

# Nitrik Oksit (NO) ve Abiyotik Stres Toleransı: Bağcılıkta Yapılan Uygulamalar

Aslı Tokyol<sup>1</sup> , İlknur Korkutal<sup>2</sup> , Ali Ergül<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Tekirdağ Viticulture Research Institute, Department of Breeding and Genetic Resources, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup> Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Tekirdağ, Türkiye

<sup>3</sup> Ankara Üniversitesi, Biyoteknoloji Enstitüsü, Ankara, Türkiye

**Nasıl alıntı yapılır:** Tokyol, A., Korkutal, İ., Ergül, A. (2026). Nitrik Oksit (NO) ve Abiyotik Stres Toleransı: Bağcılıkta Yapılan Uygulamalar. Viticulture Studies (VIS), 6(1): 29-47 <https://doi.org/10.52001/vis.2026.33.29.47>

## Makale Geçmişi:

Başvuru Tarihi: 16.12.2025

Kabul Tarihi: 14.01.2026

Yayın Tarihi: 29.01.2026

## Sorumlu Yazar

[asli.tokyol@tarimorman.gov.tr](mailto:asli.tokyol@tarimorman.gov.tr)

## Anahtar Kelimeler

Nitrik Oksit  
Sinyal Molekülleri  
Abiyotik Stres  
Stres Toleransı  
Bağcılık

## Keywords

Nitric Oxide  
Signaling Molecules  
Abiotic Stress  
Stress Tolerance  
Viticulture

## Özet

İklim değişikliği sebebiyle ortaya çıkan stres koşulları, tarımsal üretim ve bitki fizyolojisi üzerinde önemli olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bitkilerin bu stres faktörlerine karşı geliştirdiği fizyolojik ve moleküler yanıtlar ile bu süreçlerde rol alan biyomoleküller, bitki stres biyolojisi açısından büyük önem taşımaktadır. Farklı stres koşullarına rağmen bitkiler, stres toleransının sağlanmasında sinyal moleküllerinden yararlanmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu sinyal moleküllerinden biri olan Nitrik Oksit (NO)'in, bitki gelişimi, stres algısı ve savunma mekanizmalarının düzenlenmesinde önemli bir role sahip olduğunu ortaya koymuştur. NO'nun bitkiler üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi, stres koşullarına verilen yanıtların daha iyi anlaşılmasına ve tarımsal üretimde sürdürülebilir yaklaşımların geliştirilmesine önemli katkılar sunacaktır. Bu derlemede, NO'nun bitkilerdeki sentez mekanizmaları, fizyolojik süreçlerdeki işlevleri ve abiyotik stres koşullarındaki düzenleyici rolleri ele alınmış; bağcılıkta kuraklık, tuzluluk ve sıcaklık stresi gibi faktörlerin olumsuz etkilerinin azaltılması, asmanın stres toleransının artırılması ve ürün kalitesinin korunmasına yönelik güncel literatür bulgularına yer verilmiştir. NO'nun bitkisel stres biyolojisindeki artan önemi, bağcılıkta sürdürülebilir üretim stratejilerinin geliştirilmesi açısından gelecek vadeden bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

## Nitric Oxide (NO) and Abiotic Stress Tolerance: Applications in Viticulture Abstract

Climate change-induced stress conditions have caused significant adverse effects on agricultural production and plant physiology. The physiological and molecular responses developed by plants against these stress factors, as well as the biomolecules involved in these processes, are of great importance in terms of plant stress biology. Despite various stress conditions, plants utilize signaling molecules to achieve stress tolerance. In recent years, studies have revealed that nitric oxide (NO), one of these signaling molecules, plays a crucial role in the regulation of plant growth, stress perception, and defense mechanisms. A detailed investigation of the effects of NO on plants will contribute significantly to a better understanding of plant responses under stress conditions and to the development of sustainable approaches in agricultural production. In this review, the biosynthetic mechanisms of NO in plants, its functions in physiological processes, and its regulatory roles under abiotic stress conditions are discussed; furthermore, recent literature findings are presented regarding the mitigation of the adverse effects of factors such as drought, salinity, and heat stress in viticulture, the enhancement of grapevine stress tolerance, and the preservation of fruit quality. The increasing importance of NO in plant stress biology stands out as a promising approach for the development of sustainable production strategies in viticulture.

## Giriş

Bitkiler, yaşam süreçleri boyunca kuraklık, yüksek sıcaklık, tuzluluk ve ağır metal stresi gibi çeşitli abiyotik stres faktörleriyle karşılaşmaktadır. Bu stres koşullarına karşı savunma yanıtlarının düzenlenmesinde görev alan NO, bitki gelişimi ve çevresel streslere verilen fizyolojik ve moleküler tepkilerde önemli rol oynayan etkili bir redoks sinyal molekülüdür (Nabi ve ark., 2019).

NO'nun bitkiler üzerindeki etkisi türden türe farklılık göstermekle birlikte, stres koşullarında bu molekülün seviyesinin yükseldiği ve bunun da stres toleransı geliştirilmesinde doğrudan ilişkili olduğu çeşitli araştırmalarda belirtilmiştir. Stres durumunda bitkiler, savunma sistemlerini aktive etmek üzere reaktif oksijen türleri (ROS) üretirler (Jaspers ve Kangasjärvi, 2010); fakat bu türlerin fazlalığı hücrel dengeleri bozarak oksidatif hasara yol açabilmektedir (Asada, 2006). NO, ROS türlerinin dengesini sağlayarak hücre içi redoks ortamını korumaya yardımcı olmaktadır (Vranová ve ark., 2002). Her ne kadar NO'nun bitkilerdeki kesin işlevi hala tam anlamıyla anlaşılabilmiş ve türe özgü farklılıklar göstermiş olsa da yapılan araştırmalar, stres koşulları altında NO birikimi ile bitkisel stres tepkileri arasında pozitif bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır (Nabi ve ark., 2019). Bu nedenle NO hem bitkinin gelişim süreçlerini destekleyen hem de çevresel stres faktörlerini modüle eden temel bir sinyal molekülü olarak değerlendirilmektedir.

Asma (*Vitis vinifera* L.), hem tarihsel hem de ekonomik açıdan önemli bir tarım ürünü olup, dünya genelinde yaklaşık 10.000 üzüm çeşidi bulunmaktadır (Yeğenoğlu ve ark., 2016). Son yıllarda iklim değişikliğine bağlı olarak değişen çevresel faktörler, bağ alanlarını tehdit etmektedir (Arık ve ark., 2023). Asma, stres koşullarına karşı belirli fizyolojik uyum mekanizmaları geliştirmiş olsa da, vejetatif ve generatif gelişim evrelerinde meydana gelen iklimsel değişimler, bitkinin gelişim sürecini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu etkiler; fenolojik süreçler, morfolojik özellikler, fotosentetik kapasite, verim miktarı ve üzüm kalitesi gibi pek çok parametrede farklı düzeylerde değişimlere neden olabilmektedir (Soltekin ve ark., 2021). Bu stres koşulları altında, bitkilerin verdiği yanıtları daha iyi anlayabilmek bağcılık stratejilerinin belirlenmesi açısından

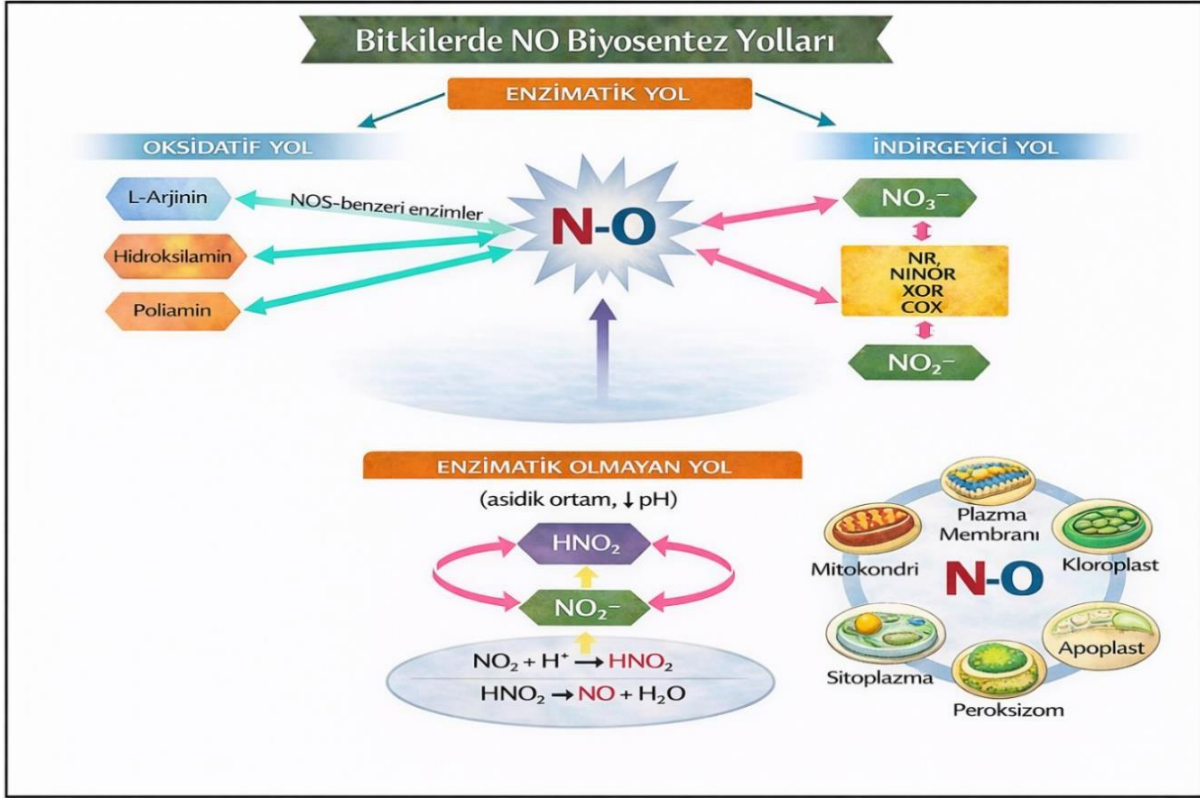
önem taşımaktadır (Arık ve ark., 2023).

## Nitrik Oksit'in Bitkilerde Sentezi ve Metabolizması

NO, bitkilerde ilk kez Klepper tarafından 1979 yılında rapor edilmiş ve başlangıçta zararlı bir gaz olarak kabul edilmiştir. Ancak ilerleyen yıllarda yapılan araştırmalar, NO'nun hem bitki hem de hayvan hücrelerinde çok sayıda fizyolojik ve biyokimyasal süreci düzenleyen etkili bir sinyal molekülü olduğunu ortaya koymuştur (Khan ve ark., 2023). Bu nedenle, 1992 yılında "Yılın Molekülü" ünvanını alarak, bitki fizyolojisinde önemli bir biyoregülatör olarak tanımlanmıştır (Levine ve ark., 2012).

Küçük, lipofilik ve serbest radikal yapısı sayesinde hücre zarlarını kolayca geçebilen NO hem hücre içi hem de hücreler arası sinyal iletiminde görev almaktadır (Hayat ve ark., 2010; Zhang ve ark., 2007). Başlangıçta bir çevre kirleticisi olarak sınıflandırılmış olsa da, günümüzde NO'nun özellikle bitki gelişimi ve stres tepkilerinin düzenlenmesinde kritik bir redoks bileşeni olduğu kabul edilmektedir (Hancock ve Veal, 2021). Reaktif azot bileşenleri (RNS) arasında yer alan NO, çevresel stres altında üretimi artarak bitkisel savunma yanıtının koordinasyonunda rol oynamaktadır (Wu ve ark., 2011; Fröhlich ve Durner, 2011).

