

ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TATLI MISIR (*Zea mays saccharata* Sturt.)’DA NANO ÇİNKO OKSİT (NANO-ZnO) UYGULAMALARININ KURAKLIĞA TOLERANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Athraa Abd Almunaf FADHIL ALTUMA

TARIM VE YAŞAM BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

ÇANKIRI
2025

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Athraa Abd Almunaf FADHIL ALTUMA tarafından hazırlanan “**Tatlı Mısır (*Zea mays saccharata* Sturt.)’da Nano Çinko Oksit (Nano-ZnO) Uygulamalarının Kuraklığa Tolerans Üzerindeki Etkisi**” adlı tez çalışması 07/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım ve Yaşam Bilimleri Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Alpaslan KUŞVURAN

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Alpaslan KUŞVURAN
Tarım ve Yaşam Bilimleri Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Şebnem KUŞVURAN
Tarım ve Yaşam Bilimleri Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. İbrahim ATIŞ
Tarla Bitkileri Anabilim Dalı
Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ersoy YILMAZ

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum “**Tatlı Mısır (*Zea mays saccharata* Sturt.)’da Nano Çinko Oksit (Nano-ZnO) Uygulamalarının Kuraklığa Tolerans Üzerindeki Etkisi**” konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan “Bilimsel İntihal Tespit Programı”yla tarandığını, “intihal içermediğini” beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (07/02/2025).

Athraa Abd Almunaf FADHIL ALTUMA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TATLI MISIR (*Zea mays saccharata* Sturt.)’DA NANO ÇİNKO OKSİT (NANO-ZNO) UYGULAMALARININ KURAKLIĞA TOLERANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Athraa Abd Almunaf FADHIL ALTUMA

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarım ve Yaşam Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Alpaslan KUŞVURAN

Bu çalışmada; tatlı mısırdaki (*Zea mays saccharata* Sturt.) farklı dozlarda nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının (NZnOD1: 0, NZnOD2: 50, NZnOD3: 100 ve NZnOD4: 150 ppm), kuraklığa toleransı (K1: %100 sulama/SK/kontrol, K2: %75 sulama/SK, K3: %50 sulama/SK ve K4: %25 sulama/SK) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma sera koşullarında, 11 litre kapasiteli plastik saksılarda, farklı kuraklık düzeyleri ana parselleri, farklı nano-çinko oksit dozları ise alt parselleri oluşturacak şekilde, tesadüf parselleri bölünmüş parseller deneme desenine göre üç tekrarlamalı olarak yürütülmüştür. Araştırma sonucunda kuraklık stresinin; incelenen özelliklerin tamamında %1 ile %40 arasında değişen oranlarda olumsuz etkilere neden olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, kuraklık stresi ile birlikte NZnOD uygulamalarında kontrol bitkilerine kıyasla; bitki boyunda %7-21, bitki yaş ağırlığında %9-33, bitki kuru ağırlığında %18-33, sap kalınlığında %1-15, yaprak boyunda %3-22, yaprak eninde %6-40 ve yaprak sayısında %2-5, YOSİ değerinde %3-31 düzeyinde bir iyileşme sağlanmıştır. Sonuç olarak; uygulanan NZnOD, kuraklık stresinden kaynaklanan olumsuzlukları değişen oranlarda olumlu yönde etkilediği, NZnOD3 ve NZnOD4 dozlarının diğer uygulamalara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

2025, 52 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Abiyotik stres, Kurak stresi, Mısır, Nanopartiküller, Su kısıtı

ABSTRACT

Master of Science Thesis

THE EFFECT OF NANO-ZINC OXIDE APPLICATIONS (NANO-ZNO) ON DROUGHT TOLERANCE IN SWEET CORN (*Zea mays saccharata* Sturt.)

Athraa Abd Almunaf FADHIL ALTUMA

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Agriculture and Life Science

Advisor: Prof. Dr. Alpaslan KUŞVURAN

In this study, the effects of different doses of nano-zinc oxide (NZnOD) applications (NZnOD1: 0, NZnOD2: 50, NZnOD3: 100 ve NZnOD4: 150 ppm) on drought tolerance (K1: 100% irrigation/SK/control, K2: 75% irrigation/SK, K3: 50% irrigation/SK and K4: 25% irrigation/SK) in sweet corn (*Zea mays saccharata* Sturt.) were investigated. The research was carried out under greenhouse conditions in 11 L capacity plastic pots, according to a randomized split plot design with three replications, with different drought levels forming the main plots and different nano-zinc oxide doses forming the subplots. As a result of the research, it was determined that drought stress caused negative effects ranging from 1% to 40% on all of the examined traits. In addition, in NZnOD applications with drought stress, compared to control plants; 7-21% improvement in plant height, 9-33% in plant fresh weight, 18-33% in plant dry weight, 1-15% in stem thickness, 3-22% in leaf length, 6-40% in leaf width, 2-5% in leaf number and 3-31% in YOSI value were achieved. As a result, it was determined that the applied NZnOD positively affected the negativities caused by drought stress at varying rates and NZnOD3 and NZnOD4 doses gave better results compared to other applications.

2025, 52 pages

Keywords: Abiotic stress, Drought stress, Maize, Nanoparticles, Irrigation limitation

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmamın bütün aşamalarında benimle sabır ve güler yüzle yakından ilgilenen, her aradığımda ulaşabildiğim, her konuda samimiyetle yardımlarını esirgemeyen, çalışmamım her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden sonsuz yararlandığım değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Alpaslan KUŞVURAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarında benden bilgi, tecrübeleriyle desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, değerli hocam Prof. Dr. Şebnem KUŞVURAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Her zaman maddi, manevi yanımda alan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Athraa Abd Almunaf FADHIL ALTUMA

Çankırı, Şubat 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1 Kuraklık Stresi ve Mısırdaki Kuraklık Stresinin Etkileri.....	3
2.2 Nano-Çinko Oksit (Nano-ZnO) ve Abiyotik Strese Toleransta Etkisi	7
3. MATERYAL VE METOT	13
3.1 Materyal.....	13
3.2 Yöntem	13
3.2.1 Bitkilerin yetiştirilmesi ve denemenin kurulması.....	14
3.2.2 Nano-Çinko Oksit (NZnO) dozlarının uygulanması ve kuraklık stresi	16
3.2.3 Ölçüm ve analizler	21
3.2.3.1 Skala değerlendirmesi (0-5 Skalası)	21
3.2.3.2 Bitki boyu (cm).....	21
3.2.3.3 Sap kalınlığı (mm).....	21
3.2.3.4 Yaprak sayısı (adet bitki ⁻¹).....	21
3.2.3.5 Yaprak ayası boyu (cm).....	22
3.2.3.6 Yaprak ayası eni (cm)	22
3.2.3.7 Bitki yaş ağırlığı (g bitki ⁻¹).....	22
3.2.3.8 Bitki kuru ağırlığı (g bitki ⁻¹).....	22
3.2.3.9 Klorofil indeksi (SPAD) değeri	22
3.2.3.10 Yaprak oransal su içeriği (YOSİ) (%)	23
3.2 Verilerin Değerlendirilmesi.....	23
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	29

4.1 Skala Değerleri (0-5 skalası).....	29
4.2 Bitki Boyu (cm).....	30
4.3 Bitki Yaş Ağırlığı (g bitki ⁻¹).....	31
4.4 Bitki Kuru Ağırlığı (g bitki ⁻¹).....	32
4.5 Sap Kalınlığı (mm).....	33
4.6 Yaprak Ayası Boyu (cm)	34
4.7 Yaprak Ayası Eni (cm)	35
4.8 Yaprak Sayısı (adet bitki ⁻¹)	36
4.9 Klorofil İçeriği (SPAD).....	37
4.10 Yaprak Oransal Su İçeriği (YOSİ).....	38
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER DİZİNİ

N	Azot
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
B	Bor
Zn	Çinko
da	Dekar
Fe	Demir
dS	Desisiemens
g	Gram
CO ₂	Karbondioksit
kg	Kilogram
≤	Küçük veya eşittir
l	Litre
m	Metre
mg	Miligram
mM	Milimolar
m ⁻²	Metrekare
MPa	Megapascal
mL	Mililitre
ppm	Milyon başına parça sayısı
nm	Nanometre
Ni	Nikel
K	Potasyum
Na	Sodyum
°C	Santigrat
cm	Santimetre
%	Yüzde

KISALTMALAR DİZİNİ

APX	Askorbat peroksidaz
DNA	Deoksiribo nükleik asit
D	Doz
EPS	Ekzopolisakkarit
GSH-Px	Glutasyon peroksidaz
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
CAT	Katalaz
SPAD	Klorofil içeriği
K	Kuraklık
MDA	Malondialdehit
PEG	Polietilen glikol
ROS	Reaktif oksijen türleri
SKP	Saksı kapasitesi
SK	Su kısıtı
SOD	Süperoksit dismutaz
TK	Tarla kapasitesi
TFAA	Toplam serbest aminoasit
TSS	Toplam çözünür şeker
TSP	Toplam çözünür protein
YOSİ	Yaprak oransal su içeriği
LRWC	Yaprak oransal su içeriği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Ekim öncesi saksıların hazırlanması	14
Şekil 3.2 Tohum ekimleri.....	15
Şekil 3.3 Bitkilerde çıkışlar ve gelişim aşamaları-I (17/05/2023, 19/05/2023, 24/05/2023, 31/05/2023, 07/06/2023 ve 18/06/2023)	16
Şekil 3.4 Nano-çinko oksit (NZnO) uygulamaları (08/06/2023, 16/06/2023, 20/06/2023 ve 26/06/2023).....	17
Şekil 3.5 Bitkilerde kuraklık stresi uygulamaları.....	19
Şekil 3.6 Bitkilerde ölçüm ve analizler	23
Şekil 3.7 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) dozlarının K1 (%100 sulama-kontrol) kuraklık stresi koşullarında etkisi	24
Şekil 3.8 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) K2 (%75 sulama) kuraklık stresi koşullarında etkisi.....	25
Şekil 3.9 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) K3 (%50 sulama) kuraklık stresi koşullarında etkisi.....	26
Şekil 3.10 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) K4 (%25 sulama) kuraklık stresi koşullarında etkisi.....	27

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Nano-çinko oksit (NZnOD) dozları ve sulama/saksı kapasitesi (SKP) uygulamaları	19
Çizelge 4.1 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin skala değerleri bakımından değerlendirmesi (0-5 skalası).....	29
Çizelge 4.2 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin bitki boyu bakımından değerlendirilmesi (cm).....	30
Çizelge 4.3 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin bitki yaş ağırlığı bakımından değerlendirilmesi (g bitki ⁻¹)	31
Çizelge 4.4 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin bitki kuru ağırlık değeri bakımından değerlendirilmesi (g bitki ⁻¹)	32
Çizelge 4.5 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin sap kalınlığı değeri bakımından değerlendirilmesi (mm).....	33
Çizelge 4.6 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin yaprak boyu değeri bakımından değerlendirilmesi (cm).....	34
Çizelge 4.7 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin yaprak eni değeri bakımından değerlendirilmesi (mm).....	35
Çizelge 4.8 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin yaprak sayısı değeri bakımından değerlendirilmesi (adet bitki ⁻¹).....	36
Çizelge 4.9 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin SPAD değeri bakımından değerlendirilmesi	37
Çizelge 4.10 Nano-çinko oksit (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin YOSİ değeri bakımından değerlendirilmesi (%)	38

1. GİRİŞ

Kuraklık stresi, bitki büyüme ve gelişimini doğrudan etkileyen en önemli çevresel stres faktörlerinden biridir. Bu stresin etkisiyle bitkilerin tüm organlarındaki kuru madde birikimi azalır ve farklı organlar, bu durumdan farklı derecelerde etkilenir. Bu nedenle kurak ortamlarda yetişen bitkiler, normal koşullarda yetişenlere kıyasla daha küçük habitüs geliştirir (Nezhadahmadi *et al.* 2013, Zlatev and Lidon 2012, Yıldırım vd. 2021).

Kuraklık toleransı, su kaynaklarının sınırlı olduğu koşullarda bitkilerin hayatta kalma becerisi olarak tanımlanabilir. Bitkiler, kuraklıktan kaçınma ve kuraklığa dayanma olarak adlandırılan savunma mekanizmalarını geliştirerek strese karşı tolerans sağlarlar. Kuraklıktan kaçınan bitkilerde genellikle geniş bir kök sistemi gelişir, stomalar kapanarak su kaybı en aza indirilir ve su kullanımı daha verimli hale gelir (Ashraf and Iram 2005, Kusvuran and Kusvuran 2019, Kusvuran and Kusvuran 2020).

Mısır bitkisi, yüksek verim potansiyeli ve iklim koşullarına uyum yeteneği sayesinde dünya genelinde geniş bir yayılım alanına sahiptir. Sıcak ve serin iklim tahılları arasında buğdaydan sonra en fazla ekim alanına sahip olan mısır, üretim açısından tüm tahıllar arasında birinci sırada yer almaktadır. Tahıllar arasında morfolojik olarak en büyük yapıya sahip olan türlerden birisi olan mısır, benzer şekilde uygun koşullarda altında da en yüksek verimi sağlar. Türkiye'de tane mısır üretimi son beş yılda %50 oranında artmıştır. 2019 yılında 638 bin hektar alanda ekilen tane mısır, 2023 yılında 958 bin hektar alana ulaşmıştır. Ancak bu dönemde birim alan verimi değişmemiş ve 940 kg/da seviyesinde kalmıştır. Ekim alanındaki genişlemeye paralel olarak toplam üretim, 6,0 milyon ton/yıl seviyesinden 9,0 milyon ton/yıl düzeyine yükselmiştir (TÜİK 2024).

Mısırın bir alt türü olan tatlı mısır (*Zea mays saccharata* Sturt.), taze tüketim veya konserve yapımı amacıyla yetiştirilmektedir. Tatlı mısır koçanları haşlanarak veya közlenerek tüketilebildiği gibi daneleri bardakta mısır, konserve ya da dondurulmuş gıda olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca hasat sonrası geriye kalan sap ve yapraklar hayvan yemi olarak değerlendirilmekte, yeşil sap ve yapraklar ise silaj olarak

kullanılabilmektedir (Boztepe 2022). Tatlı mısır, ülkemizde yaklaşık 40 yıldır üretilmektedir. Ancak bitkisel üretim istatistiklerinde ayrı bir kategoriye sahip olmamasından dolayı ekim ve üretim miktarlarına ilişkin net veriler bulunmamaktadır. Buna rağmen, yıllara göre değişmekle birlikte yaklaşık 120-150 bin hektar alanda yetiştirildiği tahmin edilmektedir. Adana, Eskişehir, Sakarya ve İzmir, tatlı mısır üretiminde önde gelen iller arasında yer almakta, ülkenin hemen her bölgesinde farklı miktarlarda üretim yapılmaktadır. Yetiştirme süresi, iklim koşulları, çevresel faktörler ve çeşide bağlı olarak 70-110 gün arasında değişiklik göstermektedir. İç ve dış pazardaki talep artışına bağlı olarak, Türkiye'de tescil edilen tatlı mısır çeşitlerinin sayısında da sürekli bir artış yaşanmaktadır.

