

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Nano-Silisyum Dioksit (SiO₂)'in Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) Bitkilerinde Fizyolojik
Etkilerinin Araştırılması**

Sibel KILIÇARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI

MALATYA

Mayıs 2019

Tez Başlığı: Nano-Silisyum Dioksit (SiO₂)'in Ayđıđeđi (*Helianthus annuus* L.)
Bitkilerinde Fizyolojik Etkilerinin Araştırılması

Tezi Hazırlayan : Sibel KILIÇARSLAN

Sınav Tarihi : 31-05-2019

Yukarıdaki adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Biyoloji Anabilim Dalında

Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Prof. Dr. Füsun YÜREKLİ

Tez Danışmanı

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman KÖYTEPE

İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ođuz Ayhan KİREÇCİ

Bitlis Eren Üniversitesi (Hizan MYO)

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Nano-Silisyum Dioksit (SiO₂)’in Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) Bitkilerinde Fizyolojik Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakça yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Sibel KILIÇARSLAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Nano-Silisyum Dioksit (SiO₂)'in Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) Bitkilerinde
Fizyolojik Etkilerinin Araştırılması

Sibel KILIÇARSLAN

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyoloji Anabilim Dalı

164 + x Sayfa

2019

Danışman: Prof. Dr. Füsun YÜREKLİ

Bu çalışmada, farklı boyut ve konsantrasyonlarda SiO₂NP uygulaması yapılan *Helianthus annuus* L. (LG-5448) fidelerinin yaprak dokularında oransal su içeriği tayini, kök ve yaprak dokularında toplam protein içeriği, süperoksit dismutaz, katalaz, askorbat peroksidaz enzim aktiviteleri, malondialdehit (MDA) miktarı, klorofil miktarları, Si miktar tayini, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) analizleri yapılmıştır. Elde ettiğimiz veriler ile NP'lerin bitkilerin aktif savunma sistemiyle abiyotik stres kaynaklı hasarı hafiflettiği ortaya konulmuştur. NP'lerin ROT oluşumunu tetiklediği ve bitkiler üzerine birtakım toksik etkilerinde olduğu belirtilmiştir. NP'lerin etki şekli ile ilgili olarak, mevcut bilginin tüm etki mekanizmasını sonuçlandırmak için yeni ve değişken olduğunu söyleyebiliriz. NP'lerin bitkilerdeki rolünün hücre içi ve moleküler seviyede daha fazla araştırılması gerektiği, NP'lerin stres inhibitörleri ve/veya stres indükleyicileri olarak hareket edip etmediğini tespit etmek için ileri çalışmalara ihtiyaç olduğunu da söyleyebiliriz.

Anahtar kelimeler: *Helianthus annuus* L., Nano-Silisyum Dioksit (SiO₂), SOD, CAT, APX, MDA, Klorofil

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Investigation of the Physiological Effects of Nano-Silicon Dioxide (SiO₂) on Sunflower
(*Helianthus annuus L.*) Plants

Sibel KILIÇARSLAN

INONU UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biology

164 + x Pages

2019

Advisor: Prof. Dr. Füsün YÜREKLİ

In this study, control and determination of relative water content in leaf tissues of *Helianthus annuus L.* (LG-5448) seedlings in different sizes and concentrations of SiO₂NP, total protein content in root and leaf tissues, superoxide dismutase, catalase, ascorbate peroxidase enzyme activities, malondialdehyde (MDA), chlorophyll content, Si quantification, SEM (Scanning Electron Microscope) and AFM (Atomic Force Microscopy) analyzes were performed. With the data we have obtained, it has been shown that NPs alleviate abiotic stress caused by plants' active defense system. It has been reported that NPs trigger ROT formation and have some toxic effects on plants. Regarding the mode of action of NPs, we can say that the current knowledge is new and variable to conclude the entire mechanism of action. Further studies are needed to determine whether the role of NPs in plants should be further investigated at the intracellular and molecular level, and whether NPs act as stress inhibitors and / or stress inducers.

Key words: *Helianthus annuus L.*, Nano-Silicon Dioxide (SiO₂) SOD, CAT, APX, MDA, Chlorophyll

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın yürütülmesinde bölüm imkânlarından faydalanmamı sağlayan Biyoloji Bölüm Başkanlığı'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında yardımını, desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Füsun YÜREKLİ' ye,

SiO₂'nin sentezlenmesi AFM, SEM, EDX görüntülerinin yorumlanmasında yardımcı olan Prof. Dr. Süleyman KÖYTEPE, İmren ÖZCAN ve Nilüfer KIVILCIM'a,

Tez çalışmama yapmış olduğu finansal destek için İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na (FYL-2017-651),

Yalnızca bu çalışmamda değil bütün eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen AİLEME sonsuz teşekkürler ediyorum.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | iv |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Nanoteknoloji Nedir? | 1 |
| 1.2. Nanomalzemelerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması..... | 4 |
| 1.3. Nanopartiküllerin Uygulama Alanları..... | 6 |
| 1.4. Bitkilerde Nanopartiküllerin Alınımı ve Taşınımı..... | 9 |
| 1.4.1. Kütikula | 9 |
| 1.4.2. Suberin..... | 9 |
| 1.4.3. Müsilaj ve Eksudatlar | 10 |
| 1.4.4. Hücre Duvarı ve Hücre Membranı..... | 10 |
| 1.5. Nanopartiküllerin Hücresel Alım Mekanizması | 12 |
| 1.6. Bitki Büyüme ve Gelişmesi Üzerine Nanopartiküllerin Etkileri..... | 12 |
| 1.7. Bitkiler ve Nanopartikül Etkileşimleri | 16 |
| 1.8. Nanopartikül Toksisitesine Bitki Cevabı | 16 |
| 1.9. Yüzey Özelliklerinin Etkisi | 18 |
| 1.10. Nanopartiküllerin Boyut ve Konsantrasyonunun Etkisi..... | 19 |
| 1.11. Silisyum Dioksit Nanopartikülleri | 19 |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ | 21 |
| 3. MATERYAL METOD | 42 |
| 3.1. Ayçiçeği Bitkisi | 42 |
| 3.2. SiO ₂ NP'lerin Sentezi ve Yapısal Karakterizasyonu | 43 |
| 3.3. Çalışmada Kullanılan Kültür Çözeltileri..... | 44 |
| 3.4. SiO ₂ İçeren Çözeltiler..... | 45 |
| 3.5. Deneysel Koşullar | 45 |
| 3.6. Bitkilerin Yetiştirilmesi..... | 46 |
| 3.6.1. Tohum Çimlendirme Yöntemi..... | 46 |
| 3.6.2. Bitki Büyütme Yöntemi | 46 |
| 3.7. İncelenen Parametreler | 48 |

| | |
|--|-----|
| 3.7.1. Oransal Su İçeriği (OSİ) Tayini..... | 48 |
| 3.7.2. Toplam Protein İçeriğinin Belirlenmesi..... | 48 |
| 3.7.3. Süperoksit Dismutaz (SOD) Aktivitesinin Belirlenmesi..... | 49 |
| 3.7.4. Katalaz (CAT) Aktivitesinin Belirlenmesi..... | 49 |
| 3.7.5. Askorbat peroksidaz (APX) Aktivitesinin Belirlenmesi..... | 49 |
| 3.7.6. Malondialdehit (MDA) Düzeylerinin Ölçülmesi..... | 50 |
| 3.7.7. Klorofil Miktarının Belirlenmesi..... | 50 |
| 3.7.8. Silisyum Miktar Tayini..... | 51 |
| 3.7.9. SiO ₂ Uygulanmış Ayçiçeği Bitkisi Dokularında SEM, EDX ve AFM Analizleri..... | 51 |
| 3.7.10. İstatistik Analizler..... | 51 |
| 4. BULGULAR..... | 52 |
| 4.1. SiO ₂ NP'lerin Yapısal Karakterizasyon Sonuçları..... | 52 |
| 4.2. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Yaprak Dokusunda Oransal Su İçeriği (OSİ)'nin Değişimi..... | 58 |
| 4.3. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Yaprak ve Kök Dokusunda Toplam Protein Miktarındaki Değişim..... | 59 |
| 4.4. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Süperoksit Dismutaz (SOD) Enzim Aktivitesinin Değişimi..... | 62 |
| 4.5. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Katalaz (CAT) Enzim Aktivitesinin Değişimi..... | 64 |
| 4.6. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Askorbat Peroksidaz (APX) Enzim Aktivitesinin Değişimi..... | 66 |
| 4.7. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Malondialdehit (MDA) Düzeylerindeki Değişim..... | 67 |
| 4.8. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Yaprak Dokusunda Klorofil a, Klorofil b, Toplam Klorofil Miktarları Üzerine Etkisi... | 69 |
| 4.9. Nano-Si Uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Silisyum Miktarları Üzerine Etkisi..... | 71 |
| 4.10. Nano-Si Uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda SEM, EDX ve AFM Analizleri..... | 72 |
| 5. SONUÇ ve TARTIŞMA..... | 115 |
| KAYNAKÇA..... | 141 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 164 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1 Biyolojik bileşenler ve ‘nano’ ve ‘mikro’ boyutların tanımı ile karşılaştırıldığında nanomateryallerin logaritmik uzunluk skalası (Buzea vd. 2007). | 2 |
| Şekil 1.2 NP’lerin kullanım alanlar | 4 |
| Şekil 1.3 Bitkilerde NP’lerin emilimini, alınmasını ve taşınmasını etkileyen faktörler. 11 | |
| Şekil 1.4 Bitkilerin çeşitli fizyolojik mekanizmalarını etkileyen ve nanotoksositeye etki eden nanopartiküllerin farklı özellikleri. | 18 |
| Şekil 3.1 Bitkilerin büyütüldüğü iklim odasından bir görüntü | 47 |
| Şekil 3.2 Uygulama aşamasında fidelere ait görüntüler | 47 |
| Şekil 4.1 ~100 nm SiO ₂ NP EDX spektrumu | 55 |
| Şekil 4.2 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak dokusunda oransal su içerikleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf ve rakamlarla gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 59 |
| Şekil 4.3 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda toplam protein miktarları. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 61 |
| Şekil 4.4 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi kök ve yaprak dokusunda SOD enzim aktiviteleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 63 |
| Şekil 4.5 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda CAT enzim aktivitesi. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 65 |
| Şekil 4.6 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda APX enzim aktivitesi. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 67 |
| Şekil 4.7 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda MDA düzeyleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 68 |
| Şekil 4.8 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak dokusunda klorofil a, klorofil b, toplam klorofil miktarları. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 70 |
| Şekil 4.9 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda Si düzeyleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir. | 72 |
| Şekil 4.10 Kontrol grubu ayçiçeği yaprak dokusu SEM görüntüleri | 73 |
| Şekil 4.11 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.12 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri..... | 76 |
| Şekil 4.13 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri..... | 77 |
| Şekil 4.14 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri..... | 78 |
| Şekil 4.15 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün SEM görüntüleri..... | 79 |
| Şekil 4.16 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün SEM görüntüleri..... | 80 |
| Şekil 4.17 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün SEM görüntüleri..... | 81 |
| Şekil 4.18 Kontrol grubu ayçiçeği kök dokusu SEM görüntüleri..... | 83 |
| Şekil 4.19 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri | 84 |
| Şekil 4.20 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri | 85 |
| Şekil 4.21 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri..... | 86 |
| Şekil 4.22 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri..... | 87 |
| Şekil 4.23 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri | 88 |
| Şekil 4.24 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri | 89 |
| Şekil 4.25 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri..... | 90 |
| Şekil 4.26 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri..... | 91 |
| Şekil 4.27 Kontrol grubu ayçiçeği yaprak dokusu EDX görüntüleri | 92 |
| Şekil 4.28 ~50 nm boyutunda 20mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri..... | 93 |
| Şekil 4.29 ~50 nm boyutunda 50mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri..... | 94 |
| Şekil 4.30 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri..... | 95 |
| Şekil 4.31 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri..... | 96 |
| Şekil 4.32 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri..... | 97 |
| Şekil 4.33 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri..... | 98 |
| Şekil 4.34 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri..... | 99 |
| Şekil 4.35 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri..... | 100 |
| Şekil 4.36 Kontrol grubu kök dokusu EDX görüntüleri..... | 101 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4.37 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri | 102 |
| Şekil 4.38 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri | 103 |
| Şekil 4.39 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri..... | 104 |
| Şekil 4.40 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri..... | 105 |
| Şekil 4.41 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri | 106 |
| Şekil 4.42 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri | 107 |
| Şekil 4.43 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri..... | 108 |
| Şekil 4.44 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO ₂ NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri..... | 109 |
| Şekil 4.45 Kontrol yaprak dokusuna ait AFM görüntüsü..... | 110 |
| Şekil 4.46 Yaprak dokusunda 4. gün 50-20 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 111 |
| Şekil 4.47 Yaprak dokusunda 4. gün 50-50 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 111 |
| Şekil 4.48 Yaprak dokusunda 4. gün 100-20 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 112 |
| Şekil 4.49 Yaprak dokusunda 4. gün 100-50 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 112 |
| Şekil 4.50 Yaprak dokusunda 8. gün 50-20 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 113 |
| Şekil 4.51 Yaprak dokusunda 8. gün 50-50 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 113 |
| Şekil 4.52 Yaprak dokusunda 8. gün 100-20 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 114 |
| Şekil 4.53 Yaprak dokusunda 8. gün 100-50 nm-mg/L SiO ₂ NP uygulamasının AFM görüntüsü..... | 114 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Çizelge 1.1 Nanopartiküllerin Sınıflandırılması | 6 |
| Çizelge 3.1 Türkiye Ayçiçeği Verileri..... | 43 |
| Çizelge 3.2 Hoagland kültür çözeltilisinin bileşimi | 45 |
| Çizelge 4.1 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak dokusunda oransal su içerikleri | 58 |
| Çizelge 4.2 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda toplam protein miktarları | 60 |
| Çizelge 4.3 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda CAT enzim aktivitesi | 64 |
| Çizelge 4.4 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda APX enzim aktivitesi | 66 |
| Çizelge 4.5 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda MDA düzeyleri | 68 |
| Çizelge 4.6 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak dokusunda klorofil a, klorofil b, toplam klorofil miktarları | 70 |
| Çizelge 4.7 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonda nano-Si uygulamasının <i>Helianthus annuus</i> L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda Silisyum düzeyleri | 71 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

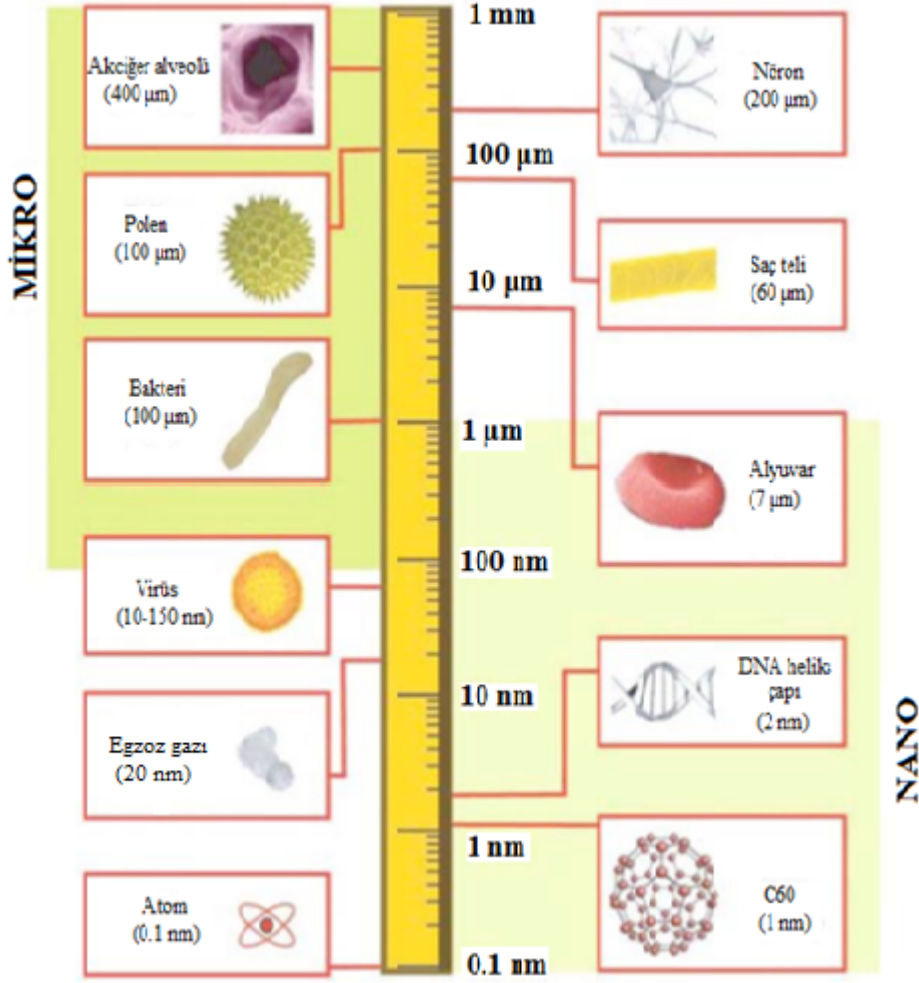
| | |
|---------------------|---|
| AFM | Atomik kuvvet mikroskobu |
| AgNP | Gümüş nanopartikülü |
| APX | Askorbat peroksidaz |
| CAT | Katalaz |
| CNT | Karbon nanotüp |
| DTA | Diferansiyel termal analiz |
| ENP | Tasarlanmış nanopartikül |
| EDX | Enerji Dağılımı X-Ray analiz |
| FAO | Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Organizasyonu |
| MDA | Malondialdehit |
| MWCNT | Çok katmanlı karbon nanotüp |
| NM | Nanomalzeme |
| NP | Nanopartikül |
| ROT | Reaktif oksijen türleri |
| SEM | Taramalı elektron mikroskobu |
| SEM-EDX | Enerji Yayılımlı X-ışını analiz |
| SiO ₂ NP | Silisyum dioksit nanopartikülü |
| SOD | Süperoksit dismutaz |
| SWCNT | Tek katmanlı karbon nanotüp |
| TBA | Tiyobarbitürik asit |
| TCA | Trikloroasetik asit |
| TGA | Termogravimetrik analiz |
| TiO ₂ | Titanyum dioksit |
| ZnONP | Çinko oksit nanopartikülü |
| XRD | X-Işını difraksiyonu |

1. GİRİŞ

1.1. Nanoteknoloji Nedir?

Nanoteknoloji; maddenin atomik veya moleküler seviyede işlenmesiyle daha gelişmiş materyaller, araçlar ve sistemler geliştirmek olarak tanımlanmaktadır. Nanoteknoloji kelimesi, Yunanca ‘cüce’ anlamına gelen ‘nano’ ön ekine dayanır. Teknik bir terim olarak ‘nano’, 10^{-9} ya da milyarda bir şeklinde ifade edilir. 100 nm’den küçük bir parçacık boyutuna sahip malzemeler, nanomalzemeler olarak sınıflandırılmıştır. Nanomateryallerin (NM) fiziksel ve kimyasal özellikleri, aynı bileşimin yığın malzemelerinden önemli ölçüde farklı olabilir. Nanoteknolojik materyaller, boyutlarının bir sonucu olarak mikro metrik veya daha büyük moleküllerden çok farklı özellikler sergilerler. Bunlar; optik, fiziksel dayanıklılık, kimyasal reaktivite, elektriksel iletkenlik ve manyetizma gibi özelliklerdir (Joseph ve Morrison, 2006; Abriz ve Torabian, 2018).