Her ne kadar NO'nun bitkisel hücrelerde önemli bir sinyal bileşiği olduğu bilinse de, biosentez yolları henüz tam anlamıyla aydınlatılamamıştır. Güncel çalışmalar, bu sentezin sekiz farklı yol aracılığıyla gerçekleştiğini ve bu yolların oksidatif ya da indirgeme temelli mekanizmalarla sınıflandırıldığını bildirmektedir (Santisree ve ark., 2019). Oksidatif yollarda; L-arjinin'in nitrik oksit sentez (NOS) benzeri enzimlerle oksidasyonu, poliaminlerin ve hidroksilaminin dönüşümü öne çıkarken; indirgeme esaslı yollarda nitrat redüktaz (NR), nitrit:NO redüktaz (NiNOR), ksantin oksidoredüktaz (XOR) ve sitokrom c oksidaz (COX) gibi enzimlerin aktif rol aldığı bildirilmiştir (Crawford ve Guo, 2005). Ayrıca, asidik ortamda nitritin, nitroz asite ( $\text{HNO}_2$ ) dönüşmesi ve  $\text{HNO}_2$ 'nin kimyasal bozunması sonucu oluşan NO, bu süreçte enzimatik olmayan yollarla da sentezlenebilmektedir (Gupta ve ark., 2011; Khan ve ark., 2013; Procházková ve ark., 2014). NO sentezinin oksidatif ve indirgeme yolları Şekil 1' de gösterilmiştir.



**Şekil 1:** Bitki hücresinde NO sentezinin; L-arjinin'e bağlı oksidatif yol ve nitrit indirgenmesine dayalı indirgen yollar aracılığıyla gerçekleştiğini ve mitokondri, kloroplast, peroksizom ve apoplast gibi hüresel kompartımanların bu sürece katkı sağladığını gösteren şematik model.

NO sentezinin bitki hücresinde farklı bölgelerde gerçekleştiği bilinmektedir: kloroplastlarda NR yardımıyla nitrit indirgenmesi, mitokondride nikotiamid adenin dinükleotid fosfat (NADPH)'ye bağlı mitokondriyal nitrit-nirik oksit redüktaz (mtNi:NOR) yolu ile üretim; peroksizom, sitoplazma, plazma membranı ve apoplast gibi organellerde de senteze katkı sağlandığı ifade edilmiştir. Bu yolların etkinliği; bitki türüne, dokunun yapısına ve çevresel koşullara göre değişiklik gösterebilmektedir (Hancock, 2012; Salgado ve ark., 2013).

Son yıllarda, bitkilerde doğal olarak üretilen biyomoleküllerin eksojen uygulamalarla büyüme ve gelişim süreçlerini düşük konsantrasyonlarda dahi destekleyebildiği gösterilmiştir (Ashraf ve Foolad, 2007; Ashraf ve ark., 2008). Bu kapsamda NO donörleri, bitki fizyolojisi ve metabolizmasında önemli elisitörler arasında sayılmaktadır (Yağcı ve ark., 2022). sodyum nitroprusid (SNP), S-nitrozo-N-asetilpenisilamin (SNAP), S-nitrozoglutasyon (GSNO), 3-morfolinosidonimin (SIN-1) ve diazenyumdiolatlar (NONOatlar) gibi bileşikler, deneysel çalışmalarda NO salınımı için yaygın

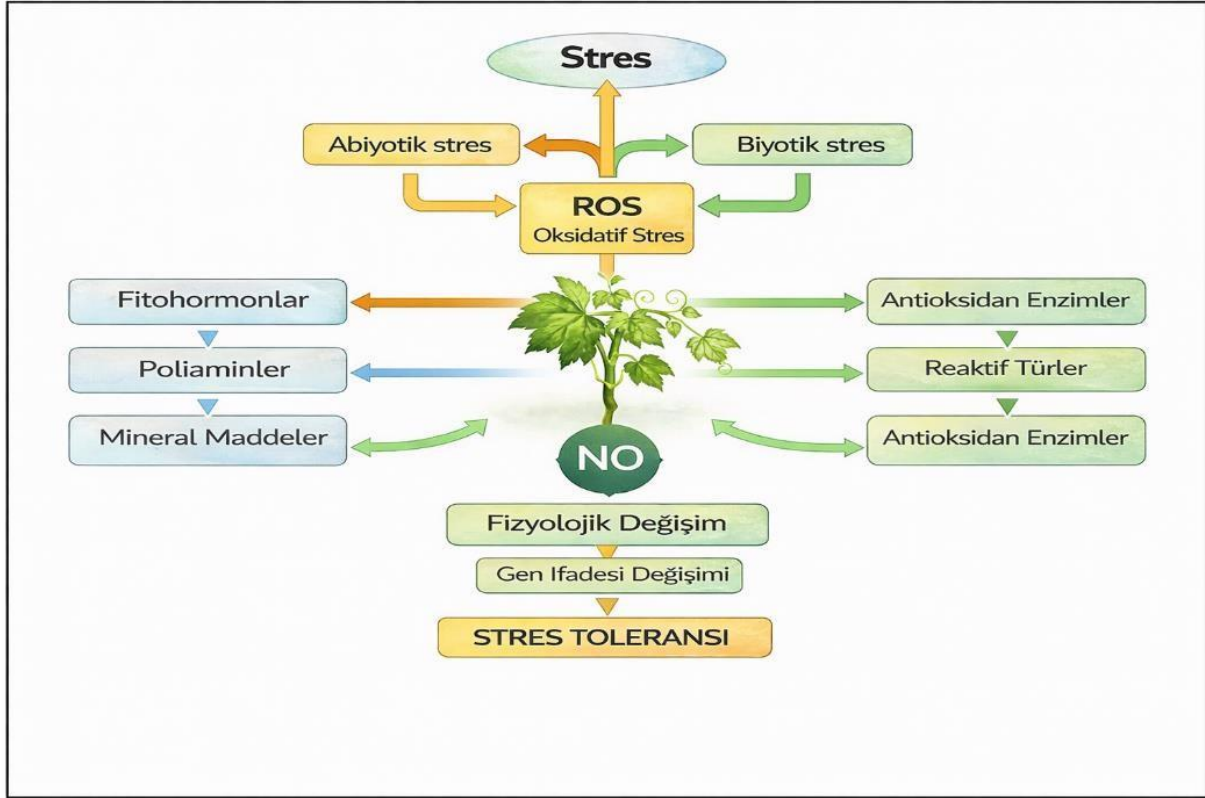
olarak kullanılmakta; özellikle SNP, kararlılığı ve kontrollü salınımı sayesinde öne çıkmaktadır (Gupta ve ark., 2011).

Dışsal NO uygulamaları, abiyotik ve biyotik stres koşullarında bitkisel hasarın azaltılmasına katkı sağlar. Ancak bu uygulamaların etkinliği; kullanılan donörün kimyasal yapısı, dozajı, stresin türü ve bitkinin fizyolojik durumu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. NO'nun küçük, yüksüz ve geçici yapısı sayesinde, hücre zarlarını geçerek çevresel sinyallere karşı hızlı ve etkili bir haberci olarak işlev görmesi bu süreçte avantaj sağlamaktadır (Kumar ve Ohri, 2023).

### Nitrik Oksit ve Fizyolojik Süreçlerdeki Rolü

NO, bitkilerin büyüme, gelişme ve çevresel stres koşullarına karşı yanıt mekanizmalarında çok yönlü işlevlere sahip olan bir moleküldür. Bitkilerde çimlenmeden yaprak yaşlanmasına kadar uzanan pek çok fizyolojik süreci düzenleme kapasitesine sahiptir (Simontacchi ve ark., 2015; Hussain ve ark., 2022).

NO, oksidatif stresin kontrolünde ve antioksidan savunma sistemlerinin etkinliğinin



**Şekil 2:** Abiyotik ve biyotik stres koşullarında nitrik oksidin (NO), reaktif oksijen türleri (ROS) ve antioksidan savunma sistemi ile etkileşerek fizyolojik ve moleküler düzeyde stres toleransını düzenlemesini gösteren model.

artırılmasında önemli bir rol oynar. Metal iyonlarının taşınması, iyon homeostazının korunması ve hücrel redoks dengesinin sürdürülmesi yoluyla bitkisel metabolizmanın istikrarına katkı sağlamaktadır. Ayrıca NO, çeşitli moleküllerle etkileşerek gen ekspresyonu ve protein fonksiyonlarını düzenler; böylece bitkilerin çevresel koşullara verdiği yanıtlar şekillenmektedir (Huang ve ark., 2019; Mandal ve ark., 2022). NO'nun stres algısı, oksidatif süreçler, sinyal ağları, gen ekspresyonu düzenlenmesi ve tolerans gelişimi üzerindeki etkisi Şekil 2'de gösterilmiştir.

Patojen saldırısı, hipoksi, ultraviyole (UV) radyasyonu, kuraklık, tuzluluk, aşırı sıcaklıklar ve ağır metal toksisitesi gibi stres koşullarında NO transkripsiyon faktörlerini etkileyerek genetik düzeyde savunma tepkilerini modüle etmektedir (Rahim ve ark., 2022; Rolly ve ark., 2020; Khan ve ark., 2021).

NO, bitki fizyolojisinde hem endojen hem de eksojen kaynaklı olarak etki göstermektedir. Endojen NO; hormon sentezinin düzenlenmesi, stomal hareketlerin kontrolü ve programlanmış hücre ölümünün önlenmesi gibi temel süreçlerde rol oynarken, eksojen NO uygulamaları süperoksit anyonlarının üretimini

sınırlayarak oksidatif hasarı azaltmaktadır (Simontacchi ve ark., 2015; Shi ve ark., 2007). NO aynı zamanda süperoksit anyonları ve lipit radikallerini nötralize ederken; süperoksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), glutatyon peroksidaz (GPX), katalaz (CAT), glutatyon redüktaz (GR), glutatyon S-transferaz (GST) ve monodehidroaskorbat redüktaz (MDHAR) gibi antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırarak abiyotik stres toleransını desteklemektedir (Goyal ve ark., 2021; Sami ve ark., 2021).

### Nitrik Oksit ve Sinyal Molekülleri Etkileşimi

NO, hidrojen sülfür ( $H_2S$ ) ile etkileşim halindedir ve bu etkileşim stomal kapanma, klorofil içeriğinin korunması ve su kaybının azaltılması gibi adaptif süreçleri desteklemektedir (García-Mata ve Lamattina, 2010; Antoniou ve ark., 2020). NO'nun baskılanması durumunda  $H_2S$ 'nin etkisinin de kaybolması, aralarındaki sinyal ilişkisini göstermektedir.

Hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ile NO arasındaki ilişki ise bitkinin savunma mekanizmalarında eş zamanlı rol oynamaktadır. NO,  $H_2O_2$  üretimini

uyarabilir ve bu iki molekül, absisik asit (ABA) aracılı savunma yanıtları ve fotosentetik dengenin korunması gibi süreçlerde birlikte çalışmaktadır (Shi ve ark., 2015; Liao ve ark., 2012).

NO ile kalsiyum iyonu ( $Ca^{2+}$ ) arasında da karşılıklı bir etkileşim bulunmaktadır. NO, plazma zarındaki kalsiyum kanallarını aktive ederek sitozolik  $Ca^{2+}$  düzeylerini artırırken; artan  $Ca^{2+}$  düzeyleri de NO üretimini teşvik etmektedir (Lamotte ve ark., 2004; Rodríguez-Serrano ve ark., 2009).

Ayrıca poliaminler (PA'lar), bitkilerde NO sentezini uyararak stres toleransını destekleyen bir rol oynamaktadır. Eksojen PA uygulamalarının NO üretimini artırdığı ve bu sayede kuraklık gibi stres koşullarına karşı dayanıklılığı güçlendirdiği gösterilmiştir (Hussain ve ark., 2011).

Bu etkileşimlerin tamamı, NO'nun yalnızca tekil bir sinyal değil; aynı zamanda diğer sinyal molekülleriyle koordineli çalışan merkezi bir düzenleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

### Nitrik Oksit ve Fitohormonlar ile Etkileşimi

NO, bitkilerde hormonal sinyal yollarıyla etkileşerek büyüme, gelişme ve stres yanıtlarını koordine etmektedir. Abiyotik stres koşullarında, özellikle ABA ile olan etkileşimi öne çıkmaktadır. NO, ABA sinyallesini modüle ederek stomaların kapanması, su dengesinin korunması ve antioksidan savunma sistemlerinin aktivasyonunu desteklemektedir (Neill ve ark., 2008; Hasanuzzaman ve ark., 2018).