Son yıllarda nanobiyoteknolojiye dayalı uygulamalar, araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Nanoteknoloji; biyoloji, fizik, kimya, mühendislik gibi çeşitli bilim dallarını nano düzeyde bir araya getiren ve hızla gelişen çok disiplinli bir alan olarak öne çıkmaktadır. Biyoteknoloji ve tarım sektöründe önemli bir yere sahip olan bu teknoloji, gıda işleme sanayisi, patojen tespiti ve teşhisi, gıda mühendisliği, ambalaj malzemeleri ve ekipmanları gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Nanopartiküller, boyutları 1-100 nanometre arasında değişen ve genellikle nano ölçekli parçacıklar (NSP) olarak adlandırılan küçük moleküllü yapılar olup, tarım sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yapılar; bitki büyümesini destekleyiciler, herbisitler, nano-pestisitler ve nanogübreler gibi çeşitli formlarda uygulanabilmektedir. Nanogübrelerin düşük miktarlarda kullanılması, gübre tasarrufu sağlamanın yanı sıra kimyasal gübre ve pestisitlerin toprakta birikmesine bağlı olarak oluşan toksisiteyi azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, abiyotik ve biyotik stres koşullarında, bitkilerde fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmaları tetikleyerek stres toleransını artırmada etkili olmaktadır (DeRosa *et al.* 2010, Siddiqui *et al.* 2015, Saxena *et al.* 2016).

Bu çalışmada; özel bir firma tarafından üretim izni alan Braveheart tatlı mısır (*Zea mays saccharata* Sturt.) çeşidinde (Anonim 2021); farklı dozlarda NanZnO uygulamalarının tatlı mısırın erken gelişme döneminde kuraklığa toleransı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Kuraklık Stresi ve Mısırdaki Kuraklık Stresinin Etkileri

Kuraklık, her yıl meydana gelen ve ürün verimi üzerinde yıkıcı etkilere sahip olan, ürün büyümesini ve üretkenliğini tehdit eden en ciddi küresel sorunlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Kuraklık stresine maruz kalan ürünlerin veriminde %48'lik bir azalma olduğu ve kuraklık stresinden kaynaklanan küresel ürün kayıplarının diğer tüm abiyotik streslerin toplamından daha fazla olduğu rapor edilmektedir. Bununla birlikte, gelecekte küresel kuraklık şiddetinde sürekli bir artış olacağı ve 2050 yılına kadar ekilebilir tarım alanlarının %50'sinden fazlasında ciddi bitki büyüme ve verim sorunları ile karşı karşıya kalacağı öngörülmektedir (Gu *et al.* 2024)

Kuraklık stresi altındaki, bitkilerin morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri, engellenen fotosentez, hücre uzaması, hücre bölünmesi ve hücre turgor basıncı ile olumsuz yönde etkilenmektedir (Gu *et al.* 2024). Kuraklık stresinin, yaprak alanını ve birim yaprak alanı başına düşen fotosentez hızını azaltarak fotosentezi olumsuz etkilediği bilinmektedir. Fotosentetik hızdaki bu azalma, genellikle stomaların kapanması ya da metabolik süreçlerde meydana gelen bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Sınırlı hücre içi CO₂ konsantrasyonu koşullarında, kuraklık stresi sırasında fotosentetik ışık reaksiyonları devam etmekte, bu da fotosentetik elektron taşıma bileşenlerinin birikmesine yol açmaktadır. Biriken bu bileşenler, moleküler oksijeni azaltarak reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumuna neden olmaktadır. ROS, fotosentez mekanizmasında ciddi zararlar meydana getirerek bitki büyümesini ve verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Basu *et al.* 2016).

Kuraklık stresi, toprak ve bitki kök bölgesindeki su potansiyelinin azalmasına bağlı olarak ozmotik potansiyelin artmasına neden olur. Bu durumda bitkiler, hücre hacmini ve turgor durumunu koruyarak dehidrasyona karşı direnç gösterebilmek için şekerler,

prolin, mannitol ve glisin betain gibi organik çözünen maddeler sentezler. Bu süreç, "ozmotik dengenin korunması" olarak adlandırılmaktadır (Yıldırım vd. 2021). Osmotik düzenleme, bitkilerin osmotik potansiyelini düşürerek su kıtlığı nedeniyle maruz kaldıkları stresin olumsuz etkilerine karşı koymak için kritik bir mekanizmadır. Bitkiler kuraklık stresine maruz kaldığında osmotik düzenleme, üç farklı yolla gerçekleştirilebilir: hücre içindeki suyun azalması, hücre hacminin küçülmesi ve hücre içeriğinin yoğunlaşması. Bu üç yol genellikle bitkilerde bir arada bulunur, ancak tüm bitkiler osmotik düzenleme yeteneğine sahip değildir. Osmotik düzenleme, genellikle hücrelerin aktif bir şekilde çözünen madde miktarını artırarak osmotik potansiyeli düşürdüğü bir adaptasyon stratejisi olarak kabul edilir (Yang *et al.* 2021).

Farklı kuraklık stresi düzeylerinin (%50, %60 ve %70 su kısıtlaması) mısır bitkisinin büyüme parametrelerine etkilerinin incelendiği çalışmada; bitki boyu, yaprak sayısı, yaprak alanı, yaprak indeksi, kuru madde birikimi ve bitki büyüme oranını değerlendirmiştir. Araştırmada, kuraklık stresinin şiddeti arttıkça, bu parametrelerdeki değişimin belirgin şekilde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Abdulameer and Ahmed 2019).

Badr vd. (2020), mısırın büyüme, gelişme, verim ve kalite parametrelerini olumsuz etkileyen kuraklık stresine duyarlılığını vurgulamış ve 40 farklı mısır genotipinin kuraklığa tolerans düzeylerini belirlemek amacıyla gerçekleştirdikleri tarama çalışmasında %10, %15 ve %20 PEG kullanarak yapay kuraklık stres ortamları oluşturmuşlardır. %15 ve %20 PEG uygulamalarının, çimlenme oranında belirgin bir düşüşe, fide büyümesinde gecikmeye ve anormal fide sayısında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sürgün ve kök özellikleri arasındaki pozitif korelasyonlar ve bu özelliklerin orta ila yüksek düzeyde kalıtım derecesine sahip olması, daha ileri genetik analizler için önemli bir temel oluşturduğu belirtilmiştir (Badr *et al.* 2020).

Kuraklık ve yüksek sıcaklık stresleri, genellikle aynı anda meydana gelerek mısır (*Zea mays* L.) gibi tahıllarda ciddi verim kayıplarına neden olan temel abiyotik stres faktörleridir. Ayub vd. (2021) yürüttüğü çalışmada, 10 farklı mısır genotipi, kök uzunluğu stres tolerans indeksi kullanılarak yüksek sıcaklık (2, 4 ve 6 saat boyunca

40°C) ve kuraklık (-0,2, -0,4 ve -0,6 MPa) stresleri altında taranmıştır. Bu çalışma sonucunda, 2 toleranslı ve 2 hassas genotip belirlenmiştir. Çalışmanın devamında, kuraklık (%60 tarla kapasitesi), sıcaklık (6 saat boyunca 40°C'lik döngü) ve birleşik stres koşullarında bitki büyüme parametreleri ile biyokimyasal özellikler değerlendirilmiştir. Kuraklık stresinin, sıcaklık stresine kıyasla daha baskın bir etkisi olduğu, ancak her iki stresin birleşiminin tüm parametreler üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açtığı tespit edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, toplam çözünür şekerler (TSS), prolin ve toplam serbest aminoasitler (TFAA) gibi biyokimyasal özelliklerin stres altında artış gösterdiği; buna karşılık toplam çözünür proteinler (TSP) ve nitrat redüktaz aktivitesinin azaldığı belirlenmiştir. Toleranslı genotiplerin daha yüksek TSS, TSP, prolin ve TFAA içeriklerini koruyarak, kuraklık ve yüksek sıcaklık stresine karşı daha iyi adaptasyon sağladıkları ve bu genotiplerin iklim değişikliği koşullarında ıslah programlarında kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Haseeb vd. (2020), mısır bitkisinin biyotik ve abiyotik stres koşullarına karşı duyarlılığını vurgulamış ve dört farklı mısır genotipinin (B-316, Raka-poshi, Pak-Afghoi ve EV-1097Q) farklı sulama düzeylerinde (%20, %40, %60, %80, %90 ve %100) kuraklık stresine verdikleri tepkileri incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, sulama düzeyi azaldıkça canlı bitki sayısında düşüş, ortalama yaprak alanında, bitki başına düşen kök sayısında, yeşil aksam ve kök kuru ağırlığında, ayrıca gövde uzunluğunda azalma meydana gelmiştir. Elde edilen bulgular, kuraklık toleransı açısından B-316 ve Raka-poshi genotiplerinin diğer genotiplere kıyasla daha iyi bir performans sergilediğini ortaya koymuştur (Haseeb *et al.* 2020).

Mazhar vd. (2020), mısır bitkisinde kuraklık stresine dayanıklılığı değerlendirmek amacıyla P1429, L5971 ve L6103 genotiplerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bitkiler çimlenmeden 7 gün sonra kuraklık stresine maruz bırakılmış ve yeşil aksam yaş ve kuru ağırlığı, kök ve yaprak ağırlığı ile kök ve yaprak uzunluğu gibi parametreler incelenmiştir. Çalışma sonuçları, L6103 genotipinin kuraklığa tolerans bakımından diğer genotiplerden daha üstün olduğunu göstermiştir (Mazhar *et al.* 2020).

Azeem vd. (2022), mısır bitkilerinde kuraklık stresine yönelik 21 gün süren bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu süre boyunca bitkiler fizyolojik parametreler, fotosentetik pigment içerikleri, lipid peroksidasyon içeriği (MDA) ve antioksidatif enzim aktiviteleri açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, stres altındaki bitkilerde gövde uzunluğunun kontrol grubuna kıyasla %9-13, kök uzunluğunun ise %7-15 oranında azaldığını göstermiştir. Ayrıca, her iki çeşitte klorofil-a, klorofil-b, toplam klorofil ve karotenoid içeriklerinde düşüş gözlenirken, MDA içeriği ve antioksidatif enzim aktivitelerinde belirgin bir artış kaydedilmiştir (Azeem *et al.* 2022).

Luqman vd. (2023), HY-1898 ve FH-1046 hibrit mısır çeşitlerini kullanarak kuraklık stresinin fizyolojik, morfolojik ve biyokimyasal etkilerini incelemiştir. %60 tarla kapasitesinde oluşturulan stres koşulları altında bitkiler; büyüme parametreleri, fotosentetik bileşenler ve ozmolit birikimi açısından değerlendirilmiştir. Araştırmada, glisin betain ve prolin gibi ozmolitlerin kuraklık stresıyla birlikte arttığı, fotosentetik pigment içeriklerinin, verim ve verim parametrelerinin ise kontrol grubuna göre azaldığı belirlenmiştir (Luqman *et al.* 2023).

Shah vd. (2023), tolerant ve hassas olmak üzere iki hibrit mısır çeşidinde %50 ve %100 sulama koşulları altında kuraklık stresinin etkilerini incelemiştir. Çalışmada, mısır bitkisinin büyüme ve gelişme süreçlerinin her aşamasında kuraklık stresine duyarlı olduğu, stres koşullarının büyüme, verim ve verim parametrelerinde azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir.

Kuraklık stresinin mısırdaki bitki besin elemanı alımının sınırlandırılmasına, buna bağlı olarak azalan bitki büyüme ve gelişmesi ile verimde düşüşe neden olduğunu ifade eden Samadi vd. (2024), gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında kuraklık stresine bağlı olarak yeşil aksam ve kök yaş ve kuru ağırlık, N, K ve P iyon içeriklerinde azalma meydana geldiğini vurgulamışlardır.

2.2 Nano-Çinko Oksit (Nano-ZnO) ve Abiyotik Strese Toleransta Etkisi

Küresel ısınmanın iklim değişikliği etkileriyle birlikte, artan dünya nüfusunun gelecekte beslenme ve giyinme gereksiniminin sağlanması amacıyla, kurağa tolerant ve daha az su ihtiyacı bulunan bitki genotip ve çeşitlerinin geliştirilmesi ya da kuraklığa toleransı sağlayacak dışsal uygulamaların belirlenmesi gerekmektedir (Jaleel *et al.* 2008) .

Çinko (Zn), tüm organizmalar için hayati bir element olup, enzimler ve proteinlerin kritik bir bileşeni olarak görev yapar (Marschner 1995). Zn, enzimler ile substratlar arasında bağlanma ve yönlendirme işlevi görür. Özellikle karbonik anhidraz ve süperoksit dismutaz enzimlerinin aktivasyonunda önemli bir rol oynar. Bu enzimlerin kloroplastlarda lokalize olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Zn, RNA sentezine doğrudan katkı sağlar ve Zn eksikliği durumunda RNA sentezinin durduğu, dolayısıyla protein üretiminin de kesintiye uğradığı bildirilmiştir. Çinkonun diğer bir önemli işlevi ise karbonhidrat metabolizmasında enzim aktivatörü olarak görev almasıdır (Çelik Saygın 2013).

Kuraklık stresi altında Zn uygulaması, tohum çimlenmesini, bitki su ilişkilerini, hücre zarı stabilitesini, ozmolit birikimini, stomaların düzenlenmesini, su kullanım verimliliğini ve fotosentez aktivitesini olumlu yönde etkileyerek bitkilerin kuraklık stresine toleransını artırmaktadır. Bunun yanı sıra Zn, bitki hormonlarıyla ilişkili olup stres proteinlerinin ekspresyonunu artırır ve kuraklık etkilerine karşı bitkileri desteklemek için antioksidan enzimleri uyarır (Hassan *et al.* 2020).

Nanopartiküller, fizikokimyasal özelliklerinden dolayı bitki gelişimi üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkiler gösterebilir. Nanopartiküllerin bitkilerdeki birikimi, etkisi ve sürekliliği; nanopartiküllerin boyutuna, konsantrasyonuna, kimyasal yapısına ve bitki dokularında depolandığı hücre içi bölümlerin kimyasal ortamına bağlıdır. Nanopartiküller, biyolojik sistemlerde beş temel etki mekanizmasıyla işlev gösterebilir:

Kimyasal Etki: Çözeltideki metal iyonlarının çözünmesi ile ortaya çıkar.

Mekanik Etki: Nanopartiküllerin yapısına bağlı olarak gerçekleşir.

Katalitik Etki: Yüzey yapısının katalizör işlevi görmesiyle oluşur.

Yüzey Etkisi: Nanopartiküllerin proteinlere bağlanmasını sağlayan yüzey özelliklerinden kaynaklanır.