Nanoteknolojide sağlık ve çevre bilimlerinde parçacık büyüklüğünü tanımlamak için kullanılan terminolojiyi birleştirmek önemlidir. Materyaller, kaynaklarına bakılmaksızın partiküller olarak sınıflandırılabilir. Bu partiküllerin büyüklüğü 1 nm ile birkaç mikron arasında değişir ve bu nedenle ya nanopartiküller (NP) (1 mikrondan küçük herhangi bir boyut) ya da mikro partiküller (tüm boyutlar bir mikrondan daha büyük) olarak sınıflandırılabilir. Boyut farkının etkisini aydınlatmak için, çeşitli doğal mikro ve NP’ler Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Genel olarak; NP’lerin boyutları virüsler, DNA ve proteinler ile karşılaştırılabilirken mikro partiküller hücrelere, organellere ve daha büyük fizyolojik yapılara benzemektedir (Şekil 1.1). Akciğer alveolleri ~400 µm iken bir kırmızı kan hücresi ~7 µm, bir saç teli 60 µm büyüklüğündedir (Buzea vd. 2007).



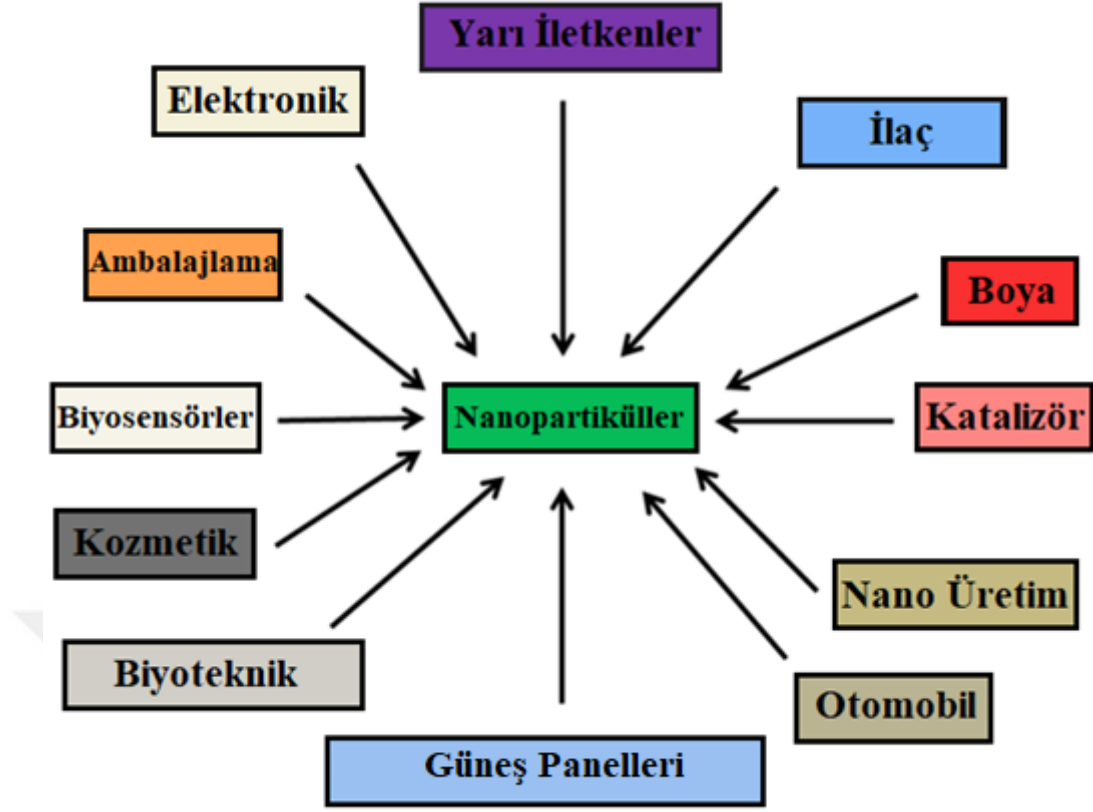
Şekil 1.1 Biyolojik bileşenler ve ‘nano’ ve ‘mikro’ boyutların tanımı ile karşılaştırıldığında nanomateryallerin logaritmik uzunluk skalası (Buzea vd. 2007).

Nanoteknolojinin konusu; biyolojik olan ve olmayan 100 nm’den küçük yapıları üretmek, karakterize etmek ve fonksiyonel hale getirmektir. Bu alandaki çalışmalar son yıllarda hızla artmıştır. Farmakolojik bilimler ve elektronik endüstrisi gibi pek çok alanda, nanoteknolojinin avantajlarının farkına varılmış ve ticari ürünler üreilmeye başlanmıştır. Nanoteknolojinin gelişimi için; fizik, kimya, biyoloji, mühendislik, tıp, ziraat, gıda ve materyal bilimlerinin multidisipliner çalışmasına ihtiyaç vardır. Bununla birlikte gıda endüstrilerinde, gıda güvenliği ve yeni sentez ürünler göz önünde bulundurulduğunda, nanoteknolojik uygulamaların sınırlı kaldığı da ifade edilmektedir. Gıdalar birçok biyolojik ve biyokimyasal modifikasyon yapılarak hazır hale getirilmektedir. Bu süreç, pek çok prensip ve mekanizma ile kontrol edilen karmaşık bir sistemdir. Nanoteknoloji; bilim insanlarına bu

modifikasyonları nano ölçekte kontrol etme, değiştirme ve ölçümleme imkânı vermektedir (Weiss vd. 2006). Nanoteknolojik metodlar kullanılarak bitki ve hayvanların genetik ıslahı yoluyla tarım ve gıda sektöründe üretkenlik ve kalite artırılabilir.

Nanoteknoloji, biyoteknoloji ve tarım sektöründe yeni bir uygulama alanı yaratmıştır. Çünkü NP'ler benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Yüksek yüzey alanı, yüksek reaktivite, ayarlanabilir gözenek ve partikül morfolojisi bunlara örnek olarak verilebilir. Herbisit, nano-pestisit gübresi ya da genlerini içeren NP'ler sihirli mermi gibi spesifik hücre organellerini hedef alarak onların içeriğinin serbest bırakılmasını sağlar. NP'lerin bitki sistemlerinde toksik etkisi üzerine çalışma yapılmış olmasına rağmen bitki büyüme ve gelişmesi üzerine az sayıda çalışma yapılmıştır. Bitkilerde NP'lerin, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler mekanizmanın aydınlatılması daha iyi bitki büyüme ve gelişmesine yol açacağı da bildirilmiştir (Weiss vd. 2006).

NP'ler sahip oldukları eşsiz özelliklerinden dolayı kullanılabilirdiği alanların şematik gösterimi Şekil 1.2'de verilmiştir. Özellikle medikal amaçlı olarak NP'lerin kullanım imkânı bulduğu alanlar hastalıkların daha kolay tanınabilmesi ve sonuç olarak daha akılcı tedavi yöntemleri geliştirilmesi olarak ifade edilebilmektedir. Tıp alanında NP'lerin bu şekilde kullanılabilir olması, özellikle nanoküreler kullanılarak yapılabilecek gen terapilerini, kanser gibi son derece yaygın olan hastalıkların daha erken teşhis ve tedavisinin yapılabilmesini, hedefe yönelik ilaç taşınımı gibi pek çok alanda bilim insanlarına olanak sağlamaktadır. Bunun yanında NP'ler yalnızca tıp alanında değil aynı zamanda bilgisayarlar, bataryalar, elektronik cihazlar ve mobil iletişim sistemleri gibi alanlar ile mühendislik bilim dallarında da aktif bir şekilde kullanılabilir (Mboniyivuze vd. 2015).



Şekil 1.2 NP'lerin kullanım alanları (Mbonyiryivuze vd. 2015)

Nanoteknoloji; bitkilerin besinleri soğurma yeteneğinin artırılması gibi yeni yaklaşımlarla tarım ve gıda endüstrisinde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Akıllı biyosensörler ve kontrollü salım sistemleri, tarım endüstrisinin virüslerle ve diğer patojenlerle savaşmasına yardım edecektir. Yakın bir gelecekte nano yapıdaki katalizörler sayesinde pestisitlerin ve herbisitlerin daha düşük dozlarıyla daha etkili olması sağlanacaktır. Ayrıca nanoteknoloji, alternatif (yenilenebilir) enerji bileşikleri ve filtre/katalizörlerin kullanımıyla kirliliği azaltacak ve mevcut kirletici maddeleri temizleyerek dolaylı yoldan çevreyi koruyacaktır (Demirbilek, 2015).

1.2. Nanomalzemelerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması

NM'ler genel olarak üç sınıfa ayrılır.

1- Bir boyutlu nanomalzemeler

Son on yıldır tek boyutlu sistem (ince lifli veya üretilmiş yüzeyler) için kullanılmıştır. İnce filmler (1-100 nm arası boyutlar) veya tek tabakalı filmler artık güneş hücrelerinin sunduğu alanda ve kimyasal gibi farklı teknolojik uygulamalar ve biyolojik sensörler, bilgi depolama sistemleri, manyeto-optik ve optik cihaz, fiber optik sistemler gibi alanlarda yaygın bir şekilde yer almaktadır.

2- İki boyutlu nanomalzemeler

Karbon nanotüpler

3- Üç boyutlu nanomalzemeler

Dendrimerler, Quantum Dots, Fullerenler (Carbon 60), (QDs)

Gelişmiş atomik kuvvet mikroskobu (AFM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM)'e göre NP'lerin karakterizasyonu, büyüklüğü, morfolojisi ve yüzeyi belirlenebilir. Boyut dağılımı, ortalama partikül çapı, yük gibi özellikleri, NP'lerin fiziksel stabilitesini ve in vivo dağılımını etkiler. Yüzey morfolojisi, boyutu ve genel şekli gibi özellikler ise elektron mikroskobu teknikleri ile belirlenir. Fiziksel stabilite ve polimer dispersiyonunun yeniden dağıtılabilişliğı gibi özellikleri, NP'lerin yüzey yükünden etkilenir (Bhatia vd. 2016).

Çizelge 1.1 Nanopartiküllerin Sınıflandırılması (Nowack ve Bucheli, 2007)

| | | Oluşum | | Örnek |
|--|-----------|------------|----------------------|---|
| Doğal | C-içeren | Biojenik | Organik kolloidler | Hümitik, fulvik asit |
| | | | Organizmalar | Virüsler |
| | | Geojenik | Kurum | Fullerenler |
| | | Atmosferik | Aerosoller | Organik asitler |
| | | Pirojenik | Kurum | CNT |
| | | | | Fullerenler |
| | | | | Nanoküreler, soğan-şekilli nanoküreler |
| | İnorganik | Biyojenik | Oksitler | Magnetit |
| | | | Metaller | Ag, Au |
| | | Geojenik | Oksitler | Fe-oksitler |
| | | | Kil | Allofan |
| | | Atmosferik | Aerosoller | Deniz Tuzu |
| Antropojenik (üretmiş, işlenmiş) | C-içeren | Yan ürün | Yanma ürünleri | CNT |
| | | | | Nanoküreler, soğan-şekilli nanoküreler |
| | | İşlenmiş | Kurum | Karbon Black |
| | | | | Fullerenler |
| | | | | İşlevsel CNT, fullerenler |
| | | | Polimerik NP | Polietilenglikol (PEG) NP |
| | İnorganik | Yan ürün | Yanma yan ürünü | Platin grubu metaller |
| | | İşlenmiş | Okside Metaller | TiO ₂ , SiO ₂ Ag, Fe |
| | | | Tuzlar | Metal-fosfatlar |
| | | | Alimünyum silikatlar | Zeolitler, kil, seramik |

1.3. Nanopartiküllerin Uygulama Alanları

Günümüzde nanoteknolojik gelişmeler oldukça popüler olup, bilimsel araştırmalar için yeni bir alan oluşturmaktadır. Nanoteknolojik uygulamaların artışıyla birlikte NM'ler, pek çok tüketici ürünü için kullanılmaya başlanmıştır (Rizwan vd. 2016). NP'ler, yüksek yüzey-hacim oranı ile ilişkili eşsiz özellikleri sebebiyle önem taşımakta olup; katalizörler, ilaç sanayi, optik materyaller, sensörler ve enerji depolama-aktarma başta olmak üzere birçok uygulama alanına sahiptirler

(Thiruvengadam vd. 2014). NP'lerin fonksiyonları ve kullanım alanları NP'lerin boyutuna ve bileşimine göre farklılık göstermektedir (Moon vd, 2014). Gümüş nanopartikülleri (AgNP) ev aletlerinde (Lin vd. 2007), platinyum nanopartikülleri (PtNP) endüstride ve biyomedikal uygulamalarda (Xiang vd. 2015), altın nanopartikülleri (AuNP) sensör alanındaki çalışmalarda (Wu vd. 2014) kullanılabilir.

NP'ler; güç, elektrik ve optik gibi fizikokimyasal özelliklere sahip küçük boyutlu (100 nm'den az) ve geniş yüzey alanları ile karakterize edilirler. NP'ler işlenmiş veya tesadüfen nanopartiküller halinde ya da doğal ve insani kaynaklardan elde edilebilir. Tasarlanmış nanopartiküllerin (ENP) bileşimi, boyutu ve morfolojisi; onların elektronik, biyomedikal, ilaç, kozmetik, enerji, çevre, kataliz ve malzeme bilimi gibi alanlarda kullanılmasını sağlar. Nanoteknoloji daha ileri üretim için yenilikçi ve bilimsel bir büyüme alanı olduğundan, NP'lere ve etkilerine ilişkin özellikle insan/hayvan sağlığı ve bitki verimi konularında daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır. Yani; gelişmekte olan kirleticiler olarak NP'ler çevre sağlığı üzerine etkileri yeni araştırma alanları oluşturmaktadır (El-Temsah vd. 2012).

NP'lerin bitki çeşitleri üzerindeki etkisi; NP'lerin ve bitki çeşitlerinin bileşimine, konsantrasyonuna, büyüklüğüne ve önemli fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır. NP'ler çeşitli bağlanma yolları ile hücre içerisine girebilirler. Bu bağlanma yollarından başlıcaları; akuaporinler aracılığıyla proteinlere bağlanma, endositoz ile yeni porlar oluşturma ve çevresel ortamda organik kimyasallara bağlanma şeklindedir. NP'ler, membran taşıyıcılar veya kök sızıntı sıvıları ile kompleks oluşturabilir. Bu komplekslerle de bitki içerisine taşınabilirler. Hücre içine giren NP'ler apoplastik veya simplastik olarak bir hücreden diğerine plazmodezma aracılığıyla taşınabilirler. Bu taşınım sırasında NP'lerin yüzey özellikleri önem kazanmaktadır. NP'lerin destekleyici ve engelleyici etkilerinin bitki büyümesindeki etkileri araştırılmaktadır (Pérez-de-Luque vd. 2017).

1959 yılında, Amerikalı ve Nobel ödüllü bir fizikçi olan Richard Feynman, nanoteknoloji kavramını ilk kullanan kişidir. 1974 yılında Japon araştırmacı Prof. Norio Taniguchi ilk kez nanoteknoloji terimini kullanmıştır. Çalışmasında; "Nanoteknoloji esas olarak bir atom veya molekülden ayrılma veya birleşme ile yeniden oluşum işlemidir" ifadesini kullanmıştır. Daha sonra 1980'de Dr. K. Eric Drexler, nanoteknoloji kavramını araştırmış ve bu yeni alanda nano ölçekli olayların ve cihazların teknolojik önemine, özellikle teşvik edilmesi konularına dikkat

çekmiştir. 2000 yılında federal nanoteknoloji araştırma ve geliştirme çalışmaları koordine edilerek, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Nanoteknoloji Girişimi kurulmuştur (<https://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>). Nanoteknolojideki hızlı gelişmelerin diğer teknolojik alanlarda olduğu gibi insan ve ekosistem için yararları olduğu kadar önemli zararları da olabileceği konusu tartışılmaktadır (Lin vd. 2007; Gupta ve Xie, 2018). Son yıllarda nanoteknoloji alanındaki hızlı gelişmeler bu teknoloji ürünlerinin günlük yaşantımıza daha fazla oranda girmesine yol açmaktadır. Bugün itibariyle 1000'den fazla nanoteknoloji ürününün günlük kullanılan ürünler arasında yerlerini aldığı görülmektedir. Kir tutmaz bebek elbiseleri, leke tutmaz masa örtüleri, su tutmaz-ıslanmaz-kirlenmez boyalar, tıraş losyonları, güneş kremleri, hatta tanı ve tedavi amacıyla yapılan bir takım ilaç-tıbbi uygulamalar bunlardan bazılarıdır.

NP'lerin potansiyel sağlık ile ilgili ve NM'lerin çevresel risklerle ilişkisi hakkında bilimsel bilgi eksikliğinin olduğu literatürlerde bildirilmiştir (Johansson ve Boholm, 2017; Koçak ve Karasu, 2018). NP'lerin bazı Avrupa ülkelerinde ve Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'nda (EPA) yeni ortaya çıkan kirleticiler grubunda sınırlı tehdit grubuna dahil edilmesi tartışılmaktadır (Remédios vd. 2012).

Nanoteknolojide kullanılan NP'ler; American Society for Testing and Materials (ASTM)'in standart tanımlamasına göre partikül boyutları iki ya da üç boyutlu olarak 1-100 nm uzunluktaki parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Farklı özelliklerine göre farklı sınıflamalar bulunmakla birlikte basit olarak şu şekilde sınıflandırılabilir (Raliya ve Tarafdar, 2013).

1.Karbon bazlı NP'ler (fullerenler, çok duvarlı karbon nanotüpler vb.)

2.Metal bazlı NP'ler (altın kolloidler, nanokabuklar, nanoçubuklar, süperparamagnetik demiroksit nanopartiküller vb.)

3.Yarı iletken bazlı NP'ler (kuantum noktaları vb.)

Nanoteknolojinin gelişmesi ile birlikte nanokristal, nanopartikül, nanotüp gibi nano boyutlu malzemelerin üretilmesi sağlanmaktadır. Çevreye ve insan sağlığına olan etkileri ve riskleri ile ilgili çok az bilgi olmasına rağmen, tasarlanmış NP'ler çok çeşitli ticari ürünlerin bileşimine entegre edilmiş durumdadır (Lin vd. 2007; Suriyaprabha vd. 2012; Rizwan vd. 2016; Tripathi vd. 2016).

NP'lerin pek çok endüstriyel alanda sıkça kullanılmaya başlanması, nanopartikül sentezlenmesinin de önemini artırmaktadır. Mühendislik yöntemleri ile

üretilebilen NP'ler doğal yollarla da oluşabilmektedir. Hem hâlihazırda doğada bulunması hem de nanoteknolojinin gelişmesinin sonucu olarak, NP'lerin konsantrasyonlarının ortamlarda yükselmesi de muhtemeldir.