NO'nun oksin ile ilişkisi ise özellikle kök uzaması, yönelimli büyüme ve hücre bölünmesi gibi gelişimsel süreçlerde önemlidir. NO, oksin sentezini veya taşınmasını etkileyerek morfolojik adaptasyonları yönlendirmektedir (Kolbert ve ark., 2019).

Sitokinin ile NO arasındaki etkileşim daha karmaşıktır; genellikle zıt işlevleri düzenleyen bir denge mekanizması olarak işlemektedir. Sitokininler hücre bölünmesini ve yaşlanmanın gecikmesini desteklerken, NO bu süreçleri baskılayabilir ya da yeniden yönlendirebilmektedir. Özellikle NO'nun sitokinin sinyallesini negatif yönde etkilemesi, yaprak yaşlanması gibi süreçlerde etkili olmaktadır (Kiba ve ark., 2011; Černý ve ark., 2011).

NO ile etilen arasındaki etkileşim, bitkilerin stres tepkileri ve gelişimsel süreçlerinde önemli

düzenleyici rol oynamaktadır. NO, etilenin sentezi ve sinyal iletim yollarını modüle ederek özellikle yaprak yaşlanması, stomal hareketler ve programlanmış hücre ölümü gibi süreçleri düzenlemektedir (Tun ve ark., 2006; Corpas ve ark., 2011). Abiyotik stres koşullarında, NO etilen üretimini baskılayarak hücrel yıkımın önüne geçebilmektedir (Liu ve ark., 2007).

Genel olarak NO'nun fitohormonlarla gerçekleştirdiği bu çok yönlü etkileşimler, bitkinin stres koşullarına uyumunu; büyüme süreçleri ile savunma mekanizmalarını senkronize ederek mümkün kılmaktadır.

### Nitrik Oksit ve Abiyotik Stres Toleransındaki Rolü

Abiyotik stres, çevresel şartların neden olduğu ultraviyole, yüksek ve düşük sıcaklık, donma, kuraklık, tuzluluk, ağır metaller gibi durumları kapsamaktadır. Abiyotik stres faktörlerine karşı bitkilerin geliştirdiği yanıtların anlaşılması, bitki araştırmalarında büyük önem taşımaktadır (Hirayama ve Shinozaki, 2010).

*Yüksek Sıcaklık Stresi;* bitki gelişimini sınırlandıran stres faktörlerinden biridir. Hücrel düzeyde bu stres; oksidatif hasar, lipid peroksidasyonu, protein denatürasyonu, pigment bozulması, enzim inaktivasyonu ve DNA zincirinde kırılmalara yol açmaktadır (Szymańska ve ark., 2017; Carneiro-Carvalho ve ark., 2021; Kumar ve ark., 2021). Bitkiler bu zararları azaltmak amacıyla savunma mekanizmalarını harekete geçirmekle birlikte, bu mekanizmaların önemli bileşenlerinden biri NO'dur.

Sıcaklık stresine maruz kalan bitkilerde endojen NO üretimi artış gösterir. NO, bir sinyal molekülü olarak görev yapar ve çeşitli savunma yollarını düzenler. Örneğin, bakla üzerinde yapılan bir çalışmada, artan oksidatif yük ve ROS seviyeleri, NO birikimini tetiklemiş; NO ise prolin biyosentezi, antioksidan savunma sistemlerinin düzenlenmesi ve ısı şok proteinlerinin aktivasyonu yoluyla hücrel uyum mekanizmalarını yönlendirmiştir. NO'nun bu düzenleyici etkisi, cPTIO (2-(4-karboksifenil)-4,4,5,5-tetrametilimidazolin-1-oksil-3-oksit) ile NO'nun uzaklaştırılması sonucunda prolin birikimi, nispi su içeriği ve savunma yanıtlarının azalmasıyla doğrulanmıştır. Bu bulgular, NO'nun hem stres algılamasında sinyal ileticisi hem de metabolik yanıtların koordinatörü olarak yüksek

sıcaklık toleransında anahtar bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır (Alamri ve ark., 2019).

Bununla birlikte, dışsal NO uygulamalarının sıcaklık stresine karşı koruyucu etkileri birçok bitkide gösterilmiştir. Örneğin, mısır fidelerinde NO uygulaması lipid peroksidasyonu ve elektrolit sızıntısını azaltarak hayatta kalma oranını artırmıştır (Li ve ark., 2015). Benzer şekilde buğdayda NO uygulaması, lipid peroksidasyonunu baskılamış ve sürgün dokularında membran termostabilitesini iyileştirmiştir (Bavita ve ark., 2012). Zencefil yapraklarında yapılan çalışmalarda NO uygulamasının elektrolit sızıntısı ve klorofil kaybını azalttığı, böylece bağıl su içeriğini artırdığı bildirilmiştir (Parankusam ve ark., 2017). Marulda NO uygulamasının çimlenme oranlarını yükselttiği, çeltikte ise düşük konsantrasyonlardaki NO'nun sıcaklığa bağlı fizyolojik bozulmaları hafiflettiği belirlenmiştir (Deng ve ark., 2012; Song ve ark., 2013). Bu bulgular toplamda NO'nun yüksek sıcaklık stresine karşı hücresel bütünlüğü koruyarak fizyolojik uyumu artıran bir düzenleyici molekül olduğunu göstermektedir.

NO, hücrede antioksidan sistemlerin aktivasyonunu sağlar. SOD, APX ve GR gibi enzimlerin aktivitelerini artırarak oksidatif zararın azaltılmasına katkıda bulunur. Ayrıca, redoks dengesini koruyan glutatyon ve askorbat sistemlerinin düzenlenmesinde de etkili olmaktadır (Hasanuzzaman ve ark., 2012). NO uygulaması buğday kallusunda, antioksidan enzim aktivitelerini ve toplam glutatyon içeriğini yükselterek ısı kaynaklı oksidatif hasarı azaltmıştır (El-Beltagi ve ark., 2016). Buna ek olarak, NO'nun gliksalaz I-II, DHA redüktaz ve MDHA redüktaz enzimlerini aktive ederek redoks homeostazının korunmasına da katkı sağladığı belirtilmiştir (Hasanuzzaman ve ark., 2012).

Ayrıca, NO'nun diğer moleküllerle birlikte kullanımı da dikkate değerdir. Örneğin domateste yapılan bir çalışmada; NO ve kalsiyum birlikte uygulandığında klorofil bozunması sınırlanmış; RuBisCo, karbonik anhidraz ve nitrat redüktaz aktiviteleri artmıştır (Siddiqui ve ark., 2017). ABA ve NO birlikte uygulandığında ise buğdayda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> düzeyi düşmüş, ozmolit birikimi ve antioksidan aktivite artmıştır (Iqbal ve ark., 2022).

Moleküler düzeyde de NO'nun stres yanıtlarının düzenlenmesinde etkili olduğu gösterilmiştir. *Arabidopsis thaliana* üzerinde

yapılan çalışmada, NO'nun AtCaM3'e kadar uzanan sinyal yollarında görev aldığı; HSP18.2 protein bolluğunu ve HSF transkripsiyon faktörlerinin DNA bağlanma kapasitelerini artırdığı belirlenmiştir (Xuan ve ark., 2010).

Genel olarak, NO hem endojen üretimiyle hem de dışsal uygulamalar yoluyla bitkilerde sıcaklık stresi toleransının oluşumunda merkezi bir rol oynamaktadır. Antioksidan savunmayı güçlendirmesi, membran ve protein stabilitesini koruması ve genetik düzeyde stres yanıtını düzenlemesi ile NO, yüksek sıcaklık koşullarında bitki dayanıklılığının artırılmasına önemli katkı sağlamaktadır.

*Düşük Sıcaklık Stresi;* bitki gelişimini sınırlayan başlıca çevresel stres faktörlerinden biridir. Bu koşullar, metabolik faaliyetlerin yavaşlamasına, hücre zarlarının akışkanlığının azalmasına ve ROS birikimine bağlı olarak oksidatif stresin artmasına yol açmaktadır. Bu süreçte, NOS-benzeri enzimler ve NR aktivitesindeki artış, endojen NO sentezini tetiklemektedir (Cantrel ve ark., 2011). NO'nun hem endojen hem de eksojen formları, bitkide don toleransı ve soğuk adaptasyonun geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Zhao ve ark., 2009; Zhao ve ark., 2011).

NO uygulamaları, MDA düzeylerini azaltırken klorofil, çözünür şeker ve antioksidan enzim aktivitelerini artırarak hücresel hasarı sınırlamaktadır (Liu ve ark., 2011). Örneğin, Bermuda çiminde NO, elektrolit sızıntısını azaltmış ve SOD ile POX aktivitelerini yükseltmiştir (Fan ve ark., 2015). Çayır otu gibi soğuğa dayanıklı türlerde, NO uygulaması ile SOD, CAT, APX ve GR enzimlerinin aktivitesi belirgin şekilde artmış; buna karşılık NO inhibitörü olan cPTIO'nun bu etkileri ortadan kaldırması, NO'nun doğrudan koruyucu rolünü doğrulamıştır (Fu ve ark., 2016).

Domates ve kavun gibi türlerde de benzer şekilde, NO uygulaması fotosentetik sistem hasarını azaltmış ve antioksidan yanıtı güçlendirmiştir (Diao ve ark., 2016). Buğdayda NO ile salisik asit (SA) birlikte uygulanması, lipid peroksidasyonunu ve hidrojen peroksit birikimini düşürerek sinerjik koruma sağlamıştır (Esim ve Atıcı, 2015).

Soğuk stresi yalnızca yaprak dokularını değil, meyve dokularını da etkiler. Hasat sonrası NO uygulamaları; kabak, muz ve şeftali meyvelerinde kaliteyi korumuş ve soğuk kaynaklı hasarı azaltmıştır (Jiménez-Muñoz ve ark., 2021;

Wang ve ark., 2016; Song ve ark., 2021).

Moleküler düzeyde, NO'nun gen ekspresyonunu da düzenlediği gözlenmiştir. Hıyarda NO uygulaması, MYB63, WRKY21, HD-ZIP ve bZIP gibi transkripsiyon faktörlerini aktive etmiş; kavun bitkisinde ise şeker metabolizması, lignin sentezi ve fenilalanin yolaklarına ait genlerde ifade düzeylerinde artış gözlenmiştir (Wu ve ark., 2022; Iqbal ve ark., 2022).

NO'nun soğuk stresine karşı koruyucu etkisi; antioksidan savunmanın güçlendirilmesi, ROS birikiminin baskılanması, gen ekspresyonunun yeniden düzenlenmesi ve sinyal molekülleriyle olan etkileşimleri aracılığıyla çok katmanlı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamlı rolü, NO'yu soğuk stres toleransının kilit düzenleyicilerinden biri haline getirmektedir.

*Kuraklık Stresi*; iklim değişikliğinin etkisiyle giderek artan tarımsal verim kayıplarının başlıca nedenlerinden biridir. Bu abiyotik stres faktörü, bitkilerde su kullanım verimliliği, stomal iletkenlik, yaprak büyümesi, fotosentetik kapasite ve membran bütünlüğü gibi yaşamsal süreçleri olumsuz etkilemektedir (Bartels ve Sunkar, 2005; Fahad ve ark., 2017).

Bu stres koşullarında NO hem endojen olarak sentezlenmekte hem de eksojen yollarla uygulanarak savunma mekanizmalarını aktive etmektedir. NO, stomaların kapanmasını uyararak transpirasyonu sınırlar ve su kaybını azaltır (Garcia-Mata ve Lamattina, 2009). Aynı zamanda, antioksidan sistemlerin aktivasyonunu sağlayarak ROS birikimini sınırlandırmaktadır (Sidana ve ark., 2015).

NO üretimi; bitki türü, gelişim evresi, stres süresi ve şiddeti gibi faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir (Lau ve ark., 2021). Örneğin, kuraklığa toleranslı kumul sazlarında NO üretimi artarken, bataklık sazlarında bu artış gözlenmemiştir; bu fark, antioksidan enzim aktivitelerindeki yükselme ve serbest radikal düzeylerindeki düşüşle birlikte tespit edilmiştir (Zhao ve ark., 2008).