Kimyasal Ortam Değişikliği: Ortamın pH'ını değiştirerek etkisini gösterir (Dietz and Hertzh 2011).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, nanopartiküllerin bitkilerde oksidatif strese ve hücrel hasara yanıt olarak antioksidatif savunma mekanizmalarını harekete geçirdiğini ortaya koymaktadır. Bu süreçte antioksidatif enzim aktivitelerinin artırıldığı ve belirli antioksidanların üretiminin teşvik edildiği rapor edilmiştir (Sharma *et al.* 2012).

Sedghi vd. (2021) tarafından yapılan başka bir çalışmada, soya (*Glycine max* L.) bitkisinde farklı PEG (-0,5 ve -1 MPa) ve nano-ZnO (0, 0,5, 1 g l⁻¹) uygulamalarının çimlenme oranı, kök ve sürgün gelişimi, yaş ve kuru ağırlık gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nano-ZnO uygulamalarının çimlenme oranı ve yüzdesinde belirgin bir artış sağladığı tespit edilmiştir.

Dimkpa vd. (2019) tarafından yapılan bir diğer araştırmada ise sorgum bitkilerinde kuraklığın morfolojik ve fizyolojik etkileri, nano-ZnO'nun bu etkilere karşı gösterdiği iyileştirici rol değerlendirilmiştir. 1, 3 ve 5 mg kg⁻¹ Zn dozlarında nano-ZnO uygulanmış toprakta, kuraklık stresine maruz bırakılan bitkilerde tane verimi %76 oranında azalmışken, nano-ZnO uygulaması ile tane veriminde %22-183 arasında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca kuraklık, bitkilerin azot (N) ve fosfor (P) alımını engellerken, ZnO-NP'ler, azot ve fosfor alımını iyileştirmiştir. Kuraklık sonucu potasyum alımı da %41 oranında azalmışken, nano-ZnO uygulaması, potasyum alımını %16-30 oranında artırmıştır (Dimkpa *et al.* 2019). Kuraklık altında zincirli ZnO-NP değişiklikleri, kuraklık etkisinde olan bitkilerde Zn içeriğini %94 oranında

iyileştirmiştir. ZnO-NP'lerin bitki gelişimini hızlandırma, verimi artırma ve besin içeriklerini iyileştirme konusunda güçlü etkilerinin olduğu vurgulanmıştır, bu da tarımsal sistemlerin dayanıklılığını artırarak gıda ve yem üretimini desteklemeye yardımcı olabilir.

Limonotu (*Cymbopogon citratus* L.)'nda abiyotik stres toleransında nano-ZnO uygulamalarının etkileri üzerine yapılan bir çalışmada, 50 ve 100 ppm dozları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, 100 ppm nano-ZnO dozunun strese tolerans sağlanmasında daha etkili olduğu bulunmuştur (Hamid and Nazmy 2020).

Tek yıllık çim (*Lolium multiflorum* Lam.)'de kuraklık stresi koşullarında dışsal Zn uygulamalarının etkisi üzerine yapılan bir çalışmada, çinko uygulamaları sonucunda absisik asit (ABA) içeriğinde azalma gözlemlenirken, kuru ağırlık değerlerinde artış meydana gelmiştir. Elde edilen bulgular, Zn uygulamalarının bitkinin kuraklık stresine karşı daha verimli bir şekilde tepki vermesine yardımcı olabileceğini ve bu mekanizmanın bitkilerin su kaybını ve stres yanıtlarını modüle etme yeteneğiyle ilgili olduğunu göstermiştir (Školníková *et al.* 2020).

Sun vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, kuraklık stresinin mısır bitkisinin büyüme ve gelişmesini sınırladığı, stomaların kapanmasına neden olduğu, net fotosentez oranını düşürdüğü ve osmolit konsantrasyonlarının arttığı belirtilmiştir. Ancak, Nano-ZnO (100 mg l⁻¹) uygulaması, fotosentetik pigment bozulmasını sınırlamış, net fotosentetik oranı artırmış ve kuraklığa toleransı iyileştirerek su kullanım verimliliğini artırmıştır. Ayrıca, Nano-ZnO uygulaması, UDP-glikoz pirofosforilaz, fosfoglucoizomeraz ve sitoplazmik invertaz aktivitelerini sırasıyla %17,8, %391,5 ve %126 oranında artırarak, kuraklık stresi altındaki yapraklarda nişasta ve sukroz biyosentezini ve glikoliz metabolizmasını yükseltmiştir. Sonuç olarak, Nano-ZnO uygulaması, mısırın fotosentetik karbon asimilasyonunu iyileştirerek, kuraklık stresinin olumsuz etkilerini iyileştirmede etkili olmuştur.

Kazemi vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, nanoteknolojinin tarımsal üretimi artırdığı ve gübreleme nedeniyle ortaya çıkan çevre sorunlarının çözümünde etkili

olabileceği vurgulanmıştır. Çalışmada, nano makro ve mikro gübrelemenin, kimyasal gübrelemelere kıyasla, tane sorgum (*Sorghum bicolor* L. Moench) üzerinde kuraklık stresi koşullarında verim ve biyokimyasal parametreler bakımından iyileşme sağladığı bulunmuştur. Araştırmacılar, nano gübrelerin sadece ekonomik ve çevresel avantajlar sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kurak ve yarı kurak alanlarda sorgum yetiştiriciliği için uygun bir besin kaynağı olduğunu belirtmişlerdir.

Buğday (*Triticum aestivum* L.) bitkisinde kuraklık stresinde Nano-ZnO uygulamalarının etkisi incelenmiştir. Çalışmada 0, 25, 50 ve 100 ppm ZnO dozları kullanılmıştır. Sonuçlar, 100 ppm dozunun en etkili olduğunu, klorofil içeriğinde artış sağladığını, oksidatif strese azalma meydana geldiğini ve SOD (süperoksit dismutaz) ile POD (peroksidaz) aktivitelerinde artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur (Adrees *et al.* 2021).

Dört farklı nano partikülün (ZnO, SiO₂, TiO₂ ve Fe₂O₃) keten (*Linum usitatissimum* L.) bitkisinde tuz stresi koşullarında tohum morfolojisi ve fizyolojisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma, NP'lerin tuz stresi koşullarında büyüme, karbon ve besin asimilasyonunda iyileşme sağladığını, prolin içeriğinde artış olduğunu ve sonuç olarak bitkinin strese toleransının sağlanmasında etkili olduğunu bildirmiştir (Singh *et al.* 2021).

Semida vd. (2021), patlıcan (*Solanum melongena* L.) bitkisinde dışsal Nano-ZnO uygulamalarının (0, 50 ve 100 ppm) kuraklık stresi altında (tarla kapasitesinin %100 ve %60) ortaya koyduğu değişimleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, dışsal ZnO nanopartikülleri uygulamaları ile yaprak oransal su içeriği ve fotosentetik aktivitede artış sağlanmış, bitki büyüme parametrelerinde ve verimde de değişen oranlarda iyileşme ve artış gözlemlenmiştir (Semida *et al.* 2021).

Farklı dozlardaki yapraktan Nano-ZnO uygulamalarının kuraklık stresi altında hıyar bitkilerindeki büyüme ve gelişme performanslarını incelenmiştir. Nano-ZnO uygulaması yapılan bitkiler, uygulanmayanlara kıyasla büyüme ve gelişme açısından daha yüksek performans göstermiş ve kuraklık stresinin olumsuz etkilerini azaltmıştır.

Morfolojik ve fizyolojik parametrelerde en yüksek değerler, 100 mg l⁻¹ Nano-ZnO uygulamasında elde edilmiştir. Ayrıca, fotosentetik pigment içerikleri, fotosentez ve PSII aktivitesi artmış, antioksidan enzim aktiviteleri de yükselmiş, ROS üretimi ve MDA içeriği azalmıştır. Nano-ZnO uygulaması ile prolin, glisin betain, serbest amino asit ve şeker içerikleri artmıştır. Çalışma sonucunda, Nano-ZnO uygulamasının kuraklık stresine tolerans sağlanmasında etkili olduğu belirtilmiştir (Ghani *et al.* 2022).

Li vd. (2023), şalgamda çinkonun bitki büyümesini ve verimini düzenleyerek kuraklık stresini hafifletmeye yardımcı olan önemli bir besin elementi olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında, Nano-ZnO ve geleneksel çinko sülfat (ZnSO₄) farklı konsantrasyon seviyelerinde (%0,01, %0,05 ve %0,1) karşılaştırmalı etkilerini incelemişlerdir. Kuraklık stresi, tüm büyüme ve biyokimyasal özelliklerde önemli bir azalmaya ve antioksidan enzimatik aktivitede artışa yol açmıştır. Geleneksel ZnSO₄ ile karşılaştırıldığında, %0,1 Nano-ZnO uygulamasının kuraklık stresi altında yapraklarda bitki boyu, biyokütle, kök/yumru uzunluğu, yumru çapı, antioksidan savunma sistemi, sekonder metabolitler ve fotosentetik pigmentlerde önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, kuraklık stresi altında ZnSO₄ yerine Nano-ZnO yaprak uygulamasının şalgam bitkilerinin büyümesini ve verimini artırmada etkili olduğu bildirilmiştir.

Karimian ve Samiei (2023) tarafından yapılan çalışmada, nano gübrelerin bitkilerde kuraklık stresinin etkilerini hafifletmede yeni bir yöntem olarak kullanımı incelenmiştir. Çalışmada, çinko nanopartiküller (ZnO-NPs) ve çinko sülfat (ZnSO₄) gübrelerinin tıbbi-süs bitkisi Ejderotu (*Dracocephalum kotschy*)'nda kuraklık toleransını iyileştirme etkileri araştırılmıştır. Bitkiler, %50 ve %100 tarla kapasitesi (FC) altında, üç doz ZnO-N ve ZnSO₄ (0, 10 ve 20 mg l⁻¹) ile muamele edilmiştir. Sonuçlara göre, ZnO-N ile kuraklık stresi altındaki yapraktan gübrelemenin, elektrolit iletkenliğini (EC) azalttığı, ZnSO₄ uygulamasının ise daha az etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, %50 FC uygulanan bitkilerde şeker ve prolin içeriği ile süperoksit dismutaz (SOD) ve guaiakol peroksidaz (GPO) aktivitelerinde ZnO-N'nin etkisiyle artış gözlemlenmiştir. ZnSO₄ uygulaması ise bu bitkilerde klorofil ve protein içeriği ile polifenol oksidaz (PPO) aktivitesini artırmıştır. Çalışmada ZnO-N ve ZnSO₄'nin, bitkilerin Zn, P, Cu ve Fe

konsantrasyonlarını değiştirerek fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerini iyileştirdiği ve kuraklık toleransını artırdığı bulunmuştur. Sonuç olarak, *Dracocephalum kotschy*'de kuraklığa toleransı artırmada, şeker ve prolin içeriğinin artışı ve antioksidan enzim aktivitelerinin yükselmesi nedeniyle ZnO-N gübrelemesinin önerildiği ifade edilmiştir (Karimian and Samiei 2023).

Mısırdaki kitosan yüklü çinko nano partiküllerin kuraklık stresine toleransın sağlanmasıdaki etkilerinin incelendiği çalışmada, kontrole göre bitki uzunluğunda %10,20, yaprak alanında %29,87, bitki başına kardeş sayısında %5,92, koçan uzunluğunda %8,66, koçan ağırlığında % 47,22 ve tane sayısında %462,42 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, CSNP'lerin kullanımı fitokimyasal parametreler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuş, ozmotik potansiyelde %5,61 artış, bağlı su içeriğinde %2,24 azalma, klorofil ve karotenoid içeriğinde sırasıyla %18,14 ve %17,28 azalma, membran stabilite indeksinde %9,82 artış, şeker içeriğinde %6,085 azalma, proteinlerde %61,67 artış, fenoliklerde %0,42 artış, prolinde %5,51 azalma, flavonoidlerde %21,12 artış ve malondialdehit (MDA) içeriğinde %21,07 azalma meydana gelmiştir. Oksidatif stresin bir belirteci olan MDA düzeyleri mısırdaki CSNP uygulamasına yanıt olarak kuraklık koşullarında %21,07 oranında azalmıştır. Stres çalışmaları, CSNP'lerin kuraklık stresi altında antioksidan enzimlerin, katalaz (CAT) %13,71, peroksidaz (POD) %27,17 ve süperoksit dismutaz (SOD) %24,66 oranında aktivitesinin artırdığını ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda, kitosan yüklü çinko nanopartiküllerin (CSNP'ler) mısırdaki kuraklık toleransını olumlu yönde artırdığı rapor edilmiştir (Inam *et al.* 2024).

3. MATERİYAL VE METOT

3.1 Materyal

Araştırmada bitki materyali olarak; AG Tohum Ltd. Şti. tarafından üretim izni alınan Braveheart tatlı mısır (*Zea mays saccharata* Sturt.) çeşidi materyal olarak kullanılmıştır (Anonim 2021). Braveheart çeşidi; süper tatlı mısır (Sh2) grubunda yer alan ve sanayiye uygun bir çeşittir. Çeşidin genel özellikleri; sarı renkli, 84 günde olgunluğa erişen, ortalama 213 cm bitki boyu, 18-20 sıralı, ortalama 24,0-25,5 cm koçan boyunda, 81 cm ilk koçan yüksekliği ve 4,8 cm koçan çapına sahip olarak belirtilmektedir (Anonim 2021).

3.2 Yöntem

Araştırma farklı nano-çinko oksit (NZnOD) dozlarının tatlı mısır (*Zea mays saccharata* Sturt.)'ın erken gelişme döneminde kuraklık/su kısıtı koşullarındaki etkisini belirlemek amacıyla; farklı kuraklık (K)/su kısıtı (SK) seviyeleri ana parselleri (K1: %100

sulama/SK/kontrol, K2: %75 sulama/SK, K3: %50 sulama/SK ve K4: %25 sulama/SK), nano-çinko oksit (NZnOD) dozları (NZnOD1: 0 ppm/kontrol, NZnOD2: 50 ppm, NZnOD3: 100 ppm ve NZnOD4: 150 ppm) ise alt parselleri oluşturacak şekilde, torf:perlit (2:1) karışımından oluşan, 11 l kapasiteli ($0,011 \text{ m}^3$) ve $57 \times 16 \times 12 \text{ cm}$ boyutlarındaki plastik saksılarda ($0,09 \text{ m}^2$), tesadüf parselleri bölünmüş parseller deneme desenine göre üç tekrarlamalı olarak, 2023 yılı 09/05/2023-11/07/2023 tarihleri arasında 64 gün süreyle, ankırı Karatekin Üniversitesi Gıda ve Tarım Meslek Yüksekokulu Uluyazı Yerleşkesi Araştırma ve Uygulama Serasında yürütölmüştür.

3.2.1 Bitkilerin yetiştirilmesi ve denemenin kurulması

Tatlı mısırın ekimlerinde kullanılan saksı ortamı 06/05/2023 tarihinde hazırlanmış ve sonrasında tohum yatağının nemli kalması için 07/05/2023 ve 08/05/2023 tarihlerinde sulanmıştır (şekil 3.1).