1.4. Bitkilerde Nanopartiküllerin Alınımı ve Taşınımı

Bitki yüzeyi anatomik yapıları havadaki farklı NP'lerin biriktirilmesini destekler, sürgün yüzeyleri epikütiküler yapılarla lotus (kendi kendisini temizleme) etkisini azaltır ve farklı maddelerin birikimine neden olur. Bu materyaller daha sonra kütikula, pektinler, müsilaj ve eksüdatlar gibi doğal bariyer yoluyla farklı bitki açıklıklarına girerler. Farklı taşıyıcı proteinler, akuaporinler ve iyon kanalları, hücrelere girebilmek için NP'ye yardımcı olur. Metal bazlı NP'lerin çoğu, tercihen, belirli iyon taşıyıcıları yoluyla bitkiler tarafından alınır. Bununla birlikte, bu alımın bitki türlerine özgü olup olmadığı hala net değildir. Bitki sisteminde NP'lerin girişini düzenleyen farklı anatomik bariyerler aşağıda tarif edilmiştir (Dev vd. 2018).

1.4.1. Kütikula

Kütikula, farklı türlerdeki NM'lerin bitkilere girişini sağlayan ilk koruyucu ve hidrofobik kaplamadır. Kütikula; negatif yüklü mezoforus silika NP'lerin (MSN 20 nm) (Hussain vd. 2013) ve nötr yüklü lipit bazlı sıvı kristalin NP'lerin (150-300 nm) antiklinal hücre duvarlarında biriktirildiği rapor edilen negatif yüklü bir yapıdır (Nadiminti vd. 2013). Daha büyük NP'ler kütikulasız boşluklardan içeri girerken TiO₂ gibi küçük NP'ler delikler oluşturduktan sonra kütikullara girerler (Larue vd. 2014). Kütikula; farklı salgı veya alım fonksiyonları olan trikomlar, yaprakların hücre içi gaz alanı, müsilaj kaplı kök saçakları, kök uçları, stoma ve hidatodlar hariç bitki parçalarının çoğunu kaplar. Bu açıklıklar, NP'nin epidermal hücrelere girmesine izin verir. Doğal olarak kütikula içermeyen stomaların büyük gözenek boyutu (4 µm), polar çözünenleri geçirmeyen mumsu kütikül tabakasının önemini vurgulamaktadır. Monokotil kütikülunun, lipit bazlı nanoyapılı sıvı kristalin NP'lere dikotil kütikülundan daha az geçirgen olduğu bildirilmiştir (Eichert ve Goldbach, 2008).

1.4.2. Suberin

Suberin; bitkilerin köklerinde ve tuberlerin üzerinde tek veya çok katmanlı kompleks yağ asidi maddeleridir (Schreiber, 2010). Bu yapılar; bitki köklerini

NP'lerin merkezi silindir ksilemine girmesinden korur. Böylece çözünenlerin ve suyun topraktan apoplastik akışını önler. Bununla birlikte yeni oluşmuş yan kökler korteks bölgesini kırar ve apoplastik akışını ve NP'lerin korteks yoluyla merkezi silindire korteks yoluyla ksileme girmesini sağlar (Faiyue vd. 2010).

1.4.3. Müsilaj ve Eksudatlar

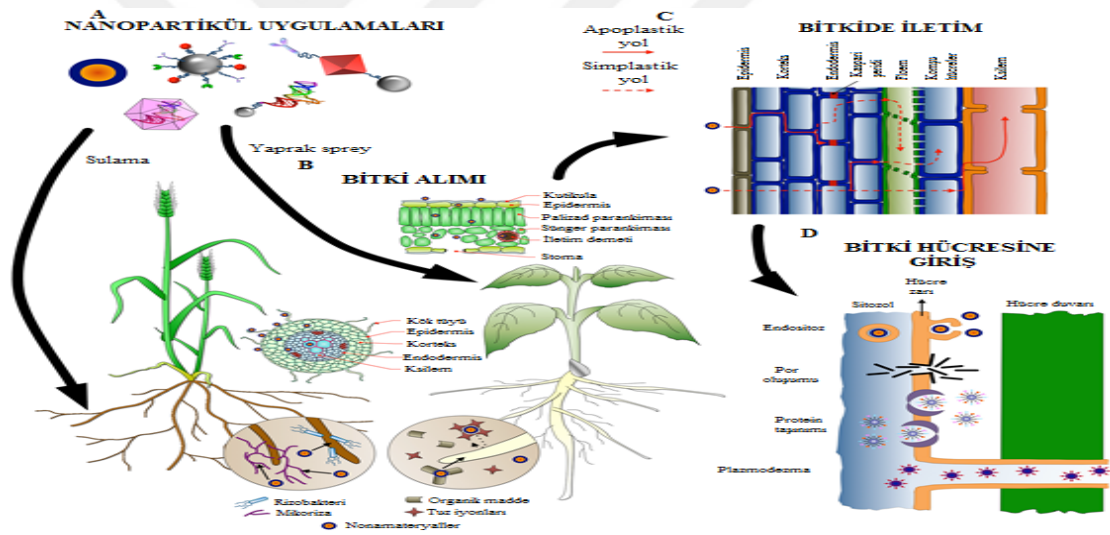
Müsilaj ve eksudatlar; bitkilerde NM'nin bariyeri olarak çalışan bitki polisakaritleri ve uzun zincirli şekerlerdir. Tohum kabuğu ve bitki kökleri müsilaj salgılar ve rizosfer içine eksude ederler (Zhang vd. 2011; Yang vd. 2012; Driouich vd. 2013). Bitkiyi strese karşı aktif olarak koruyan ve rizosferin korunmasına yardımcı olan asidik bir ortam sağlar. NP'lerin farklı tipleri asidik ortamda çözülür ve bitkiler tarafından metabolize edilirler (Taylor vd. 2014).

1.4.4. Hücre Duvarı ve Hücre Membranı

Bitki hücrelerinin selülozik hücre duvarı süreklilik göstermez ve değişik büyüklükte gözenekler içerir. Hücre duvarlarının kalınlığı bitki dokusu boyunca, palizat parankima hücrelerinde 4.5-5.2 nm iken, kök tüylerinde 3.5-3.8 nm dir (Carpita vd. 1979). Hücre duvarının gözenekliliği pH ve divalent iyon konsantrasyonundan etkilenir. <5 nm partiküllerin hasarsız hücre duvarlarından verimli bir şekilde geçtiği bildirilmiştir (Hischemoller vd. 2009).

NP'lerin bitkiler tarafından alınımı NP'nin kendi doğasıyla ilgili çeşitli faktörlerden etkilenir. Aynı zamanda bitki fizyolojisi ve NP'lerin çevre ile etkileşimi ile de etkilenir (Şekil 1.3). NP özelliklerinin bitkilerde alınımını ve hareketini büyük ölçüde etkileyeceği ifade edilmiştir. NP'nin boyutu, bitki dokularına nüfuz etmenin ana sınırlarından biri gibi görünmektedir ve bitkilerin, genellikle 40 ile 50 nm arasındaki partiküllerin hücrelerin içinde hareket etmesine ve birikmesine izin verdiği maksimum boyutlar hakkında bazı raporlar bulunmaktadır (González-Melendi vd. 2008; Corredor vd. 2009; Sabo-Attwood vd. 2012; Taylor vd. 2014). Ayrıca; NP tipi ve kimyasal bileşimi, alınımı etkileyen başka bir faktördür. Morfolojinin de bazı durumlarda belirleyici olduğu gösterilmiştir. NP yüzeyinin işlevselleştirilmesi ve kaplanması, bitki tarafından emilim ve birikme özelliklerini büyük ölçüde değiştirebilir. Bitki türleri fizyolojilerinde farklılık gösterebilir ve bu tür farklılıklar NP'lerin alınmasına ilişkin değişikliklerle sonuçlanır. Bu çalışmalar; farklı familyalara ait bitki türlerinin sırasıyla manyetik karbon kaplı, TiO₂NP'lere

veya AuNP'lere maruz bırakılmasının bitkilerin içinde farklı emilim ve birikim modelleri sunduğunu göstermiştir. Ancak, bir bitkinin NP'leri ne kadar etkili bir şekilde içselleştireceğini belirlemek için uygulama yolları da hayati önem taşır. Kökler besin maddelerinin ve suyun emiliminde, oysa yapraklar gaz değişimi için özelleşmiştir ve yaprak yüzeyinde maddelerin penetrasyonunu engelleyen bir kütikül ortaya çıkar. Fakat NP'ler çevrenin diğer bileşenleriyle etkileşir ve bitkiler tarafından asimile edilmek için özelliklerini etkileyebilir (Şekil1.3). Örneğin; toprakta bulunan humik asitler ve diğer organik maddeler gelişmiş bir stabiliteye ve dolayısıyla NM'lerin daha iyi bir biyoyararlanımına yol açabilir. Oysa tuz iyonları çökelmeyi indükleyebilir ve tersine bir etki yaratabilir. Daha da ötesi; bakteri ve mantarlar gibi diğer organizmaların varlığı, esas olarak mikorizal mantarlar da olduğu gibi bitkilerle simbiyotik ilişki kurduklarında NP'lerin bitki alımını etkilediği bildirilmiştir (Pérez-de-Luque vd. 2017).



Şekil 1.3 Bitkilerde NP'lerin emilimini, alınmasını ve taşınmasını etkileyen faktörler

(A) NP'nin özellikleri, NP'lerin bitkiye nasıl alındıklarını, yer değişimlerini ve uygulama yöntemini etkiler. (B) Toprakta NP'ler emilimini kolaylaştıracak veya engelleyecek mikroorganizmalar ve bileşiklerle etkileşime girebilir. Giriş noktasına (kökler veya yapraklar) bağlı olarak birkaç doku (epidermis, endodermis, vb.) ve bariyerler (kaspari şeridi, kütikula, vb.) vasküler dokulara ulaşmadan geçebilirler. (C) NP'ler, bitkide yukarı ve aşağı hareket edebilmek için apoplastik ve/veya simplastik yolları ve bir yoldan diğerine geçiş için radyal hareketi takip edebilir. (D) NP'lerin hücre içine alınımı için endositoz, por oluşumu, taşıyıcı proteinlerin aracılık ettiği ve plazmodezma aracılığıyla gerçekleşen çeşitli mekanizmalarla gerçekleşmektedir (Pérez-de-Luque vd. 2017).

NP'ler bitkiye girdikten sonra, dokularda hareket etmeleri için apoplast ve simplast olmak üzere iki yol vardır (Şekil 1.3). Apoplastik taşıma, plazma zarının dışında, hücre dışı boşluklar, komşu hücrelerin ve ksilemlerin hücre duvarları boyunca gerçekleşir. Simplastik taşıma ise plasmodezma olarak adlandırılan özelleşmiş yapılar ve kalburlu borulara doğru komşu hücre duvarlarının arasında su ve maddelerin hareketini içerir. Apoplastik yol, bitki dokularındaki radyal hareket için önemlidir ve NP'lerin kök kısmından daha fazla hareket için kök merkezi silindrine ve vasküler dokulara ulaşmasına izin verir (González-Melendi vd. 2008; Larue vd. 2012; Zhao vd. 2012; Sun vd. 2014). NP'ler merkezi silindirin içine girdiğinde, transpirasyon akımını takiben ksilemdeki hava boşluğuna doğru hareket edebilir (Sun vd. 2014).

Gerçekten de, bazı NP'ler kaspari şeridinde durdurulabilir ve biriktirilebilir (Sun vd. 2014; Lv vd. 2015). Bir başka önemli simplastik taşınım ise floemdeki kalburlu boru elemanları kullanılarak fotosentetik olmayan dokulara ve organlara dağılımına izin verilmesi ile mümkündür (Ramesh vd. 2016). NP'lerin bitkilerin içinde hareket etmelerinin yolu gerçekten önemlidir. Çünkü bitkinin hangi kısımlarına ulaşabileceğine, nereye gidebileceklerine ve nerede birikebileceklerine dair göstergeler verebilir. Örneğin, bazı NP'ler temel olarak floem ile değil ksilem yoluyla taşındığında, kökten gövdeye ve yapraklara hareket ederler. Bu yüzden bitkilerde iyi bir dağılım elde etmek için köklere uygulanmaları gerektiği bildirilmiştir (Pérez-de-Luque vd. 2017).

1.5. Nanopartiküllerin Hücresel Alım Mekanizması

Bitki hücrelerinde NP'lerin; pinositoz, fagositoz, klatriin-aracılıklı endositoz ve membran mikro bölgeyle ilişkili endositoz gibi iyi bilinen mekanizmaları vardır. NP'ler, klatriin veya adaptinler olarak adlandırılan vezikül oluşturan proteinlerin bir grubu yoluyla hücre zarındaki spesifik reseptörlere bağlanır (Pérez-de-Luque vd. 2017).

1.6. Bitki Büyüme ve Gelişmesi Üzerine Nanopartiküllerin Etkileri

NP'lerin bitkilerle etkileşimleri birçok morfolojik ve fizyolojik değişimlere sebep olur. NP'lerin etkileri; kimyasal kompozisyonuna, boyutuna, yüzey kaplamasına, reaktivitesine ve etkili dozlarına göre saptanır. NP'lerin bitki büyüme ve gelişimi üzerine hem pozitif hem negatif etkilerinin olduğunu bildirilmiştir. Aynı

zamanda NP'lerin kompozisyon, konsantrasyon, boyut, fiziksel ve kimyasal özellikler kadar bitki türlerine de bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. NP'lerin etkileri konsantrasyonlarına bağlıdır ve bitkiden bitkiye değişiklik gösterir (Taraftar vd. 2012; Nair vd. 2016; Rastogi vd. 2017).

Bitkilerde NP'lerin toksisitesi ile ilgili çok bilgi olmasına rağmen hangi NP'nin bitki büyüme ve gelişmesi üzerine etkili olduğuna dair az sayıda çalışma vardır. Ayrıca nanobilim, bitkilerde NP'lerin uygun eylem modunu anlamamızda bize yeni fikirler için katkıda bulunur. Bitkilerde NP'lerin fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler mekanizmasının aydınlatılması, bitkinin daha iyi büyüme ve gelişimine olanak sağlar.

Yeni gelişen ve bilimin etkileyici bir alanı olan nanoteknoloji birçok alanda ileri düzeyde araştırmaya olanak sağlar ve nanoteknolojik keşifler biyoteknoloji ve tarım alanındaki yeni uygulamalara yol açabilir. Gübreler bitkilerin büyümesi ve gelişmesi açısından çok önemli olmasına rağmen uygulanan gübrelerin çoğu fotoliz, hidroliz ve çürüme gibi filtreleme ve ayrışım gibi birçok faktör nedeniyle kullanılamaz hale getirilmektedir. Dolayısıyla gübredeki zararları en aza indirmek nanomaddelerin ve teknolojinin yardımıyla yeni uygulamalardan faydalanılması yoluyla mahsul verimini artırmak için gereklidir. ENP'ler bitki hücreleri ve yapraklarına girebilir ve aynı zamanda DNA ve kimyasalları bitki hücrelerine taşıyabilir (Siddiqui vd. 2015). Araştırmanın bu alanı bitkilerin belirli hücrelerde spesifik genlerin manipülasyonu ve ifadesi için bitki biyoteknolojisinde yeni olanaklar sunmaktadır. Araştırmacılar, kloroplast içine karbon nanotüpleri göndererek daha fazla ışık enerjisi ürününe sahip bitkileri geliştirmişlerdir ve aynı zamanda nanotüplerin bitkilerin normal sınırları içinde olmayan ultraviyole, yeşil ve yakın-kırmızı ışık gibi ışığın dalga boyunu yakalamasına izin veren yapay antenler olarak görev yaptığını bildirmişlerdir (Rico vd. 2015; Tripathi vd. 2016). ENP'ler; tohumun çimlenmesi, büyümesi ve bitkilerin gelişimini artırır (Lin vd. 2007; Arruda vd. 2015). Bununla birlikte, NP'ler üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu toksisite üzerinedir. Nispeten NP'lerin bitkiler için yararlı olduğu çalışmalar az sayıdadır. Nanoteknoloji alanındaki araştırmalar; bitkilerin genetik transformasyonu için kimyasal maddelerin, proteinlerin ve nükleotidlerin spesifik iletimini hedeflemek amacıyla yeni uygulamalarını keşfetmek için gereklidir (Ma ve Yamaji, 2015; Siddiqui vd. 2015).

NP'lerin toksik etkilerinin bitki fizyolojisindeki ana endeksleri; çimlenme yüzdesi, kök uzaması, biyokütle ve yaprak sayısıdır (Lee vd. 2010). NP'ler, tohum çimlenmesi ve bitki uzamasının engellenmesi gibi önemli olumsuz etkilere sahip olabilir ve hatta bitki ölümüne neden olabilir. Daha önceki birçok bitki nanotoksosite çalışması, NP'lere, (tek katmanlı karbon nanotüpler (MWCNT), ZnONP, AgNP ve FeNP) maruz kalmak suretiyle soya fasulyesi, mısır, buğday, çavdar ve arpa gibi bitki türlerinin inhibisyonunu belirlediği; tohum çimlenmesi, sürgün uzunluğu, biyokütle ve gen ifadesi dahil olmak üzere bitki büyümesinin çeşitli yönleri ile etkilendiği ifade edilmiştir (Yang vd. 2017). *Bacillus thuringiensis* (Bt)-transgenik pamuk bitkileri SiO₂NP'lere maruz kaldığında büyüme inhibisyonu gözlenmiştir (Le vd. 2014).

Fotosentezin, ışığı kimyasal enerjiye çeviren ve bitkiler için önemli bir süreç olduğunu biliyoruz. Bitkiler büyüme evresinde mevcut enerjinin sadece % 2-4'ünü dönüştürür. Günümüzde bilim adamları, teknikleri ve gen manipülasyonlarını düzenleyerek vasküler bitkilerin bu düşük verimliliğini artırmaya çalışmaktadırlar. Bilim adamları, bitki fotosentezi ve turbo şarjlı ürünlerin hızlandırılması ve CO₂'nin biyolojik bileşiklere dahil edilmesini katalize etmek için fotosentez işleminde önemli bir enzim olan Rubisco ile çalışmaktadırlar (Kirschbaum, 2011).

Son zamanlarda Lin vd. (2014), tütün bitkisinde karbon-sabitleme için Rubisco genini iki siyanobakterium *Synechococcus* uzama genleri ile değiştirerek yeni tütün bitkileri geliştirmişlerdir. Bu yeni tasarlanmış bitkilerin, doğal bitkilerden daha fazla fotosentez verimliliğine sahip olduğu bildirilmiştir. Ayrıca; nanobiyoteknoloji alanında, araştırmacılar daha iyi fotosentez etkinliğine ve biyokimyasal algılaya sahip olabilecek biyonik bitkiler geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Giraldo vd. (2014), izole edilmiş kloroplasta gömülü tek katmanlı karbon nanotüplerin (SWCNT) kontrollere göre üç kat daha yüksek fotosentez aktivitesi gösterdiğini, artırılmış maksimum elektron taşıma oranlarını artırdığını ve SWCNT'lerin bitkilerin bir sinyal molekülü olan nitrik oksidi (NO⁻) algılamasını sağladığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar, düzenlenmiş bitkilere nanobiyonik yaklaşımın, fotosentetik organellerde yeni ve gelişmiş fonksiyonel özellikler sağlayacağını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca; CNT'lerin şekerler ve glikoz gibi fotosentez ürünlerine olan etkisini görmek için hala kapsamlı bir araştırmaya ihtiyaç

duyulduğunu da ifade etmişlerdir. Ayrıca Noji vd. (2011), nano mezo-gözenekli silika bileşiminin, fotosistem II (PSII) ile bağlandığını ve fotosentetik oksijenle gelişen reaksiyonun kararlı aktivitesini indüklediğini bildirmiş ve bu durumun, sudan kinon moleküllerine ışığa dayalı elektron taşınmasını gösterdiği ve PSII-mezo-gözenekli silika bileşiminin fotosensörler ve yapay fotosentetik sistem için geliştirilecek özelliklere sahip olabileceğini de rapor etmişlerdir. SiO₂NP, fotosentetik pigmentlerin sentezini ve karbonik anhidraz aktivitesini artırarak fotosentez oranını artırdığı bildirilmiştir (Xie vd. 2012; Siddiqui vd. 2014). Fotosentezi artırabilen, karbonik anhidraz Rubisco'ya CO₂ sağlar (Siddiqui vd. 2012). Nano-anataz TiO₂, fotokataliz bir özelliğe ve ışık emiciliğine sahiptir ve ışık enerjisinden elektrik ve kimyasal enerjiye dönüşümü sağlar. Ayrıca karbon dioksit asimilasyonuna neden olur. TiO₂NP'ler uzun süreli ışıklandırmada kloroplastı yaşlanmadan korur. Nano-anataz TiO₂ Rubisco'yu aktive ederek fotosentetik karbon asimilasyonunu artırır ve böylece bitkilerin büyümesini artırır (Gao vd. 2006).