NO sentezi ile ABA sentezinin birbiriyle etkileşim halinde olduğu bilinmektedir. Buğday fidelerinde NO sentezinin baskılanması, ABA düzeylerinde düşüşe yol açmış; bu durum NO'nun ABA üretimini tetikleyici rolünü desteklemiştir (Zhao ve ark., 2008).

NO uygulamaları, birçok türde kuraklık stresine karşı koruyucu etkiler göstermiştir. Soya fasulyesine uygulanan NO, fotosentetik verimliliği, bağlı su içeriğini ve biyokütleyi

artırmış, aynı zamanda lipid peroksidasyonunu ve ROS birikimini azaltmıştır (Imran ve ark., 2021). Benzer şekilde domateste farklı dozlarda NO uygulaması, antioksidan enzim aktivitelerini ve bağlı su içeriğini yükseltmiş, stres altındaki bitkilerde viral hastalık insidansını düşürmüştür (Elkelish ve ark., 2021). Buğday fidelerinde NO uygulaması, fotosentez hızı, SOD ve CAT aktiviteleri ile bağlı su içeriğini artırmış; oksidatif hasarı azaltmıştır (Tan ve ark., 2008; Tian ve ark., 2006). Karpuzda NO uygulaması, APX enzim aktivitesini artırarak kuraklık kaynaklı hücre hasarını azaltmıştır (Hamurcu ve ark., 2020).

NO, aynı zamanda ozmotik homeostazın sağlanmasında da görev alır. Prolin, glisin, betain gibi osmoprotektanların birikimini teşvik ederek kuraklık koşullarında su potansiyelinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Rezayian ve ark., 2020). Bu etki, özellikle melatonin (MEL) gibi diğer sinyal molekülleriyle birlikte uygulandığında güçlenmektedir. MEL + NO kombinasyonu, soya fasulyesi bitkilerinde toplam biyoküttele artışa ve oksidatif stresin azalmasına neden olmuştur (Imran ve ark., 2021).

NO'nun tohum priming uygulamalarıyla da kuraklık toleransını artırdığı gösterilmiştir. Domates tohumlarında NO ile yapılan priming, prolin birikimini ve antioksidan enzim aktivitelerini artırmıştır (Hayat ve ark., 2011). Arpacıktan elde edilen soğan bitkilerine NO uygulaması, yaprak su içeriğini ve fotosentetik pigmentleri artırmanın yanı sıra, allisin üretimini ve rejenerasyon oranını da yükseltmiştir (Ghassemi-Golezani ve ark., 2018).

Moleküler düzeyde, NO uygulaması antioksidan genlerin ekspresyonunu da tetiklemektedir. Soya fasulyesinde NO uygulamasının MDA içeriğini düşürdüğü ve PAL ile SOD gen ekspresyonunu artırdığı tespit edilmiştir (Rezayian ve ark., 2023).

NO, kuraklık stresine karşı bitkilerde çok yönlü bir koruma sağladığı bilinmektedir. Bu etki; stomal düzenleme, ABA sinyalleme, ozmotik denge, antioksidan savunma ve gen ekspresyonu gibi çeşitli yollarla ortaya çıkmaktadır. Ancak NO'nun etkinliği, uygulama dozu, yöntemi, bitki türü ve stres şiddeti gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle NO uygulamaları, kuraklık stresine karşı potansiyel bir strateji olarak görülmektedir.

*Tuz stresi*; yüksek tuz konsantrasyonlarına maruz kalan bitkilerde ozmotik ve iyonik dengenin bozulmasına neden olarak büyüme, gelişme ve metabolik süreçlerde ciddi

aksamalara yol açmaktadır (Mohinani ve ark., 2021). Bu durum; membran hasarı, iyon sızıntısı, DNA bütünlüğünün bozulması ve metabolik disfonksiyonlar gibi çeşitli fizyolojik bozukluklarla sonuçlanabilmektedir (Hasegawa ve ark., 2000). Ayrıca fotosentez, solunum, enzim aktiviteleri ve antioksidan savunma sistemleri gibi temel yaşamsal süreçlerde de bozulmalar gözlenmektedir (Munns ve Tester, 2008). Tuz stresine maruz kalan bitkiler genellikle klorofil içeriğinde azalma sergilerken; elektrolit sızıntısında, ROS birikiminde ve lipid peroksidasyonunda artış ortaya çıkmaktadır (Tian ve ark., 2015).

Bu stres koşullarında NO, bitkisel savunma yanıtlarının düzenlenmesinde merkezi bir sinyal molekülü olarak rol oynamaktadır. NO, plazma membranındaki H<sup>+</sup>-ATPaz enzimini aktive ederek K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> oranının dengede tutulmasına katkı sağlamakta ve iyon toksisitesini sınırlamaktadır (Zhao ve ark., 2007). Özellikle *Arabidopsis thaliana*'nın Atnoa1 mutantlarında gözlenen düşük NO düzeylerinin, yüksek Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> oranı ve azalmış hayatta kalma oranlarıyla ilişkili olması bu rolü desteklemektedir (Guo ve ark., 2003). NO yanıtının etkinliği; bitki türü, gelişim evresi ve maruz kalınan tuz seviyesi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir (Manai ve ark., 2014).

NO uygulamalarının tuz stresine karşı koruyucu etkileri birçok farklı bitki türünde deneysel olarak gösterilmiştir. Örneğin *Rhizophora mangle* bitkisinde yapılan çalışmalarda, NO uygulamasının iyon toksisitesini azaltarak besin elementi dengesini iyileştirdiği ve endojen NO seviyelerini artırarak antioksidan sistemi aktive ettiği rapor edilmiştir (Hasanuzzaman ve ark., 2021). *Arabidopsis thaliana*' da ise NO, tohum çimlenmesi ve erken büyüme süreçlerini desteklemiş; bu etkilerin Ethylene Insensitive 3 transkripsiyon faktörünün düzenlenmesiyle bağlantılı olduğu bildirilmiştir (Lin ve ark., 2013). *Vigna radiata* tohumlarına uygulanan NO, oksidatif hasarı azaltmış ve SOD, CAT, APX gibi temel antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırmıştır (Roychoudhury ve ark., 2021).

Benzer şekilde, mısırdaki yapılan bir çalışmada NO uygulaması Na<sup>+</sup> birikimini azaltırken, K<sup>+</sup> seviyelerini ve klorofil içeriğini artırmış; membran stabilitesini koruyarak kuru madde birikimini teşvik etmiştir (Zhang ve ark., 2006). Domates ve ispanakta yapılan NO

uygulamaları, flavonoid, prolin, toplam fenolik bileşikler, glutatyon ve askorbat düzeylerini yükseltmiştir (Du ve ark., 2015; Hayat ve ark., 2012). Buğday fidelerinde, Ca<sup>2+</sup> ile birlikte uygulanan NO'nun çözünür şeker ve klorofil içeriğini artırdığı; aynı zamanda antioksidan sistem üzerinde olumlu etkiler yaratarak mineral dengesini iyileştirdiği rapor edilmiştir (Tian ve ark., 2015).

NO uygulaması, buğdayda lipid peroksidasyonunu ve Na<sup>+</sup> ile Cl<sup>-</sup> iyonlarının birikimini azaltmıştır (Sehar ve ark., 2019). Kolzada ise NO uygulaması, Na<sup>+</sup> ve SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iyonlarının birikimini azaltmış; bu etkinin CNGC1 iyon kanalı ve Sultr1.4 sülfat taşıyıcısına ait transkript düzeylerindeki azalmayla ilişkili olduğu belirlenmiştir (Huang ve ark., 2022). *Vigna angularis* bitkilerinde NO, fotosentetik verimlilik ve genel büyüme parametreleri üzerinde olumlu etkiler göstermiştir (Ahanger ve ark., 2019).

NO'nun tuz stresine karşı bitkisel tolerans mekanizmalarında çok yönlü bir düzenleyici rol oynadığı görülmektedir. Hücre zarının bütünlüğünü koruma, ROS üretimini sınırlama, osmotik dengeyi sağlama ve antioksidan savunma sistemlerini aktive etme gibi çeşitli mekanizmalar yoluyla NO, bitkilerin tuzluluk stresine karşı adaptasyonunu güçlendiren etkili bir sinyal molekülü olarak öne çıkmaktadır.

**Metal Stresi;** NO, ağır metal stresine karşı bitkisel savunma mekanizmalarında önemli bir sinyal molekülü olarak görev yapmaktadır. Alüminyum, arsenik, kadmiyum, bakır, cıva, kurşun gibi toksik elementlerin bitkilerde birikimi; fotosentez, besin alımı ve genel metabolik işlevlerde ciddi bozulmalara neden olmaktadır (Arif ve ark., 2021). Son yıllarda yapılan araştırmalar, hem endojen hem de eksojen NO'nun bu tür streslerin zararlı etkilerini azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Cıva toksisitesi altındaki soya fasulyesi bitkilerinde NO uygulamasının, biyokütle üretimini ve gaz değişim parametrelerini iyileştirdiği; ayrıca SOD ve CAT aktivitelerinde anlamlı artışlar sağladığı tespit edilmiştir (Ahmad ve ark., 2021). Kadmiyum toksisitesine karşı farklı konsantrasyonlarda uygulanan NO çözeltileri ise mercimek otu bitkisinde klorofil içeriği, prolin birikimi, elektrolit sızıntısı ve enzimatik savunma yanıtlarında olumlu değişikliklere yol açmıştır (Azizi ve ark., 2021). Benzer şekilde, yer fıstığında NO uygulamaları Kadmiyum kaynaklı stres

etkilerini hafifletmiş ve fizyolojik parametrelerde iyileşme sağlamıştır (Dong ve ark., 2020).

Kadmiyum ve bakır streslerine maruz kalan tütün bitkilerinde NO uygulamasının, Rubisco ve Rubisco aktivaz enzimlerinin aktivitesini artırarak bu toksik etkilere karşı koruma sağladığı belirlenmiştir (Khairy ve ark., 2016).

NO'nun etkisi yalnızca fizyolojik parametrelerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda moleküler düzenleme yollarını da kapsamaktadır. Örneğin, Arsenik stresine maruz bırakılan çeltik bitkisinde, NO uygulaması hücre ölümü ve ROS birikimini azaltmış; bu etki, MYB ailesinden Os02g0168200 transkripsiyon faktörünün ifadesinin artması ve Nodulin-26-benzeri aquaporin genlerinin ifadesinin azalması ile ilişkilendirilmiştir (Singh ve ark., 2017).

Anason üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, NO uygulaması bZIP ve R2R3-MYB transkripsiyon faktörlerinin aktivitesini artırmış, PAL gen ekspresyonunu yükseltmiş ve SOD aktivitesini artırarak Kadmiyum stresine karşı toleransı güçlendirmiştir (Hajbagheri ve ark., 2022). Benzer şekilde, hardal bitkisinde Argon stresine karşı NO uygulaması büyüme, klorofil ve besin elementi içeriklerini artırmış; ayrıca azot metabolizmasıyla ilişkili genlerin ifadesinin azaldığı, oksin taşıyıcı genlerin ise ifadesinin arttığı rapor edilmiştir (Praveen ve ark., 2019).

Bu bulgular, NO'nun ağır metal stresine karşı çok yönlü ve etkili bir koruyucu sinyal bileşeni olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu etkinin düzeyi; uygulanan NO donörünün türü, dozu, bitki ve doku tipi ile maruz kalma süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Nabi ve ark., 2019; Kováčik ve ark., 2014).

**UV-B Stresi;** ultraviyole ışınım spektrumunun 280–315 nm aralığını kapsayan bileşeninden kaynaklanmakta olup; yüksek enerjisi nedeniyle bitkiler üzerinde en zararlı etkileri oluşturan dalga boyları arasında yer almaktadır (Kataria ve ark., 2014). UV-B radyasyonu, hücresel düzeyde oksidatif stres oluşturarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> birikimi ile iyon sızıntısını artırmakta; bu durum tilakoid zarlarında oksidatif hasarı tetikleyerek hücre ölümünü hızlandırabilmektedir (Shi ve ark., 2005; Jenkins, 2009). Ayrıca UV-B'ye bağlı olarak artan ROS, DNA, protein, lipid ve pigment yapılarında tahribata yol açmakta; fotosistem II'nin D1 ve D2 proteinlerinde hasar oluşturarak klorofil içeriğini

ve Rubisco enzim aktivitesini azaltmaktadır (Hollósy, 2001).