şekil 3.1 Ekim öncesi saksıların hazırlanması

Tatlı mısır tohum ekimleri, her bir saksıda 5 adet sağlıklı bitki olmasını garanti altına almak için 2'şer adet tohum aynı yerde olacak şekilde, 4-5 cm ekim derinliğinde plastik saksılara 09/05/2023 tarihinde gerçekleştirilmiştir (şekil 3.2). Ekim sonrasında saksılara can suyu verilerek saksıların tamamen su ile doygun hale (%100 saksı kapasitesi-SKP) getirilmesi sağlanmıştır. 16/05/2023 tarihi itibarıyla, ekimden 7 gün sonra ıkışlar başlamış, 19/05/2023 tarihinde, ekimden 10 gün sonra, bütün saksılarda ıkışlar tamamlanmıştır. Çıkışlar tamamlandıktan ve bitkiler iki gerçek yapraklı aşamaya

geldikten sonra, 27/05/2023 tarihinde, ekimden 18 gün sonra, daha güçlü bitkilerin bırakılması esasına göre, her bir saksıda 5 adet bitki kalacak şekilde tekleme işlemi yapılmıştır.

Karahan vd. (2014), saksılar topraktaki suyu kapillar kuvvetler yardımıyla toprak profilinin içine doğru çeken alt toprak katmanları içermediklerinden dolayı, tarla kapasitesinin seralarda saksılara uygulanamayacağını; bunun yerine Kirkham (2014)’a göre sulamadan sonra toprakta kalan ve drenajın durduğu zamanki suyun miktarını belirtmek için “saksı kapasitesi” terimi kullanabileceğini bildirmiştir. Bu nedenle; tarla kapasitesi (TK) yerine benzer durumu tanımlayan saksı kapasitesi (SKP) ifadesine yer verilmiştir.

Ekim sonrasında günlük olarak ve kısa süreli olacak şekilde sulamalara devam edilmiş, bitkilerde çıkışlar tamamlandıktan ve tekleme işlemi yapıldıktan sonra sulamalar bitkilerin besin elementi ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde ayarlanan standart besin çözeltisiyle sulanmıştır (Dasgan and Koc 2009, Kusvuran and Kusvuran 2019). Sulamada “drene olan çözelti/uygulanan çözelti” oranı esas alınmıştır (Schröder and Lieth 2002). Drenaj seviyeleri düzenli olarak belirlenmiş ve bitkilerin büyümesi dikkate alınarak bu oran %30-35 (her bir saksıdaki su miktarı ağırlığın %65-70’i) seviyelerinde tutulmuştur. Stres uygulamalarına kadar geçen sürede bütün saksılardaki su seviyesi, doyma noktası ile saksı kapasitesi arasında tutulmuştur.





Şekil 3.2 Tohum ekimleri

3.2.2 Nano-Çinko Oksit (NZnO) dozlarının uygulanması ve kuraklık stresi

Bitkiler çıkışlarını tamamladıktan ve tekleme işlemlerinden sonra gelişimlerini devam ettirmiş (Şekil 3.3) ve bitkiler 4-6 gerçek yapraklı aşamaya ulaştıktan sonra nano-çinko oksit (NZnO) uygulamalarına başlanmıştır (Şekil 3.4).





Şekil 3.3 Bitkilerde çıkışlar ve gelişim aşamaları (17/05/2023, 19/05/2023, 24/05/2023, 31/05/2023, 07/06/2023 ve 18/06/2023)

Yapraktan nano-çinko oksit (NZnO) uygulamaları bitkilerde kuraklık stresi uygulamalarına başlamadan hemen önce 08/06/2023 tarihi itibarıyla başlamış, 16/06/2023, 20/06/2023 ve 26/06/2023 tarihlerinde toplam 4 adet uygulama olacak şekilde her bir kuraklık dozu uygulamasında; NZnOD1: 0 ppm/kontrol, NZnOD2: 50 ppm, NZnOD3: 100 ppm ve NZnOD4: 150 ppm dozları esas alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4).





Şekil 3.4 Nano-çinko oksit (NZnO) uygulamaları (08/06/2023, 16/06/2023, 20/06/2023 ve 26/06/2023)

Bitkilerde kuraklık stresi uygulamasına 12/06/2023 tarihi itibarıyla başlanmış, bitkiler 14/06/2023, 16/06/2023 ve 19/06/2023 tarihlerinde kademeli olarak, 21/06/2023 tarihi itibarıyla da bitkilerde her bir kuraklık dozu dikkate alınarak strese maruz bırakılmışlardır. Kuraklık stresi için saksı kapasitesinin %100, %75, %50 ve %25 düzeyi alınmış, %100 oranı saksı kapasitesi (SKP)/kontrol uygulaması olarak kabul edilmiştir.

Uygulama öncesi her saksıda saksı kapasitesini belirlemek için, saksılar su ile doymuş hale getirilerek serbest drenaja bırakılmıştır. Drenaj durduktan sonra saksılar tartılarak ağırlık olarak saksı kapasitesi (SKP) tespit edilmiştir. Sonrasında, her bir saksıya

verilecek sulama suyu miktarının belirlenmesi için, sulamadan hemen önce her bir saksı ayrı ayrı tartılarak mevcut ağırlık ile saksı ağırlığı arasındaki fark bulunmuştur. Belirlenen bu fark kullanılacak katsayılarla (%100, %75, %50, %25) çarpılarak her bir saksı için verilecek sulama suyu miktarı belirlenmiştir.

Sulama zamanları, bir diğer ifadeyle kuraklık stresi uygulamaları, gözleme dayalı olarak ve kontrol bitkilerinin ihtiyacı dikkate alınarak belirlenmiş ve her iki günde bir kontrol edilerek deneme sonlandırılana kadar 12/06/2023, 14/06/2023, 16/06/2023, 19/06/2023, 23/06/2023, 26/06/2023, 28/06/2023, 30/06/2023, 03/07/2023, 05/07/2023, 07/07/2023 ve 10/07/2023 tarihlerinde olmak üzere toplam 12 kez gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).

Stres etkilerinin net olarak görüldüğü; bitkilerin ekimlerinden 64 gün, strese maruz bırakılmalarından ise 20 gün sonraya karşılık gelen 11/07/2023 tarihinde deneme sonlandırılarak bazı morfolojik ve fizyolojik parametreler bakımından değerlendirilmiştir.

Farklı nano-çinko oksit (NZnO) dozları ve kuraklık stresi uygulamalarına ait ayrıntılı bilgiler izelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Nano-inko oksit (NZnO) dozları ve sulama/saksı kapasitesi (SKP) uygulamaları

Sulama/Saksı Kapasitesi (SKP) Uygulamaları	Nano-inko Oksit (NZnO) Uygulamaları (ppm)
K1 (%100 Sulama/SKP/Kontrol)	0
	50
	100
	150
K2 (%75 Sulama/SKP)	0
	50
	100
	150
K3 (%50 Sulama/SKP)	0
	50
	100
	150
K4 (%25 Sulama/SKP)	0
	50
	100
	150



şekil 3.5 Bitkilerde kuraklık stresi uygulamaları

3.2.3 Ölçüm ve analizler

Araştırmada, aşağıda yer alan ölçüm ve analizler Çankırı Karatekin Üniversitesi Gıda ve Tarım Meslek Yüksekokulu Uluyazı Yerleşkesi'nde bulunan Araştırma ve Uygulama Serasında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6).

3.2.3.1 Skala değerlendirmesi (0-5 Skalası)

Bitkilerde morfolojik olarak meydana gelen zararlanma düzeyini belirlemek için vejetasyon örtüsüne Kuşvuran vd. 2011'nin bildirdiği şekilde 0-5 arasında puan verilmiştir.

3.2.3.2 Bitki boyu (cm)

Hasattan hemen sonra her bir saksıdaki 4 farklı bitkide, toprak yüzeyinden bitkinin en uç noktasında yer alan tepe püskülü arasındaki mesafe ölçülerek değerler cm (± 0.1) olarak belirlenmiştir.

3.2.3.3 Sap kalınlığı (mm)

Hasattan hemen sonra her bir saksıdaki 4 farklı bitkide, alttan ikinci ve üçüncü boğum arasında kalan bölümde sayısal kumpas yardımı ile ölçümler yapılarak değerler mm ($\pm 0,1$) olarak tespit edilmiştir.

3.2.3.4 Yaprak sayısı (adet bitki⁻¹)

Hasattan hemen sonra her bir saksıdaki 4 farklı bitkide, her bir bitki üzerinde bulunan yaprakların tamamı sayılarak yaprak sayıları adet bitki⁻¹ olarak saptanmıştır.

3.2.3.5 Yaprak ayası boyu (cm)

Hasattan hemen sonra her bir saksıdaki 4 farklı bitkide, yaprak ayasının yaprak kınıyla birleştiği yerden en uç noktasına kadar olan mesafesi ölçülerek değerler cm ($\pm 0,1$) şeklinde belirlenmiştir.

3.2.3.6 Yaprak ayası eni (cm)

Hasattan hemen sonra her bir saksıdaki 4 farklı bitkide, yaprak ayasının tam orta kısmındaki mesafe ölçülerek değerler cm ($\pm 0,1$) şeklinde tespit edilmiştir.

3.2.3.7 Bitki yaş ağırlığı (g bitki⁻¹)

Hasattan hemen sonra her bir saksıdaki 4 farklı bitkide, her bir bitki hassas terazide ayrı ayrı tartılarak bitki yaş ağırlıkları g bitki⁻¹ ($\pm 0,1$) şeklinde belirlenmiştir.

3.2.3.8 Bitki kuru ağırlığı (g bitki⁻¹)

Yaş ağırlıkları belirlenen bitkiler 65 °C etüvde 48 saat süreyle ağırlıkları sabit kalıncaya kadar kurutulduktan sonra hassas terazide tartılarak bitki kuru ağırlıkları g bitki⁻¹ ($\pm 0,1$) olarak tespit edilmiştir.

3.2.3.9 Klorofil indeksi (SPAD) değeri

Hasattan hemen sonra her bir saksıdaki 4 farklı bitkide, yaprakların SPAD-metre değerleri Minolta marka (SPAD-502 Plus, Minolta, Japonya) klorofil metre cihazı ile ölçülerek değerler belirlenmiştir.

3.2.3.10 Yaprak oransal su içeriği (YOSİ) (%)

Stres sonunda bitkilerden alınan yaprak örneklerinin taze ağırlıkları ölçülmüş ve sonrasında örnekler dört saat süre ile saf su içerisinde bekletilerek bu süre sonunda turgor ağırlıkları saptanmıştır. Ağırlıkları tespit edilen yaprak örnekleri 78 °C etüvde 48 saat süreyle kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları g cinsinden tespit edilmiştir. Elde edilen taze ve kuru ağırlıklar Denklem (3.1)'de yer alan formül yardımıyla oranlanarak değerler % olarak hesaplanmıştır (Sanchez *et al.* 2004, Turkan *et al.* 2005).

$$YOSİ (\%) = \frac{TA-KA}{TuA-KA} \times 100 \quad (3.1)$$

TA: Taze Ağırlık, KA: Kuru Ağırlık, TuA: Turgor Ağırlığı

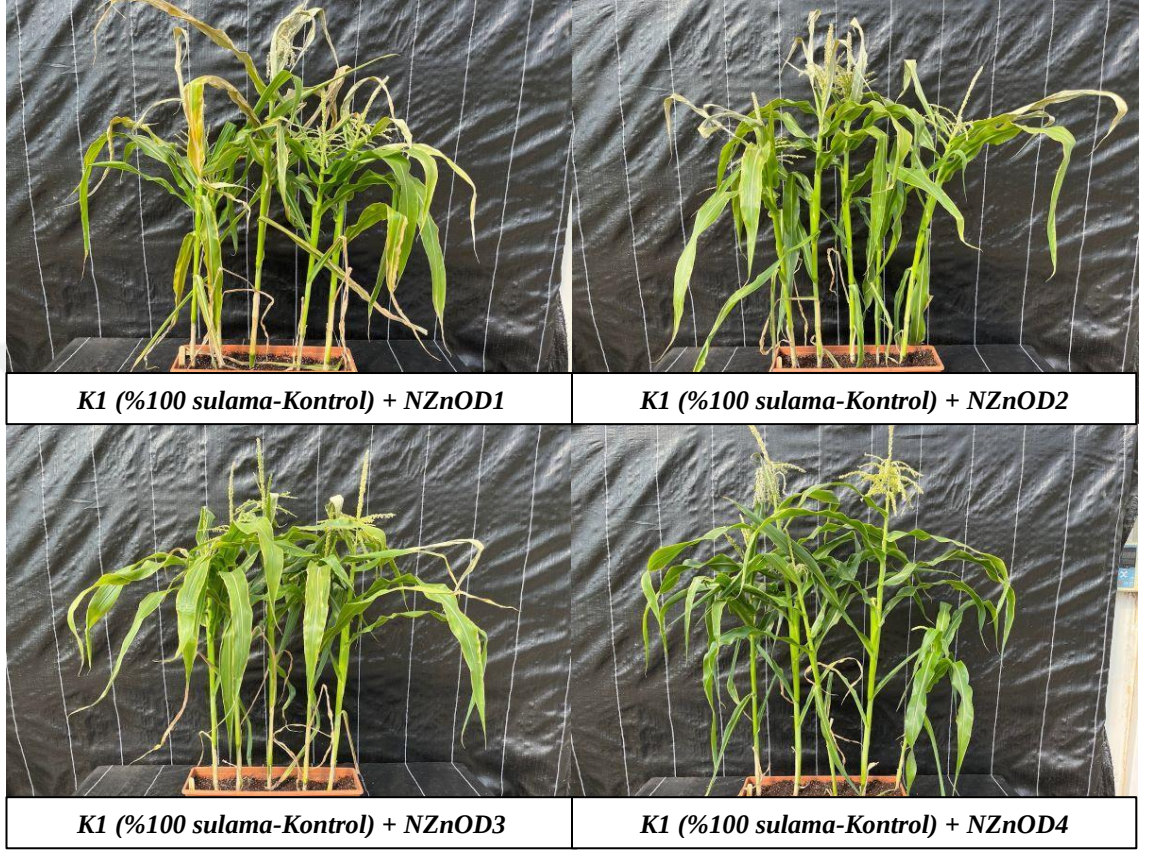
3.2 Verilerin Değerlendirilmesi

Denemelerden elde edilen sayısal değerler, JMP version 8,0 (SAS Institute Inc., ABD) istatistik paket programında varyans analizine tabi tutulup istatistiksel açıdan uygulamalar arasındaki farklılıklar LSD (Least Significant Difference = Asgari Önemli Fark) çoklu karşılaştırma testi ile önemlilik dereceleri ortaya konularak $p \leq 0,05$ düzeyinde harflendirme yoluyla gösterilmiştir.

