmakta ve prolinin genetik mühendislik ve biyoteknoloji alanlarındaki yönetiminin çevresel streslere dayanıklı bitki türlerinin geliştirilmesindeki önemine ilişkin gelecek perspektifleri sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Prolin, stres toleransı, kuraklık stresi, tuzluluk stresi, ağır metal stresi

Proline and Its Importance in Stress Tolerance

Abstract: Abiotic stress is the main cause of yield loss in plants, reducing crop yields by over 50%. To protect against damage caused by abiotic stress factors, plants respond by accumulating compatible osmolytes such as proline, glycine betaine, proline betaine, glycerol, mannitol, and sorbitol. It has been reported that proline accumulation in plants plays a significant role in the development of stress tolerance capacity under adverse or stressful conditions and acts as an osmoregulatory compound. In addition to its osmolyte function, proline has three roles within the plant: it acts as a metal chelator, an antioxidant defense, and a signaling molecule. Various researchers have reported that proline accumulation increases under conditions of drought, salinity, and heavy metal stress. In this review, the current literature on the biosynthesis of proline is summarized, the mechanisms contributing to proline's tolerance to abiotic stress conditions such as drought, salinity, and heavy metal stress are discussed, and future perspectives on the significance of managing proline in the fields of genetic engineering and biotechnology for the development of plant species resistant to environmental stresses are presented.

Keywords: Proline, stress tolerance, drought stress, salinity stress, heavy metal stress

1. Giriş

Bitkisel üretimde verim ve kaliteyi sınırlayan faktörler konusunda çok sayıda araştırma yürütülmektedir. Bitkinin verimini ve kalitesini olumsuz yönde etkileyen biyotik (fungus, bakteri, virüs ve nematod vb.) ve abiyotik (kuraklık,

tuzluluk, yüksek ve düşük sıcaklık, ağır metal kirliliği vb.) faktörler bilimsel araştırmaların konusu olmuştur. Abiyotik stres, bitkideki verim kaybının birinci nedenidir ve, kültür bitkilerinde verimi % 50'den fazla azaltmaktadır (Wang ve ark., 2004).

Bitkiler maruz kaldıkları abiyotik çevresel stres faktörlerine karşı geri dönüşümlü veya geri dönüşümsüz birçok tepkiler geliştirerek hayatlarını sürdürmeye çalışırlar (Korkmaz ve Durmaz, 2017). Nitekim, bitkiler çevresel stres faktörleri altında büyüme ve gelişmelerini devam ettirebilmeleri için çeşitli mekanizmalar geliştirmişlerdir. Stres faktörleri altındaki bitki hücrelerinde osmotik dengesizlik, oksidatif stres ve hücre zarı hasarı görülebilir. Bitkiler, abiyotik stres faktörlerinin neden olduğu hasara karşı korunmak amacıyla prolin, glisin betain, prolin betain, gliserol, mannitol ve sorbitol gibi uyumlu osmolitleri biriktirerek tepki gösterirler (Hare ve Cress, 1997).

Bitkilerde stres koşullarında prolin birikim seviyesi türden türe farklılık göstermekte ve kontrolden 100 kat fazla olabilmektedir (Verbruggen ve Hermans, 2008). Bitkilerde prolin birikiminin, olumsuz koşullar veya stres koşulları altında stres tolerans kapasitenin geliştirilmesinde önemli rol oynadığı ve osmoregülatör bir bileşik olarak görev yaptığı bildirilmiştir (Hare ve Cress, 1997). Osmolit işlevinin yanında prolin bitkinin iç kısmında metal şelatörü, antioksidan savunma ve sinyal molekülü gibi üç fonksiyona sahiptir (Hayat ve ark., 2012). Aminoasit olan prolin ikincil bir amino grubu içerir ve bu nedenle proteinojenik aminoasitler arasında benzersizdir. Prolin hem proteinlerin bir bileşeni hem de serbest aminoasit olarak hücrel metabolizma için çok önemli bir rol oynar (Lehmann ve ark., 2010; Burritt, 2012; Singh ve ark., 2015; Hosseinifard ve ark., 2022).

Bu derlemede, mevcut literatür bilgileri ışığında prolinin biyosenteziyle ilgili bilgi vermek, prolinin kuraklık, tuzluluk ve ağır metal stresi gibi abiyotik stres koşullarına toleransa katkı mekanizmalarını irdelemek ve prolinin genetik mühendislik ve biyoteknoloji alanlarındaki yönetiminin çevresel streslere dayanıklı bitki türlerinin geliştirilmesindeki önemini vurgulamak amaçlanmıştır.

2. Prolin Biyosentezi

Bitkilerde prolinin biyosentezi kloroplast ve sitoplazmada gerçekleşirken, prolin katabolizması mitokondride meydana gelir (Elthon ve Stewart, 1981; Dar ve ark., 2016; Szepesi ve Szöllösi, 2018).