UV-B maruziyeti, bitkilerde endojen NO üretimini artıran önemli bir uyarıcı olarak tanımlanmaktadır. NOS-benzeri enzimlerin UV-B altında aktive olması, etilen sentezini tetiklemekte ve böylece ROS birikiminin düzenlenmesine aracılık etmektedir (Wang ve ark., 2006). Bunun yanı sıra kloroplastlarda ışınım kaynaklı oksidatif hasarı sınırlandırmak üzere NO sentezinin yükseldiği görülmektedir; ancak UV-B şiddeti kritik bir eşik değerini aştığında bu savunma yanıtının oksidatif yükü karşılamada yetersiz kaldığı belirtilmiştir (Simontacchi ve ark., 2015).

NO uygulamalarının UV-B'ye karşı koruyucu etkileri çeşitli bitki türlerinde tespit edilmiştir. Buğday fidelerinde yapılan çalışmalarda, NO uygulamasının klorofil kaybını ve elektrolit sızıntısını azalttığı; prolin ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> seviyelerini düşürdüğü, lipid peroksidasyonunu engellediği ve antioksidan enzim aktivitelerini belirgin şekilde artırdığı rapor edilmiştir (Tian ve ark., 2007). Mısır bitkilerinde ise NO, protein sentezini ve β-glukozidaz aktivitesini uyararak radyasyon kaynaklı hasarı sınırlamış; mezofil ve kloroplast hücrelerinde ROS birikimini azaltmıştır (Tossi ve ark., 2009).

Benzer şekilde, soya fasulyesinde yapılan çalışmalarda NO tedavisi; süperoksit anyonları (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> düzeylerini düşürerek membran bütünlüğünün korunmasını sağlamış, APX, CAT ve SOD aktivitelerinde artışa neden olmuştur. Aynı zamanda bu enzimlerin izoformlarına ait genlerin ekspresyon seviyelerinde yukarı yönlü regülasyon bildirilmiştir (Santa-Cruz ve ark., 2014). Ayrıca, NO uygulamaları büyüme hormonları indol asetik asit (IAA) ve giberellik asit (GA), klorofil, karotenoid ve toplam fenolik bileşik düzeylerini artırırken; MDA, SA ve ABA birikimini azaltmıştır (Eringu ve ark., 2016).

UV-B radyasyonu bitkilerde oksidatif stres, membran hasarı, pigment kaybı ve fotosentetik verimlilikte azalma gibi çok yönlü fizyolojik ve biyokimyasal bozulmalara yol açmaktadır. Bu zararlı etkilerin hafifletilmesinde NO, hem endojen hem de eksojen kaynaklardan etkili bir sinyal molekülü olarak öne çıkmaktadır. NO'nun UV-B kaynaklı reaktif oksijen türlerini azaltması, antioksidan savunma sistemlerini güçlendirmesi ve hormon düzeyleri ile savunma genlerinin ekspresyonunu düzenlemesi, bitkilerin UV-B'ye karşı tolerans geliştirmesine önemli katkılar

sağlamaktadır.

### Bağcılıkta Nitrik Oksit Kullanımı

NO, bağcılıkta hem fizyolojik işleyişin düzenlenmesinde hem de çevresel streslere karşı savunma mekanizmalarının etkinleştirilmesinde önemli bir sinyal molekülü olarak rol oynamaktadır. NO, biyotik ve abiyotik stres koşullarında hücresele, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeylerde koruyucu işlevler üstlenmekte; antioksidan sistemleri aktive ederek stres toleransını artırmakta ve hasat sonrası kalite kayıplarını azaltmaktadır.

Royal ve Gök üzüm çeşitlerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, NO uygulamasının çimlenme oranı, bitkiye dönüşüm yüzdesi, sürgün uzunluğu ve kalınlığı ile yaprak yaş ağırlığı ve yüzey alanı gibi morfolojik parametreleri anlamlı düzeyde iyileştirdiği rapor edilmiştir. Elde edilen bulgular, NO'nun daha yüksek çimlenme performansı ve hasat sonrası hızlı bitki eldesini teşvik ederek yeni üzüm çeşitlerinin geliştirilmesine yönelik seleksiyon süreçlerini hızlandırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Kara ve ark., 2025).

Mavrodafni üzüm çeşidinde, kuraklık stresine karşı NO üretiminin erken evrede stomal beki hücrelerinde arttığı ve stomal iletkenlik değişimlerinin hem NO hem de ABA ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık hidrojen peroksit ile iletkenlik arasında anlamlı bir ilişki saptanmamıştır. Bu sonuçlar, NO'nun kuraklığa karşı stomal tepkileri düzenleyen önemli bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır (Patakas ve ark., 2010).

Benzer şekilde Malbec üzüm çeşidinde yapılan çalışmada, su stresine maruz kalan asmalara uygulanan eksojen NO ve ABA uygulamaları karşılaştırılmış; her iki uygulamanın da su potansiyelini artırarak stomaların kapanmasını teşvik ettiği gözlenmiştir. Ayrıca, antioksidan savunmayla bağlantılı metabolitlerin (serbest amino asitler, organik asitler, şekerler, flavanoller, terpenler) birikimi artmıştır. NO, APX aktivitesini artırmış ve zar stabilitesini destekleyen terpen birikimini yükselterek ABA'dan farklı mekanizmalarla kuraklık toleransını artırmıştır (Pontin ve ark., 2021).

NO'nun tuzluluk stresine karşı koruyucu etkileri Bidaneh Sefid ve Yaghouti üzüm çeşitleri ile 140Ru ve 1103 P anaçları üzerinde

gerçekleştirilen bir çalışmada, NO uygulamasının tuzluluk nedeniyle oluşan büyüme geriliğini azalttığı rapor edilmiştir. Yaprak alanı, sürgün ve kök uzunluğu, yaş ve kuru biyokütle ile yaprak göreceli su içeriğinde NO ile anlamlı artışlar sağlanmıştır. Bu artışlar özellikle 'Yaghouti' ve 'Bidaneh Sefid' çeşitlerinde daha yüksek bulunmuştur (Pileh ve ark., 2024). Bu bulgular, NO'nun tuzluluk stresi altında çeşit ve anaç bazlı uygulamalar açısından potansiyel bir destekleyici strateji olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Tuzluluk koşullarında iyon dengesinin korunmasına yönelik etkiler, Qarah Shani ve Thompson Seedless çeşitleri üzerinde yapılan çalışmalarda değerlendirilmiştir. NO uygulaması, yaprak ve kök dokularında  $Cl^-$  ve  $Na^+$  birikimini azaltırken,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  ve  $NO_3^-$  düzeylerini artırarak iyon homeostazını desteklemiştir (Amiri ve ark., 2015). Bu bulgular, NO'nun iyon taşıma süreçlerini düzenleyerek tuzluluk stresinin fizyolojik etkilerini hafifletmede etkili olduğunu göstermektedir.

Cardinal çeşidinde, önceden NO uygulaması yapılmış bitkilerin NaCl uygulamasına karşı daha dayanıklı olduğu; kök-sürgün uzunluğu, biyokütle, klorofil içeriği, stomal iletkenlik ve yaprak sıcaklığı gibi parametrelerde olumlu gelişmeler gösterdiği tespit edilmiştir. MDA seviyeleri düşerken, SOD, CAT ve APX aktiviteleri artmıştır (Daler ve Yağcı, 2021). Bu bulgular, NO'nun stres öncesi uygulanmasının asmada fizyolojik dayanıklılığı artıran etkili bir ön uygulama olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

NO'nun hasat sonrası fizyolojik kaliteyi koruma potansiyeli de birçok çalışmada ortaya konmuştur. Rish Baba üzüm çeşidinde soğuk depolama koşullarında yapılan uygulamalarda, NO'nun lipid peroksidasyonunu,  $H_2O_2$  ve MDA birikimini azalttığı, bununla birlikte C vitamini, SÇKM ve organik asit içeriğini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca SOD, CAT, POD ve APX gibi antioksidan enzim aktiviteleri de artmıştır (Ghorbani ve ark., 2017). Bu bulgular, NO'nun üzüm tanelerinde oksidatif hasarı sınırlandırarak kalite kayıplarını geciktiren ve depolama süresince fizyolojik bütünlüğün korunmasına katkı sağlayan etkili bir düzenleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Benzer sonuçlar Hamburg Misketi çeşidinde de elde edilmiştir. Hasat sonrası dönemde *Botrytis cinerea* ve *Alternaria alternata*

kaynaklı kalite kayıplarına karşı yapılan NO uygulamaları, üzüm tanelerinde solunum hızını düşürmüştür, ağırlık kaybı ve buruşma oranını azaltmıştır. Bu süreçte PPO ve SOD aktiviteleri artarken, CAT ve POD enzimlerinde dengeleyici bir etki gözlenmiştir. NO uygulamasının mantari enfeksiyonlara karşı etkili bir araç olabileceği belirtilmiştir (Shi ve ark., 2023).

NO'nun moleküler düzeyde gen ekspresyonunu etkileyerek kaliteyi koruma işlevi, Kyoho ve Munage çeşitlerinde yapılan transkriptom ve qPCR tabanlı analizlerle desteklenmiştir. Kyoho çeşidinde NO uygulaması, raf ömrünü uzatmış ve *Botrytis cinerea*'nın gelişimini baskılamıştır. RNA-Seq analizleri, 2.226 genin yukarı, 1.249 genin aşağı yönlü düzenlendiğini ortaya koymuş; STS ve CHS gibi savunma genlerinin ekspresyonunda anlamlı artış gözlenmiştir (Song ve ark., 2021). Munage çeşidinde ise VvSOD, VvCAT, VvPOD2 ve VvGR genlerinin özellikle kabuk ve tane eti dokularında yüksek düzeyde ifade edildiği belirlenmiştir (Zhang ve ark., 2019).

Thompson Seedless çeşidinde, NO uygulamasının fenolik bileşiklerin birikimini azalttığı, PPO ve PAL aktivitelerini baskıladığı, buna karşılık POD enzim aktivitesini artırdığı rapor edilmiştir. PPO1, PAL2 ve PAL3 genlerinin ifade seviyelerinin azalması, NO'nun hasat sonrası kaliteyi korumadaki etkili genetik düzenleyici rolünü desteklemektedir (Wu ve ark., 2021).

Mevcut veriler, NO'nun bağcılıkta üretim verimliliği ve kalite yönetimi açısından umut vadeden bir düzenleyici olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bağcılıkta NO üzerine yapılan çalışmalar halen sınırlıdır ve mevcut bulguların farklı üzüm çeşitleri, uygulama yöntemleri ve stres koşulları açısından daha kapsamlı biçimde doğrulanması gerekmektedir. NO'nun bağcılıkta etkili olduğu moleküler yolakların aydınlatılması, üzüm çeşitlerine özgü yanıtların karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve uygulama dozlarının optimize edilmesi ilerleyen araştırmalar açısından önem taşımaktadır.