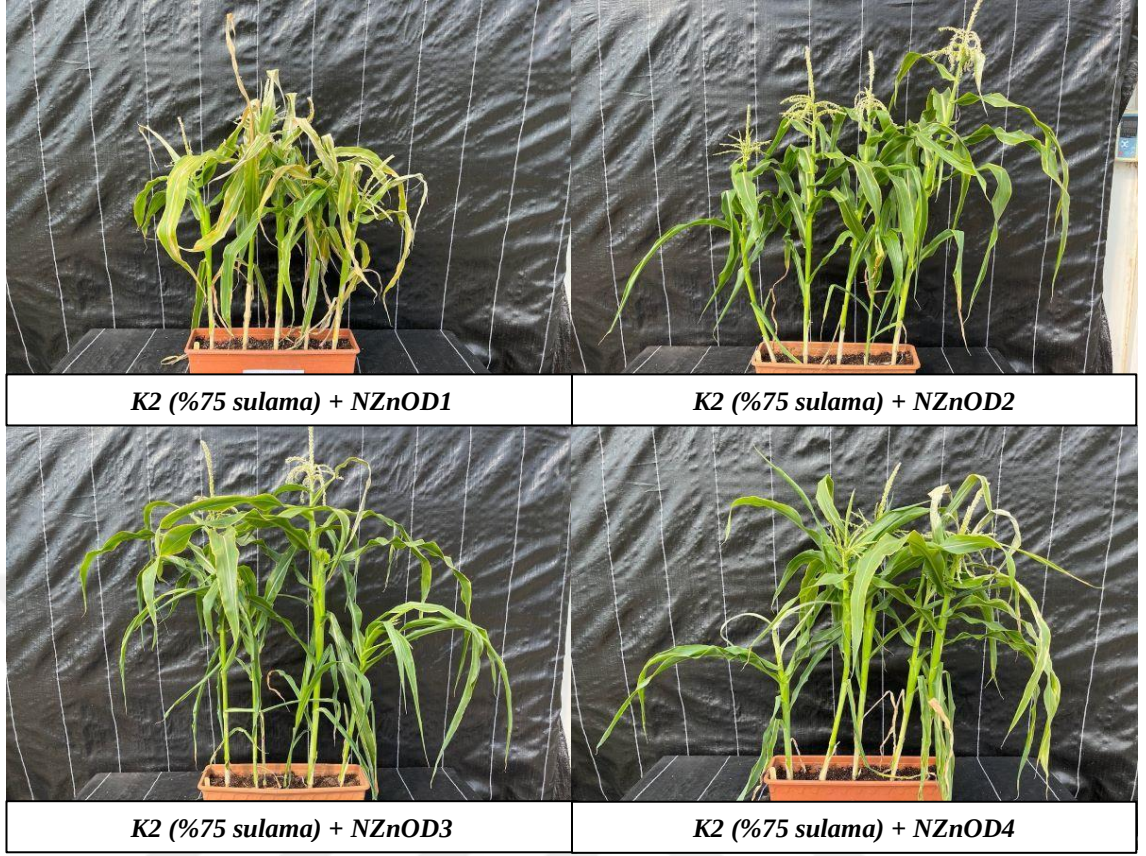


Şekil 3.6 Bitkilerde ölçüm ve analizler

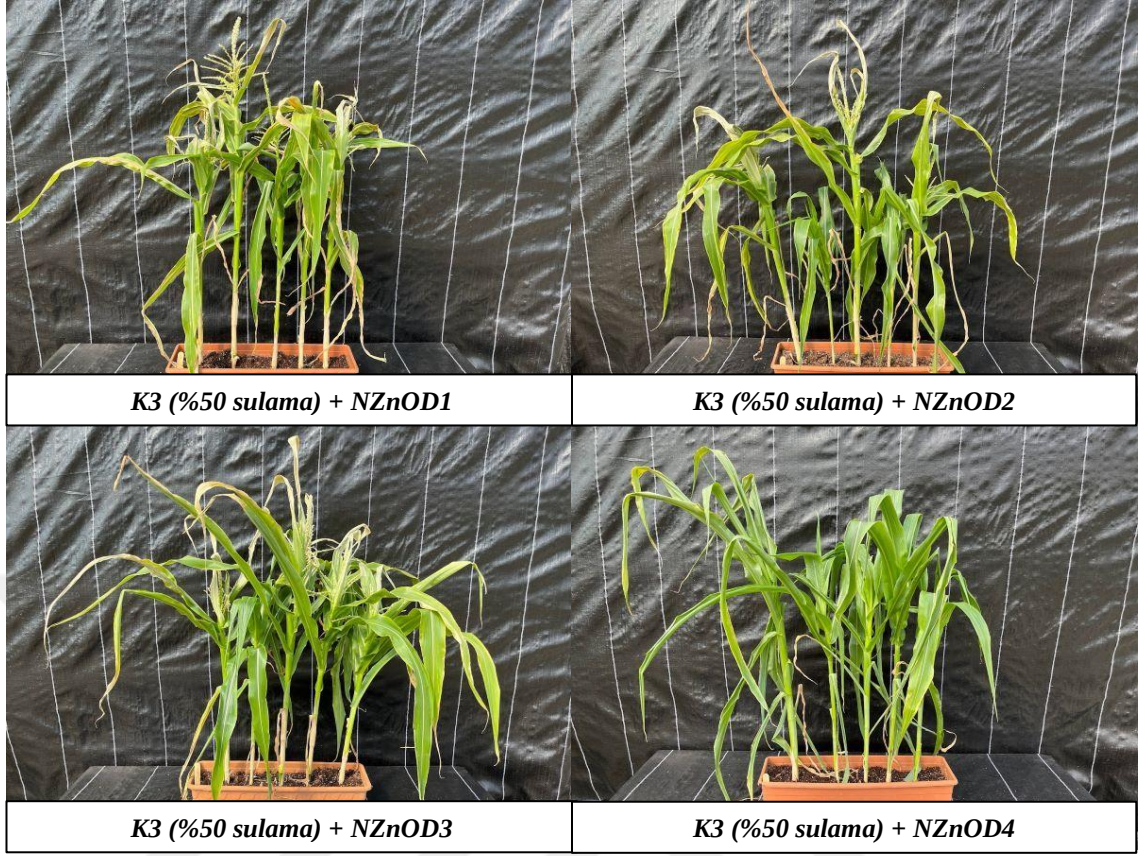
Farklı nano-çinko oksit (NZnO) dozlarının, kuraklık stresi koşulları altında tatlı mısırdaki morfolojik özellikler bakımından göstermiş olduğu etkiler şekil 3.7, şekil 3.8, şekil 3.9 ve şekil 3.10’da verilmiştir.



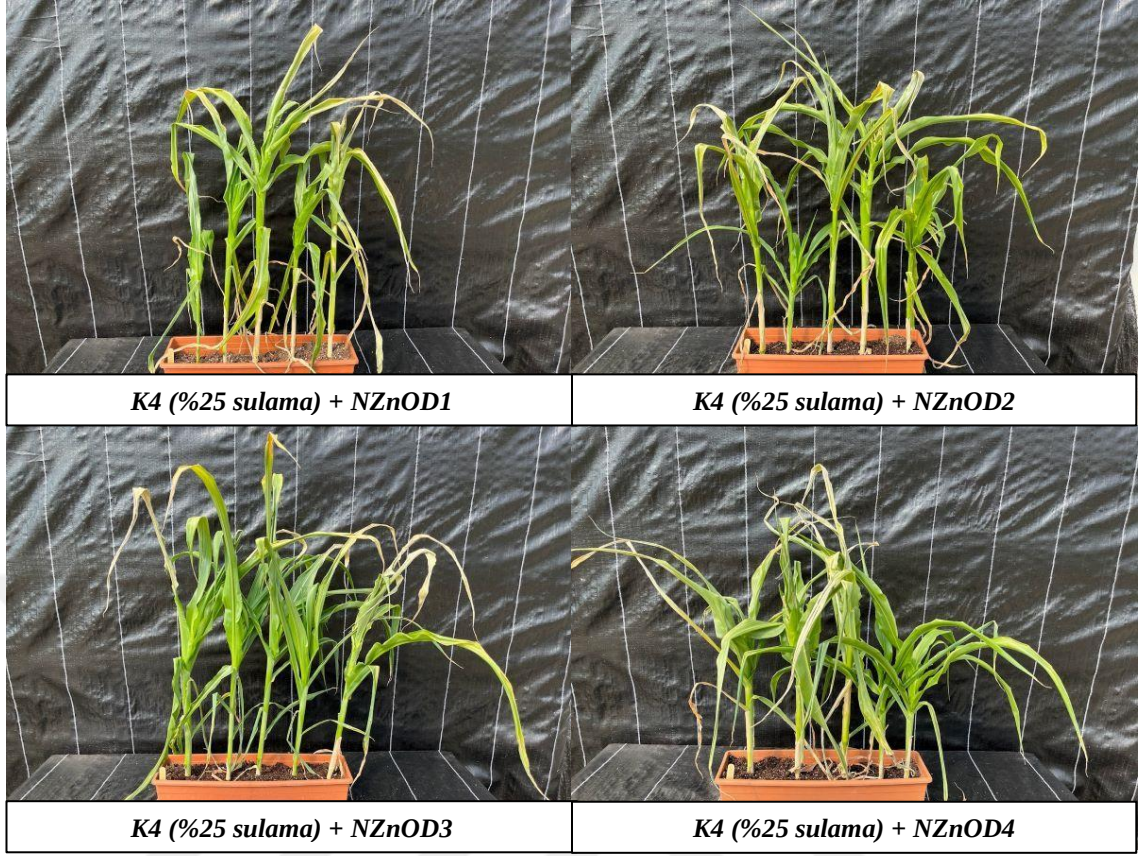
şekil 3.7 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) dozlarının K1 (%100 sulama-kontrol) kuraklık stresi koşullarında etkisi



Şekil 3.8 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) dozlarının K2 (%75 sulama) kuraklık stresi koşullarında etkisi



Şekil 3.9 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) dozlarının K3 (%50 sulama) kuraklık stresi koşullarında etkisi



Şekil 3.10 Farklı nano-çinko oksit (NZnO) dozlarının K4 (%25 sulama) kuraklık stresi koşullarında etkisi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Farklı nano-çinko oksit (NZnOD) dozlarının kuraklık stresine tolerans üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

4.1 Skala Değerleri (0-5 skası)

Farklı NZnOD dozları, kuraklık stresi ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama skala değerleri bakımından istatistiksel olarak %1 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin 1,0-4,0 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Kuraklık stresi karşısında bitkilerin zararlanma derecelerini ortaya koyabilmek amacı ile oluşturulan görsel skala değerlendirmesinde kontrol bitkileri “0,0” olarak kabul edilmiştir. Kuraklık düzeyi incelendiğinde en düşük skala değeri “1,5” ile K1 düzeyinde, en yüksek skala değeri 3,2 ile K4 uygulamasında belirlenmiştir. NZnOD dozları incelendiğinde en düşük skala değeri 1,9 ile NZnOD2 ve en yüksek skala değeri 2,7 ile NZnOD1 dozunda tespit edilmiştir. İnteraksiyonda ise en yüksek skala değerleri (4,0), NZnOD1×K4 interaksyonundan elde edilmiştir. Bunu NZnOD3×K4, NZnOD4×K4 ve NZnOD1×K3 interaksyonu da 3,0 skala değeri izlemiştir. NZnOD3×K1, NZnOD4×K1 ve NZnOD2×K2 düzeyleri “1,0” skala değeri almıştır. Bu uygulamaları “2,0” skala değeri ile NZnOD1×K1, NZnOD2×K1, NZnOD4×K2, NZnOD2×K3 ve NZnOD4×K3 uygulamaları izlemiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin skala değerleri bakımından değerlendirmesi (0-5 skalası)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	2,0 de	1,7 e	3,0 b	4,0 a	2,7 a
NZnOD2	2,0 de	1,0 f	2,0 de	2,7 bc	1,9 c
NZnOD3	1,0 f	2,3 cd	2,3 cd	3,0 b	2,2 b
NZnOD4	1,0 f	2,0 de	2,0 de	3,0 b	2,0 bc
Kuraklık Ortalaması	1,5 d	1,8 c	2,3 b	3,2 a	
LSD_(0,05)	NZnOD: 0,24 ^{**} , K: 0,24 ^{**} , NZnOD × K: 0,48 ^{**}				

*: $P \leq 0,05$, **: $P \leq 0,01$, **Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.2 Bitki Boyu (cm)

Farklı NZnOD dozları, kuraklık stresi ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama bitki boyu değerleri bakımından istatistiksel olarak %1 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin 59,5-108,9 cm arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Bitki boyu bakımından en yüksek değerler K1 ve K2 bitkilerinde ortalama olarak 99,7 ve 99,4 cm olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.2). Kuraklık stresi dikkate alındığında en düşük bitki boyu ortalama olarak 65,2 cm ile K4 kuraklık stresi koşullarında tespit edilmiştir. NZnOD uygulamaları değerlendirildiğinde ortalama olarak NZnOD1 uygulaması dışında 87,1-91,1 cm bitki boyu arasında değişmiş ve aynı istatistiksel grupta yer almışlardır. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada, en yüksek bitki boyu K2 uygulamasının NZnOD2 dozunda 108,9 cm olarak bulunurken, bunu 107,8 cm ile K1 uygulamasının NZnOD4 dozu izlemiştir. En düşük bitki boyu ise K4 uygulamasının NZnOD1 (59,5 cm) dozunda tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin bitki boyu bakımından değerlendirilmesi (cm)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	87,3 de	90,3 c-e	75,2 fg	59,5 h	78,1 b
NZnOD2	104,4 ab	108,9 a	80,5 ef	67,4 gh	90,2 a
NZnOD3	99,7 a-c	96,8 b-d	86,3 d-f	65,6 gh	87,1 a
NZnOD4	107,8 ab	101,6 a-c	86,7 d-f	68,1 gh	91,1 a
Kuraklık Ortalaması	99,7 a	99,4 a	82,2 b	65,2 c	
LSD (0,05)	NZnOD: 5,84 ^{**} , K: 5,84 ^{**} , NZnOD × K: 11,69 [*]				

: P≤0,05, **: P≤0,01, *Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.3 Bitki Yaş Ağırlığı (g bitki⁻¹)