Prolin metabolik yolunun reaksiyonları Şekil 1'de verilmiştir. Yüksek bitkilerde prolin biyosentezi glutamat veya ornitin yoluyla gerçekleşir (Delauney ve Verma, 1993). Prolin sentezinin ana yolu glutamat yoludur. Bu yolda glutamik asit pirolin-5-karboksilat sentetaz (P5CS) ile glutamat-1-semi aldehit (GSA)'e indirgenir ve daha sonra pirolin-5-karboksilat'a (P5C)

dönüştürülür. Daha sonra pirolin-5-karboksilat redüktaz (P5CR) enzimi ile P5C proline indirgenir (Meena ve ark., 2019; Liu ve Wang, 2020). İkinci yolda ornitin, ornitin amino transferaz (OAT) enzimi tarafından P5C'ye dönüştürülür ve bu molekül daha sonra P5CR tarafından proline indirgenir (Roosens ve ark., 1998).

Prolin katabolizmasında prolin, prolin dehidrojenaz veya prolin oksidaz (PDH veya POX) ve P5C dehidrojenaz (P5CDH) tarafından P5C'ye dönüştürülür ve P5C'den glutamat elde edilir (Ribarits ve ark., 2007; Schertl ve ark., 2014).

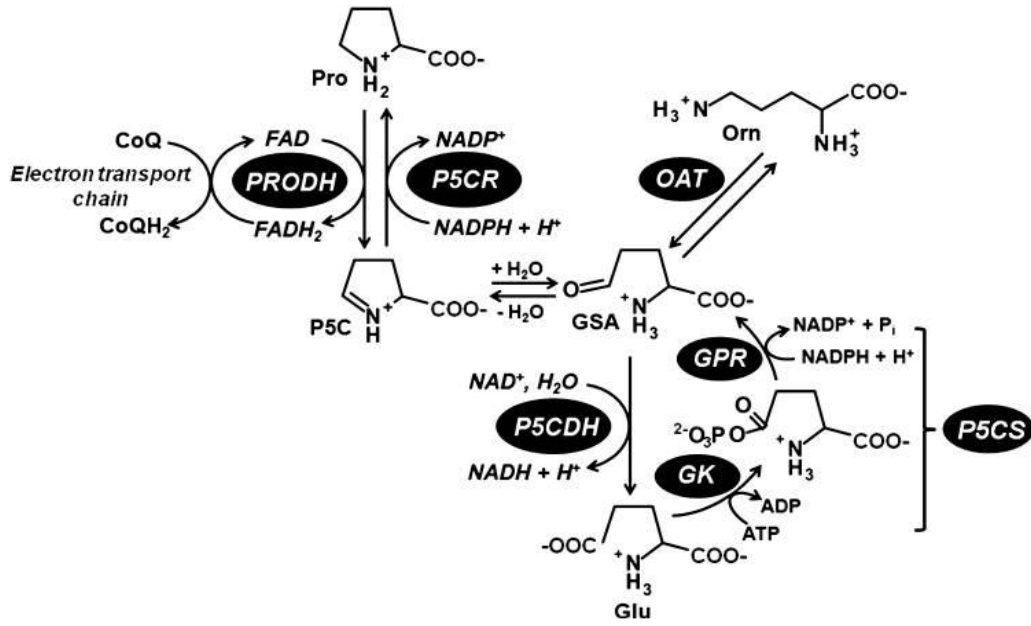
3. Prolin ve Kuraklık Stresi

Kuraklık, bitki verimliliğini ve kalitesini olumsuz yönde etkileyen abiyotik stres faktörlerinin başında gelmekte ve dünya genelinde tarımsal verimliliği etkileyen bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bitkiler kurak koşullara uyum sağlamak için çeşitli adaptasyon stratejileri geliştirir. Bu stratejilerden biri, osmoprotektif moleküllerin, özellikle prolinin birikimidir.

Kuraklık stresine tepki olarak bitki dokularında prolin birikiminin arttığını rapor eden pek çok çalışma bulunmaktadır. Petunya (Yamada ve ark., 2005), ayçiçeği (Manivannan ve ark., 2007), soya (Kayabaşı, 2011), pirinç (Lum ve ark., 2014), soğan (Hancı ve Cebeci, 2015), transgenik pamuk (Sarwar ve ark., 2017), tütün (Kaya ve İnan, 2018), domates (Demiralay, 2021), şeker otu (Yalçın ve ark., 2022), kestane (Beyazyüz ve Kulaç, 2023) ve buğday (Ural ve ark., 2024) bitkilerinde kurak koşullarda prolin seviyelerinde artış saptandığı bildirilmiştir.

Prolin, zararlı iyonik etkileri olmaksızın hücre içinde yüksek konsantrasyonlarda birikebilen bir pH düzenleyicisi ve ozmotik ayarlama için uyumlu bir ozmotik koruyucu olmasının yanında özellikle su stresinden etkilenmiş büyüme apikalleri için azot ve enerji kaynağıdır. Ayrıca, reaktif oksijen türleri (reactive oxygen species, ROS)'nin detoksifikasyonunda görev alan bir ajandır (Yancey ve ark., 1982; Kocsy ve ark., 2005). Prolin aminoasiti, glutamin ya da ornitinden sentezlenir ve osmotik stres altında prolinin glutaminden oluşum yolu daha baskındır (Yamada ve ark., 2005).