## Sonuç

Değişen iklim koşulları, tarımsal üretim üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmakta; bu durum, bitkilerin stres faktörlerine karşı geliştirdiği yanıtların ve bu süreçte rol oynayan biyomoleküllerin önemini artırmaktadır. Yapılan

araştırmalar, bu sinyal moleküllerinden biri olan NO'nun, bitki gelişimi ve stres yönetiminde kritik bir düzenleyici olduğunu ortaya koymaktadır. NO'nun biyokimyasal ve fizyolojik etkilerinin anlaşılması, bitkilerin stres tepkilerinin çözülmesi ve tarımsal üretimde sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi açısından büyük potansiyel taşımaktadır. Bu kapsamda, NO bitki stres biyolojisindeki artan önemi sürdürülebilir tarım uygulamaları için umut verici bir perspektif sunmaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, NO'nun bağcılıkta özellikle çevresel stres koşullarına karşı dayanıklılığı artırdığını, antioksidan savunma sistemlerini aktive ettiğini ve hasat sonrası kalite kayıplarını azaltarak ürün raf ömrünü uzattığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, NO'nun sürdürülebilir bağcılıkta hem fizyolojik dengeyi koruyan hem de kalite yönetimini destekleyen etkili bir biyoregülatör olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Ancak mevcut çalışmaların sayıca sınırlı olması, NO'nun farklı üzüm çeşitlerinde etkilerinin değişkenlik gösterebileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle, uygulama dozlarının, sürelerinin ve yöntemlerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Gelecek araştırmalarda, NO uygulamalarının üzüm çeşitlerine göre stres, verim, kalite ve adaptasyon süreçleri üzerindeki etkilerinin fizyolojik ve moleküler düzeyde ayrıntılı biçimde incelenmesi gerekmektedir. Bu yöndeki çalışmaların, bağcılıkta sürdürülebilir üretim tekniklerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

## Etik Onay

Bu çalışmada etik kurul onayı gerekmemektedir.

## Teşekkür

Yazarlar, metnin son halini okuyarak katkıda bulunan tüm hakemlere ve editörlere teşekkürlerini sunmaktadır.

## Çıkar Çatışmaları

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmektedir.

## Yazar Katkısı

Tüm yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

**KAYNAKLAR**

- Ahanger, M. A., Aziz, U., Alsahli, A. A., Alyemini, M. N., & Ahmad, P. (2019). Influence of exogenous nitric oxide on growth, photosynthesis, and antioxidant metabolism in *Vigna angularis* L. under salinity stress. *Plants*, 8(11), 508. <https://doi.org/10.3390/biom10010042>.
- Ahmad, P., Alyemini, M. N., Alyemini, M., Wijaya, L., & Wijaya, L. (2021). Nitric oxide donor, sodium nitroprusside, mitigates mercury toxicity in different cultivars of soybean. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124852>.
- Alamri, S. A., Siddiqui, M. H., Al-Khaishany, M. Y., Khan, M. N., Ali, H. M., & Alakeel, K. A. (2019). Nitric oxide-mediated cross-talk of proline and heat shock proteins induce thermotolerance in *Vicia faba* L. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 290–302. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.012>.
- Amiri J., & Eshghi S., (2015). Ion and mineral concentrations in roots and leaves of two grapevine cultivars as affected by nitric oxide foliar application under NaCl stress. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 49(3), 155–164.
- Antoniou, C., Xenofontos, R., Chatzimichail, G., Christou, A., Kashfi, K., & Fotopoulos, V. (2020). Exploring the potential of nitric oxide and hydrogen sulfide (NOSH)-releasing synthetic compounds as novel priming agents against drought stress in *Medicago sativa* plants. *Biomolecules*, 10(1), 120. <https://doi.org/10.3390/biom10010120>.
- Arık, C., Berberoğlu, E., Can, T. H., & Yeğenoğlu, E. D. (2023). Bağcılıkta biyoteknolojik yaklaşım. *MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2(36).
- Arif, M. S., Yasmeen, T., Abbas, Z., Ali, S., Rizwan, M., Aljarba, N. H., & Abdel-Daim, M. M. (2021). Role of exogenous and endogenous hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) on functional traits of plants under heavy metal stresses: a recent perspective. *Frontiers in Plant Science*, 11, 545453. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.545453>.
- Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, 141(2), 391–396. <https://doi.org/10.1104/pp.106.082040>.
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>.
- Ashraf, M., Akram, N. A., Arteca, R. N., & Foolad, M. R. (2008). The physiological, biochemical and molecular roles of brassinosteroids and salicylic acid in plant processes and salt tolerance. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27(4), 293–308. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483580>.
- Azizi, I., Esmailpour, B., & Fatemi, H. (2021). Exogenous nitric oxide on morphological, biochemical and antioxidant enzyme activity on savory (*Satureja hortensis* L.) plants under cadmium stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.05.003>.
- Bartels, D., & Sunkar, R. (2005). Drought and salt tolerance in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(1), 23–58. <https://doi.org/10.1080/07352680590910410>.
- Bavita, A., Shashi, B., & Navtej, S. B. (2012). Nitric oxide alleviates oxidative damage induced by high temperature stress in wheat. *Experiment*, 50, 372–378.
- Cantrel, C., Vazquez, T., Puyaubert, J., Rezé, N., Lesch, M., Kaiser, W. M., & Baudouin, E. (2011). Nitric oxide participates in cold-responsive phosphosphingolipid formation and gene expression in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist*, 189(2), 415–427. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03500.x>
- Carneiro-Carvalho, A., Anjos, R., Pinto, T., & Gomes-Laranjo, J. (2021). Stress oxidative evaluation on SiK®-supplemented *Castanea sativa* Mill. plants growing under high temperature. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 415–425. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00370-3>.
- Černý, M., Dyčka, F., Bobálová, J., & Brzobohatý, B. (2011). Early cytokinin response proteins and phosphoproteins of *Arabidopsis thaliana* identified by proteome and phosphoproteome profiling. *Journal of Experimental Botany*, 62(3), 921–937. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq322>.
- Corpas, F. J., Palma, J. M., & del Río, L. A. (2011). Nitric oxide and nitric oxide synthase activity in plants: cellular signalling, development and stress responses. *Plant Cell Monographs*, 19, 21–39.
- Crawford, N. M., & Guo, F. Q. (2005). New insights into nitric oxide metabolism and regulatory functions. *Trends in Plant Science*, 10(4), 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.02.008>.
- Daler, S., & Yağcı, A., (2021). The effects of sodium nitroprusside (SNP) applications against salinity stress on morphological, physiological and biochemical changes in grape seedlings. 31st International Scientific-Expert Conference of Agriculture and Food Industry, İzmir, 190.

- Deng, Z., & Song, S. (2012). Sodium nitroprusside, ferricyanide, nitrite and nitrate decrease the thermo-dormancy of lettuce seed germination in a nitric oxide-dependent manner in light. *South African Journal of Botany*, 78, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2011.06.009>.
- Diao, Q. N., Song, Y. J., Shi, D. M., & Qi, H. Y. (2016). Nitric oxide induced by polyamines involves antioxidant systems against chilling stress in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedling. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 17(12), 916–930. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1600102>.
- Dong, Y. J., Chen, W. F., Liu, F. Z., & Wan, Y. S. (2020). Physiological responses of peanut seedlings to exposure to low or high cadmium concentration and the alleviating effect of exogenous nitric oxide to high cadmium concentration stress. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 154(3), 405–412. <https://doi.org/10.1080/11263504.2019.1651771>.
- Du, S. T., Liu, Y., Zhang, P., Liu, H. J., Zhang, X. Q., & Zhang, R. R. (2015). Atmospheric application of trace amounts of nitric oxide enhances tolerance to salt stress and improves nutritional quality in spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Food chemistry*, 173, 905–911. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.115>.
- El-Beltagi, H. S., Mohamed, H. I., Sofy, M. R., & Seif-Eldin, S. M. (2016). Protective effect of nitric oxide on high temperature induced oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum*) callus culture. *Notulae Scientia Biologicae*, 8(2), 192–198. <https://doi.org/10.15835/nsb829807>.
- Elkelish, A., Ibrahim, M. F., Ashour, H., Bondok, A., Mukherjee, S., Aftab, T. & El-Gawad, H. G. A. (2021). Exogenous application of nitric oxide mitigates water stress and reduces natural viral disease incidence of tomato plants subjected to deficit irrigation. *Agronomy*, 11(1), 87. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010087>.
- Esim, N., & Atıcı, Ö. (2015). Effects of exogenous nitric oxide and salicylic acid on chilling-induced oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum*). *Frontiers in Life Science*, 8(2), 124–130. <https://doi.org/10.1080/21553769.2014.998299>.
- Esringu, A., Aksakal, O., Tabay, D., & Kara, A. A. (2016). Effects of sodium nitroprusside (SNP) pretreatment on UV-B stress tolerance in lettuce (*Lactuca sativa* L.) seedlings. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(1), 589–597. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5301-1>.
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>.
- Fan, J., Chen, K., Amombo, E., Hu, Z., Chen, L., & Fu, J. (2015). Physiological and molecular mechanism of nitric oxide (NO) involved in bermudagrass response to cold stress. *PlosOne*, 10(7), e0132991. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132991>.
- Fröhlich, A., & Durner, J. (2011). The hunt for plant nitric oxide synthase (NOS): is one really needed? *Plant Science*, 181(4), 401–404. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.07.014>.
- Fu, J. J., Chu, X. T., Sun, Y. F., Xu, Y. F., & Hu, T. M. (2016). Involvement of nitric oxide in 5-aminolevulinic acid-induced antioxidant defense in roots of *Elymus nutans* exposed to cold stress. *Biologia Plantarum*, 60(3), 585–594. <https://doi.org/10.1007/s10535-016-0635-1>.
- García-Mata, C., & Lamattina, L. (2009). Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress (Vol. 126, p. 1196, 2001) [Correction]. *Plant Physiology*, 150(1), 531. <https://doi.org/10.1104/pp.126.3.1196>.
- García-Mata, C., & Lamattina, L. (2010). Hydrogen sulphide, a novel gasotransmitter involved in guard cell signalling. *New Phytologist*, 188(4), 977–984. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03465.x>.
- Ghassemi-Golezani, K., Farhadi, N., & Nikpour-Rashidabad, N. (2018). Responses of in vitro-cultured *Allium hirtifolium* to exogenous sodium nitroprusside under PEG-imposed drought stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 133(2), 237–248. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1377-2>.
- Ghorbani, B., Pakkish, Z., & Najafzadeh, R. (2017). Shelf life improvement of grape (*Vitis vinifera* L. cv. Rish Baba) using nitric oxide (NO) during chilling damage. *International Journal of Food Properties*, 20, 2750–2763.
- Goyal, V., Jhanghel, D., & Mehrotra, S. (2021). Emerging warriors against salinity in plants: Nitric oxide and hydrogen sulphide. *Physiologia Plantarum*, 171(4), 896–908. <https://doi.org/10.1111/pp.13380>.
- Guo, F.-Q., Okamoto, M., & Crawford, N. M. (2003). Identification of a plant nitric oxide synthase gene involved in hormonal signaling. *Science*, 302(5642), 100–103. <https://doi.org/10.1126/science.1086770>.
- Gupta, K. J., Igamberdiev, A. U., Manjunatha, G., Segu, S., Moran, J. F., Neelawarne, B., Bauwe, H., & Kaiser, W. M. (2011). The emerging roles of nitric oxide (NO) in plant mitochondria. *Plant Science*, 181, 520–526. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.03.018>.