Kuraklık stresi uygulamaları, NZnOD dozları ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama bitki yaş ağırlık değerleri bakımından istatistiksel olarak %1 ve %5 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin 118,2-234,2 g bitki⁻¹ arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Bitki yaş ağırlığı bakımından en yüksek değerler K1 ve K2 düzeyinde ortalama olarak 212,6 ve 215,5 g bitki⁻¹ olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3). Kuraklık stresi bitki yaş ağırlığında azalmaya neden olmuş, en düşük bitki yaş ağırlığı ortalama olarak 132,9 g bitki⁻¹ ile K4 kuraklık stresi koşullarında tespit edilmiştir. NZnOD uygulamaları değerlendirildiğinde en düşük bitki yaş ağırlığı NZnOD1 dozunda 164,3 g bitki⁻¹ olarak belirlenmiş, diğer dozlar 189,4-194,5 g bitki⁻¹ ile aynı istatistiksel grupta yer almışlardır. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada, en yüksek bitki yaş ağırlığı K2 uygulamasının NZnOD2 ve NZnOD4 dozlarında 229,7 g bitki⁻¹ ve 234,2 g bitki⁻¹ olarak bulunmuştur. En düşük bitki yaş ağırlığı ise K4 uygulamasının NZnOD1 (118,2 g bitki⁻¹) ve NZnOD2 (135,3 g bitki⁻¹) dozlarında tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin bitki yaş ağırlığı bakımından değerlendirilmesi (g bitki⁻¹)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	197,3 bc	176,3 cd	165,3 de	118,2 f	164,3 b
NZnOD2	215,2 ab	229,7 a	182,2 cd	135,3 f	190,6 a
NZnOD3	214,3 ab	221,7 ab	183,8 cd	137,8 ef	189,4 a
NZnOD4	223,5 ab	234,2 a	180,0 cd	140,3 ef	194,5 a
Kuraklık Ortalaması	212,6 a	215,5 a	177,8 b	132,9 c	
LSD (0,05)	NZnOD: 13,91 ^{**} , K: 13,91 ^{**} , NZnOD × K: 27,82 [*]				

: P≤0,05, **: P≤0,01, *Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.4 Bitki Kuru Ağırlığı (g bitki⁻¹)

Farklı NZnOD dozları, kuraklık stresi ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama bitki kuru ağırlığı (g bitki⁻¹) bakımından istatistiksel olarak %1 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin 48,83-90,5 g bitki⁻¹ arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Bitki kuru ağırlığı bakımından en yüksek değerler K1 ve K2 uygulamalarında ortalama olarak 84,7 ve 79,8 g bitki⁻¹ şeklinde belirlenmiştir (Çizelge 4.4). Kuraklık stresi bitki kuru ağırlığında azalmaya yol açmış, en düşük bitki kuru ağırlık değerleri ortalama olarak 55,8 g bitki⁻¹ ile K4 kuraklık stresi koşullarında tespit edilmiştir. NZnOD uygulama dozları bakımından en düşük bitki kuru ağırlık değeri 65,0 g bitki⁻¹ ile NZnOD1 dozunda tespit edilmiştir. Diğer dozlar 74,5-77,9 g bitki⁻¹ ile aynı istatistiksel grupta yer almışlardır. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada en yüksek bitki kuru ağırlık değeri K1 uygulamasının NZnOD4 dozu “90,5 g bitki⁻¹” bitki kuru ağırlık değeri ile ilk sırada yer almıştır. En düşük değer ise “48,8 g bitki⁻¹” ile K4 kuraklık stresi koşullarında NZnOD1 uygulamasında tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin bitki kuru ağırlık değeri bakımından değerlendirilmesi (g bitki⁻¹)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	80,5 a-d	68,5 ef	62,3 fg	48,8 h	65,0 b
NZnOD2	82,5 a-d	84,2 a-c	73,5 de	58,7 f-h	74,7 a
NZnOD3	85,3 ab	82,1 a-d	74,3 c-e	56,2 gh	74,5 a
NZnOD4	90,5 a	84,5 a-c	77,0 b-e	59,7 fg	77,9 a
Kuraklık Ortalaması	84,7 a	79,8 a	71,79 b	55,8 c	
LSD_(0,05)	NZnOD: 5,15 ^{**} , K: 5,15 ^{**} , NZnOD × K: 10,31 [*]				

*: P≤0,05, **: P≤0,01, **Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.5 Sap Kalınlığı (mm)

Nano-Zn (NZnOD) farklı dozları, kuraklık stresi ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama sap kalınlığı bakımından istatistiksel olarak %1 ve %5 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin 13,7- 18,3 mm arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Sap kalınlığı bakımından en yüksek değerler K2 (17,0 mm) ve K3 (16,2 mm) bitkilerinde, en düşük değerler ise K4 bitkilerinde (13,9 mm) olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.5). NZnOD uygulamaları arasında en yüksek sap kalınlığı değeri 16,3 mm ile NZnOD3 uygulamasında, en düşük sap kalınlığı NZnOD2 (15,3 mm) dozunda tespit edilmiştir. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada en yüksek sap kalınlığı değeri K2 uygulamasının NZnOD4 dozunda 18,3 mm olarak belirlenmiştir. En düşük sap kalınlığı değeri ise K4 uygulamasının NZnOD1-3 (13,7-13,9 mm) dozlarında saptanmıştır.

Çizelge 4.5 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin sap kalınlığı değeri bakımından değerlendirilmesi (mm)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	15,1 d-f	15,9 c-e	15,9 c-e	13,7 f	15,4 c
NZnOD2	15,2 c-f	15,8 c-e	16,4 b-d	13,9 f	15,3 bc
NZnOD3	16,9 a-c	17,9 ab	16,5 b-d	13,8 f	16,3 a
NZnOD4	15,8 c-e	18,3 a	16,0 c-d	14,2 ef	16,1 ab
Kuraklık Ortalaması	15,7 b	17,0 a	16,2 ab	13,9 c	
LSD_(0,05)	NZnOD: 0,89 [*] , K: 0,89 ^{**} , NZnOD × K: 1,78 [*]				

*: $P \leq 0,05$, **: $P \leq 0,01$, **Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.6 Yaprak Ayası Boyu (cm)

Farklı NZnOD dozları, kuraklık ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama yaprak ayası boyu değerleri bakımından istatistiksel olarak %1 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin 61,3-81,9 cm arasında değiştiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.6).

Yaprak ayası boyu bakımından en yüksek değerler K1, K2 ve K3 (73,3-75,9 cm) bitkilerinde belirlenmiş ve bu uygulamalar aynı istatistiksel grupta yer almışlardır. En düşük yaprak ayası boyu K4 uygulamasında 69,5 cm değeri ile ortaya çıkmıştır. Genel olarak NZnOD uygulamalarında en yüksek yaprak ayası boyu 73,7-76,6 cm ile NZnOD2-4 dozlarında belirlenirken en düşük değerler NZnOD1 dozunda 67,7 cm düzeyinde saptanmıştır. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada en yüksek değerler 81,9 cm yaprak ayası boyu değeri ile K3 uygulamasının NZnOD4 uygulamasında tespit edilirken en düşük yaprak ayası boyu değeri K4 düzeyindeki NZnOD1 uygulamasında 61,3 cm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.6 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin yaprak ayası boyu değeri bakımından değerlendirilmesi (cm)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	71,1 cd	70,3 cd	68,0 d	61,3 e	67,7 b
NZnOD2	75,2 bc	72,2 b-d	75,7 a-c	71,6 b-d	73,6 a
NZnOD3	72,8 b-d	76,1 a-c	77,9 ab	70,1 cd	74,2 a
NZnOD4	75,1 bc	74,5 b-d	81,9 a	74,9 bc	76,6 a
Kuraklık Ortalaması	73,6 a	73,3 a	75,8 a	69,5 b	
LSD_(0,05)	NZnOD: 3,32 ^{**} , K: 3,32 ^{**} , NZnOD × K: 6,65 [*]				

*: P≤0,05, **: P≤0,01, ** Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.7 Yaprak Ayası Eni (cm)

Kuraklık stresi ve NZnOD dozlarından elde edilen yaprak ayası eni değerleri bakımından istatistiksel olarak %1 önem düzeyinde farklılık olduğu, NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksiyonun ise önemsiz bulunduğu çalışmada, ortalama değerlerin 3,96-5,88 cm arasında değiştiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.7).

Yaprak ayası eni bakımından en yüksek değerler ortalama 5,4 cm ile K4 bitkilerinde belirlenmiştir. NZnOD dozları bakımından ise en yüksek yaprak ayası eni değerleri NZnOD4 (5,2 cm) ve NZnOD2 (5,0 cm) uygulamalarında belirlenmiş ve elde edilen değerler aynı istatistiksel grupta yer almıştır. Bununla birlikte NZnOD1 dozu 4,4 cm ile en düşük yaprak ayası enini oluşturmuştur.

Çizelge 4.7 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin yaprak ayası eni değeri bakımından değerlendirilmesi (cm)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	4,5	4,00	4,2	5,0	4,4 b
NZnOD2	5,0	4,9	4,8	5,4	5,0 a
NZnOD3	4,7	4,2	5,1	5,4	4,9 a
NZnOD4	4,6	4,7	5,9	5,6	5,2 a
Kuraklık Ortalaması	4,7 bc	4,4 c	5,0 ab	5,4 a	
LSD_(0.05)	NZnOD: 0,41 ^{**} , K: 0,41 ^{**} , NZnOD × K: Ö.D				

: P≤0,05, **: P≤0,01, ** Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.8 Yaprak Sayısı (adet bitki⁻¹)

Kuraklık stresi ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama yaprak sayısı değerleri bakımından istatistiksel olarak %1 ve %5 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin 9,0-10,6 adet bitki⁻¹ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte NZnOD dozları arasında ortaya çıkan değişimde istatistiksel olarak bir farklılık bulunmamıştır (Çizelge 4.8).

Yaprak sayısı bakımından en yüksek değerler ortalama 10,4 adet bitki⁻¹ ile K1 bitkilerinde belirlenmiştir. Kuraklık stresi ile yaprak sayısında azalma meydana gelmiş, K4 kuraklık düzeyinde bu değer 9,4 adet bitki⁻¹ şeklinde gerçekleşmiştir. NZnOD uygulamaları değerlendirildiğinde, ortaya çıkan değişim istatistiksel olarak önemli bulunmamış ve yaprak sayısı 9,7-10,0 adet bitki⁻¹ arasında değişim göstermiştir. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada, en yüksek yaprak sayısı değeri, 10,6 ve 10,5 adet bitki⁻¹ ile K1 düzeyinde NZnOD4 ve NZnOD3 uygulamasında belirlenmiştir. En düşük yaprak sayısı değeri ise K4 düzeyinde NZnOD1 uygulamasında 9,0 adet bitki⁻¹ olarak saptanmıştır.

Çizelge 4.8 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin yaprak sayısı değeri bakımından değerlendirilmesi (adet bitki⁻¹)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	10,3 ab	9,6 b-d	9,3 cd	9,0 d	9,7
NZnOD2	10,3 ab	10,2 a-c	9,6 b-d	9,3 cd	9,9
NZnOD3	10,6 a	10,3 ab	9,6 b-d	9,3 cd	10,0
NZnOD4	10,5 a	9,8 a-d	9,3 cd	9,8 a-d	9,9
Kuraklık Ortalaması	10,4 a	10,0 b	9,6 bc	9,4 c	
LSD_(0,05)	NZnOD: Ö.D ^{**} , K: 0,46 ^{**} , NZnOD × K: 0,89 [*]				

*: P≤0,05, **: P≤0,01, ** Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.9 Klorofil İçeriği (SPAD)

SPAD değeri bakımından kuraklık stresi, NZnOD doz etkisi ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu istatistiksel olarak %1 önem düzeyinde farklılık olduğu çalışmada ortalama değerlerin 29,5-59,2 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.9).

SPAD bakımından en yüksek değerler ortalama 54,1 ile K1 bitkilerinde belirlenmiştir. Kuraklık stresi ile SPAD değerinde azalma meydana gelmiş, K4 kuraklık düzeyinde bu değer 36,3 şeklinde gerçekleşmiştir. NZnOD uygulamaları değerlendirildiğinde, en yüksek SPAD değeri 46,7 ile NZnOD4 uygulamasında; en düşük değer ise 37,18 ile NZnOD1 uygulamasında tespit edilmiştir. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada, en yüksek SPAD değeri, 59,2 ile K1 düzeyinde NZnOD4 uygulamasında belirlenmiştir. En düşük SPAD değeri ise K4 düzeyinde NZnOD1 uygulamasında 29,5 ve K3 düzeyinde NZnOD1 uygulamasında 29,5 olarak saptanmıştır.

Çizelge 4.9 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin SPAD değeri bakımından değerlendirilmesi

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	48,9 bc	40,3 de	30,0 f	29,5 f	37,2 c
NZnOD2	53,7 ab	42,2 de	39,7 e	36,7 e	43,1 bc
NZnOD3	54,6 ab	45,0 cd	40,8 de	38,3 e	44,7 ab
NZnOD4	59,2 a	45,0 cd	41,7 de	40,1 de	46,7 a
Kuraklık Ortalaması	54,1 a	43,1 b	38,0 c	36,3 c	
LSD (0,05)	NZnOD: 2,91 ^{**} , K: 2,91 ^{**} , NZnOD × K: 0,89 [*]				

*: P≤0,05, **: P≤0,01, ** Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

4.10 Yaprak Oransal Su İçeriği (YOSİ)

Farklı NZnOD dozları, kuraklık stresi ve NZnOD dozları×kuraklık stresi interaksyonu uygulamalarından elde edilen ortalama YOSİ değerleri bakımından istatistiksel olarak %1 önem düzeyinde farklılık olduğu ve ortalama değerlerin %53,4-%96,4 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.10).

YOSİ bakımından en yüksek değerler ortalama %90,4 ile K1 bitkilerinde belirlenmiştir. Kuraklık stresi ile YOSİ değerinde azalma meydana gelmiş, K4 kuraklık düzeyinde en düşük değer %61,43 şeklinde gerçekleşmiştir. NZnOD uygulamaları değerlendirildiğinde, en yüksek YOSİ değeri %79,3-81,4 ile NZnOD2-4 uygulamalarında; en düşük değer ise %70,9 ile NZnOD1 uygulamasında tespit edilmiştir. NZnOD×kuraklık interaksyonunun istatistiksel olarak önemli bulunduğu çalışmada, en yüksek YOSİ değeri, %96,4 ile K1 düzeyinde NZnOD3 uygulamasında belirlenmiştir. En düşük YOSİ değeri ise K4 düzeyinde NZnOD1 uygulamasında %53,4 olarak saptanmıştır.