Prolin, bir alfa-aminoasit olup, bitkilerde çeşitli biyokimyasal süreçlerde yer alır. Kimyasal yapısı, prolinin protein yapılarını stabilize etmesine ve hücrel stres koşullarında önemli işlevler görmesine imkan tanır. Prolin, bitkilerde osmoregülasyon için kritik bir moleküldür. Kurak koşullarda, prolinin birikimi hücre içindeki osmotik basıncı artırarak, hücrelerin su kaybının azalmasını ve turgor basıncının korunmasını sağlar. Böylelikle kurak koşullarda bitkinin su dengesini



Şekil 1. Prolin metabolik yolunun reaksiyonları (Liang ve ark., 2013)

sağlamasına yardımcı olur (Hare ve ark., 1998; Szabados ve Savoure, 2010).

Prolin, antioksidan sistemlerin etkinliğini artırarak hücrel oksidatif stresin etkilerini azaltır. Kuraklık, ROS birikmesine yol açar ve bu da hücrel hasara neden olabilir. Prolin, antioksidan enzimlerin (süperoksit dismutaz, katalaz vb.) ekspresyonunu artırarak bu zararlı etkileri azaltır (Hare ve Cress, 1997). Prolin, kuraklık stresine yanıt olarak gen ekspresyonunu düzenler. Özellikle, prolisin, DREB (dehydration-responsive element-binding) ve AREB/ABF (abscisic acid-responsive element-binding) gibi transkripsiyon faktörlerinin ifadesini artırarak stres yanıtlarını düzenler. Bu faktörler, kuraklık koşullarında stres yanıtı genlerinin ifadesini teşvik eder (Kishor ve ark., 2005). Prolin, proteinlerin yapısal stabilitesini korur. Kurak koşullarda prolisin varlığı proteinlerin fonksiyonlarının korunmasına yardımcı olur. Bu da, hücrel işlevlerin devamlılığını sağlar (Munns ve Tester, 2008).

4. Prolin ve Tuzluluk Stresi

Tuz stresi, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde bitkilerin gelişimini etkileyerek ürün verimliliğini sınırlandıran önemli abiyotik stres faktörlerinden biridir (Shannon, 1998). Dünyada tarım alanlarının yaklaşık % 20'sinde, Türkiye topraklarının yaklaşık 1.5 milyon hektarlık kısmında tuzluluk sorunu bulunmaktadır (Yılmaz ve ark., 2011). Bu oran küresel iklim değişikliği ve yanlış sulama yöntemleri gibi faktörler nedeniyle gün geçtikçe artış göstermektedir. Tuzluluk stresi, bitkilerin

hücre içi su potansiyelini düşürerek ve iyon dengesizliğine yol açarak büyüme süreçlerini olumsuz etkiler (Munns ve Tester, 2008). Bitkiler söz konusu stres koşullarına uyum sağlayabilmek için bir dizi biyokimyasal savunma mekanizması geliştirmek zorunda kalırlar. Stres koşullarında görülen prolisin miktarındaki artış bu savunma mekanizmalarından biridir. Prolin, bitkilerde yalnızca osmoregülasyon için değil, aynı zamanda oksidatif strese karşı koruma, hücre zarlarının stabilizasyonu ve protein yapılarının korunması için de kritik bir rol oynar (Szabados ve Savoure, 2010).

Tuz stresiyle birlikte prolisin miktarında görülen artışı tespit eden birçok çalışma literatürde yer almıştır. Tuz kumu mahmuzu bitkisinde prolisin miktarının tuzluluk artışıyla doğru orantılı bir şekilde arttığı ve tuz stresine bağlı olarak prolisin değerindeki artışın % 69.9 oranında olduğu belirtilmiştir (Akçin ve ark., 2017). Soya bitkisinde, prolisin ile içsel salisilik asit miktarında artış saptanmış ve bu durum prolisin ve salisilik asitin oksijen radikallerinin olumsuz etkilerini önlemesi ve hücre duvarlarında dayanıklılık sağlamasıyla açıklanmıştır (Baran, 2011). Tritikale bitkisinde artan tuz konsantrasyonlarına bağlı olarak prolisin miktarının önemli ölçüde arttığı rapor edilmiştir (Akgün ve ark., 2011). Dışsal prolisin uygulamasının kabak bitkisinde tuza toleransın artmasında olumlu etki yaptığı bildirilmiştir (Bayat ve ark., 2014). Bir başka çalışmada, değerlendirilen tüm buğday genotiplerinde tuzluluk stresinin artmasıyla stresli bitkilerdeki prolisin içeriğinin, stressiz bitkilere göre sırasıyla % 192.61 ve % 218.87 oranında arttığı vurgulanmıştır (Hussein ve ark., 2023).