- Hajbageri, S., Abbaspour, H., Enteshari, S., Habibollahi, S., & Iranbakhsh, A. (2022). An investigation into the effects of cadmium and nitric oxide on induced secondary metabolism and antioxidant system in *Pimpinella anisum* L. through transcriptional upregulations in AIS1, PAL, SOD, R2R3-MYB, and bZIP genes. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, 11(1), 129–134.
- Hamurcu, M., Khan, M. K., Pandey, A., Ozdemir, C., Avsaroglu, Z. Z., Elbasan, F., ... & Gezgin, S. (2020). Nitric oxide regulates watermelon (*Citrullus lanatus*) responses to drought stress. *3 Biotech*, 10(11), 494. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02479-9>.
- Hancock, J. T. (2012). NO synthase? Generation of nitric oxide in plants. *Periodicum Biologorum*, 114(1), 19–24.
- Hancock, J. T., & Veal, D. (2021). Nitric oxide, other reactive signalling compounds, redox, and reductive stress. *Journal of Experimental Botany*, 72(3), 819–829. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa331>.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., & Fujita, M. (2012). Exogenous nitric oxide alleviates high temperature-induced oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings by modulating the antioxidant defense and glyoxalase system. *Australian Journal of Crop Science*, 6(8), 1314–1323.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Rahman, A., Inafuku, M., Oku, H., & Fujita, M. (2018). Exogenous nitric oxide donor and arginine provide protection against short-term drought stress in wheat seedlings. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 24(6), 993–1004. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0531-6>.
- Hasanuzzaman, M., Inafuku, M., Nahar, K., Fujita, M., & Oku, H. (2021). Nitric oxide regulates plant growth, physiology, antioxidant defense, and ion homeostasis to confer salt tolerance in the mangrove species, *Kandelia obovata*. *Antioxidants*, 10(4), 611. <https://doi.org/10.3390/antiox10040611>.
- Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J.-K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Biology*, 51, 463–499. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>.
- Hayat, S., Hasan, S. A., Mori, M., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2010). Nitric oxide: chemistry, biosynthesis, and physiological role. *Nitric Oxide in Plant Physiology*, 69(14), 15–21.
- Hayat, S., Yadav, S., Wani, A. S., Irfan, M., & Ahmad, A. (2011). Nitric oxide effects on photosynthetic rate, growth, and antioxidant activity in tomato. *International Journal of Vegetable Science*, 17(4), 333–348. <https://doi.org/10.1080/19315260.2011.563275>.
- Hayat, S., Yadav, S., Wani, A. S., Irfan, M., Alyemini, M. N., & Ahmad, A. (2012). Impact of sodium nitroprusside on nitrate reductase, proline content, and antioxidant system in tomato under salinity stress. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 53(5), 362–367. <https://doi.org/10.1007/s13580-012-0481-9>.
- Hirayama, T., & Shinozaki, K. (2010). Research on plant abiotic stress responses in the post-genome era: Past, present and future. *The Plant Journal*, 61(6), 1041–1052. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04124.x>.
- Hollósy, F. (2001). Effects of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron*, 33(2), 179–197. [https://doi.org/10.1016/S0968-4328\(01\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0968-4328(01)00011-7).
- Huang, H., Ullah, F., Zhou, D. X., Yi, M., & Zhao, Y. (2019). Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses. *Frontiers in Plant Science*, 10, 800. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00800>.
- Huang, Q., Farooq, M. A., Hannan, F., Chen, W., Ayyaz, A., Zhang, K., & Islam, F. (2022). Endogenous nitric oxide contributes to chloride and sulphate salinity tolerance by modulation of ion transporter expression and reestablishment of redox balance in *Brassica napus* cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 194, 104734. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104734>.
- Hussain, S. S., Ali, M., Ahmad, M., & Siddique, K. H. M. (2011). Polyamines: Natural and engineered abiotic and biotic stress tolerance in plants. *Biotechnology Advances*, 29(3), 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.01.003>.
- Hussain, A., Shah, F., Ali, F., & Yun, B. W. (2022). Role of nitric oxide in plant senescence. *Frontiers in Plant Science*, 13, 851631. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.851631>.
- Imran, M., Shazad, R., Bilal, S., Imran, Q. M., Khan, M., Kang, S. M., Khan, A. L., Yun, B. W., & Lee, I. J. (2021). Exogenous Melatonin mediates the regulation of endogenous nitric oxide in *Glycine max* L. to reduce effects of drought stress. *Environ. Exp. Bot.*, 188, 104511.
- Iqbal, N., Sehar, Z., Fatma, M., Umar, S., Sofó, A., & Khan, N. A. (2022). Nitric oxide and abscisic acid mediate heat stress tolerance through regulation of osmolytes and antioxidants to protect photosynthesis and growth in wheat plants. *Antioxidants*, 11(2), 372. <https://doi.org/10.3390/antiox11020372>.
- Jaspers, P., & Kangasjärvi, J. (2010). Reactive oxygen species in abiotic stress signaling. *Physiologia Plantarum*, 138(4), 405–413. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2009.01321.x>.

- Jenkins, G. I. (2009). Signal transduction in responses to UV-B radiation. *Annual Review of Plant Biology*, 60, 407–431. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092953>.
- Jiménez-Muñoz, R., Palma, F., Carvajal, F., Castro-Cegrí, A., Pulido, A., Jamilena, M., ... & Garrido, D. (2021). Pre-storage nitric oxide treatment enhances chilling tolerance of zucchini fruit (*Cucurbita pepo* L.) by S-nitrosylation of proteins and modulation of the antioxidant response. *Postharvest Biology and Technology*, 171, 111345. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111345>.
- Kara, Z., Doğan, O., & Yazar, K. (2025). Effects of Sodium Nitroprusside and Gibberellic Acid applications on direct germination of fully mature grapevine seeds and seedling growth. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 39(2), 268-279. <https://doi.org/10.15316/selcukjafsci.1583555>.
- Kataria, S., Jajoo, A., & Guruprasad, K. N. (2014). Impact of increasing ultraviolet-B (UV-B) radiation on photosynthetic processes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 137, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.02.004>.
- Khairy, A. I. H., Oh, M. J., Lee, S. M., Kim, D. S., & Roh, K. S. (2016). Nitric oxide overcomes Cd and Cu toxicity in in vitro-grown tobacco plants through increasing contents and activities of rubisco and rubisco activase. *Biochimie Open*, 2, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.biopen.2016.02.002>.
- Khan, M. I. R., Iqbal, N., Masood, A., Per, T. S., & Khan, N. A. (2013). Salicylic acid alleviates adverse effects of heat stress on photosynthesis through changes in proline production and ethylene formation. *Plant Signaling & Behavior*, 8(11), e26374. <https://doi.org/10.4161/psb.26374>.
- Khan, M., Al Azawi, T. N. I., Pande, A., Mun, B. G., Lee, D. S., Hussain, A., & Yun, B. W. (2021). The role of nitric oxide-induced ATILL6 in growth and disease resistance in *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 685156. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.685156>.
- Khan, M., Ali, S., Al Azzawi, T. N. I., Saqib, S., Ullah, F., Ayaz, A., & Zaman, W. (2023). The key roles of ROS and RNS as signaling molecules in plant–microbe interactions. *Antioxidants*, 12(2), 268. <https://doi.org/10.3390/antiox12020268>.
- Kiba, T., Kudo, T., Kojima, M., & Sakakibara, H. (2011). Hormonal control of nitrogen acquisition: Roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin. *Journal of Experimental Botany*, 62(4), 1399–1409. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq410>.
- Kolbert, Z., Feigl, G., Bordé, Á., Molnár, Á., & Erdei, L. (2019). Protein tyrosine nitration in plants: Present knowledge, computational prediction and future perspectives. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.028>.
- Kováčik, J., Babula, P., Hedbavny, J., & Švec, P. (2014). Manganese-induced oxidative stress in two ontogenetic stages of chamomile and amelioration by nitric oxide. *Plant Science*, 215, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.10.015>.
- Kumar, G., Saad, K. R., Arya, M., Puthusseri, B., Mahadevappa, P., Shetty, N. P., & Giridhar, P. (2021). The synergistic role of serotonin and melatonin during temperature stress in promoting cell division, ethylene and isoflavones biosynthesis in *Glycine max*. *Current Plant Biology*, 26, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100206>.
- Kumar, D., & Ohri, P. (2023). Say “NO” to plant stresses: Unravelling the role of nitric oxide under abiotic and biotic stress, *Nitric Oxide*, 130, 36-57. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2022.11.004>
- Lamotte, O., Gould, K., Lecourieux, D., Sequeira-Legrand, A., Lebrun-Garcia, A., Durner, J., Pugin, A., & Wendehenne, D. (2004). Analysis of nitric oxide signaling functions in tobacco cells challenged by the elicitor cryptogein. *Plant Physiology*, 135(2), 516–529. <https://doi.org/10.1104/pp.104.038968>.
- Lau, S. E., Hamdan, M. F., Pua, T. L., Saidi, N. B., & Tan, B. C. (2021). Plant nitric oxide signaling under drought stress. *Plants*, 10(2), 360. <https://doi.org/10.3390/plants10020360>.
- Levine, A. B., Punihaole, D., & Levine, T. B. (2012). Characterization of the role of nitric oxide and its clinical applications. *Cardiology*, 122(1), 55-68. <https://doi.org/10.1159/000338150>.
- Li, Z. G., Luo, L. J., & Sun, Y. F. (2015). Signal crosstalk between nitric oxide and hydrogen sulfide may be involved in hydrogen peroxide-induced thermotolerance in maize seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, 62(4), 507-514. <https://doi.org/10.1134/S1021443715030127>.
- Liao, W. B., Huang, G. B., Yu, J. H., & Zhang, M. L. (2012). Nitric oxide and hydrogen peroxide alleviate drought stress in marigold explants and promote its adventitious root development. *Plant Physiology and Biochemistry*, 58, 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.06.012>.

- Lin, Y., Yang, L., Paul, M., Zu, Y., & Tang, Z. (2013). Ethylene promotes germination of *Arabidopsis* seed under salinity by decreasing reactive oxygen species: evidence for the involvement of nitric oxide simulated by sodium nitroprusside. *Plant Physiology and Biochemistry*, 73, 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.003>.
- Liu, Y., Wu, R., Wan, Q., Xie, G., & Bi, Y. (2007). Glucose-6-phosphate dehydrogenase plays a pivotal role in nitric oxide-involved defense against oxidative stress under salt stress in red kidney bean roots. *Plant Cell Physiology*, 48(4), 511–522. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcm020>.
- Liu, X., Wang, L., Liu, L., Guo, Y., & Ren, H. (2011). Alleviating effect of exogenous nitric oxide in cucumber seedling against chilling stress. *African Journal of Biotechnology*, 10(22), 4380–4386. <https://doi.org/10.5897/AJB10.812>.
- Manai, J., Kalai, T., Gouia, H., & Corpas, F. J. (2014). Exogenous nitric oxide (NO) ameliorates salinity-induced oxidative stress in tomato (*Solanum lycopersicum*) plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(2), 433–446. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162014005000034>.
- Mandal, M., Sarkar, M., Khan, A., Biswas, M., Masi, A., Rakwal, R., & Sarkar, A. (2022). Reactive Oxygen Species (ROS) and Reactive Nitrogen Species (RNS) in plants—maintenance of structural individuality and functional blend, *Advances in Redox Research*, 5, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.arres.2022.100039>.
- Mohinani, P., Mohinani, T., Bhooshan, B., & Kumar, D. (2021). Plants responses and the role of phytohormones against salinity stress. *Plant Archives*, 21(1), 1192–1198.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
- Nabi, R. B. S., Tayade, R., Hussain, A., Kulkarni, K. P., Imran, Q. M., Mun, B. G., & Yun, B. W. (2019). Nitric oxide regulates plant responses to drought, salinity, and heavy metal stress. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.003>.
- Neill, S., Barros, R., Bright, J., Desikan, R., Hancock, J., Harrison, J., Morris, P., Ribeiro, D., & Wilson, I. (2008). Nitric oxide, stomatal closure, and abiotic stress. *Journal of Experimental Botany*, 59(2), 165–176. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm293>.
- Parankusam, S., Adimulam, S. S., Bhatnagar-Mathur, P., & Sharma, K. K. (2017). Nitric oxide (NO) in plant heat stress tolerance: Current knowledge and perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1582. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01582>.
- Patakas, A.A., Zotos, A., Beis, A.S. (2010). Production, localisation and possible roles of nitric oxide in drought-stressed grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16, 203–209. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00064.x>.
- Pileh, F., Ebadi, A., Zamani, Z., Babalar, M., & Lopez Climent, M. F. (2024). Effects of sodium nitroprusside foliar application on the growth characteristics and nutrient elements in some grapevine cultivars and rootstocks under salt stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 47(19), 3210–3230. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2376923>.
- Pontin, M., Murcia, G., Bottini, R., Fontana, A., Bolcato L. & Piccoli, P. (2021). Nitric oxide and abscisic acid regulate osmoprotective and antioxidative mechanisms related to water stress tolerance of grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 27, 392–405. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12485>.
- Praveen, A., Pandey, A., & Gupta, M. (2019). Nitric oxide alters nitrogen metabolism and PIN gene expressions by playing protective role in arsenic challenged *Brassica juncea* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 176, 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.054>.
- Procházková, D., Haisel, D., & Pavlíková, D. (2014). Nitric oxide biosynthesis in plants – The short overview. *Plant, Soil and Environment*, 60(3), 129–134. <https://doi.org/10.17221/901/2013-PSE>.
- Rahim, W., Khan, M., Al Azzawi, T. N. I., Pande, A., Methela, N. J., Ali, S., & Yun, B. W. (2022). Exogenously applied sodium nitroprusside mitigates lead toxicity in rice by regulating antioxidants and metal stress-related transcripts. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(17), 9729. <https://doi.org/10.3390/ijms23179729>.
- Rezayian, M., Ebrahimzadeh, H., & Niknam, V. (2020). Nitric oxide stimulates antioxidant system and osmotic adjustment in soybean under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1122–1132. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00198-x>.
- Rezayian, M., Ebrahimzadeh, H., & Niknam, V. (2023). Metabolic and physiological changes induced by nitric oxide and its impact on drought tolerance in soybean. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(3), 1905–1918. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10668-4>.