Çizelge 4.10 Nano-ZnO (NZnOD) uygulamalarının farklı kuraklık dozu koşullarında ortaya koyduğu değişimlerin YOSİ değeri bakımından değerlendirilmesi (%)

Nano-ZnO	Kuraklık Dozları				Nano-ZnO Ortalaması
	K1 (%100)	K2 (%75)	K3 (%50)	K4 (%25)	
NZnOD1	87,8 bc	79,9 e	62,4 fg	53,4 h	70,9 b
NZnOD2	89,1 b	89,7 b	80,4 de	65,1 fg	81,1 a
NZnOD3	96,4 a	82,0 c-e	80,3 de	66,8 f	81,4 a
NZnOD4	88,4 b	86,2 b-d	81,9 c-e	60,5 g	79,3 a
Kuraklık Ortalaması	90,4 a	84,4 b	76,3 c	61,4 d	
LSD (0,05)	NZnOD: 3,11 ^{**} , K: 3,11 ^{**} , NZnOD × K: 6,22 [*]				

*: P≤0,05, **: P≤0,01, ** Farklı harf ile gösterilen ortalamalar LSD testine göre %5 hata sınırları içinde istatistiksel olarak farklıdır. NZnOD: Nano-ZnO, K: Kuraklık, ÖD: Önemli değil

İklim değişikliği, tarımsal üretim koşullarında bitki büyümesini ve gelişimini engelleyen abiyotik stres faktörlerinin daha sık ve yoğun bir şekilde ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, kuraklık, dünya genelinde bitkisel üretimi ve dolayısıyla verimi olumsuz yönde etkileyen en önemli abiyotik stres faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Jacques *et al.* 2021). Kuraklık stresi, bitkilerin moleküler, biyokimyasal, fizyolojik ve morfolojik özelliklerinde çeşitli bozulmalara yol açmaktadır. Ayrıca, su kıtlığının yaşandığı ortamlarda bitki verimi ve kalitesi düşmekte olup bu etkiler; büyüme evresi, bitki türü, yaş, kuraklığın şiddeti ve süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Seleiman *et al.* 2021). Kuraklık stresinin neden olduğu değişimler ve buna bağlı verim kaybını önlemek için en etkili stratejilerden biri, bitkilerin kuraklık toleransını artırarak tarımsal verimliliği iyileştirmektir (Agliassa *et al.* 2021).

Son yıllarda, nanomalzemelerin çeşitli sektörlerde, özellikle de nano-gübreler alanında kullanımına yönelik ilgi giderek artmaktadır. Nanopartiküller (NP), 100 nm'den küçük boyutlarıyla yüksek yüzey alanına ve yüzey yüküne sahip olduklarından, makroskobik ölçekli benzerlerinden daha reaktif özellikler sergilemektedir. Nano-gübreler, besin maddelerini kademeli olarak serbest bırakarak toprak kirliliğini en aza indirmenin yanı sıra bitki besin alımını artırmada etkili bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca, nano-gübreler, abiyotik ve biyotik stres koşulları altında bitkilerde fizyolojik ve biyokimyasal

mekanizmaları uyararak stres toleransının artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır (DeRosa *et al.* 2010, Siddiqui *et al.* 2015, Saxena *et al.* 2016).

Çinko (Zn), tüm bitkilerin büyümesi için kritik öneme sahip bir mikro besin maddesidir. Çinko, RNA ve DNA polimerazlar, dehidrojenazlar, transfosforilazlar ve proteinaz gibi çeşitli enzimlerin aktivitesinde görev almakla birlikte hücre bölünmesi ve membran yapısının korunmasına, klorofil biyosentezine ve fotosentetik aparatın geliştirilmesine katkıda bulunur. Ayrıca, mikro besin maddelerinin su potansiyelini artırarak, hücre bütünlüğünü koruyarak ve kuraklık stresinin tetiklediği serbest radikalleri detoksifiye ederek bitki sağlığı üzerinde olumlu etkiler sağladığı rapor edilmiştir (López-Valdez and Fernández-Luqueño 2018).

Geleneksel Zn gübresinin ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) Zn kullanım verimliliği oldukça düşük bir seviyede (%1-5) kalmaktadır. Buna karşın, çinko oksit nanopartiküllerinin (NZnOD), bitkilerde verim ve besin kullanım etkinliğini artırmada daha etkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar, soya, mısır ve buğday gibi tarımsal bitkilerde nanogübre kullanımının kuraklık stresine karşı toleransı artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Seghatoleslami and Forutani 2015, Kayalarlı 2023). Kazemi vd. (2021), nanoteknolojinin tarımsal üretimi artırma potansiyelini ve gübrelemeden kaynaklanan çevresel sorunların çözümündeki etkinliğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında, nano makro ve mikro gübreleme ile kimyasal gübrelemenin, tane sorgum (*Sorghum bicolor* L. Moench)'da kuraklık stresi koşullarında verim ve biyokimyasal değişimler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, nano gübrelemenin kuraklık stresi altında verim ve biyokimyasal parametrelerde iyileşme sağladığını; bu gübrelerin ekonomik ve çevresel avantajlarıyla birlikte, kurak ve yarı kurak bölgelerde sorgum yetiştiriciliği için uygun bir besin kaynağı olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada, NZnOD kontrol ile birlikte dört farklı dozunun kuraklık stresine toleransın sağlanmasındaki etkinliği incelenmiştir. Kuraklık stresi incelenen parametrelerde genel olarak azalmaya neden olmuş, bu azalma özellikle %25 sulama (K4) koşullarında belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Kuraklık stresinin oluşturduğu

etkinin belirlenebilmesi için bitkiler skala (0-5) değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Buna göre %100 (K1) sulama koşullarında bitkiler “1” skala değerine sahip olmuş, stres şiddeti arttıkça skala değeri de artış göstermiştir. Çizelge 4.1’de gösterildiği üzere özellikle %25 sulama (K4) koşullarında bitkiler “3,2” skala değerini almıştır. Bununla birlikte NZnOD kullanımı bitkilerde skala değerlerinde azalmaya neden olmuş, bir diğer ifadeyle stresin etkisini hafifletici yönde etkide bulunmuştur. Nitekim NZnOD uygulamaları ile skala değeri 1,9-2,2 arasına gerilemiştir.

Kuraklık stresi diğer abiyotik stres faktörlerinde olduğu gibi bitki büyüme ve gelişmesinde olumsuzluklara yol açarken; bitkide morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal değişimleri de beraberinde getirmektedir. Farklı düzeylerdeki kuraklık stresi [%75 sulama (K2), %50 sulama (K3) ve %25 sulama (K4)] bitki yaş ve kuru ağırlıklarında, bitki boyu, sap kalınlığı, yaprak sayısı, yaprak boyu ve yaprak eninde azalmaya neden olmuştur. Bu azalma ortalama olarak %1-40 arasında değişim göstermiştir. Mısırdaki gerçekleştirilen farklı çalışmalarda kuraklık düzeyinde meydana gelen artışın bitki büyüme ve gelişmesinde olumsuzluklara yol açtığı vurgulanmıştır (Mazhar *et al.* 2020, Azeem *et al.* 2022, Luqman *et al.* 2023, Shah *et al.* 2023). Bu çalışmada, NZnOD kullanımı ortaya çıkan olumsuzlukların sınırlandırılmasında incelenen parametreler bakımından farklı düzeylerde etkili olmuştur. Stres koşullarında NZnOD uygulaması ile birlikte bitki boyunda %7-21, bitki yaş ağırlığında %9-33, bitki kuru ağırlığında %18-33, sap kalınlığında %1-15, yaprak boyunda %3-22, yaprak eninde %6-40 ve yaprak sayısında %2-5 düzeyinde bir iyileşme sağlanmıştır. Semida vd. (2021), çinko oksit nanopartiküllerinin (NZnOD), topraktaki su eksikliğine karşı bitkilerin adaptasyonunu geliştiren hormonal sinyal yollarını etkilediğini vurgulamıştır. Bu nanopartiküllerin, ABA (absisik asit) ve sitokininler gibi hormonların gen aktivitesini ve ekspresyonunu artırarak kuraklık stresini tolere etmeye yardımcı olan kök büyümesini düzenlediğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, ZnO nanopartiküllerinin yapraklara püskürtülmesinin fotosentetik verimliliği artırdığı, böylece bitkilerde daha fazla metabolit üretimi ve fotosentez sağlandığı belirtilmiştir. Tek yıllık çim (*Lolium multiflorum* Lam.) üzerinde yapılan bir çalışmada, kuraklık stresine karşı dışsal çinko uygulamalarının etkisi incelenmiş ve bu uygulamaların ABA içeriğinde azalma sağlarken bitkinin kuru ağırlığında artışa yol açtığı rapor edilmiştir (Školníková *et al.*

2020). Bu bulgular, Zn uygulamalarının bitkilerin stres koşullarına uyum mekanizmalarını desteklemede önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Klorofil, fotosentezin gerçekleştiği kloroplastların temel bileşenlerinden biridir. Kuraklık stresi altında klorofil içeriğindeki düşüş, pigment fotooksidasyonu ve klorofilin bozulması nedeniyle sıklıkla gözlenen bir durumdur. Bu azalma, kuraklık stresinin süresi ve şiddeti gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Rahdari and Hoseini 2012). Farklı kuraklık düzeylerinin incelendiği bir çalışmada, SPAD değerlerinin artan kuraklık seviyelerine bağlı olarak %8 ila %40 arasında azaldığı ve en belirgin düşüşün, klorofil indeksinde kontrol bitkilerine kıyasla K4 seviyesinde gerçekleştiği saptanmıştır. Azeem vd. (2022), mısır bitkisi üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, kuraklık stresinin klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve toplam karotenoid içeriğinde azalmaya neden olduğunu bildirmiştir. Benzer şekilde, Luqman vd. (2023), HY-1898 ve FH-1046 mısır hibrit çeşitlerini kullandıkları araştırmalarında, kuraklık stresiyle birlikte fotosentetik pigment içeriklerinde düşüş gözlemlemişlerdir. NZnOD uygulamaları klorofil düzeyinde meydana gelen bu olumsuzluğu sınırlandırmada etkili bulunmuş ve %4-38 oranında iyileşme sağlanmıştır. Sun vd. (2020) ise mısır üzerinde yaptıkları çalışmalarda, kuraklık stresinin bitki büyüme ve gelişimini sınırladığını, stomaların kapanmasına neden olduğunu ve net fotosentez oranını düşürürken osmolit konsantrasyonlarını artırdığını rapor etmişlerdir. Araştırmada, kuraklık stresi altındaki mısır bitkisine 100 mg l⁻¹ konsantrasyonunda Nano-ZnO uygulanmasının fotosentetik pigment bozulmasını sınırlandırdığı, daha yüksek bir net fotosentez oranı sağladığı ve su kullanım verimliliğini artırarak kuraklık toleransını geliştirdiği tespit edilmiştir. Birçok araştırmacı, biyostimülantların klorofil biyosentezini teşvik ederek veya bozulmasını önleyerek yaprakların rengini iyileştirdiğini gözlemlemiştir (Abbas and Akladios 2013). Yapraklara uygulanan çinko oksit nanopartiküllerinin (NZnOD), membran bütünlüğünü stabilize etmenin yanı sıra makro ve mikro besin maddelerinin alımını artırdığı ve klorofilaz enzim aktivitesini baskılayarak klorofil yapısının korunmasında etkili olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda, Klute ve Dirksen (2018), 100 mg l⁻¹ ZnO NP uygulamasının su stresi altındaki mısır bitkilerinin kloroplast ve mitokondri yapısını stabilize ettiğini, bunun da fotosentetik verimliliğin artmasına katkı sağladığını bildirmiştir. Sadati vd. (2022), buğdayda

kuraklık stresinin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla çinko oksit nanoparçacıklarının (ZnO NP) kullanımını ve kuraklıkla ilişkili genlerin ekspresyonunu araştırmışlardır. Çalışmada, üç farklı sulama seviyesi (tarla kapasitesinin %85, %60 ve %35) ve üç farklı Nano-ZnO dozu (0, 0,5 ve 1,0 g l⁻¹) kullanılarak üç buğday çeşidi (Miha, Heidari ve Gascogne) incelenmiştir. Bitkiler üç yapraklı döneme ulaştıklarında Nano-ZnO uygulaması püskürtme yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve bitkiler 10 gün boyunca kuraklık stresine maruz bırakılmıştır. Araştırmanın sonuçlarına göre, kuraklık stresi altındaki buğday çeşitlerinde Nano-ZnO uygulamaları, toplam protein, lösin, çözünür şekerler, klorofil, karotenoid içerikleri, antioksidan enzim aktiviteleri ve prolin birikimini önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca, Nano-ZnO, prolin biyosentezinde görev alan P5CS geni, katalaz aktivitesinden sorumlu CAT1 geni ve kuraklık toleransı ile ilişkili DREB2 ve Wdhn13 gibi dehidrasyona duyarlı genlerin ekspresyonunu yükselterek bitkilerin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını artırmıştır. Bu sonuçlar, Nano-ZnO'nun kuraklık stresini hafifletme ve buğday bitkilerinde stres toleransını geliştirme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Yaprak oransal su içeriği (YOSİ), kuraklık stresi altında bitki performansını değerlendirmek için önemli bir indikatör olarak kabul edilmektedir. YOSİ, hücre hacmi ile sıkı bir ilişkiye sahip olup, transpirasyon oranı ve yaprağa sağlanan su arasındaki dengenin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, bitki su teminini ne kadar iyi sağlayabilirse kuraklık stresinden o kadar etkili bir şekilde kurtulabilmektedir (Dhanda and Sethi 2002). YOSİ'deki azalma, genellikle turgor kaybının bir sonucu olarak görülür ve bu durum hücre genişlemesinin kısıtlanmasına, dolayısıyla bitki büyümesinde azalmaya yol açar (Castillo *et al.* 2013). Okunlola vd. (2017), YOSİ'nin kuraklığa toleransın belirlenmesinde önemli bir ölçüt olduğunu ve kuraklık stresıyla birlikte YOSİ değerlerinde belirgin bir azalma meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Benzer şekilde, Nxele vd. (2017), YOSİ'nin bitkilerin kuraklık toleransını değerlendirmek için en kolay ve etkili tarımsal değişkenlerden biri olduğunu ifade etmişlerdir. Bu bulgular, YOSİ'nin kuraklık stresine karşı bitki dayanıklılığını anlamada kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Patlıcan ve buğdayda gerçekleştirilen çalışmalarda, su stresine maruz kalan bitkilerde, yapraklara Nano-ZnO uygulamasının, bitki dokularının su durumunu iyileştirdiği görülmüştür. Araştırmacılar, Nano-ZnO'nin

hücre membranının bütünlüğünü koruma ve metabolik olarak kullanılabilir su olarak YOSİ'yi artırma rolü oynayabileceğini rapor etmişlerdir (Semida *et al.* 2021, Pandya *et al.* 2023). Abbas vd. (2023) buğdayda gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında kuraklık stresi koşullarında YOSİ değerlerinde azalma meydana geldiğini, ancak Nano-ZnO uygulamasının yaprak oransal su içeriğini artırdığını ifade etmişlerdir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nano-ZnO (NZnOD) uygulamasının, mısırdaki kuraklık stresine tolerans üzerindeki etkilerinin incelendiği bu çalışmada, kuraklık uygulaması bitki büyüme ve gelişmesi ile SPAD ve YOSİ parametrelerinde olumsuzluklara yol açmış, bu etki %25 sulama (K4) düzeyinde oldukça belirginleşmiştir. NZnOD kullanımı kuraklık stresinin ortaya koyduğu olumsuzlukları sınırlandırmada etkili olmuş ve meydana gelen stres zararı incelenen özellikler bakımından değişen oranlarda azalma yönünde etki göstermiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, kontrol bitkilerine (K1) oranla meydana gelen değişim ve bitki gelişimi açısından ortaya koydukları iyileşme açısından; NZnOD3 ve NZnOD4 uygulamalarının ön plana çıktığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular çerçevesinde;