Prolin, hücre içindeki suyu tutarak ozmotik dengeyi sağlar ve hücre turgor basıncını korur. Bu durum, bitkilerin hücre dehidrasyonunu önlemelerine ve tuzluluk stresi altında dahi su dengesini korumalarına yardımcı olur (Ashraf ve Foolad, 2007). Tuzluluk stresi, ROS üretimini artırarak oksidatif strese yol açar. Prolin, ROS birikimini azaltarak hücre zarlarını ve diğer biyomolekülleri oksidatif hasardan korur (Szabados ve Savoure, 2010). Prolin, hücre zarlarını stabil hale getirerek, zar geçirgenliğinin artmasını ve iyon dengesizliğinin oluşmasını önler. Böylelikle, tuzluluk stresine maruz kalan bitkilerde hücresel bütünlüğün korunmasına yardımcı olunur (Ashraf ve Foolad, 2007). Prolin, proteinlerin dehidratasyonunu engelleyerek, hücresel proteinlerin fonksiyonel yapılarını korur. Bu özellik, bitkilerin stres koşullarında enzimatik faaliyetlerini sürdürebilmelerini sağlar (Kishor ve ark., 2005).

5. Prolin ve Ağır Metal Stresi

Ağır metal kirliliği, bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerinde ciddi sağlık sorunlarına yol açabilen önemli çevresel bir sorundur. Sanayi, tarım ve madencilik faaliyetleri gibi insan kaynaklı aktiviteler, ağır metallerin çevreye salınımını artırmaktadır. Bu metallerin başında kurşun (Pb), civa (Hg), kadmiyum (Cd), arsenik (As), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi elementler yer almaktadır. Bitkiler, bu metallerin yüksek konsantrasyonlarına maruz kaldığında oksidatif stres, büyüme bozuklukları, metabolik dengesizlikler ve hücresel hasar gibi olumsuz etkiler yaşar (Jorjani ve Karakaş, 2024).

Ağır metallerin bitkilerdeki etkileri karmaşık ve çok yönlüdür. Bu metaller, doğrudan toksik etkilerinin yanı sıra, bitkilerin biyolojik süreçlerini olumsuz etkileyen çeşitli mekanizmaları tetikler. Ağır metaller, bitkilerde ROS birikimine neden olarak oksidatif strese yol açar. ROS, bitki hücrelerinde lipid peroksidasyonuna, protein denatürasyonuna ve DNA hasarına neden olabilir. Bu durum, hücresel yapıları bozar ve bitkilerin büyüme ve gelişme süreçlerini engeller. Örneğin, Pb ve Cd gibi metaller, özellikle fotosentezle ilgili enzimlerin aktivitesini inhibe ederek bitkilerin enerji üretimini etkiler (Singh ve ark., 2016).

Ağır metaller, bitkilerde iyon dengesizliğine neden olabilir. Özellikle sodyum (Na^+) ve klorür (Cl^-) iyonlarının hücrelerde birikmesi, potasyum (K^+) ve kalsiyum (Ca^{2+}) gibi hayati elementlerin alımını engelleyebilir. Bu durum, bitkilerin su alımını olumsuz etkiler ve ozmotik dengesizliğe yol açar. Ozmotik stres, hücredeki su dengesini bozar

ve bu da bitkilerin büyüme kapasitesini kısıtlar (Hossain ve ark., 2014).

Ağır metaller, bitkilerin antioksidan enzimlerinin aktivitelerini de olumsuz yönde etkileyebilir. Bu enzimler, ROS'u nötralize ederek hücresel yapıları korur. Ancak ağır metal stresi altında bu enzimlerin etkinliği azalabilir ve bitkilerde oksidatif hasar birikir. Bu nedenle, bitkiler, oksidatif hasarı azaltmak için prolin gibi moleküllerin üretimini artırır (Berni ve ark., 2019; Jorjani ve Karakaş, 2024).

Prolin, bitkilerde stresle başa çıkma mekanizmalarına katkı sağlayan önemli bir amino asittir. Prolinin, özellikle ozmotik stres, antioksidan aktivite ve hücresel yapıları koruma gibi işlevleri ile ağır metal stresine karşı önemli bir rol oynadığı literatürle kanıtlanmıştır. Prolin, bitkilerin ozmotik baskıyı artırarak hücre içi su dengesini sağlar. Ağır metal stresinin yol açtığı osmotik dengesizlik, bitkilerin hücrelerinde su kaybına yol açabilir. Prolin, hücre içindeki ozmotik basıncı yükselterek suyun hücre içinde tutulmasına yardımcı olur, böylece bitkilerin kuraklık ve tuzluluk gibi stres faktörlerine karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlar (Ashraf ve Foolad, 2007). Prolin, reaktif oksijen türlerinin etkilerini nötralize edebilecek bir antioksidan özellik gösterir. ROS birikimi, ağır metal stresinin önemli bir sonucudur ve hücresel hasara yol açabilir. Prolin, ROS üretimini azaltarak bitkilerin oksidatif hasara karşı direnç kazanmasına yardımcı olabilir (Hayat ve ark., 2012).