- Rodríguez-Serrano, M., Romero-Puertas, M. C., Pazmiño, D. M., Testillano, P. S., Risueno, M. C., Del Río, L. A., & Sandalio, L. M. (2009). Cellular response of pea plants to cadmium toxicity: Cross talk between reactive oxygen species, nitric oxide, and calcium. *Plant Physiology*, 150(1), 229–243. <https://doi.org/10.1104/pp.108.131524>.
- Rolly, N. K., Imran, Q. M., Shahid, M., Imran, M., Khan, M., Lee, S. U., ... & Yun, B. W. (2020). Drought-induced AtbZIP62 transcription factor regulates drought stress response in Arabidopsis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.013>.
- Roychoudhury, A., Singh, A., Aftab, T., Ghosal, P., & Banik, N. (2021). Seedling priming with sodium nitroprusside rescues *Vigna radiata* from salinity stress-induced oxidative damages. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(6), 2454–2464. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10328-z>.
- Salgado, I., Martínez, M. C., Oliveira, H. C., & Frungillo, L. (2013). Nitric oxide signaling and homeostasis in plants: A focus on nitrate reductase and S-nitrosoglutathione reductase in stress-related responses. *Brazilian Journal of Botany*, 36, 89–98. <https://doi.org/10.1007/s40415-013-0013-6>.
- Santa-Cruz, D. M., Pacienza, N. A., Zilli, C. G., Tomaro, M. L., Balestrasse, K. B., & Yannarelli, G. G. (2014). Nitric oxide induces specific isoforms of antioxidant enzymes in soybean leaves subjected to enhanced ultraviolet-B radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 141, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.09.019>.
- Sami, F., Siddiqui, H., Alam, P., & Hayat, S. (2021). Nitric oxide mitigates the salt-induced oxidative damage in mustard by upregulating the activity of various enzymes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(6), 2409–2432. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10331-4>.
- Santisree, P., Adimulam, S. S., Sharma, K., Bhatnagar-Mathur, P., & Sharma, K. K. (2019). Insights into the Nitric Oxide mediated stress tolerance in plants. In *Plant Signaling Molecules*, 385–406. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816451-8.00024-1>.
- Sehar, Z., Masood, A., & Khan, N. A. (2019). Nitric oxide reverses glucose-mediated photosynthetic repression in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.01.010>.
- Shi, S., Wang, G., Wang, Y., Zhang, L., & Zhang, L. (2005). Protective effect of nitric oxide against oxidative stress under ultraviolet-B radiation. *Nitric Oxide*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2005.04.006>.
- Shi, Q., Ding, F., Wang, X., & Wei, M. (2007). Exogenous nitric oxide protect cucumber roots against oxidative stress induced by salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45(8), 542–550. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.05.005>.
- Shi, C., Qi, C., Ren, H., Huang, A., Hei, S., & She, X. (2015). Ethylene mediates brassinosteroid-induced stomatal closure via Gα protein-activated hydrogen peroxide and nitric oxide production in Arabidopsis. *The Plant Journal*, 82(2), 280–301. <https://doi.org/10.1111/tpj.12815>.
- Shi, J., Huang, D., Du, Y., Zhu, S., Hüseyin, Z., Haydar M.S. & Anwar R. (2023). Effects of exogenous nitric oxide treatment on grape berries against *Botrytis cinerea* and *Alternaria alternata* related enzymes and metabolites. *Plant Disease*, 107(5), 1510–1521. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-22-0928-RE>.
- Sidana, S., Bose, J., Shabala, L., & Shabala, S. (2015). Nitric oxide in drought stress signalling and tolerance in plants. *Springer*, 95–114. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17804-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17804-2_6).
- Siddiqui, M., Alamri, S. A., Mutahhar, Y., Al-Khaishany, M., Al-Qutami, H., & Khan, M. N. (2017). Nitric oxide and calcium induced physio-biochemical changes in tomato (*Solanum lycopersicum*) plant under heat stress. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(2), 1663–1672.
- Simontacchi, M., Galatro, A., Ramos-Artuso, F., & Santa-María, G. E. (2015). Plant survival in a changing environment: The role of nitric oxide in plant responses to abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 6, 977. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00977>.
- Singh, P. K., Indoliya, Y., Chauhan, A. S., Singh, S. P., Singh, A. P., Dwivedi, S., ... & Chakrabarty, D. (2017). Nitric oxide mediated transcriptional modulation enhances plant adaptive responses to arsenic stress. *Scientific Reports*, 7(1), 3592. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03923-2>.
- Soltekin, O., Altındaşlı, A., & İşçi, B. (2021). İklim değişikliğinin Türkiye’de bağcılık üzerine etkileri. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 58(3), 457–467. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.882893>.
- Song, L., Zhao, H., & Hou, M. (2013). Involvement of nitric oxide in acquired thermotolerance of rice seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, 60(6), 785–790. <https://doi.org/10.1134/S1021443713060149>.

- Song, C., Zhao, Y., Li, A., Qi, S., Lin, Q., & Duan, Y. (2021). Postharvest nitric oxide treatment induced the alternative oxidase pathway to enhance antioxidant capacity and chilling tolerance in peach fruit. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.036>.
- Szymańska, R., Ślesak, I., Orzechowska, A., & Kruk, J. (2017). Physiological and biochemical responses to high light and temperature stress in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 139, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.05.002>.
- Tan, J. F., Zhao, H. J., Hong, J. P., Han, Y. L., Li, H., & Zhao, W. C. (2008). Effects of exogenous nitric oxide on photosynthesis, antioxidant capacity and proline accumulation in wheat seedlings subjected to osmotic stress. *World Journal of Agricultural Sciences*, 4 (3): 307-313.
- Tian, X., & Lei, Y. (2006). Nitric oxide treatment alleviates drought stress in wheat seedlings. *Biologia Plantarum*, 50(4), 775–778. <https://doi.org/10.1007/s10535-006-0129-7>.
- Tian, X. R., & Lei, Y. B. (2007). Physiological responses of wheat seedlings to drought and UV-B radiation: Effect of exogenous sodium nitroprusside application. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(5), 676–682. <https://doi.org/10.1134/S1021443707050160>.
- Tian, X., He, M., Wang, Z., Zhang, J., Song, Y., He, Z., & Dong, Y. (2015). Application of nitric oxide and calcium nitrate enhances tolerance of wheat seedlings to salt stress. *Plant Growth Regulation*, 77(3), 343–356. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0069-3>.
- Tossi, V., Lamattina, L., & Cassia, R. (2009). An increase in the concentration of abscisic acid is critical for nitric oxide-mediated plant adaptive responses to UV-B irradiation. *New Phytologist*, 181(4), 871–879. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02722.x>.
- Tun, N. N., Santa-Catarina, C., Begum, T., Silveira, V., Handro, W., Segal Floh, E. I., & Scherer, G. F. E. (2006). Polyamines induce rapid biosynthesis of nitric oxide (NO) in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant and Cell Physiology*, 47(3), 346–354. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci252>.
- Vranová, E., Inzé, D., & Van Breusegem, F. (2002). Signal transduction during oxidative stress. *Journal of Experimental Botany*, 53(372), 1227–1236. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.372.1227>.
- Wang, Y., Feng, H., Qu, Y., Cheng, J., Zhao, Z., Zhang, M., Wang, X., & An, L. (2006). The relationship between reactive oxygen species and nitric oxide in ultraviolet-B-induced ethylene production in leaves of maize seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 57(1-2), 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.04.009>.
- Wang, Y., Luo, Z., Mao, L., & Ying, T. (2016). Contribution of polyamines metabolism and GABA shunt to chilling tolerance induced by nitric oxide in cold-stored banana fruit. *Food Chemistry*, 197, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.118>.
- Wu, X., Zhu, W., Zhang, H., Ding, H., & Zhang, H. J. (2011). Exogenous nitric oxide protects against salt-induced oxidative stress in the leaves from two genotypes of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 33, 1199–1209. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0648-x>.
- Wu, Z., Dong, C., Wei, J., Guo, L., Meng, Y., Bin Wu, B. & Chen, J. (2021). A transcriptional study of the effects of nitric oxide on rachis browning in table grapes cv. Thompson Seedless. *Postharvest Biology and Technology*, 175 (8), 111471. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111471>.
- Wu, P., Kong, Q., Bian, J., Ahammed, G. J., Cui, H., Xu, W., ... & Liu, H. (2022). Unveiling molecular mechanisms of nitric oxide-induced low-temperature tolerance in cucumber by transcriptome profiling. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5615. <https://doi.org/10.3390/ijms23105615>.
- Xuan, Y., Zhou, S., Wang, L., Cheng, Y., & Zhao, L. (2010). Nitric oxide functions as a signal and acts upstream of AtCaM3 in thermotolerance in *Arabidopsis* seedlings. *Plant Physiology*, 153(4), 1895-1906. <https://doi.org/10.1104/pp.110.160424>.
- Yağcı, A., Daler, S., Bozkurt, A., (2022). Sodyum nitroprusid uygulamalarının Çeliksü, Rizellim, Rizessi, Rizpem ve ülkemiz üzüm (*Vitis labrusca*) çeşitlerinde fide büyüme ve gelişme özelliklerine etkisi. *Tarımsal Perspektif*, 203-224.
- Yeğenoğlu, E. D., Aydın, Ş., Arık, C., Gevrekçi, Y., & Aşık, M. (2016). Üzümde çeşitliliğin belirlenmesinde morfolojik farklılıkların kullanılması. *CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2(22), 13–20.
- Zhang, Y., Wang, L., Liu, Y., Zhang, Q., Wei, Q., & Zhang, W. (2006). Nitric oxide enhances salt tolerance in maize seedlings through increasing activities of proton-pump and Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiport in the tonoplast. *Planta*, 224(3), 545-555. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0242-z>.

- Zhang, A., Jiang, M., Zhang, J., Ding, H., Xu, S., Hu, X., & Tan, M. (2007). Nitric oxide induced by hydrogen peroxide mediates abscisic acid-induced activation of the mitogen-activated protein kinase cascade involved in antioxidant defense in maize leaves. *New Phytologist*, 175(1), 36–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02071.x>.
- Zhang, Z., Xu, J., Chen, Y., Wei, J., & Wu, B. (2019). Nitric oxide treatment maintains postharvest quality of table grapes by mitigation of oxidative damage. *Postharvest Biology and Technology*, 152, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.015>.
- Zhao, M.-G., Tian, Q.-Y., & Zhang, W.-H. (2007). Nitric oxide synthase-dependent nitric oxide production is associated with salt tolerance in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 144(1), 206–217. <https://doi.org/10.1104/pp.107.096842>.
- Zhao, L., He, J., Wang, X., & Zhang, L. (2008). Nitric oxide protects against polyethylene glycol-induced oxidative damage in two ecotypes of reed suspension cultures. *Journal of Plant Physiology*, 165(2), 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.03.002>.
- Zhao, M. G., Chen, L., Zhang, L. L., & Zhang, W. H. (2009). Nitric reductase-dependent nitric oxide production is involved in cold acclimation and freezing tolerance in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 151(2), 755–767. <https://doi.org/10.1104/pp.109.140996>.
- Zhao, R., Sheng, J., Lv, S., Zheng, Y., Zhang, J., Yu, M., & Shen, L. (2011). Nitric oxide participates in the regulation of *LeCBF1* gene expression and improves cold tolerance in harvested tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 62(2), 121–126. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2011.05.013>.