Son yıllarda, NP'lerin bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkisini analiz etmek ve tanımlamak için çok sayıda çalışma yapılmıştır ve bunların birçoğu tahıl bitkilerinde çalışılarak incelenmiştir (Zuverza-Mena vd. 2016; Du vd. 2016). Arpa, mısır, pirinç, soya fasulyesi, şalgam, domates ve tütün bitkilerine SWCNH'ler ile uygulama yapılması, bu tür NP'lerin tohum çimlenmesini hızlandığını göstermiştir. Dahası, SWCNH'lere yanıt olarak tütün bitkisi hücrelerinde büyümenin arttığı ve genetik seviyedeki analizler ile de SWCNH'lerin hücrelerin stres koşullarına karşı hücrel ve metabolik yanıtlarda yer alan bir dizi domates geninin ekspresyonunu etkileyebildiği de rapor edilmiştir (Lahiani vd. 2015). Farklı boyutlarda ve konsantrasyonlarda AgNP ile muamele edilmiş olan yasemin pirinci, NP'lerin büyüklüğü ile fide büyümesindeki azalma arasında pozitif bir korelasyon gösterdiğide bildirilmiştir. Ayrıca, AgNP'lerin birikimlerinin, daha küçük AgNP'lerle (~20 nm) muamele edilmiş olan pirinç bitki dokularında daha yüksek olduğu ve NP'lerin yapraklara translokasyon yapmak yerine köklerinde tutulduğu rapor edilmiştir (Milewska-Hendel vd. 2016).

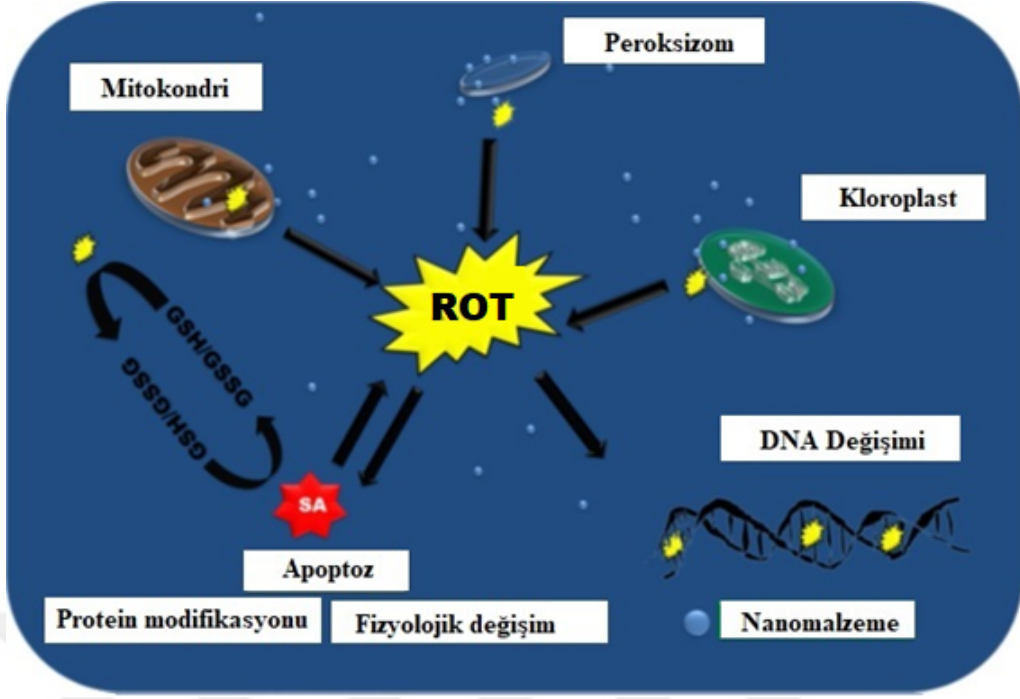
1.7. Bitkiler ve Nanopartikül Etkileşimleri

NP'ler farklı bitkiler ile fiziksel veya kimyasal temas yoluyla etkileşir. Bu etkileşimler, bitkilerde, örneğin reaktif oksijen türlerine (ROT) zararlı olabilecek bazı bilinmeyen yeni moleküllerin oluşumuna yol açan kimyasal ve fiziksel sinyalleşmeye neden olur. ROT'ların, hücre zarındaki iyon aktarımında oksidatif hasarı ve lipit peroksidasyonunu indüklediği bilinmektedir. NP'lerin karakteristik özellikleri, bitki türleri ve çevresel faktörler NP'lerin ve bitkilerin etkileşimini belirleyen temel faktörlerdir. NP'nin ilk temas noktasının bitkilerdeki gidişatına nasıl karar verileceği hala iyi belirlenememiştir. Bununla birlikte, çeşitli çalışmalarla partikül işleyişini geliştirebilecek birkaç yol vardır. Doğrudan uygulama, kazayla serbest bırakma, kirlenmiş toprak/sedimanlar ve atmosferik atıklar giriş yolunu belirleyen iyi bilinen kanallardır. NP'lerin bitkiye kök sistemi tarafından ksileme girişi korteks ve perisikl aracılığıyla gerçekleşir. Bazı anahtar bileşenler çeşitli kontrol noktalarından parçacıkların girişini düzenler. İlk kontrol noktası, hücre duvarıdır yapısal bir elek olarak çalışır sadece gözenek boyutlu uyumlu NP'lerin girişine izin verir. Sadece bu NP'ler hücre duvarını etkili bir şekilde geçebilir ve hücre duvarı gözenek büyüklüğünü tamamlayan plazma zarına ulaşabilir. Küçük NP'ler hızlıca kök sistemi yoluyla bitki hücrelerine girebilir ve daha büyük NP'ler çiçek stıgması, hidatodlar ve stoma gibi büyük açıklıklardan girebilir. Daha büyük NP'ler hücreye daha zor girer. Bu nedenle, hücre metabolik aktivitesindeki değişim ortaya çıkmaz. Bitki hücrelerine girdikten sonra, metal bazlı NP'ler reaktif metal iyonları ve farklı fonksiyonel protein gruplarıyla reaksiyona girer ve biyokimyasal aktiviteyi değiştirir. Bu NP'lerin geniş yüzey alanı, kloroz ve solgunluk içeren dolaylı toksisite semptomları ile besin maddesi veya topraktan farklı molekülleri ve inorganik iyonları kolayca adsorbe eder. NP'ler ve bitkilerin reaksiyonu bitkilerde NP'lerin alınmasını ve birikimini belirler ve farklı trofik düzeylere aktarır (Dev vd. 2018).

1.8. Nanopartikül Toksisitesine Bitki Cevabı

Farklı kompozisyon, büyüklük ve konsantrasyona sahip NP'lerin fiziksel/kimyasal özelliklere sahip olması, çeşitli bitki türlerinin hem olumlu hem de olumsuz etkileri ile büyümesini ve gelişimini etkilediği rapor edilmiştir. Bitkiler ROT'un üretimi yoluyla ağır metallere ve NP'lerin aracılık ettiği streslere tepki verir. Bitkiler, detoksifikasyon mekanizmasının bir yan ürünü olarak bu farklı tipteki

ROT'ları üretir. Bitkiler strese maruz kaldığında, ROT üretimi önemli ölçüde artar. Bu da oksidatif hasara ve hücre ölümüne neden olur. Bu oksidatif stres, doğrudan ROT aktivitesi, lipid peroksidasyonu ve elektrolit sızıntısı ölçülerek belirlenebilir. ROT oluşumu ve oksidatif hasar, toksisitenin cevabıdır, ancak NP'lerin aracılık ettiği ROT oluşumu ve bitkilerde membran hasarı hakkında çok az şey bilinmektedir (Dev vd. 2018). ROT; mitokondri, kloroplast ve peroksizomlar gibi organellerde metabolik yolların yan ürünlerinden biridir. Bitkiler bu molekülleri nötralize etmek için bir mekanizmaya sahiptir, ancak hücre içindeki aşırı üretim ve birikim hücre ölümüne yol açar (Şekil 1.4). Farklı enzimler (oksidoredüktazlar, katalazlar, vb.) ve hormonlar (salisilikasit ve absisikasit) bu nötralizasyon reaksiyonunun kilit aktörleridir. Reaksiyon nötralize edilmezse, oksidatif hasara yol açacaktır. Bu oksidatif hasar, aniden aşırı miktarda ROT üreten ve hücre hasarıyla sonuçlanan bazı abiyotik streslere veya biyotik streslere bağlı olabilir. Bu ROT türleri, hidrojen peroksit (H_2O_2), hidroksil radikali (HO^*), süperoksit (O_2^-) ve singlet oksijen (1O_2) içerir (Mourato vd. 2012). Katalaz (CAT), askorbat peroksidaz (APX), dehidro askorbat redüktaz (DHAR), süperoksit dismutaz (SOD), glutatyon peroksidaz (GPOX), glutatyon redüktaz (GR) ve tiyoller (GSSG veya GSH) gibi düşük moleküler ağırlıklı antioksidanlar ve askorbat, oksidatif hasarı en aza indirmeye ve yüksek toksik ROT türlerini nötralize etmeye yardımcı olur. Bu türler arasında, ağırlıklı olarak H_2O_2 epidermal hücrede, parankima dokusunda ve yaprak demet kını hücrelerinde oluşur.



Şekil 1.4 Bitkilerin çeşitli fizyolojik mekanizmalarını etkileyen ve nanotoksisteye etki eden nanopartiküllerin farklı özellikleri (Dev vd. 2018).

Ayrıca Fe^{+2} ve Cu^{+2} fenton reaksiyonunu başlatır ve herhangi bir şekilde detoksifiye edilemeyen yüksek oranda ROT (hROT) ve hidrosil radikali (HO^*) oluşturur. Bu ROT, hücre zarında ve nükleer bileşende geri dönüşümsüz hasara neden olur. Metal bazlı NP'ler agresif bir şekilde hROT üretirler, ancak bu molekülü dolaylı olarak izlemek için hidrojen peroksit seviyeleri ölçülmekle birlikte, HO^* miktarını ölçmek için bilinen herhangi bir ölçüm yoktur.

1.9. Yüzey Özelliklerinin Etkisi

NP'nin yüzey özellikleri, bitki sistemindeki farklı bariyerler boyunca translokasyonu şaşırtıcı bir şekilde etkiler. Fullerollerin ($C_{60}(OH)_{20}$) son derece hidrofilik yapısı, *Allium cepa*'nın hücre duvarları boyunca geçirgenliği desteklediği bildirilmiştir. Fullerol bitkilere aktarılır ve hücre duvarı ile plazma zarı arasında birikme eğilimi gösterirken, doğal olarak oluşan organik madde çözülmüş hidrofobik fulleren C_{70} , hücre duvarının gözeneklerini tıkayarak bitkiler tarafından neredeyse hiç alınmaz. Kabak fidelerine enjekte edilen karbon kaplı manyetik NP'lerin, uygulama alanından kök parankima dokusuna ve ksileme taşındığı rapor edilmiştir. Yapraklar üzerine püskürtüldüğünde NP'ler, düşük verimli translokasyon ile petiyolün epidermal hücrelerinin içinde ortaya çıktığı da bildirilmiştir (Dev vd. 2018).

1.10. Nanopartiküllerin Boyut ve Konsantrasyonunun Etkisi

NP translokasyon ve birikimi NP'nin büyüklüğü ve konsantrasyonuna bağlı bir süreçtir. Mısır bitkilerinde bozulmamış apeksleri ve kesilen köklerde, TiO₂NP (30 nm)'nin translokasyonu gerçekleşmemiş ve araştırmacılar bunun hücre duvarı gözenek çapına (6.6 nm) kıyasla büyük boyutlu NP'ler nedeniyle olabildiğini açıklamışlardır. Hücreden hücreye translokasyonu, komşu hücreler arasındaki plazmodezma boyutunun sınırına bağlı olarak, ~3 nm boyutunda olan yeşil floresan protein (GFP) (27 kDa), hücreler boyunca hareket eder. Daha yüksek konsantrasyon, kümelenmeye neden olur. Bu nedenle farklı konsantrasyon aralığında (500-4000 mg/L) ZnONP'leri ile muamele edilmiş soya fasulyesi tohumlarında 500 mg/L'de, yüksek konsantrasyonlara (1000-4000 mg/L) kıyasla daha yüksek bir artış göstermiştir. Aglomerasyon, hücre duvarları gözeneklerinden geçişi zorlaştırır ve alımı azaltır (Dev vd. 2018).

1.11. Silisyum Dioksit Nanopartikülleri

Silikon (Si) bitki büyümesi ve gelişimi için önemli bir elementtir. Si'nin artan mevcudiyeti bitki büyüme oranını artırabilir ve birçok ürün için yarı-temel bir elementtir (Ma vd. 2001). Bitkilerde her yerde bulunması büyüme, üreme ve gelişme ile ilgili olarak, dikkate değer zararlı etkiler veya düzensizlikler yoksa bir element yarı-temel olarak tanımlanır. Bitkiler, fizyolojik pH'da kök plazma membranını geçebilen monomerik, nötrleştirilmiş ortosilikik asit molekülü (H₄SiO₄) formunda Si'yi alır. Dikotillerin ksilem özsuyundaki silikon konsantrasyonu, dış silikon konsantrasyonundan bağımsız olarak dışarıdan gelen çözeltilerinkinden daha düşüktür. Si, farklı bitkilerde biyotik ve abiyotik stresin zararlı etkilerini azaltmada bir role sahiptir. Bu yararlı etkiler temel olarak doku yüzeyindeki yüksek Si birikimine bağlanabilir, böylece bitkilerin antioksidan aktivitelerini artırır ve ağır metaller gibi toprak kirleticilerinin emilimini azaltır. Ayrıca Si uygulamasının tuz toleransını da artırdığı, apoplastta sodyum iyonlarının yoğunlaştırılması ve tuz işlemine tabi tutulmuş bitkilerde fotosentetik parametreler, klorofil içeriği ve yaprak alanının artırılması yoluyla birçok bitkide büyümeyi önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir (Mozafariyan vd. 2016; Soundararajan vd. 2017; Farhangi-Abriz ve Torabian, 2018). Bitkilerde silikon içeriğinin, % 0.1 ile % 10 arasında değiştiği ve bunun farklı silikon alım mekanizmalarına bağlı olduğu ifade edilmektedir.

Bitkilerde çözülmüş silikonun monosilik asit şeklinde absorbe edildiği ve bazı metaloid birikme kapasitesine sahip bitkilerde, farklı silikon taşıyıcı genlerin (LSi1, LSi2 ve LSi6 gibi) taşınmasında yardımcı olduğu bildirilmiştir (Rao ve Susmitha, 2017).

Rastogi vd. (2019) nanoteknolojinin; tıp, eczacılık, elektronik ve tarım gibi çeşitli alanlarda yol açıcı ve umut verici bir disiplinler arası araştırma konusu olduğunu ve biyomoleküllerin silikon nanopartikül (Si-NP) aracılı hedeflemesinin, çeşitli biyotik ve abiyotik faktörlere dirençli yeni çeşitler geliştirmek için faydalı olacağını bildirmişlerdir. Bu NP'lerin; doğaya zarar vermeden çeşitli kimyasal gübreler yerine yeşil ve çevre dostu alternatifler sağlayabileceğini, bu nedenle Si-NP'lerin yabancı otlar, patojenite, kuraklık, ürün verimi ve üretkenlik ile ilgili birçok tarımsal sorunlara somut çözümleri olabileceğini rapor etmişlerdir.

Bitkilerin NP'lere tepkisi ise NP büyüklüğü, şekli, uygulama yöntemi, kimyasal ve fiziksel özellikleri gibi çeşitli faktörlere dayanır (Rastogi vd. 2017). Son çalışmalar; Si-NP'lerin bitkilerle doğrudan etkileşime girebildiklerini ve bitkilere yapısal renklerin eklenmesi de dahil olmak üzere çeşitli şekillerde morfoloji ve fizyolojilerini etkileyebileceğini ve bitki büyümesinin ve veriminin iyileştirilmesine yardımcı olduğunu göstermiştir (Suriyaprabha vd. 2014; Siddiqui ve Al-Whaibi, 2014). Bazı çalışmalar Si-NP'lerin bitkiler üzerindeki olumsuz etkilerini de göstermiştir (Slomberg ve Schoenfisch 2012; Le vd. 2014). Nano ölçekli Si-NP'lerinin benzersiz fizikokimyasal özellikleri, tarım sektöründeki ümit verici uygulamalar da dahil olmak üzere farklı sektörlerde yararlı uygulamalara sahiptir. Si-NP'lerin benzersiz özellikleri, biyotik ve/veya abiyotik stres nedeniyle oluşabilecek tarımsal zararlarla başa çıkmalarını sağlar. Si-NP'lerin tarımda uygulanmasının, yüksek verimli ve iyileştirilmiş çeşitlerin geliştirilmesine yardımcı olarak küresel gıda güvenliğine de yol açabileceği belirtilmiştir (Rastogi vd. 2019).

Bu çalışma kapsamında ekonomik bir bitki olan ayçiçeği bitkisine farklı boyut ve konsantrasyonda Nano-SiO₂ uygulamasının fizyolojik ve biyokimyasal etkileri araştırılmıştır. Ayçiçeği bitkisi yaprak dokusunda OSİ, klorofil miktar tayini, kök ve yaprak dokularında toplam protein içeriği, SOD, CAT, APX enzim aktiviteleri, MDA içeriği, Si miktar tayini, SEM ve AFM analizleri yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan çalışmalarda, stres koşullarında bitki büyüme ve gelişimi üzerinde silikonun düzenleyici etkisi olduğu bildirilmiştir. Bitkilerin pek çok strese maruz kaldığı ve silisyumun bitki sağlığında önemli rol oynadığı rapor edilmiştir (Siddiqui ve Al-Whaibi, 2014; Rastogi vd. 2019). Si'nin bitkilerde en önemli rolü hücre duvarında silika olarak birikerek hücre duvarını güçlendirmesidir. Silika cisimcikleri fitolit veya bitki opali olarak adlandırılır. Silikonun çeşitli bitkilerde büyüme ve verim, biyotik ve abiyotik strese dayanıklılıkta etkileri bilinse de hala bitki büyüme ve gelişiminde esas besin elementi olarak yerini alamamıştır. Nano-SiO₂ fiziko mekanik bariyer olarak önemli rol oynar. Birçok bitkide özellikle monokotillerde epidermis, kök, yaprak kılıfı, vasküler dokular, gövde duvarları üzerinde birikir ve aynı zamanda bitkilerde fizyolojik aktiviteleri düzenler (Heckman, 2013; Nazaralian vd. 2017).