Birçok çalışma, prolinin ağır metal stresine karşı bitkilerdeki olumlu etkilerini desteklemektedir. Kurşun, Zn ve Cd stresi altında buğday bitkilerinde prolin seviyelerinin önemli ölçüde arttığı ve bu artışın buğday bitkilerinde söz konusu ağır metallere karşı direnç sağladığı bildirilmiştir (Ergün, 2005). Prolinin, Cd stresine karşı özellikle antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak zeytin bitkilerinde stresle daha iyi başa çıkılmasına yardımcı olduğu açıklanmıştır (Zouari ve ark., 2016). Bir başka çalışmada buğday fidelerinde suya uygulanan dışsal prolinin köklerde ve sürgünlerde Cd içeriğinin azalmasına neden olduğu rapor edilmiştir (Genç, 2021).

6. Gelecek Perspektifleri

Prolin, bitkilerde çeşitli çevresel stres faktörlerine karşı biyokimyasal savunma mekanizmalarını destekleyen önemli bir moleküldür. Su stresi, tuz stresi, sıcaklık değişimleri, ağır metal toksisitesi ve oksidatif stres gibi çeşitli çevresel faktörler, bitkilerin sağlığını ve verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu koşullar altında, bitkiler çeşitli metabolik yanıtlar geliştirerek hayatta kalmaya

çalışırlar ve prolin, bu süreçlerin önemli bir bileşiği olarak öne çıkar.

Prolinin bitkilerdeki rolü, sadece ozmotik dengeyi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda antioksidan özellikleri ile hücrel yapıların korunmasına da yardımcı olur. Bu nedenle, prolin üretimi ve kullanımı, tarımda çevresel streslere karşı dirençli bitki türlerinin geliştirilmesinde önemli bir biyoteknolojik strateji haline gelmiştir.

Prolinin, bitkilerdeki rolü ve potansiyel biyoteknolojik uygulamaları son yıllarda yapılan araştırmalarla daha da belirginleşmiştir. Prolinin, tarımda ve biyoteknolojide nasıl kullanılabileceği üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Gelecekte, prolin üretiminin artırılması ve prolinin çeşitli tarım uygulamalarına entegrasyonu, çevresel streslerin yönetilmesinde önemli bir strateji olacaktır.

Genetik mühendislik teknikleri ile bitkilerin prolin üretimini artırmak mümkündür. Prolinin üretimi, bitkilerde prolin dehidrogenaz ve delta-1-pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5CS) gibi enzimlerin genetik olarak manipülasyonu ile artırılabilir. Bu yaklaşım, bitkilerin stres koşullarına karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlayabilir. Özellikle, su kısıtlaması ve tuz gibi faktörlerle mücadele eden bitkilerde bu stratejiler daha fazla verimlilik sağlayabilir. Çeşitli bitki türlerine aktarılan transgenlerin farklı abiyotik stres faktörlerine karşı tolerans sağladıkları yapılan araştırmalarda rapor edilmiştir. Buğday ve tütünde P5CS transgeninin (Tuteja ve ark., 2011; Zarei ve ark., 2012), portakalda P5CSF129A transgeninin (Molinari ve ark., 2004) kuraklık stresine, patates bitkisinde P5CS ve fasulye bitkisinde P5CS1 ve P5CS2 transgenlerinin (Hmida-Sayari ve ark., 2005; Chen ve ark., 2013) tuzluluk stresine karşı toleransa katkı sağladıkları belirtilmiştir. Yine çeltik bitkisinde yapılan çalışmalarda, OsamiR319b ve OsPRP3 transgenlerinin soğuk stresine karşı toleransa katkıda bulundukları açıklanmıştır (Wang ve ark., 2014; Kishor ve ark., 2015).

Prolin, özellikle su stresi ve tuz stresi gibi zorlu çevresel koşullarda bitkilerin daha iyi gelişmesini sağlamak için kullanılabilir. Tarımsal ürünlerin genetik olarak modifiye edilmesi veya dışsal olarak prolin takviyeleri yapılması, stres toleransını artırmak için etkili bir yaklaşım olabilir. Bitkilerin prolin seviyelerinin artırılması, özellikle kurak ve tuzlu topraklarda tarım yapılan alanlarda verim artışı sağlayabilir.

Ağır metal kirliliği, tarımda büyük bir sorun teşkil etmektedir. Prolinin, bitkilerde ağır metal stresine karşı biyoteknolojik bir strateji olarak kullanılması, bu sorunun çözülmesine yardımcı olabilir. Prolinin bitkilerdeki biyokimyasal

süreçlerinin düzenlenmesi, onların ağır metal toksisitesine karşı daha dirençli olmalarını sağlayabilir.

İklim değişikliği, dünya çapında tarım üretimini olumsuz etkileyen bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Aşırı sıcaklıklar, kuraklık, su kıtlığı ve tuzluluk gibi faktörler, bitkilerin verimliliğini azaltabilir. Prolinin bitkilerdeki stresle başa çıkma kapasitesinin artırılması, iklim değişikliğinin tarım üzerindeki olumsuz etkilerini azaltabilir. Genetik mühendislik ile prolin üretiminin artırılması, gelecekte daha sürdürülebilir tarım yöntemlerinin geliştirilmesine olanak tanıyabilir.