- Çalışmanın arazi koşullarında ve daha uzun soluklu bir araştırma ile yürütülmesi,
- Farklı mısır çeşitleri ile kuraklık stresinde bu dozların etkinliğinin daha kapsamlı araştırılması,
- Kullanılan NZnOD dozlarının artırılarak etkinliğinin detaylı bir şekilde incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbas, S. M. and Akladios, S. A. 2013. Application of carrot root extract induced salinity tolerance in cowpea (*Vigna sinensis* L.) seedlings. Pak. J. Bot., 45: 795-806.
- Abbas, S. F., Bukhari, M. A., Raza, M. A. S., Abbasi, G. H., Ahmad, Z., Alqahtani, M. D. and Iqbal, M. A. 2023. Enhancing drought tolerance in wheat cultivars through nano-ZnO priming by improving leaf pigments and antioxidant activity. Sustainability, 15: 5835.
- Abdulameer, O. Q. and Ahmed, S. A. 2019. Role of humic acid in improving growth characters of corn under water stress. Iraqi J. Agric. Sci., 50(1): 420-430.
- Adrees, M., Khan, Z. S., Hafeez, M., Rizwan, M., Hussain, K., Asrar, M. and Ali, S. 2021. Foliar exposure of zinc oxide nanoparticles improved the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and decreased cadmium concentration in grains under simultaneous Cd and water deficient stress. Ecotoxicology and Environmental Safety, 208: 111627.
- Agliassa, C., Mannino, G., Molino, D., Cavalletto, S., Contartese, V., Berteà, C. M. and Secchi, F. 2021. A new protein hydrolysate-based biostimulant applied by fertigation promotes relief from drought stress in *Capsicum annuum* L. Plant Physiol. Biochem., 166: 1076-1086.
- Anonim, 2021. Tatlı mısır çeşit özellikleri.
<https://www.crookham.com/products/us/braveheart> Erişim Tarihi: 20.02.2023
- Ashraf, M. and Iram, A. 2005. Drought stress induced changes in some organic substances in nodules and other plant parts of two potential legumes differing in salt tolerance. Flora, 200: 535-546.
- Ayub, M., Ashraf, M. Y., Kausar, A., Saleem, S., Anwar, S., Altay, V. and Ozturk, M. 2021. Growth and physio-biochemical responses of maize (*Zea mays* L.) to drought and heat stresses. Plant Biosyst., 155(3): 535-542.
- Azeem, M., Haider, M. Z., Javed, S., Saleem, M. H. and Alatawi, A. 2022. Drought stress amelioration in maize (*Zea mays* L.) by inoculation of *Bacillus* spp. strains under sterile soil conditions. Agric., 12(1): 50.

- Badr, A., El-Shazly, H. H., Tarawneh, R. A. and Börner, A. 2020. Screening for drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) germplasm using germination and seedling traits under simulated drought conditions. *Plants*, 9(5): 565.
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A. and Pereira, A. 2016. Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5: 1554.
- Boztepe, A. 2022. Harran Ovası koşullarında tatlı mısırdaki (*Zea mays* L. *Saccharata* sturt.) farklı azot dozlarının ve sıra üzeri mesafelerinin verim ve verim özellikleri üzerine etkisi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tesi, sf.75, Şanlıurfa.
- Castillo, G., Cruz, L. L., Hernandez-Cumplido, J., Oyama, K., Flores-Ortiz, C. M., Fornoni, J. and Nunez-Farfan, J. 2013. Geographic association and temporal variation of chemical and physical defense and leaf damage in *Datura stramonium*. *Ecol. Res.*, 28: 663-672.
- Çelik Saygın, Ü. 2013. Farklı mısır (*Zea mays* L.) genotiplerinin çinko alım etkilerinin belirlenmesi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi, 31 sf.
- Dasgan, H. Y. and Koc, S. 2009. Evaluation of salt tolerance in common bean genotypes by ion regulation and searching for screening parameters. *J. Food. Agric. Environ.*, 7(2): 363-372.
- DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R. and Sultan, Y. 2010. Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology*, 5(2): 91-91.
- Dhanda, S. S. and Sethi, G. S. 2002. Tolerance to drought stress among selected Indian wheat cultivars. *J. Agric. Sci.*, 139(3): 319-326.
- Dietz, K.J. and Herth, S. 2011. Plant nanotoxicology. *Trends in Plant Science*, 16(11): 582-9.
- Dimkpa, C. O., Singh, U., Bindraban, P. S., Elmer, W. H., Gardea-Torresdey, J. L. and White, J. C. 2019. Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. *Science of the Total Environment*, 688: 926-934.
- Ghani, M. I., Saleem, S., Rather, S. A., Rehmani, M. S., Alamri, S., Rajput, V. D. and Liu, M. 2022. Foliar application of zinc oxide nanoparticles: An effective strategy

- to mitigate drought stress in cucumber seedling by modulating antioxidant defense system and osmolytes accumulation. *Chemosphere*, 289: 133202.
- Gu, Z., Hu, C., Gan, Y., Zhou, J., Tian, G. and Gao, L. 2024. Role of Microbes in Alleviating Crop Drought Stress: A Review. *Plants*, 13(3): 384.
- Hamid, A. and Nazmy, A. 2020. Alleviation of salinity stress through magnetic water and nano zinc and magnesium treatment of lemongrass plant (*Cymbopogon citratus* L.). *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 28(2): 485-503.
- Haseeb, A., Nawaz, A., Rao, M. Q. A., Ali, Q. and Malik, A. 2020. Genetic variability and association among seedling traits of *Zea mays* under drought stress conditions. *Biol. Clin. Sci. Res. J.*,
- Hassan, U. M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L. and Guoqin, H. 2020. The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10(9), 396.
- Inam, A., Javad, S., Naseer, I., Alam, P., Almutairi, Z. M., Faizan, M. and Shah, A. A. 2024. Efficacy of chitosan loaded zinc oxide nanoparticles in alleviating the drastic effects of drought from corn crop. *Plant Stress*, 14: 100617.
- Jacques, C., Salon, C., Barnard, R. L., Vernoud, V. and Prudent, M. 2021. Drought stress memory at the plant cycle level: A review. *Plants*, 10(9): 1873.
- Jaleel, C. A., Gopi, R., Sankar, B., Gomathinayagam, M. and Panneerselvam, R. 2008. Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. *C. R. Biol.*, 331(1): 42-47.
- Karahan, G., Erşahin, S. ve Öztürk, H. S. 2014. Toprak koşullarına bağlı olarak tarla kapasitesi dinamiği. *Gaziosmanpaşa Üniv. Zir. Fak. Derg.*, 30(1): 1-11.
- Karimian, Z. and Samiei, L. 2023. ZnO nanoparticles efficiently enhance drought tolerance in *Dracocephalum kotschy* through altering physiological, biochemical and elemental contents. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1063618.
- Kayalarlı, 2023. Çim Karışımında Nano Çinko Oksit (Nano-ZnO) Uygulamalarının Kuraklığa Tolerans Üzerindeki Etkisi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım ve Yaşam Bilimleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi, 51 sf.

- Kazemi, E., Ganjali, H. R., Mehraban, A. and Ghasemi, A. 2021. Yield and biochemical properties of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench.) affected by nano-fertilizer under field drought stress. Cereal Research Communications, 1-9.
- Kirkham, M. B. 2014. Principles of soil and plant water relations, Second Edition, Elsevier Academic Press, 598 page, Boston.
- Klute, A. and Dirksen, C. 2018. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. Methods Biogeochem. Wetl. 9: 687-734.
- Kusvuran, A. and Kusvuran, S. 2019. Using of microbial fertilizer as biostimulant alleviates damage from drought stress in guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) seedlings. Int. Lett. Nat. Sci., 76: 147-157.
- Kusvuran, A. and Kusvuran, S. 2020. The defensive role of amino acid in guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) against stress condition induced by drought. Fresenius Environ. Bull., 29(6): 4302-4308.
- Kuşvuran, Ş., Daşgan, H. Y. ve Abak, K. 2011. Farklı kavun genotiplerinin kuraklık stresine tepkileri. Yüzüncü Yıl Üniv. Tarım Bil. Derg., 21(3): 209-219.
- Li, J., Zafar, S., Javaid, A., Perveen, S., Hasnain, Z., Ihtisham, M. and Abbas, M. 2023. Zinc nanoparticles (ZnNPs): High-fidelity amelioration in Turnip (*Brassica rapa* L.) production under drought stress. Sustainability, 15(8), 6512.
- López-Valdez, F. and Fernández-Luqueño, F. 2018. Agricultural nanobiotechnology. Modern agriculture for a sustainable future. Springer Cham, 218 page, Switzerland
- Luqman, M., Shahbaz, M., Maqsood, M. F., Farhat, F., Zulfikar, U., Siddiqui, M. H. and Haider, F. U. 2023. Effect of strigolactone on growth, photosynthetic efficiency, antioxidant activity, and osmolytes accumulation in different maize (*Zea mays* L.) hybrids grown under drought stress. Plant Signal. Behav., 18(1): 2262795.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edn. Academic Press, London.
- Mazhar, T., Ali, Q. and Malik, M. S. R. A. 2020. Effects of salt and drought stress on growth traits of *Zea mays* seedlings. Life Sci. J., 17(7): 48-54.
- Nezhadahmadi, A., Prodhan, Z. H. and Faruq, G. 2013. Drought tolerance in wheat. The Sci. World J., 1-12.

- Nxele, X., Klein, A. and Ndimba, B. K. 2017. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *S. Afr. J. Bot.*, 108: 261-266.
- Okunlola, A. I., Ogungbire, O. C. and Hassan, G. F. 2017. Growth and nutritional qualities of three ocimum species as affected by methods of propagation. *E. Afri. Agric. For. J.*, 82(1): 36-46.
- Pandya, P., Kumar, S., Sakure, A. A., Rafaliya, R. and Patil, G. B. 2023. Zinc oxide nanopriming elevates wheat drought tolerance by inducing stress-responsive genes and physio-biochemical changes. *Current Plant Biology*, 35: 100292.
- Rahdari, P. and Hoseini, S. M. 2012. Drought stress: a review. *Int. J. Agron. Plant Prod.*, 3(10): 443-446.
- Samadi, A., Derafshi, M., Hassani, A., Gholamhoseini, M., Asgari Lajayer, B., Astatkie, T. and Price, G. W. 2024. Effects of biofertilizers and potassium sulfate on nutrients uptake and physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) Under Drought Stress. *Journal of Crop Health*, 76(1): 209-218.
- Sanchez, F. J., Andres, E. F., Tenorlo, J. L. and Ayerbe, L. 2004. Growth of epicotyls, turgor maintenance and osmotic adjustment in pea plants (*Pisum sativum* L.) subjected to water stress. *Field Crop. Res.*, 86: 81-90.
- Sadati, S. Y. R., Godehkahriz, S. J., Ebadi, A. and Sedghi, M. 2022. Zinc oxide nanoparticles enhance drought tolerance in wheat via physio-biochemical changes and stress genes expression. *Iran. J. Plant Physiol.*, 20(1): e3027
- Saxena, R., Tomar, R. S. and Kumar, M. 2016. Exploring nanobiotechnology to mitigate abiotic stress in crop plants. *J. Pharm. Sci. Res.*, 8(9): 974.
- Schröder, F. G. and Lieth, J. H. 2002. Irrigation control in hydroponics. In: *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Savvas, D. and Passam, P. (eds), Embryo Publications. pp. 263-269, Athens.
- Sedghi, M., Sheikhnaz Jahed, P. and Gholi-Tolouie, S. 2021. Zinc oxide nanoparticles alleviate drought stress effects on soybean antioxidant system during germination. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 11(4): 3769-3778.
- Seghatoleslami, M. and Forutani, R. 2015. Yield and water use efficiency of sunflower as affected by nano ZnO and water stress. *J. Adv. Agric. Technol*, 2(1): 34-37.

- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul Wajid H. H. and Battaglia, M. L. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2): 259.
- Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G., El-Mageed, A., Taia, A., El-Mageed, A. and Ali, E. F. 2021. Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Plants*, 10(2): 421.
- Shah, M. N., Wright, D. L., Hussain, S., Koutroubas, S. D., Seepaul, R., George, S. and Eswaramoorthy, R. 2023. Organic fertilizer sources improve the yield and quality attributes of maize (*Zea mays* L.) hybrids by improving soil properties and nutrient uptake under drought stress. *J. King Saud. Univ. Sci.*, 35(4): 102570.
- Sharma, V., Anderson, D. and Dhawan, A. 2012. Zinc oxide nanoparticles induce oxidative DNA damage and ROS-triggered mitochondria mediated apoptosis in human liver cells (HepG2). *Apoptosis*, 17: 852-870.
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Firoz, M. and Al-Khaishany, M. Y. 2015. Role of nanoparticles in plants. *Nanotechnology and plant sciences: nanoparticles and their impact on plants*, 19-35.
- Singh, P., Arif, Y., Siddiqui, H., Sami, F., Zaidi, R., Azam, A. and Hayat, S. 2021. Nanoparticles enhances the salinity toxicity tolerance in *Linum usitatissimum* L. by modulating the antioxidative enzymes, photosynthetic efficiency, redox status and cellular damage. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213: 112020.
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Firoz, M. and Al-Khaishany, M. Y. 2015. Role of nanoparticles in plants. *Nanotechnology and Plant Sciences*, 19-35.
- Školníková, M., Škarpa, P., Rumpová, E. and Kováčik, P. 2020. The effect of zinc application on annual ryegrass (*Lolium multiflorum*) under drought stress. *Acta fytotechn zootechn*, 23(4): 198-204.
- Sun, L., Song, F., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Wang, Y. and Li, X. 2021. Nano-ZnO alleviates drought stress via modulating the plant water use and carbohydrate metabolism in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(2): 245-259.
- Turkan, I., Bor, M., Ozdemir, F., & Koca, H. 2005. Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius*

gray and drought sensitive *P. vulgaris* L. subjected to polyethylene glycol mediates water stres. Plant Sci., 168: 223-231.

TÜİK, 2024. Türkiye İstatistik Kurumu Merkezi Dağıtım Sistemi. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr> Erişim Tarihi: 29.02.2024

Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z. and Chen, S. 2021. Response mechanism of plants to drought stress. Horticulture, 7(3): 50.

Yıldırım, E., Kul, R., Ekinci, M., Örs, S. ve Dursun, A. 2021. Kuraklık Stresi. Sebzelelerde Stres Toleransı ve Islah Stratejileri. Editörler: Ellialtıoğlu, Ş. Ş., Daşgan, H. Y., Kuşvuran, Ş. Gece Kitaplığı, ss. 66-117, Ankara.

Zlatev, Z. and Lidon, F. C. 2012. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. Emir J. Food Agric., 57-72.