Abiyotik stres altında, Nano-SiO₂'nin tohum çimlenmesini artırdığı bildirilmiştir. Haghghi vd. (2012) domateste, Siddiqui vd. (2014) kabakta Nano-SiO₂'nin tuz stresinde antioksidan sistemini uyardığı ve tohum çimlenmesini artırdığını bildirmişlerdir. Eksojen uygulanan Nano-SiO₂ ve Nano-TiO₂'nin nitrat redüktazın artması ile soya fasulyesinde tohum çimlenmesini (Lu vd. 2002) ve aynı zamanda bu NP'lerin tohumların yararlı su ve besinleri absorblama yeteneğini de artırdığını rapor etmişlerdir (Zheng vd. 2005).

Nano-SiO₂'nin tuz stresi altında yaprak yaş ve kuru ağırlığını, klorofil içeriğini ve prolin birikimini artırdığı rapor edilmiştir. Prolinin birikiminde, serbest amino asitlerde, besin içeriklerinde, antioksidan enzim aktivitelerindeki artışın nano-SiO₂'den kaynaklandığını bu yüzden NP'lerin abiyotik stres altında bitkilerin toleransını artırdığı bildirilmiştir. Yapılan bir çalışmada *Larix olgensis* bitkisine dışsal nano-SiO₂ uyguladıklarında; bitkinin boyunun, kök çapının, ana kök uzunluğunun, yan köklerin gelişiminin ve klorofil sentezinin arttığını rapor etmişlerdir (Bao-shan vd. 2004).

19. yüzyılın başından beri, bitkilerde önemli konsantrasyonlarda Si bulunmuştur. Tarımda faydalarını gösteren çok sayıda literatüre rağmen, Si genellikle gerekli bir element olarak kabul edilmez. Doğal silikatlarla yapılan silikon gübrelemesi, çevresel stresleri ve topraktaki besin tüketimini azaltma potansiyeline sahiptir ve bunun bir sonucu olarak tarımda sürdürülebilirliği sağlamak için bitki

sağlığı ve NP gübrelere kapsamlı bir şekilde kullanılmasına bir alternatiftir. En önemli on üründen yedisinde Si % 1 kuru ağırlığın üzerinde olan, Si akümülatörleri olarak kabul edilir. İzotop ve genetik tekniği kullanılarak yapılan çalışmalar, bitkilerde Si'nin alınması ve transferine odaklanmıştır. H_4SiO_4 olarak çözülmüş silisyumun ve amorf silika parçacıklarının (fitolit olarak adlandırılan) çökmesinin alınımı üzerine genel bir kabul olsa da, aktif veya pasif olan bu mekanizma hala tartışma konusudur. Bitkiler biyotik ve abiyotik strese maruz kaldıklarında Si'nin yararlı etkilerinin olduğu bildirilmiştir. Si tarafından sağlanan savunma mekanizmaları anlaşılmaktan henüz uzaktır ancak kanıtlar, tek bir etkiden ziyade çoklu kombine etkileri işaret etmektedir. Monokotillerin gövdelerinde yer alan fitolitler, bitkilerin hasat edilmemesi ve Si'nin biyojeokimyasal döngüsüne katkıda bulunması halinde, çökelti yoluyla toprağa geri döneceği ifade edilmiştir. Son zamanlarda biyojeokimyasal anlayışa göre; Si döngüsü ve silikat minerallerinin ayrışma süreci, fitolitlerin Si'nin bitkilere tekrar kazandırılmasına önemli ölçüde katkıda bulunacağıdır (Guntzer vd. 2012).

Silikon, dünya kabuğunun önemli bir bileşenidir ve silikat minerallerini oluşturur. Topraklarda bu mineraller kimyasal ve fiziksel ayrışmaya maruz kalırlar, bu da çözeltide Si'nin salınmasına neden olur; bu da ya kil minerallerini oluşturmak ya da akarsulara ve okyanuslara doğru yayılan bitki örtüsü tarafından alınan diğer elementlerle birleştirilir. Bitkilerdeki Si'nin toprak gelişimi üzerindeki etkisi ilk olarak, 1 ha ormanın yaklaşık 5000 ton Si'yi çıkarabileceğini hesaplayan Lovering ve Engel tarafından gösterilmiştir ve bu 30 cm kalınlığında bir bazalt tabakasına eşdeğerdir. Çöp ayrışması sırasında, bitkilerdeki Si toprağa yeniden geçer ve toprakta önemli bir Si havuzu oluşturabilir (Lovering ve Engel, 1959).

Silikon, silisik asit $[Si(OH)_4]$ veya mono silisik asit $[H_4SiO_4]$ formunda fizyolojik pH'da kökün plazma zarını geçebilir. pH 9'un altındaki toprak çözeltisindeki silisik asit konsantrasyonu 0.1 ile 0.6 mM arasında değişmektedir. Bitki yapraklarında, Si konsantrasyonu kuru ağırlık bazında % 0.1 ile % 10 arasında değişmektedir. Silikon konsantrasyonunun bitki türleri arasında ve kendi içinde önemli ölçüde değiştiği ve türler içindeki Si konsantrasyonunun değişimi, türler arasında olduğundan daha düşük olduğu bildirilmiştir. Köklerin Si'yi alma özelliğinin, farklı bitkilerde Si birikimindeki farklılıkların nedeni olduğu

düşünülmektedir. Yüksek bitkilerde su alım ilişkisine dayanarak, Si absorpsiyonu yanal köklerde; aktif (Si-alımının su alımından daha hızlı olduğu), pasif (Si-alımının su alımına benzer olduğu) ve reddedici (Si-alımının su alımından daha yavaş olduğu) olmak üzere üç olası yolla alınır (Zargar vd. 2019).

Conley (2002), bitkilerde depolanan yıllık silika miktarının (60-200 Tmol/yıl), okyanuslardaki diatomlarda biriken Si miktarı (240 Tmol/yıl) ile aynı büyüklükte olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, bitkiler tarafından biriktirilen Si miktarı, toprak gelişiminin doğal işleyişinde ve kıtasal erezyon oranlarının kontrolünde önemli bir parametredir.

Dünyanın yüzeyi, oksijenin yanında % 27.7 oranında silikonla kaplıdır. Ancak silikon saf haliyle nadir bulunur. Silisyum; yer kabuğunda kuvars (SiO_2), kum ve kumtaşı şeklinde depolanır. Silikat cürufu, çelik cürufu, elektrikli fırın cürufu, küspe ocağı külü, linyit uçucu kül ve pirinç samanı gibi tarımsal atıklar silikon bakımından zengindir ve mahsul verimini artırmak için tarım alanlarında kullanılabilir. Fosfor üretiminin bir yan ürünü olarak elde edilen kalsiyum silikat, en yaygın kullanılan silikon gübredir. Potasyum silikat oldukça çözünürdür ve hidroponik kültürde laboratuvar deneyleri için kullanılabilir. Ticari olarak kullanılan silikon kaynakları silika jeli, kalsiyum silikat hidrat vb. dir (Hasanuzzaman vd. 2019).

Son araştırmalar, Si-NP'lerin bitkilerle doğrudan etkileşime girebildiklerini ve bitkilerde yapısal rengin oluşması da dahil olmak üzere çeşitli şekillerde morfoloji ve fizyolojilerini etkileyebileceğini ortaya koyarken bitki büyümesinin ve veriminin iyileştirilmesine yardımcı olacağını göstermiştir (Siddiqui ve Al-Whaibi 2014; Rastogi vd. 2019).

Bazı çalışmalar, Si-NP'lerin bitkiler üzerindeki olumsuz etkilerini de göstermiştir (Slomberg ve Schoenfisch 2012; Le vd. 2014). Silikon NP'lerin, absorpsiyondan sonra epidermal hücre duvarında, bitkilere yapısal renk katabilecek bir ikili film oluşturdukları bildirilmiştir. Ayrıca Si-NP'lerin mantari, bakteriyel ve nematodal enfeksiyonları önlemek için bir ajan olarak etki edebileceği ve hastalık direncini artırabilecek bir güçlendirici malzeme olarak işlev görebileceği de ifade edilmiştir. Ayrıca bir nano-silikon katmanın bitki terlemesini azalttığı dolayısıyla

bitkileri kuraklığa, yüksek sıcaklığa ve neme daha dayanıklı hale getirdiğini de bildirilmiştir (Strout vd. 2013; Rastogi vd. 2019). Çalışmaların çoğunda, Si-NP'lerin, bitki büyümesine olumlu yönde veya etkisinin olmadığı (Bao-shan vd. 2004; Siddiqui ve Al-Whaibi 2014; Suriyaprabha vd. 2014), birkaç çalışmada ise Si-NP'lerin bitkileri olumsuz yönde etkilediği bildirilmiştir (Slomberg ve Schoenfisch 2012; Le vd. 2014).

Enzimatik/enzimatik olmayan antioksidanlar, ROT'un direkt olarak (katalazlar ve peroksidazlar) ya da hücrelerde iki ana redoks molekülünün (askorbat ve glutatyon) rejenerasyonu yoluyla dolaylı olarak uzaklaştırılmasında rol oynamaktadır. Bu antioksidanların birikimi, bitkilerde yüksek düzeyde stres oluşturduğunu göstermektedir. Bu, bitkinin yüksek miktarda antioksidan/enzim üreterek kendini ROT'tan koruduğu varsayılabilir. Rouhier ve Jacquot (2008), abiyotik stres koşullarında ekinlerde Si uygulamasının ROT oluşumunu düzenleyebileceğini bildirmişlerdir.

Kim vd. (2014)'nin *Oryza sativa* bitkisinde kısa süreli (6, 12 ve 24 saat) silikon (0.5, 1.0 ve 2.0 mM) uygulamalarının tuzluluk (NaCl) ile indüklenen absisik asit (ABA), jasmonik asit (JA), salisilik asit (SA) ve antioksidan etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, Si uygulamalarının, tuz stresi altındaki pirinç bitkilerinde kontrole göre, büyümenin önemli ölçüde arttığını rapor etmişlerdir. Si uygulamalarının, tuz stresi altında kontrol bitkilerine kıyasla, düşük elektrolitik sızıntı ve lipid peroksidasyonu ile sonuçlanan sodyum birikimini azalttığını ve enzimatik antioksidan (katalaz, peroksidaz ve polifenol oksidaz) yanıtlarının da kontrol grubu bitkilerinde tuz stresi altında Si uygulanan bitkilerden daha belirgin olduğunu bildirmişlerdir. JA gibi stres ve savunma ile ilişkili fitohormonların, kontrol grubuna kıyasla tuz stresi altında kısa süreli Si uygulamalarından sonra, belirgin olarak aşağı regüle edildiği ve SA'nın düzensiz olduğu belirlenirken, ABA'nın 6 ve 12 saat sonra anlamlı derecede daha yüksek, ancak tuz stresi altında Si uygulanan bitkilerde kontrol grubuna göre, 24 saat sonra önemsiz bir artış gösterdiği de rapor edilmiştir. Araştırmacılar bulgularının Si konsantrasyonlarının daha uzun süreler için artırılmasının, fitohormonal ve enzimatik antioksidanların tepkilerini modüle ederek tuzluluğun neden olduğu stresi düzenleyebileceğini ifade etmişlerdir.

Torabi vd. (2015)'nin yaptığı bir çalışmada, tuz stresi altında *Borago officinalis* L. bitkisine eksojen uygulanan Si (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 mM)'nin etkileri araştırılmıştır. Tuz stresi, taze ve kuru ağırlığı, protein içeriğini ve katalaz aktivitesini azaltmıştır. Aksine, tuz stresi altındaki bitkilerde prolin, glisin betain, MDA, SOD ve APX aktivitesi artmıştır. Sadece tuz uygulanan bitkilerle kıyaslandığında, Si uygulamasının, özellikle 1.5 mM konsantrasyonunda fizyolojik ve biyokimyasal parametrelerde bir iyileşme sağladığını bildirmişlerdir.

Shekari vd. (2015)'nin Apiaceae familyasından tek yıllık bir bitki olan *Anethum graveolens* L. ile yaptıkları bir çalışmada, kök ortamına NaCl (0 ve 10 ds/m) ve besin olarak da sodyum silikat (0 ve 1.5 mM) ve selenat (0.5 µM) uygulamışlardır. İlave edilen Si veya selenyumun, tuzluluğun bitki kuru maddesi ve klorofil içeriği üzerindeki olumsuz etkilerini iyileştirdiği, Si veya selenyum uygulamasının Na⁺ konsantrasyonunu düşürdüğü, bitkinin köklerinde ve sürgünlerinde K⁺ konsantrasyonunu artırdığı rapor edilmiştir. Tuz stresinin oksidatif stresi etkilediği ve MDA konsantrasyonunu artırdığı da bildirilmiştir. Tuzlu koşullar altında Si/Se ilavesi, tek başına tuza maruz kalan bitkilerle karşılaştırıldığında, tuz stresi altındaki bitkilerde SOD ve CAT aktivitelerini önemli ölçüde arttırdığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar, tuz stresi altındaki bitkilere Si ve Se'nin uygulanmasının büyümedeki iyileşmeye etkisinin, gelişmiş iyon dengesi, antioksidan enzim aktiviteleri ve ozmotik ayarlamaya bağlı olabileceğini ve silikonun tuz stresi altında bitkilere uygulanmasının, bu bölgelerdeki mahsul verimliliğinin muhafaza edilmesi için daha iyi bir strateji olabileceğini de bildirmişlerdir.

Ma vd. (2016), kuraklık stresi altındaki buğday bitkilerinde Si'nin fotosentetik pigmentler, antioksidan içerikleri ve antioksidan savunma yolundaki birkaç genin transkripsiyonu çalışmışlardır. Si uygulaması yapılan buğday bitkisi yaprakları Si uygulaması yapılmayan buğday bitkisi yaprakları ile karşılaştırıldığında, daha yüksek klorofil içeriği ile düşük lipid peroksidasyon seviyeleri ve H₂O₂ içeriği bulunmuştur. Ayrıca Si, buğday yapraklarında askorbat (ASC), indirgenmiş glutatyon (GSH), toplam fenolik ve toplam flavonoid madde içeriğini de artırdığı, antioksidan enzim geni, dört ASC-GSH döngüsü geni ve beş flavonoid biyosentez yolağı genleri için gen ekspresyon örneklerinde çalışıldığı bildirilmiştir. Si uygulamasının kuraklık stresi altındaki buğday bitkilerinde bu

genlerin ekspirasyonunu artırdığı bildirilmiştir. Araştırmacılar, artmış gen ekspresyonu seviyeleri ve düşük MDA ve H₂O₂ içeriklerinin, Si'nin kuraklığa tepki olarak çoklu antioksidan savunmaların koordineli transkripsiyonel regülasyonunda önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Geng vd. (2018) yaptığı çalışmada üç çeşit pirinç (*Oryza sativa* L.); T (melez pirinç çeşidi), Y (Hindistan pirinci) ve B (yapışkan pirinç) seçilmiş ve pirinç bitkileri 25°C'de 4 gün çimlenmeye bırakılmış daha sonra bitkiler hoagland kültür çözeltilisine alınmış 100 mg/L ASA, 168 mg/L sodyum silikat (Si), 100 mg/L ASA ve 168 mg/L Si (ASA+Si) uygulanarak 20 gün daha büyütülmüştür. Bu çalışma ile Si'nin ASA stresine karşı savunma mekanizmasını daha iyi anlayabilmek için, pirinç bitkisinde biyokimyasal düzeyde ASA toksisitesinin azaltılmasını etkileyip etkilemediği araştırılmıştır. Sonuçlar, ASA'nın pirinç büyümesini azalttığını, protein metabolizmasını bozduğunu, lipid peroksidasyonunu artırdığını, kontrol bitkilerine göre, antioksidan aktivitelerini düşürdüğünü, bu düşüşün sürgünlere göre köklerde daha fazla olduğunu göstermiştir. ASA stresi uygulanan pirinç bitkilerinde Si'nin eklenmesi, çözünebilir protein içerikleri kadar büyüme ve gelişmeyi de önemli ölçüde artırdığı, ancak ASA-stresli pirinç bitkilerinde MDA içeriğinin azalması neticesinde Si'nin pirinçte ASA detoksifikasyonunda kritik rollere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, artan GSH ve askorbik asit (ASA) içerikleri ile birlikte artan SOD, CAT ve POD aktivitelerine dayanarak ROT'un süpürülmesinde kısmen Si'nin rol oynadığını bildirmişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar, Si uygulamasının SOD aktivitelerini önemli ölçüde artırdığı, SOD'u aşırı serbest radikalleri uzaklaştırmak için aktif hale getirdiğini ve pirinç fidelerinde ASA toksisitesinin tetiklediği oksidatif streslere karşı savunma kapasitelerini etkili bir şekilde artırdığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada; Si, tek başına ASA uygulaması ile karşılaştırıldığında CAT aktivitelerini artırdığı ve bunun Si'nin işlevinin, CAT sentezini güçlendirdiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, bu CAT indüksiyonunu, azalan MDA içerikleriyle ve SOD aktivitelerini artırmakla uyumlu olduğunu; bu da Si ilavesinin neden olduğu daha yüksek CAT aktivitelerinin, aşırı ROT'un yanı sıra H₂O₂'yi temizlemeye ve ASA'ya maruz kalan pirinç dokularının membranını oksidatif hasara karşı koruyabileceğini ifade etmişlerdir.

Vicia faba L. bitkisinde, silikanın total protein miktarları ve bazı antioksidan enzimler üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, bitkilere 1.5 ve 3 mM nano-silika uygulanmış ve 65 günlük bitkilerin yapraklarından örnek alınmıştır. Araştırma sonucunda, 1.5 mM Si uygulamasının kontrol grubuna göre, toplam protein içeriğini önemli ölçüde artırmadığını ve nano-silikanın 1.5 ve 3 mM uygulamalarının peroksidaz aktivitesini önemli ölçüde artırdığı rapor edilmiştir. Nano-silikanın 3 mM uygulamalarında SOD ve peroksidaz aktivitesinde de önemli artışların olduğu da bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, araştırmacılar nano-silika partiküllerinin, bakladaki bazı antioksidan enzimlerin aktivitesini artırabildiği, bunun da ROT'ların neden olduğu hasarı azalttığı ve bitkinin fizyolojik süreçlerini strese karşı koruduğu sonucuna varmışlardır (Roohizadeh vd. 2015).