Prolin, biyoteknolojik uygulamalarda da önemli bir potansiyele sahiptir. Örneğin, prolin üretimi, bazı mikroorganizmaların stres toleransını artırmak için kullanılabilir. Ayrıca, prolinin kozmetik ve ilaç endüstrisindeki potansiyeli de araştırılmaktadır. Prolin, antioksidan özellikleri nedeniyle, cilt bakım ürünlerinde kullanılabilecek bir bileşik olabilir. Prolin, sıvı gübreler ve bitki besleme sistemlerinde bir katkı maddesi olarak kullanılabilir. Bu tür uygulamalar, özellikle bitkilerin çevresel streslere karşı dirençli hale gelmesine yardımcı olabilir. Prolin, bitkilerin hücrel yapılarını koruyarak, büyümeyi ve verimliliği artırabilir.

7. Sonuçlar

Prolin, bitkilerde çevresel streslere karşı önemli bir koruyucu rol üstlenir. Özellikle ozmotik dengeyi düzenleme, antioksidan aktivite sağlama ve hücrel yapıların korunmasında etkili olan prolin, bitkilerin zorlu çevresel koşullara adapte olmalarına yardımcı olur. Gelecekte, prolinin üretiminin artırılması ve biyoteknolojik uygulamalarda kullanımı, tarımda ve çevre bilimlerinde önemli bir gelişim sağlayabilir.

Genetik mühendislik ve biyoteknolojik araçlar, prolinin bitkilerdeki üretimini artırmanın yanı sıra, tarımda verimlilik sağlamak, su, tuz ve ağır metal stresi gibi çevresel zorluklarla mücadele etmek için güçlü araçlar sunmaktadır. Bu bağlamda, prolin, çevresel streslere karşı dayanıklı bitki türlerinin geliştirilmesi ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının oluşturulmasında önemli bir bileşen olabilir.

Etik Beyanı

Yazar, bu araştırma için etik onay gerekeceğini beyan eder.

Finansman

Bu araştırma, hiçbir dış finansman almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Akçin, A., Yalçın, E., Akçin, T.A., 2017. *Spergularia marina* (L.) Griseb. (Caryophyllaceae)'da tuzluluğun prolin ve klorofil pigmentleri üzerine etkisi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1): 80-92.
- Akgün, İ., Kara, B., Altındal, D., 2011. Effect of salinity (NaCl) on germination, seedling growth and nutrient uptake of different triticale genotypes. *Turkish Journal of Field Crops*, 16(2): 225-232.
- Ashraf, M., Foolad, M.R., 2007. roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59: 206-216.
- Baran, A., 2011. Bitkilerin tuz stresine toleransında salisilik asit ve prolin'in fizyolojik rolünün araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Bayat, R.A., Kuşvuran, Ş., Ellialtıoğlu, Ş., Üstün, A.S., 2014. Tuz stresi altındaki genç kabak (*Cucurbita pepo* L. ve *C. moschata* Poir.) bitkilerine uygulanan prolin'in, antioksidatif enzim aktiviteleri üzerine etkisi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(1): 25-33.
- Berni, R., Luyckx, M., Xu, X., Legayd, S., Sergeant, K., Hausman, J.-F., Lutts, S., Cai, G., Guerriero, G., 2019. Reactive oxygen species and heavy metal stress in plants: Impact on the cell wall and secondary metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 161: 98-106.
- Beyazyüz, F., Kulaç, Ş., 2023. Kuraklık stresinin kestane (*Castanea sativa* Mill.) fidanlarında yaprak gaz değişkenlerine ve prolin miktarlarına etkisi. *Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 11(7): 1231-1237.
- Burritt, D.J., 2012. Proline and the cryopreservation of plant tissues: Functions and practical applications. In: I.I. Katkov (Ed.), *Current Frontiers Cryopreservation*, IntechOpen, pp. 415-430.
- Chen, J.B., Yang, J.W., Zhang, Z.Y., Feng, X.F., Wang, S.M., 2013. Two P5CS genes from common bean exhibiting different tolerance to salt stress in transgenic Arabidopsis. *Journal of Genetics*, 92: 461-469.
- Dar, M.I., Naikoo, M.I., Rehman, F., Naushin, F., Khan, F.A., 2016. Proline accumulation in plants: Roles in stress tolerance and plant development. In: N. Iqbal, R. Nazar, A.N. Khan (Eds.), *Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies*, Springer, India, pp. 155-166.
- Delauney, A.J., Verma, D.P., 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal*, 4: 215-223.
- Demiralay, M., 2021. Yerel (Artvin-Şavşat) ve tescilli domates çeşitlerinde kuraklık stresine karşı tolerans seviyelerinin araştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4): 1474-1485.
- Elthon, T.E., Stewart, C.R., 1981. Submitochondrial location and electron transport characteristics of enzymes involved in proline oxidation. *Plant Physiology*, 67: 780-784.
- Ergün, N., 2005. Buğday (*Triticum aestivum* L. cv. Gün 91) fidelerinde bazı ağır metallerin ve ağır metal-hormon etkileşimlerinin fizyolojik ve biyokimyasal etkileri. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Genç, O.T., 2021. Effect of different concentration of exogenous proline applications on cadmium accumulation and mineral nutrition (K, Mg, Na, and Ca) of common wheat (*Triticum aestivum*). *Biotech Studies*, 30(2): 86-91.
- Hancı, F., Cebeci, E., 2015. Tuzluluk ve kuraklığın soğan yetiştiriciliğine etkisi. *Bahçe*, 44(1): 23-29.
- Hare, P.D., Cress, W.A., 1997. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*, 21: 79-102.
- Hare, P.D., Cress, W.A., Van Staden, J., 1998. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant, Cell & Environment*, 21: 535-553.
- 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.
- Hmida-Sayari, A., Gargouri-Bouazid, R., Bidani, A., Jaoua, L., Savouré, A., Jaoua, S., 2005. Overexpression of Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers salt tolerance in transgenic potato plants. *Plant Science*, 169: 746-752.
- Hossain, M.A., Hogue, Md.A., Burritt, D.J., Fujita, M., 2014. Proline protects plants against abiotic oxidative stress: Biochemical and molecular mechanisms. In: P. Ahmad (Ed.), *Oxidatif Damage to Plants*, Elsevier, pp. 477-522.
- Hosseini, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyła, Ł., Garnaczarska, M., 2022. Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9): 5186.
- Hussein, M.A.A., Alqahtani, M.M., Alwutayd, K.M., Aloufi, A.S., Osama, O., Azab, E.S., Abdelsattar, M., Hassanin, A.A., Okasha, S.A., 2023. Exploring salinity tolerance mechanisms in diverse wheat genotypes using physiological, anatomical, agronomic and gene expression analyses. *Plants*, 12: 3330.
- Jorjani, S., Karakaş, F.P., 2024. Physiological and biochemical responses to heavy metals stress in plants. *International Journal of Secondary Metabolite*, 11(1): 169-190.
- Kaya, A., İnanc, M., 2018. Kuraklık ve tuz streslerine maruz kalan tütün (*Nicotiana tabacum* L.) bitkisinde bazı fizyolojik ve biyokimyasal parametreler üzerine melatoninin etkileri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 21(4): 559-564.