Nano-silikon (NSi) ve silikonun (Si), farklı seviyelerde NaCl (0, 50, 100 ve 200 mM) stresi altında yetiştirilen *Vicia faba* L. bitkileri üzerindeki iyileştirici etkilerini açıklamak için yapılan bir çalışmada, NSi ve Si'nin hücre zarı, klo-a ve klo-b, karotenoidler, karbonhidratlar, antioksidan enzimler, serbest prolin ve mineral elementlerin özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. İki hafta büyütülen bitkilere tuz stresi uygulaması yapıldıktan sonra Si (35 µm)ve NSi (40 nm) konsantrasyonları 0, 1, 2 ve 3 mM olarak foliar uygulanmıştır. Farklı NaCl konsantrasyonlarının, kontrol bitkileriyle karşılaştırıldığında, elektrolit sızıntısı (EL) ve lipid peroksidasyonunda (LP) önemli bir artışa neden olduğu ve maksimum değer 200 mM NaCl uygulamasında olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, NSi ve Si uygulanması, stresli bitkilerin kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında EL ve LP'lerinde önemli bir düşüşe neden olduğu buna karşılık, bitki yapraklarında membran stabilite indeksi, NaCl'ye maruz kaldığında azaldığı bildirilmiştir. Diğer taraftan NSi ve Si uygulamalarının, tuzla muamele edilmiş bakla bitkilerinin membran stabilite indeksini önemli ölçüde artırdığı da rapor edilmiştir. Tuz stresinin, bakla yapraklarında Klo-a, Klo-b, karotenoidler, toplam klorofil içeriği ve klo-a / klo-b oranını önemli ölçüde azalttığı ve NSi ve Si uygulamalarında ise toplam klorofil (Klo-a + Klo-b) içeriğinde artışın en fazla NSi uygulama grubunda olduğu bildirilmiştir. NSi uygulaması ile bitki yapraklarında stres uygulanmayan bitkilere göre APX, CAT ve POD aktivitesinde belirgin bir artışa neden olduğu SOD aktivitesinde ise bir azalma meydana geldiği bildirilmiştir. Araştırmacılar, tuz stresinin neden olduğu oksidatif hasarın, NSi ve Si

uygulamaları altında antioksidan enzim aktivitesindeki artışa bağlı olarak azaldığı ve bu nedenle tuz stresine karşı toleransı artırdığı ifade edilmiştir (Qados vd. 2015).

Birçok çalışmada, nano gübreleme formunda temel bir element mevcut olduğunda pozitif sonuç gösterdiği belirtilse de bu durumun tüm bitkiler için pozitif bir etki anlamına geldiği düşünülemez. Bitkilerdeki NP'lerin olumsuz reaksiyonlar gösterdiği bazı çalışmalarla rapor edilmiştir. Örneğin; daha yavaş büyüme (Colman vd. 2013), artmış oksidatif stres (Dimkpa vd. 2013), kromozomal anormallikler (Raskar vd. 2014), azalmış fotosentetik oran (Wang vd. 2016), su taşınımındaki bozukluklar ve bitkinin su durumu (Martinez-Fernandez vd. 2016), IAA gibi büyüme hormonlarının konsantrasyonunda azalma (Le vd. 2014), metabolik bozukluklar veya nekroz (Lin ve Xing, 2008), birçok genin transkripsiyonel profilinde geniş çaplı değişiklikler (Van Aken vd. 2015) veya doğal toksinlere karşı artan duyarlılık (Hu vd. 2014).

Bakteriyel solgunluk etmeni olan *Clavibacter michiganensis*'in domates bitkilerinde meydana getirdiği zarar ve ürün veriminde oluşturduğu önemli kayıplar nedeniyle dünya çapında büyük ekonomik zarara neden olmaktadır. Nanoteknolojideki gelişmeler, patojenlerin kontrolünde uygulanabilecek alternatifler sunar. Nano-bakır (CuNP) ve silikon şu anda bitki patojenlerinin kontrolü için yaygın bir kullanıma sahiptir. Her ikisinin kombine kullanımının, bitkilerin patojenlere karşı toleransı üzerine sinerjik bir etkiye sahip olduğu ve CuNP'leri ve potasyum silikat uygulamasının bu patojene karşı domates bitkisinin toleransı üzerindeki etkisini belirlemek için yapılan bir çalışmada, bakteri kaynaklı verim kaybının % 16.1 oranında azaldığı bildirilmiştir. Biyokimyasal analizler, CuNP'leri ve potasyum silikat uygulamasının, SOD, PAL, GPX ve APX enzimlerinin aktivitesini ve ayrıca yapraklardaki indirgenmiş glutatyon ve toplam fenollerin konsantrasyonunu pozitif olarak değiştirdiğini de göstermiştir. PAL ve GPX enzimlerinin aktivitesi ve ayrıca likopen ve β -karoten içeriği meyvelerde arttığı, CuNP'lerin ve potasyum silikatın ortak uygulaması, domates bitkilerinin korunmasında kilit olan enzimatik ve enzimatik olmayan bileşiklerin seviyelerini değiştirdiği ve *C. michiganensis*'e toleransı artırdığı rapor edilmiştir. Ayrıca, özellikle Si'nin, bitkilerin hem mantar hem de bakteriyel patojenlere karşı savunma ile ilgili enzimlerden, antimikrobiyal bileşiklerin üretiminin uyarılmasından, sinyal

yollarının düzenlenmesi ve savunma ile ilgili genlerin ifadesini aktive etmesinden dolayı patojenlere karşı direnci artırdığı da bildirilmiştir (Cumplido-Nájera vd. 2019).

Bir çalışmada, biyotik ve abiyotik streslerin hafifletilmesinde silikonun rolünün iyi bilindiği, bununla birlikte abiyotik stres ve ilgili mekanizmaların düzenlenmesinde Si-NP potansiyelinin henüz araştırılmadığı ifade edilmiştir. Bu nedenle, buğday bitkisinde UV-B stresinin regülasyonunda Si veya Si-NP'nin etkili olup olmadığını araştırmak için yapılan bir çalışmada; UV-B radyasyonun buğday fidelerinin büyümesi üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu, ayrıca azalmış fotosentetik performans ve canlı yaprak yapılarını değiştirdiği bildirilmiştir. UV-B stresi, lipid peroksidasyonu ve elektrolit sızıntısının eşlik ettiği süperoksit radikal ve H₂O₂ seviyelerini artırmıştır. SOD ve APX aktiviteleri UV-B stresi ile inhibe edilirken, CAT ve guaiacol peroksidaz ve enzimatik olmayan antioksidanların UV-B ile uyarıldığı bildirilmiştir. Si-NP ön uygulamasının Si uygulananlar kadar buğday bitkilerinde antioksidanları artırarak oksidatif stresi regüle ettiği ve bitkileri UV-B stresinden koruduğu rapor edilmiştir. Araştırmacılar, Si-NP'nin antioksidan savunma sisteminin NO⁻ aracılı tetiklenmesi yoluyla buğday fidelerini koruyabildiğini ve bunun sonucunda ROT'ların fotosenteze verdiği zararı dengelediğini ayrıca, Si-NP'nin UV-B stresini azaltmada Si'den daha etkili olduğu da ifade etmişlerdir (Tripathi vd. 2016).

Si'nin topraktaki ikinci en bol element olduğu ve bitkinin toplam kuru ağırlığının % 10'unu oluşturduğunu bildirilmiştir. Si'nin birikimi/taşınması yukarı yönde gerçekleştiği ve çeşitli tahıl bitkilerinde tanımlandığı, Si uygulamasının son on yılda normal ve stresli koşullarda bitki büyümesini ve gelişimini iyileştirdiği, ayrıca Si'nin eksojen uygulamasının, ROT oluşumunu düzenleyerek, elektrolitik sızıntıyı ve MDA içeriğini azaltarak, stresli koşullar altında Na gibi toksik iyonların alımını immobilize ederek ve azaltarak stres toleransını indüklediği de ifade edilmiştir. Bununla birlikte; Si ve bitki antioksidan enzim sisteminin etkileşiminin anlaşılmasının hala eksik olduğu ve stres yanıtlarının Si-aracılı düzenlemesinden sorumlu mekanizmaları anlamak için transkriptomik seviyede daha ayrıntılı analizlere ihtiyaç duyulduğunu da rapor edilmiştir (Kim vd. 2017).

Yapılan bir çalışmada; ZnONP'lerinin mısır bitkisinde kök büyümesini azalttığı belirlenmiştir (Lin vd. 2007). TiO₂NP'leri ile yapılan çalışmalarda ise nano-TiO₂'nin bitki için yararlı olduğu belirtilse de toksik etkisinin bulunduğu da rapor edilmiştir (El-Temseh vd. 2012). Yine bir çalışmada, SiO₂ ve TiO₂NP'lerinin karışımının soyanın çimlenme ve büyümesini hızlandırdığı bildirilmiştir (Brar vd. 2010).

Suriyaprabha vd. (2012); nano-SiO₂'nin mısır tohumlarında besin maddelerinin kullanılabilirliğini artırdığını ifade etmişlerdir (Suriyaprabha vd. 2012).

Farklı bir çalışmada ise *Larix olgensis* bitkisine dışsal nano-SiO₂ uygulandığında bitkinin boyunun, kök çapının, ana kök uzunluğunun, yan köklerin gelişiminin ve klorofil sentezinin arttığı bildirilmiştir (Bao-shan vd. 2004).

NP'lerin çoğunluğunun morfoanatomik, fizyolojik, biyokimyasal ve genetik yapıları değiştirerek bitkilerin verimliliğini etkileyen bazı konsantrasyonlarda toksisiteye neden oldukları bildirilmiştir (Rico vd. 2015; Tripathi vd. 2016). Yapılan bazı çalışmalarda NP'lerin oksidatif stres, lipid peroksidasyonu, protein ve bitkilerde DNA hasarına neden olan ROT üretiminden kaynaklanan fitotoksisiteye neden olduğu gösterilmiştir (Arruda vd. 2015; Ma vd. 2015).

Eksojen uygulanan nano-SiO₂ ve nano-TiO₂ nitrat redüktaz enziminin aktivitesinin artması ile soya fasulyesinde tohum çimlenmesinin artırdığı ve aynı zamanda bu NP'lerin tohumlarda yararlı su ve besinlerin absorblama yeteneğini de artırdığı ifade edilmiştir (Zheng vd. 2005).

Bir çalışmada ise dört tuz seviyesinin (0.46, 2, 4 ve 8 dS m⁻¹), iki tuz bileşiminin (NaCl ve dört-tuz kombinasyonu) ve silisik asit (H₄SiO₄) olarak dört Si oranının (8, 100, 200 ve 300 mg/kg toprak) etkileri pirinç (*Oryza sativa* L. var. Hashemi) bitkisinde büyüme özellikleri ve SOD aktivitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Tuz bileşimi, 4: 2: 2: 1 mol oranında NaCl, Na₂SO₄, CaCl₂ ve MgSO₄ içermektedir. Toprağın tuzluluk seviyesinin artırılması kuru maddeyi (yaklaşık % 40), sürgün sayısını (yaklaşık % 12), yaprak alanını (yaklaşık % 55), yaprak klorofil konsantrasyonlarını (yaklaşık % 45) ve Si'yi (yaklaşık % 40) önemli ölçüde azalttığı, prolin konsantrasyonunda (% 200'den fazla) ve SOD enzim aktivitesinde (% 65'e

kadar) ise ciddi bir artışa neden olduğu bildirilmiştir. Tuzluluğun pirinç büyüme özellikleri üzerindeki baskılayıcı etkisinin Si uygulaması ile hafifletilebileceği ve pirinç bitkilerinin tuzdan etkilenen topraklarda yetiştirileceği zaman bitkilere yeterli Si verilmesi önerilmiştir (Saleh vd. 2018).

ZnONP'lerinin *Cyamopsis tetragonoloba* bitkisinin biyokütlesini, gövde ve kök büyümesini, kök alanı, klorofil ve protein sentezini, rizosferik mikrobiyal popülasyonu, asit fosfataz, alkalın fosfataz ve fitaz aktivitesini önemli derecede artırdığını bildirilmiştir (Raliya ve Tarafdar, 2013). NP'lerin çimlenme üzerine etkisinin ise NP'lerin yoğunluğuna bağlı olduğu ve bitkiden bitkiye değişiklik gösterdiği rapor edilmiştir (Lu vd. 2002; Haghighi vd. 2012; Siddiqui vd. 2014).

NP'lerin birikiminden sonra tohumların çimlenme oranını ve bitkilerin ürün kalitesini düşürdüğü, taze ve kuru biyokütle miktarını ve kök ve sürgünlerin uzunluğunu azalttığı, fotosentez işlevini değiştirdiği, DNA hasarı ve lipid peroksidasyonunu artırdığı, transpirasyon oranını düşürdüğü, çeşitli strese bağlı genlerde artma ve azalmalara sebep olduğu ve son olarak da apoptoza neden olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte, bitkiler doğal olarak NP'ler de dahil olmak üzere stres koşullarının neden olduğu toksisitenin üstesinden gelmek için bazı savunma stratejilerine sahiptirler. Bitkiler strese karşı çeşitli enzimatik ve enzimatik olmayan savunma sistemlerini aktive edebilirler. Ancak, stres faktörlerinin ötesinde içsel detoksifikasyon mekanizmasının toksisitenin üstesinden gelemediği ve nihayetinde bitki hücrelerinde apoptoz aktivitesine neden olduğu bildirilmiştir. Her çeşit NP'nin artan üretimi göz önüne alındığında, çevredeki salınım potansiyeli ve ardından ekosistem üzerindeki etkileri, özellikle düzenleyici kurumlar tarafından ele alınması gerektiği ifade edilmektedir (Hossain vd. 2016).

Gümüş, titanyum, silikon ve çinko gibi NP'lere maruz kalmanın, fasulye ve mısırdaki protein seviyelerini ve besin içeriğini değiştirdiği bildirilmiştir (Patra vd. 2013).

Bacopa monnieri bitkisinde sentezlenen AgNP'lerinin biyolojik etkileri üzerine yapılan çalışmada, tohum çimlenmesinde bu partikülün çok önemli etkilerinin olduğu ve protein ve karbonhidrat sentezinin azaldığı, total fenol

bileşiklerinin ve CAT ve peroksidaz enzim aktivitelerini de artırdığı rapor edilmiştir (Krishnaraj vd. 2012).

Bir çalışmada, *Arabidopsis*'in moleküler tepkisi ve fizyolojisi üzerine üç farklı yapıda AgNP'leri uyguladıkları çalışmada, dekahedral AgNP'lerin kök büyüme oranının en yüksek olduğu, küresel AgNP'lerin kök büyüme oranına etki etmediği ancak *Arabidopsis* fidelerinde antioksidan seviyesini artırdığı bildirilmiştir (Syu vd. 2014).

Bazı çalışmalarda bitkilerin toprak veya yaprak dokusu yoluyla metal ve metal oksit NP'leri alabileceği bildirilmiştir. NP'ler, kök yüzeylerine yapışarak ve apoplastik bir yolla epidermise ve kortekse girerek bitkilere geçebilir. Bununla birlikte, bitkilerdeki NP'lerin alınmasının ve yer değiştirmesinin de bitki türlerine, çeşitlerine ve büyüme koşullarına göre değişebileceği rapor edilmiştir (Zhao vd. 2012; Shi vd. 2014).

Metal ve metal oksit NP'lere maruz bırakılan tahıl bitkilerinde NP'lerin bitkilerin köklerinde biriktiği ve NP'lerin uygulanan konsantrasyon, boyut ve tipinin birikim üzerine etkili olduğu rapor edilmiştir. Bir çalışmada, manyetik karbon kaplı NP'lerin bezelye (*Pisum sativum* L.), ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) ve buğday (*Triticum aestivum* L.) bitkilerine uygulanmasının bu partiküllerin kök boyunca alındığı vasküler silindire hareket ettiği ve ksilemde transpirasyonla hava kısımlarına ulaştığı bildirilmiştir. Yapraktan uygulanan NP'lerin yaprak boyunca alındığı ve bitkinin diğer kısımlarına hareket etme yeteneğine sahip olduğu rapor edilmiştir (Cifuentes vd. 2010; Le vd. 2014; Thuesombat vd. 2014).

Rao ve Shekhawat (2014); *B. juncea* bitkisinde ~100 nm den küçük ZnONP'lerini 0, 200, 500, 1000, 1500 mg/L konsantrasyonda hidroponik kültür ortamında 13 günlük bitkilere 96 saat uygulama yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda gövde, kök ve biyokütlesinde azalma antioksidan enzim aktivitelerinde bir artışın olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, artan ZnO konsantrasyonuna bağlı olarak toplam klorofil içeriğinin kontrol bitkilerine göre önemli artış gösterdiği de saptanmıştır.

Scenedesmus obliquus ile yapılan bir çalışmada, yığın SiO₂NP'nin fotosentetik pigment içeriğinde etkili olmadığı, orta ve yüksek (50, 100 ve 200 mg/L)

SiO₂NP uygulanan bitkilerde ise fotosentetik pigment içeriğinde azalmaların olduğu fakat karotenoid miktarlarında azalmanın olmadığı rapor edilmiştir. 200 mg/L SiO₂NP uygulamasında; Klo-a'nın % 74.5, Klo-b'nin ise % 77.1 oranında azaldığı bildirilmiştir (Roghayyeh vd. 2010).

Silisyumun bitki büyümesi üzerinde yararlı etkileri olduğu bitkinin abiyotik streslere dayanıklı hale gelmesine, soğuk, sıcak, kuraklık, tuzluluk ve ağır metallere maruz kalma gibi durumlarda koruyucu role sahip olduğu bildirilmiştir (Ma vd. 2004; Sabaghnia ve Janmohammadi, 2015).

Karimi ve Mohsenzadeh (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı konsantrasyonlarda SiO₂'nin buğday bitkilerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada düşük konsantrasyonlarda olumsuz etkilerinin yanı sıra bazı olumlu etkilerinin de olduğu ifade edilmiştir. Fiziksel-mekaniksel bariyer olarak silisyum, pestisitlerin ve ağır metallerin hücre içine geçişini önleyebilmektedir. Si'nin aynı zamanda, özellikle monokotil bitkilerin epidermis hücre duvarlarında, gövde iletim demetlerinde ve yaprak yüzeylerinde birikebildiği ve bitkilerin fizyolojik özelliklerini kontrol edebildiği de ifade edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, domates bitkisine 12 nm boyutunda SiO₂NP uygulandığında çimlenme yüzdesinde artış olduğu rapor edilmiştir (Siddiqui vd. 2014).

Yapılan bir çalışmada, kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) ağır metal uygulaması yapılan *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. bitkisinde ZnONP'lerin oksidatif stres semptomlarını tersine çevirdiği rapor edilmiştir. Cd ve Pb uygulamalarına maruz kalan bitkilere ZnONP'lerin uygulanması ile fide büyümesini önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. Bu çalışmada, *Leucaena leucocephala*'ya ZnONP'ler ve iki ağır metal uygulaması yapılmıştır; kontrol, 25 mg/L ZnSO₄, 25 mg/L ZnONP, 50 mg/L Cd, 50 mg/L Cd + 25 mg/L ZnONP, 100 mg/L Pb ve 100 mg/L Pb + 25 mg/L ZnONP olmak üzere yedi uygulama yapılmıştır. Bu çalışmada, bitki büyüme ve biyokütle ölçümü, dokularda Cd ve Pb içeriği, lipit peroksidasyon seviyesi, fotosentetik pigment miktarı ve antioksidan enzim (SOD, CAT ve POX) aktivitelerine bakılmıştır. Ağır metal uygulamalarını takiben MDA içeriği, kontrole göre, 100 mg/L Pb ve 50.4 mg/L Cd uygulamasında sırasıyla % 115.4 ve % 102.6

oranında arttığı bildirilmiştir. Ayrıca ZnONP'lerin uygulanmasıyla, ağır metal uygulanan bitkilerde, kontrole karşı Cd + ZnONP ve Pb + ZnONP uygulamalarında MDA içeriği sırasıyla % 87.2 ve % 79.5 düzeyinde belirgin bir düşüş gösterdiği; buna karşın Zn ve ZnONP içeren ortamda yetiştirilen yapraklarda, kontrol grubuna göre önemli bir azalmanın olduğu rapor edilmiştir. Yaprak dokularındaki SOD aktivitesinin, kontrol grubunda 50 mg/L Cd ve 100 mg/L Pb uygulamalarına göre, sırasıyla % 95.7 ve % 97.4'e düştüğü belirtilmiştir. Cd + ZnONP'lerinin kombinasyon uygulamasında SOD aktivitesinin Pb + ZnONP'lerinden daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. CAT aktivitesinin, Cd (50 mg/L) ve Pb (100 mg/L) ağır metal uygulaması ile sırasıyla % 85.3 ve % 90.9'a düştüğü, yaprak dokularında Cd + ZnONP ve Pb + ZnONP kombinasyon uygulamalarında ağır metal uygulaması yapılmamış kontrol grubuna oranla CAT aktivitesi sırasıyla % 112.6 ve % 134.7 oranında daha yüksek bulunduğu bildirilmiştir. Ağır metal uygulamasına bağlı olarak POX aktivitesinin de kontrole göre azaldığı bildirilmiştir (Venkatachalam vd. 2016).