- Kayabaşı, S., 2011. Kuraklık stresinde yetiştirilen Soya'da (*Glycine max* L.) bazı fizyolojik parametreler ile prolin birikiminin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Kishor, P.B.K., Kumari, P.H., Sunita, M.S.L., Sreenivasulu, N., 2015. Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. *Frontiers Plant Science*, 6: 544.
- Kishor, P.B.K., Sangam, S., Amrutha, R.N., Laxmi, P.S., Naidu, K.R., Rao, K.R.S.S., Rao, S., Reddy, K.J., Theriappan P., Sreenivasulu, N., 2005. Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science*, 88(3): 424-438.
- Kocsy, G., Laurie, R., Szalai, G., Szilagyi, V., 2005. Genetic manipulation of proline levels affects antioxidants in soybean subjected to simultaneous drought and heat stresses. *Physiologia Plantarum*, 124: 227-235.
- Korkmaz, H., Durmaz, A., 2017. Bitkilerin abiyotik stres faktörlerine verdikleri cevaplar. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2): 192-207.
- Lehmann, S., Funck, D., Szabados, L., Rentsch, D., 2010. Proline metabolism and transport in plant development. *Amino Acids*, 39: 949-962.
- Liang, X., Zhang, L., Natarajan, S.K., Becker, D.F., 2013. Proline mechanisms of stress survival. *Antioxidants & Redox Signaling*, 19(9): 998-1011.
- Liu, J., Wang, Y.S., 2020. Proline metabolism and molecular cloning of AmP5CS in the mangrove *Avicennia marina* under heat stress. *Ecotoxicology*, 29: 698-706.
- Lum, M.S., Hanafi, M.M., Rafii, Y.M., Akmar, A.S.N., 2014. Effect of drought stress on growth, proline and antioxidant enzyme activities of upland rice. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 24(5): 1487-1493.
- Manivannan, P., Jaleel, C.A., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G.M., Panneerselvam, R., 2007. Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 59(2): 141-149.
- Meena, M., Divyanshu, K., Kumar, S., Swapnil, P., Zehra, A., Shukla, V., Yadav, M., Upadhyay, R., 2019. Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. *Heliyon*, 5: e02952.
- Molinari, H.C., Marur, C.J., Filho, J.B., Kobayashi, A.K., Pileggi, M., Júnior, R.L., Vieira, L.E., 2004. Osmotic adjustment in transgenic citrus rootstock Carrizo citrange (*Citrus sinensis* Osb. × *Poncirus trifoliata* L. Raf.) overproducing proline. *Plant Science*, 167: 1375-1381.
- Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 651-681.
- Ribarits, A., Abdullaev, A., Tashpulatov, A., Richter, A., Heberle-Bors, E., Touraev, A., 2007. Two tobacco proline dehydrogenases are differentially regulated and play a role in early plant development. *Planta*, 225: 1313-1324.
- Roosens, N.H., Thu, T.T., Iskandar, H.M., Jacobs, M., 1998. Isolation of the ornithine-delta-aminotransferase cDNA and effect of salt stress on its expression in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*, 117(2): 263-271.
- Sarwar, M.B., Sadique, S., Hassan, S., Riaz, S., Rashid, B., Mohamed, B.B., Husnain, T., 2017. Physio-biochemical and molecular responses in transgenic cotton under drought stress. *Journal of Agricultural Science*, 23(2): 157-166.
- Schertl, P., Cabassa, C., Saadallah, K., Bordenave, M., Savouré, A., Braun, H.P., 2014. Biochemical characterization of proline dehydrogenase in *Arabidopsis mitochondria*. *The FEBS Journal*, 281(12): 2794-2804.
- Shannon, M.C., 1998. Adaptation of plants to salinity. *Advances in Agronomy*, 60: 75-120.
- Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., 2015. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: A review. *Reviews Environmental Science and Bio/Technology*, 14: 407-426.
- Singh, S., Singh, A., Bashri, G., Prasad, S.M., 2016. Impact of Cd stress on cellular functioning and its amelioration by phytohormones: An overview on regulatory network. *Plant Growth Regulation*, 80: 253-263.
- Szabados, L., Savouré, A., 2010. Proline: A multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15(2): 89-97.
- Szepesi, Á., Szöllösi, R., 2018. Mechanism of proline biosynthesis and role of proline metabolism enzymes under environmental stress in plants. In: P. Ahmad, M.A. Ahanger, V.P. Singh, D.K. Tripathi, P. Alam and M.N. Alyemeni (Eds.) *Plant Metabolites and Regulation under Environmental Stress*, Amsterdam, The Netherlands, Elsevier, pp. 337-353.
- Tuteja, N., Gill, S.S., Tuteja, R., 2011. Plant responses to abiotic stresses: shedding light on salt, drought, cold and heavy metal stress. In: N. Tuteja, S.S. Gill and R. Tuteja (Eds.), *Omics and Plant Abiotic Stress Tolerance*, Sharjah: Bentham Science Publisher, pp. 39-64.
- Ural, M., Bahar, B., Baltacı, C., 2024. Physiological and biochemical responses of some bread wheat cultivars to drought stress during the seedling stage. *15. International Conference on Agriculture, Animal Science & Rural Development*, July 12-14, Aydın, Türkiye, pp. 378-391.
- Verbruggen, N., Hermans, C., 2008. Proline accumulation in plants: A review. *Amino Acids*, 35: 753-759.
- Wang, S., Sun, X., Hoshino, Y., Yu, Y., Jia, B., Sun, Z., Sun, M., Duan, X., Zhu, Y., 2014. *MicroRNA319* positively regulates cold tolerance by targeting

- OsPCF6* and *OsTCP21* in rice (*Oryza sativa* L.). *PLoS One*, 9: e91357.
- Wang, W., Vinocur, B., Shoseyov, O., Altman, A., 2004. Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends in Plant Science*, 9(5): 244-252.
- Yalçın, V., Torun, H., Eroğlu, E., Usta, E.Ü., 2022. Şeker otu (*Stevia rebaudiana* Bertoni) bitkisinde kuraklık stresinin fizyolojik ve biyokimyasal etkileri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(3): 1165-1176.
- Yamada, M., Morishita, H., Urano, K., Shiozaki, N., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., Yoshida, Y., 2005. Effects of free proline accumulation in petunias under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 56(417): 1975-1981.
- Yancey, P.H., Clark, M.E., Hand, S.C., Bowlus, R.D., Somero, G.N., 1982. Living with water stress: Evolution of osmolyte systems. *Science*, 217: 1214-1222.
- Yılmaz, E., Tuna, A.L., Bürün, B., 2011. Bitkilerin tuz stresi etkilerine karşı geliştirdikleri tolerans stratejileri. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1): 47-66.
- Zarei, S., Ehsanpour, A.A., Abbaspour, J., 2012. The role of overexpression of *P5CS* gene on proline, catalase, ascorbate peroxidase activity and lipid peroxidation of transgenic tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) plant under in vitro drought stress. *Journal of Cell and Molecular Research*, 4: 43-49.
- Zouari, M., Ahmed, C.B., Elloumi, N., Bellassoued, K., Delmail, D., Labrousse, P., Abdallah, F.B., Rouina, B.B., 2016. Impact of proline application on cadmium accumulation, mineral nutrition and enzymatic antioxidant defense system of *Olea europaea* L. cv Chemlali exposed to cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128: 195-205.

ALINTI: Erkul, A., 2025. Prolin ve Stres Toleransındaki Önemi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 12(2): 231-238.

CITATION: Erkul, A., 2025. Proline and Its Importance in Stress Tolerance. *Turkish Journal of Agricultural Research*, 12(2): 231-238. (In Turkish).