Tek hücreli tatlı su yosunu *Scenedesmus obliquus* ile yapılan bir çalışmada, 1 mg/L ve 1 µg/L konsantrasyonlarda TiO₂, SiO₂ ve zirkonyum dioksit (ZrO₂) NP'ler tek tek, ikili ve üçlü kombinasyonlar halinde uygulanmıştır. Araştırmacılar, 1 mg/L konsantrasyonda TiO₂, SiO₂ ve ZrO₂NP'lerin üçlü kombinasyonunun mitokondriyal membran potansiyelini ve hücre içi ROT seviyesini önemli ölçüde artırdığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, üçlü (TiO₂ + SiO₂ + ZrO₂) NP uygulamaları, lipid peroksidasyon ürünleri ve küçük moleküllü metabolitlerde artışla birlikte antioksidan savunma enzimleri SOD ve CAT'ın aktivitesini artırdığı bildirilmiştir. Üçlü NP uygulamalarının, tek tek (TiO₂, SiO₂, ZrO₂) ve ikili (TiO₂ + SiO₂, SiO₂ + ZrO₂, TiO₂ + ZrO₂) NP uygulamalarına göre alglerde daha ciddi oksidatif strese neden olduğu bu nedenle, bulgularının multi-nanomateriyal uygulamalarının sinerjik toksisitesinin değerlendirilmesinin önemini vurgulamışlardır (Yinghan vd. 2018).

Su eksikliği stresi altında *Capsicum annuum* L. bitkisinin iki çeşidine (Ikeda ve *Vermelho gigante*) 0.25, 1.00 ve 1.75 µM Si uygulaması yapılmış su eksikliği stresi iki çeşitte yaprak oransal su içeriğinin azalmasını sağlamıştır. 0.25, 1.00 ve 1.75 µM Si uygulamasının, su eksikliğinin iki çeşitte de OSİ'yi azalttığı; 0.25, 1.00 ve 1.75 µM Si uygulaması Ikeda çeşidinde OSİ oranını artırmadığı bildirilmiştir. Tüm Si konsantrasyonlarında, *Vermelho gigante* çeşidinde yaprak oransal su içeriği,

su eksikliği + 0 μM Si uygulama grubundan biraz daha yüksek bulunmuştur. Kontrol grubu ile karşılaştırıldığında her iki çeşitte su eksikliği nedeniyle stoma iletkenliği önemli ölçüde azalmıştır. Ikeda çeşidinde 1.00 ve 1.75 μM Si uygulaması, su eksikliği +0 μM Si uygulama grubu ile karşılaştırıldığında, daha yüksek stoma iletkenliğine sahipken, *Vermelho gigante*'de 0.25 ve 1.75 μM Si uygulanması ile stoma iletkenliğinin daha yüksek değerlere sahip olduğu bildirilmiştir. Su eksikliği, Ikeda ve *Vermelho gigante* çeşitlerinde tranpirasyonda önemli bir azalmaya neden olduğu ve 0.25, 1.00 ve 1.75 μM Si'nin eksojen uygulaması, su eksikliğininden dolayı semptomların zayıflatılmasını teşvik ettiğini ancak silisyumun eklenmesi ile yapılan uygulamaların istatistiksel olarak önemli olmadığı da bildirilmiştir. Bu çalışmada, Si uygulamalarının yaprak OSİ'nin kontrol grubuna daha yakın seviyelerde muhafaza ettiği ve bunun, muhtemelen bitki tarafından emilen ve esas olarak epidermal hücre çeperinde biriktirilen Si'nin etkisiyle bağlantılı olduğu ve Si'nin, su taşınımında sorumlu olan ksilem borularının direncinin daha da artmasına katkıda bulunduğu ifade edilmiştir (Lobato vd. 2013).

Yapılan bir çalışmada, alıç (*Crataegus sp.*) bitkilerinde farklı konsantrasyonlarda silisyum NP'lerin (Si-NP); 0, 10, 50 ve 100 mg/L konsantrasyonlarda ve üç toprak nemi uygulamasının (stres olmadan, orta derecede ve şiddetli stres) faktöriyel kombinasyonuna bitkilerin fizyolojik ve biyokimyasal tepkilerini araştırmışlardır. Fideler, kuraklık stresi maruz kalmadan önce, 45 gün boyunca dört Si-NP konsantrasyonundan biri ile sulanmış ve fotosentez parametreleri, MDA, OSİ, membran elektrolit sızıntısı, klorofil, karotenoid, karbonhidrat ve prolin içeriği belirlenmiştir. Denemenin sonunda, Si-NP ön uygulamasının, fizyolojik indeksler üzerindeki olumlu etkileri kuraklık stresi sırasında gözlenmiş ve kuraklık koşullarında, Nano-Si'lerin fotosentetik hız ve stoma iletkenliği üzerindeki etkisinin belirgin olduğu bildirilmiştir. Nano-Si'lerin bitki biyokütle, ksilem su potansiyeli ve MDA içeriği, özellikle kuraklık koşullarında artmış olmasına rağmen OSİ, membran elektrolit sızıntısının bu ön-uygulamalardan etkilenmediği rapor edilmiştir. Araştırmacılar, nano-Si ile önceden muamele edilen fidelerin, tüm su rejimlerinde özellikle kuraklık altında karbonhidrat ve prolin içeriğinin azaldığını uygulamalar arasında toplam klorofil içeriği ve karotenoid içeriğinin değişmediği ve genel olarak, nano-Si'lerin kuraklık stresinde olumlu bir rol oynadığını bildirmişlerdir (Ashkavand vd. 2015).

Yapılan bir çalışmada, 25 adet homojen boyutta iki yıllık yabani armut (*P. biosseriana*) fideleri seraya taşınarak orman kahverengi toprağı, nehir kumu ve kil (2: 1: 1, v/v/v) karışımını içeren plastik kaplara (5 L) nakledilmiştir. Fidanlara 14 gün boyunca 10, 100, 500, 1000 mg/L konsantrasyonlarında SiO₂NP uygulanmış. Kontrol ile karşılaştırıldığında, farklı SiO₂NP konsantrasyonlarında armut bitkilerinin biyokütle dağılımında önemli bir artış veya azalma gözlenmemiştir. Bitkilerin farklı SiO₂NP uygulaması ortalama kök uzunluğunu önemli ölçüde değiştirmedeği ve bitkilerin çap büyümesinin de etkilenmediği bildirilmiştir. Ayrıca, farklı konsantrasyonlarda SiO₂NP uygulamasının yaprak pigment içeriğini ve yaprak prolin içeriğini değiştirmedeği ifade edilmiştir. SiO₂NP'leri uygulamalarından armut bitkilerinin enzim aktivitesinin büyük ölçüde etkilendiği rapor edilmiştir. Artan SiO₂NP seviyelerinin, peroksidaz ve katalaz aktivitesinde bir artışa neden olduğu, en fazla artış kontrol ile karşılaştırıldığında daha yüksek SiO₂NP uygulamalarında bulunmuştur. 1000 mg/L SiO₂ uygulanan bitkilerde peroksidaz aktivitesinin, kontrol bitkilerine göre daha yüksek olduğu, 500 mg/L SiO₂ uygulamasının da CAT enzim aktivitesini % 65'e kadar artırdığı rapor edilmiştir. Silisyum birikimi, kökler tarafından Si alımındaki farklılıklar nedeniyle bitki türleri arasında büyük ölçüde farklılık gösterdiği ancak, armut fidelerinde yüksek konsantrasyonlarda çok sayıda kök yüzeyine yapışmış SiO₂NP'nin olduğu bildirilmiştir. Si'nin kökten yaprağına translokasyonu, farklı konsantrasyonlarda aynı seviyede kaldığı ve genel olarak Si konsantrasyonu, kontrol fidelerine kıyasla SiO₂NP'ye maruz bırakıldığında yabani armut fidelerinin yapraklarında yaklaşık % 47-63 oranında arttığı rapor edilmiştir. SiO₂NP'lerin ilavesi ile armut bitkilerinin kökleri tarafından azot alınımı azalmıştır. Benzer şekilde, SiO₂NP'lerin uygulamaları ile fosfor konsantrasyonunun azaldığı diğer yandan, en yüksek K içeriğı, 1000 mg/L SiO₂NP konsantrasyonunda kaydedildiğı, bu nedenle K alınımının SiO₂ ilavesiyle arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca, SiO₂ uygulamasının kalsiyum (Ca) alınımını artırırken, demir (Fe) ve alimünyum (Al) alınımını azalttığı da bildirilmiştir. Ayrıca araştırmacılar, toplam elektrolitlerin % 50'sinin bitki dokusundan salınması, hücre ölümü endeksi olarak kabul edildiğini ve çalışmalarında yüksek konsantrasyonlarda SiO₂NP uygulanan bitkilerde elektrolit sızıntısında çok az bir artış gözlemlediklerini de bildirmişlerdir. Bu nedenle, SiO₂NP konsantrasyonlarının, yabani armut fidelerinin yapraklarında oksidatif hasara ve hücre ölümüne neden olmadığını ifade etmişlerdir (Zarafshar vd. 2015).

Silika NP'lerinin *Zea mays*'ın büyümesi üzerindeki etkileri ve fizyolojik cevaplarının belirlendiği çalışmada, silika NP'lerinin yapraktaki birikiminin yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (Suriyaprabha vd. 2012).

Yapılan başka bir çalışmada, nikel oksit nanopartikülü (NiONP) toleransının artırılmasında SiO₂NP'nin potansiyel rolü değerlendirilmiştir. Bu amaçla, bitkiler 14 gün boyunca nano-NiO (120 mg/kg) altında ve nano-SiO₂ (3 mg/kg) ile birlikte maruz bırakılarak büyütülmüştür. Arpa bitkisinin nano-NiO'ya maruz kalması, büyüme ile ilgili parametrelerde önemli bir azalmaya ve fotosentetik aparat üzerinde negatif bir etkiye neden olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, nano-SiO₂ ile birlikte uygulanmasının taze ve kuru biyokütlede daha düşük düşüşler ve fotosentezle ilgili parametrelerin geri kazanılmasıyla kısmen azaltıldığı bildirilmiştir. nano-NiO stresi altında büyüyen bitkiler, oksidatif stres oluşumunu ve lipid peroksidasyonunun geliştirilmesini destekleyen aşırı bir süperoksit anyon üretimi (O₂⁻) gösterdiği fakat nano-SiO₂ ile birlikte uygulama yapılması LP seviyelerini düşürdüğü veya koruduğu ve tiyollerin redoks yolunu uyardığı için bu eğilimi geriye döndürdüğü rapor edilmiştir. Araştırmacılar, antioksidan sistem tepkisinin, nano-SiO₂ ile birlikte daha da belirgin olduğu ve fitotoksik semptomların, muhtemelen oksidatif strese karşı Si aracılı koruma nedeniyle, bitki AOX sisteminin daha proaktif bir performansı ile iyileştirildiği rapor edilmiştir (Soares vd. 2018).

Hardal (*B. juncea* L. Czern & Coss.) cv "Varuna" bitkisine ekimden 20 gün sonra kontrol (0), 100 µM Cr, 500 µM Si, 700 µM Si, 100 µM Cr + 500 µM Si, ve 100 µM Cr + 700 µM Si olmak üzere uygulama yapılmıştır. Cr ve Si sırasıyla K₂Cr₂O₇ ve Na₂SiO₃ formunda verilmiştir. Hardal bitkisinin Cr stresine olan toksisitesini değerlendirmek ve azaltmak için iki farklı konsantrasyonda Si varlığında büyüme, fotosentetik parametreler ve metal birikimi incelenmiştir. Si'nin sodyum silikat formundaki eksojen uygulaması, hardal bitkisinin metal birikiminde, büyümesinde ve fotosentezini önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir. Cr stresi olarak K₂Cr₂O₇'nin uygulanmasının; bitkilerde büyüme, fotosentez ve azot metabolizmasını maksimum düzeyde inhibe ettiği, Cr stresi uygulamasının; toplam klorofil içeriği ve karotenoid içeriği kontrol ile karşılaştırıldığında % 11.05 ve % 22.93 oranında azalttığı rapor edilmiştir. 500 µM Si ve 700 µM Si uygulaması; kontrole göre toplam klorofil içeriğini % 21.61 ve % 28.05, karotenoid içeriğini %

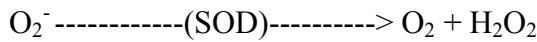
24.91 ve % 37.83 oranında artırmıştır. Si uygulanmış ve metalle muamele edilmiş bitkiler; 500 µM Si uygulaması ile toplam klorofil içeriği sırasıyla % 7.53 ve % 13.64 oranında ve karotenoid içeriğinde % 13.64 oranında artış gösterirken, 700 µM Si uygulaması sırasıyla % 14.02 ve % 21.60 oranında artırmıştır. Stres koşulu altında 700 µM Si uygulaması; toplam protein içeriğini % 12.23 oranında artırırken, 500 µM Si uygulamasında ise % 4.37 oranında artmıştır. Cr uygulamasının, kontrole göre MDA ve H₂O₂ içeriğini sırasıyla % 226.08 ve % 77.80 oranında artırdığı, 500 µM Si uygulamasının Cr uygulanan bitkilere göre, MDA ve H₂O₂ içeriğini sırasıyla % 39.6 ve % 24.5 oranında, 700 µM Si uygulamasının sırasıyla % 45.3 ve % 31.2 oranında azalttığı bildirilmiştir. Cr ile muamele edilen bitkilere kıyasla, 500 µM Si + 100 µM Cr uygulaması MDA ve H₂O₂ içeriğini sırasıyla % 28.64 ve % 13.16 azaltırken, 700 µM Si + 100 µM Cr sırasıyla % 23.54 ve % 8.18 azalttığı da rapor edilmiştir (Ashfaque vd. 2017).

Bir çalışmada, yığın ve nano-SiO₂'nin tuz stresi altında *Trigonella foenum-graceum* L. bitkisinde çimlenme ve fide büyüme indeksleri üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel uygulamalar; 4 farklı tuz (0, 50, 100 ve 150 mM), 2 yığın konsantrasyon (50 ve 100 ppm), 2 nano-SiO₂ (50 ve 100 ppm) konsantrasyonda ve kontrol (herhangi bir SiO₂ türü olmaksızın) olmak üzere dokuz gruba ayrılmıştır. Yığın ve nano-SiO₂ konsantrasyonlarının tek başına veya farklı seviyelerde tuz stresi uygulanmış bitkilerde büyüme özelliklerini önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. Ancak tuz uygulaması ile önemli ölçüde azaldığı ve tuzun sürgün, kök, fide uzunlukları üzerindeki olumsuz etkilerinin 50 ppm nano-SiO₂ uygulaması ile hafiflediği de bildirilmiştir. Tuz stresi altında, 50 ve 100 ppm nano-SiO₂ uygulaması çemen tohumunda, yığın SiO₂ konsantrasyonları ve kontrole göre sürgün, kök, fide kuru ağırlıklarını artırdığı, ancak 50 ppm nano-SiO₂ uygulamasının 100 ppm nano-SiO₂ uygulamasından daha etkili olduğu rapor edilmiştir (Ivani vd. 2018).

NP'ler tarafından doğrudan veya dolaylı olarak indüklenen ROT üretimi, fitotoksisite mekanizmasında kritik bir rol oynar. ROT üretimi, NP'lerin ve test edilen türlerin fizikokimyasal özelliklerine dayanmaktadır. Boyut ve şekil, çözünürlük ve partikül çözünmesi, metal ve metal oksit NP'lerinden salınan metal iyonları, NP'lerin biyotransformasyonu, ışık ve benzeri gibi çeşitli belirleyiciler ROT oluşumuna ve fitotoksisiteye neden olabilir (Yang vd. 2017).

ROT hücrelerin sinyal yollarında önemli role sahip olup; büyümenin düzenlenmesi, gelişim, çevresel uyartılara cevap ve hücre ölümü gibi biyolojik süreçlere neden olurlar. Normal büyüme koşullarında, hücrede ROT üretimi az olurken, birçok stres hücrel homeostasiyi bozup ROT üretimini artırmaktadır. Bu homeostasiyi bozan streslere örnek verecek olursak; kuraklık, tuz, düşük sıcaklık, yüksek sıcaklık, ağır metal, ultraviyole ışınları, ozon gibi hava kirleticileri, mekanik stres, besin yetersizliği, patojen saldırıları ve yüksek ışık verilebilir. ROT seviyesinin hücrede artması, hücre için bir tehdit oluştursa da aynı zamanda sinyalin başlaması ve gerekli savunma mekanizmalarının devreye girmesini tetikler. Bu yüzden ROT hücrel bir belirteç olup, hücre için ikincil mesajcı rolü üstlenip stresle ilgili sinyal yollarını harekete geçirir. Bitkilerin strese maruz kalmaları sonucu ROT dengesini ayarlayabilmeleri hayati bir önem taşımaktadır. Çünkü bu dengenin kurulamaması sonucu bitki çok büyük bir verim kaybı yaşayabilir veya en kötüsü ölebilir. Bunun yanı sıra ROT'un hücrelerin proliferasyonu, farklılaşması ve yaşlanması üzerine olumlu etkilerinin olduğu da belirtilmiştir (Caverzan vd. 2016).

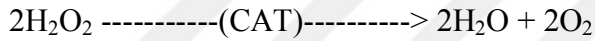
Bitkilerde metabolik süreçlerde oluşan O_2^* radikalinin toksik etkilerine karşı ilk savunma hattını süperoksit dismutaz (SOD; EC 1. 15.1.1) oluşturur. Süperoksit dismutaz (SOD) enzimi, süperoksit anyonunu (O_2^-) enzimatik olarak hidrojen peroksit ve moleküler oksijene dönüştürür.



Metabolik aşamalarda üretimi oldukça fazla olan süperoksit, hücre içi aktivitesini düşük tutarak hücrel O_2^- düzeylerinin kontrolünde ve hücreleri O_2 radikalinin etkilerinden korumada görev alır. SOD, O_2 detoksifikasyonunda yer alan ilk enzimdir. Metaloenzim olan SOD enziminin izoformları, bitkilerde Cu/Zn SOD kloroplast ve sitosolde, Mn SOD mitokondri ve peroksizomlarda ve Fe SOD ise kloroplastlarda bulunmaktadır (Caverzan vd. 2016).

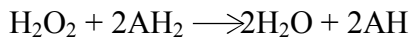
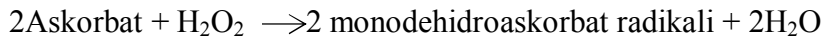
Katalaz enzimleri (EC 1.11.1.6) nükleer genler tarafından kodlanan çoklu izozimler olan tetramerik homoproteinlerdir. Genellikle peroksizom ve glioksizomlarda yer alırlar. Katalaz, protein yapısında bol miktarda bulunan karakteristik bir enzimdir. Bu enzim yaygın bir şekilde hayvan, bitki ve mikroorganizmada mevcuttur. Ayrıca toksik hidrojen peroksidi hücrelerden

uzaklaştırmada da önemli bir rol oynar. Hidrojen peroksit (H₂O₂) reaktif bir oksijen türü olup hücreler tarafından yağ asitlerinin peroksizomlarda β-oksidasyonu, fotorespirasyon ve pürin katabolizması gibi normal aerobik reaksiyonlarda oluşturulur ve farklı konsantrasyon seviyelerinde mitojenik büyümeden apoptosize kadar birçok hücrel cevap mekanizmasında etkinlik gösterir. Katalaz çeşitli streslere karşı geliştirilen cevap mekanizmalarındandır. Ayrıca patojenlerin öldürülmesinde de savunma sistemi hücreleri tarafından üretilir. Yüksek konsantrasyonlardaki H₂O₂ hücrelere zarar verir ve hücrelerde birikimi protein, lipit ve DNA gibi hücrel hedeflerin oksidasyonuna yol açar. Bu durum ise mutasyonların oluşmasına ve/veya hücre ölümüne yol açar. Bu sebeple H₂O₂'nin hücreden uzaklaştırılması oksidatif hasardan korunmak için önemlidir ve bu görevde katalaz tarafından yürütülür. Hidroperoksidaz olarak da isimlendirilen katalaz bir sitokrom sistemine sahip tüm aerobik canlılarda bulunan ve H₂O₂'nin su ve oksijene parçalanmasını katalizleyen özel bir proteindir. CAT, heme (Fe-porfirin) grubu içeren şu reaksiyonu katalizleyen enzimdir:



Bunun sonucunda CAT aynı zamanda, H₂O₂ seviyesinin kontrolünü sağlar. H₂O₂'nin bu şekilde uzaklaştırılması sayesinde daha reaktif olan hidroksil radikallerinin oluşumu önlenmiş olur. Bu reaktif oksijen türlerinin uzaklaştırılması aerobik ortamda yaşamayı kolaylaştırır (Gupta vd. 2018)

Askorbat peroksidaz hem peroksidaz enzim ailesinin bir üyesi olup mayadan insana kadar pek çok canlıda bulunur. Askorbat peroksidaz hidrojen peroksitine bağlı olarak farklı substratları katalizler. Fakat enzimin fizyolojik substratı askorbattır (vitamin C). Askorbatın dışında bazı aromatik substratların (AH₂) da oksidasyonunu katalizler.



Askorbata bağlı askorbat peroksidaz aktivitesi ilk olarak 1979 yılında bulunmuştur. Bu enzim sınıf I peroksidaz enzim ailesine ait olup bitkilerde, alglerde ve sadece siyanobakterilerde hidrojen peroksitine bağlı askorbat oksidasyon

reaksiyonunu katalizler. Fizyolojik koşullar altında reaksiyonun ara ürünü monodehidroaskorbat radikali olup başka bir enzimce tekrar askorbata indirgenir. Askorbat peroksidaz sitosolde, kloroplastlarda, peroksizomlarda bulunur. Bütün askorbat peroksidaz enzimleri elektron vericisi olarak askorbata yüksek özgülük gösterir. Fakat enzimin fizyolojik koşullarda bulunmayan substratları da okside etme yeteneği de vardır (Rosa vd. 2010; Caverzan vd. 2012).

NP'lerin endüstriyel uygulamaları ve bunların çevresel sonuçları henüz yeni araştırılan bir alandır. Son yıllarda yaygın olarak kullanılan NP'lerin çevrede artması durumunda bitkilerdeki fitotoksitesisi, fizyolojik etkileri, alınımlı, taşınımlı, birikimi, detoksifikasyonu ve toleransını içeren temel mekanizmaların anlaşılması bu NP'lerle kirlenmiş alanların fitoremediasyonu için oldukça önemlidir. Bu nedenle gelecekte yapılacak araştırmalarda NP'lerin alımı, taşınımlı ve birikimi, detoksifikasyonu ve toleransını içeren temel mekanizmaların anlaşılmasına odaklanmalıdır.

3. MATERYAL METOD

Bu çalışmada deney materyali olarak kullanılan ayçiçeği bitkisi tohumları (LG-5448), Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü'nden temin edilmiştir.

3.1. Ayçiçeği Bitkisi

Asteraceae familyasından *Helianthus annuus* L. ayçiçeği (çiğdem, günebakan) adı ile bilinmektedir. 67 çeşidi bilinen ayçiçeği tek yıllık yazlık bir yağ bitkisidir. Yetiştirme (vejetasyon) süresi çeşitlere ve yetiştirme koşullarına göre 70-165 gün arasında değişir.

Ayçiçeği, içerdiği yüksek yağ oranı nedeniyle yağlı tohumlar içinde önemli bir yere sahiptir. Yağlık ve çerezlik olarak iki tip yetiştirilmektedir. Süs bitkisi olarak da değerlendirilen tipleri mevcuttur. Yağlık ayçiçeği; yağ, küspe ve biyodizel üretim amaçlı kullanılmaktadır. Dünyada üretilen ayçiçeği tohumunun yaklaşık % 90'ı yağ için işlenmekte, geri kalan kısmı ise çerezlik olarak tüketilmektedir. Dünya yağlı tohum üretiminde ayçiçeği, içerdiği yüksek orandaki (% 22-50) yağ miktarı nedeniyle bitkisel ham yağ üretimi bakımından önemli olup dünyada 3. sırada yer almaktadır.

2017/2018 sezonunda dünyada en fazla ayçiçeği üretimini Ukrayna, Rusya ve Avrupa Birliği (AB) ülkeleri yapmakta olup bu ülkeler dünya üretiminin % 72.4'ünü teşkil ederek toplamda 36.1 milyon ton ayçiçeği üretimi gerçekleştirmişlerdir. AB ülkeleri içinde Fransa, Romanya, Portekiz ve İspanya önemli ayçiçeği üreticisi ülkelerdir. 2017/2018 sezonunda toplam ayçiçeği tohum ithalatının % 53.9'u AB ve Türkiye tarafından gerçekleştirilmiştir. İthalat miktarlarında en fazla artış oranı % 43 ile Çin'de görülmektedir.

Türkiye'de yağlık ayçiçeği, ağırlıklı olarak Trakya Bölgesi ve Konya'da üretilmektedir. 2017 yılı itibariyle Tekirdağ (% 23), Edirne (% 14.8), Kırklareli (% 11.8) ve Konya (% 9.8) yağlık ayçiçeği ekim alanının % 59'unu oluşturmaktadır. Türkiye'de 2016/2017 sezonunda ayçiçeği ekim alanı bir önceki sezona göre % 5.1 oranında artarak 720 bin hektara ulaşmıştır.

Türkiye'de 2016/2017 sezonunda ayçiçeği üretim miktarı bir önceki sezona oranla % 0.6 azalarak 1.671 milyon ton olmuştur. 2017 yılı itibariyle Türkiye yağlık

ayçiçeği üretiminde; Tekirdağ % 20.5, Edirne % 13.6, Konya % 14.1 ve Kırklareli % 10.8 ve Adana % 10.8'lik payla ilk sıralarda yer almıştır.

Dünyada bitkisel yağ üretimi palm yağı başta olmak üzere soya, kolza ve ayçiçeğinden karşılanırken, ülkemizde büyük oranda ayçiçeğinden karşılanmaktadır. Türkiye'de ayçiçeği yağı yemeklik kalitesi yönünden ve ayçiçeği tohumunun içerdiği yüksek orandaki (% 22-50) yağ miktarı nedeniyle tüketimi yüksektir. Ülkemizde bitkisel yağ ihtiyacı kişi başı tüketim miktarı ve nüfus artışına paralel olarak artış göstermektedir. Ancak yağ ihtiyacını karşılayacak düzeyde üretim gerçekleştirilememektedir. Yurt içinde üretilen ayçiçeği ile toplam bitkisel yağ talebinin sadece % 18.4'ü karşılanabilmektedir. Bu nedenle giderek artan önemli miktardaki yağ açığı ise tohum ve ham yağ ithalatı yoluyla karşılanmakta olup bitkisel yağ sanayi, hammadde yönünden % 65 düzeyinde dışa bağımlı durumdadır. Türkiye'de 2016/2017 sezonunda üretilen 1.20 milyon ton yağlık ayçiçeğinden 492 bin ton ham yağ üretimi gerçekleşmiştir. Aynı sezonda Türkiye'nin 1.40 milyon ton olan toplam ayçiçek ham yağı arzının sadece % 35.1'i yerli üretim ile geriye kalan kısmı ise tohum ve ham yağ ithalatı ile karşılanmıştır (TAGEM).

Çizelge 3.1 Türkiye Ayçiçeği Verileri (bin ton) [Kaynak: TÜİK]

| | 2012/13 | 2013/14 | 2014/15 | 2015/16 | 2016/17 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Alan (1000 ha) | 605 | 610 | 657 | 685 | 720 |
| Verim (kg/da) | 227 | 250 | 249 | 245 | 232 |
| Üretim | 1.370 | 1.523 | 1.638 | 1.681 | 1.671 |
| Yurtiçi kullanım | 2.526 | 2.498 | 2.159 | 2.059 | 2.526 |
| İthalat | 2.507 | 2.800 | 2.799 | 2.362 | 2.864 |
| İhracat | 870 | 925 | 1.827 | 1.968 | 1.833 |

3.2. SiO₂NP'lerin Sentezi ve Yapısal Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında ~50 nm ve ~100 nm olmak üzere 2 farklı partikül boyutunda SiO₂ yapısı sentezlenerek kullanılmıştır. Bu sentezlerde tetraetil ortosilikat (TEOS) başlangıç materyali olarak kullanılmış olup sürfaktan içermeyen sol-jel metodu dahilinde sentezler gerçekleştirilmiştir. Partikül boyutu reaksiyon süresi kontrol edilerek kinetik kontrollü olarak ayarlanmıştır. Genel sentezlerde 250 ml'lik bir azot (schlenk) tüpü içerisinde azot atmosferi altında 50 ml TEOS alınarak aktif reaktant karışımı ile karıştırılmıştır. Aktif reaktant karışımı olarak 250 ml su, 100 ml asetik asit ve 60 ml etanol karışımı kullanılmıştır. TEOS çözeltisi, 1000 rpm karıştırma hızında 2 saat süre dakilinde reaksiyon karışımına eklenmiştir. Elde edilen

kolloidal çözelti santrifüjlenerek etanol ile birkaç kez yıkandı. Sonuç ürün 60 °C'de 1 gece kurutuldu ve 600 °C'de 1 saat kalsine edilmiştir. Sonuç olarak 50 nm'lik partikül elde edilmiştir.

100 nm'lik partikül için ise 4 saatlik sentez süresi kullanılmıştır. Elde edilen SiO₂ yapıları FTIR, XRD, SEM ve EDX teknikleri ile karakterize edilmiştir. Bu partiküllerin termal özellikleri ve saflığı TGA ve DTA teknikleri ile belirlenmiştir.

Hazırlanan SiO₂NP'leri ilk olarak Fourier Transform Infrared Spektrometresi (FTIR) kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir. SiO₂NP'leri infrared spektrumu Perkin Elmer Spectrum Two FTIR spektrometresi ile 400-4000 cm⁻¹ aralığında kaydedilmiştir. SiO₂NP'leri ayrıca kristal yapının aydınlatılması ve safsızlıklar için X-Işını difraksiyonu (XRD) ile tanımlanmıştır. SiO₂NP'lerinin X-Ray spektrumları için Rigaku Rad B-Dmax II powder X ışını difraktometresi kullanıldı. 2θ değerleri, Cu Ka radyasyonu (λ değeri 2.2897 Å) kullanılarak, 0.04 ° adım büyüklüğü ile 5° ile 80° arasında alınmıştır. Elde edilen SiO₂NP'lerinin morfolojisi SEM (LEO EVO-40xVP) ile araştırılmıştır. Hızlanma voltajı 20 kV ve analiz için çalışma mesafesi 3 mm olarak belirlenmiş olup ve SiO₂NP'lerinin kimyasal bileşimi EDX ile analiz edildi; LEO EVO-40xVP taramalı elektron mikroskobuna bağlı Röntek Xflash dedektör analizörü kullanıldı. Partikül büyüklüğü dağılımı ve hidrodinamik boyut (çap) ölçümleri, Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Southborough, Massachusetts) kullanılarak yapıldı. SiO₂NP'lerinin termal özellikleri, termal analiz teknikleri ile incelenmiştir. Diferansiyel termal analiz (DTA) ve termogravimetri (TG), sırasıyla Shimadzu DTA-50 ve TGA-50 termal analizörleri ile yapıldı. SiO₂NP'lerinin tüm termal analizleri, DTA ve TGA için 10 mg numune kullanılarak 20 ile 1000 °C'lik hava atmosferinde 10 °C/dak. koşullarında gerçekleştirildi.

3.3. Çalışmada Kullanılan Kültür Çözeltileri

Bu çalışmada esas kültür çözeltisi olarak, Hoagland kültür çözeltisi kullanılmıştır. Hoagland kültür çözeltisinin bileşimi Hoagland ve Arnon (1950)'a göre hazırlanmıştır.

Çizelge 3.2 Hoagland kültür çözeltisinin bileşimi

| Makro elementler | g/L |
|---|-------------|
| Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O | 0.821 |
| KNO ₃ | 3 0.506 |
| KH ₂ PO ₄ | 4 0.136 |
| MgSO ₄ .7H ₂ O | 0.120 |
| Mikro elementler | mg/L |
| C ₆ H ₅ FeO ₇ .5H ₂ O (Ferrik sitrat) | 50.00 |
| MnCl ₂ .2H ₂ O | 1.47 |
| H ₃ BO ₃ | 2.90 |
| ZnCl ₂ | 0.12 |
| CuCl | 0.03 |

Çözelti hazırlandıktan sonra ½ oranında sulandırılarak pH'sı 0.05 M KOH ile 5.6-5.8'e ayarlanmıştır.

3.4. SiO₂ İçeren Çözeltiler

İnönü Üniversitesi Kimya bölümünde sentezlenen ~50 ve ~100 nm boyutundaki SiO₂NP'ler konsantrasyonları 20 mg/L ve 50 mg/L olacak şekilde Hoagland kültür çözeltisi içinde hazırlanmıştır.

3.5. Deneysel Koşullar

Çimlenme ve büyütme devresini kapsayan tüm çalışmalar bitki büyütme odasında kontrollü koşullar altında yapılmıştır. Her iki devrede de bitki büyütme odasındaki sıcaklık gece ve gündüz 24 ± 1°C ve bağıl nem % 65 ± 5'e ayarlanmış olup, deney süresince koşullar sabit kalmıştır. Çimlenme devresinde kültür kapları karanlıkta bırakılmıştır. Büyütme devresinde bitkiler 15 saat ışık, 9 saat karanlık periyodunda bırakılmıştır. Bitki büyütme odasındaki aydınlatma tavandan olup, aydınlatma şiddeti bitki yaprak yüzeyinde 12.000 lüks'tür. Aydınlatma şiddetinin % 90'ı floresans lamba, % 10'u inkandescent lamba ile sağlanmıştır.

3.6. Bitkilerin Yetiştirilmesi

3.6.1. Tohum Çimlendirme Yöntemi

Çimlendirme işlemine başlamadan önce ayçiçeği tohumlarının dolgun görünüşlü, sağlam ve benzer büyüklükte olanları seçilmiştir. Daha sonra tohumlar Hoagland kültür çözeltisiyle ıslatılarak 24 saat süreyle şişmeye bırakılmıştır. Şişme esnasında tohumları ıslatan Hoagland kültür çözeltisi güçlü bir akvaryum pompasına bağlanan havalandırma sistemi ile havalandırılmıştır. Hoagland kültür çözeltisi 24 saat sonra süzölmüş ve şişmiş tohumlar çimlendirme kaplarına alınmıştır. Çimlendirme kabı olarak 20×14×6 cm boyutlarında kapaklı plastik kaplar kullanılmıştır. Çimlendirme kaplarının içlerine çok ince bir tabaka pamuk konulduktan sonra bunun üzerine iki tabaka filtre kâğıdı yerleştirilmiştir. Kaplardaki pamuk ve filtre kâğıtları 30 mL Hoagland kültür çözeltisi ile nemlendirildikten sonra, tohumlar iki kâğıt tabakası arasına dikkatlice yayılmıştır. Çimlendirme kapları kapakları kapatılıp, bitki büyütme odasına yerleştirilmiş ve tohumların çimlenmesi için kaplar üç gün karanlıkta bırakılmıştır. Çimlenme için radikulanın testadan 0.5 cm çıkmış olması esas kabul edilmiştir.

3.6.2. Bitki Büyütme Yöntemi

Bitkilerin büyütülmesinde 26x26x11 cm boyutlarında ve yaklaşık 5 L kültür çözeltisi alan plastik özel bitki büyütme kapları kullanılmıştır. Ayrıca her kap için bitkileri üzerinde taşıyacak 22x22 cm boyutlarında fiberglastan yapılmış, iki yanından askısı olan delikli kapak şeklinde bir tabla kullanılmıştır. Her tablanın üzerinde 30 adet 0.6 cm çapında ve köşesinde de havalandırma borusu için daha büyük çapta bir delik bulunmaktadır. Plastik kaplar, üzerlerine yerleştirilen tabla seviyesine kadar Hoagland kültür çözeltisi ile doldurulmuştur. Sonra, çimlenmiş ve kökleri yeterince uzamış üç günlük fideler pens yardımıyla tabladaki deliklere yerleştirilmiştir. Fidelerin dik durabilmelerini sağlamak için pamuk tamponlardan yararlanılmıştır. Her kültür kabı, havalandırma sisteminden gelen borular aracılığıyla havalandırılmış ve sistemdeki musluklar yardımıyla her kaba eşit miktarda hava kabarcığı girmesi sağlanmıştır. Kaplardaki Hoagland kültür çözeltisi haftada iki kez olmak üzere değiştirilmiştir. Ayrıca kaplardaki Hoagland kültür çözeltisinin azalan miktarı deneme süresince tamamlanmıştır. Bu yöntem kullanılarak Hoagland kültür çözeltisinde bitkiler çimlenmeden itibaren 21 gün büyütülmüştür.

Çimlenme ve büyüme devresini kapsayan tüm çalışmalar da bitkilerin büyütüldüğü iklim odasına ait genel görüntü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Bitkilerin büyütüldüğü iklim odasından bir görüntü

Ayçiçeği bitkilerine 21 günden sonra farklı boyutta ve konsantrasyonda SiO_2NP 'leri uygulanarak 8 gün daha büyütülmüştür. SiO_2NP uygulamasının 1. 4. ve 8. günlerinde bitki kök ve yaprağından örnekler alınmış ve yapılması planlanan analizlerin amacına uygun bir şekilde saklanmıştır.



Şekil 3.2 Uygulama aşamasında fidelere ait görüntüler

3.7. İncelenen Parametreler

Çalışmada, kontrol ve farklı boyut ve konsantrasyonda SiO₂NP uygulaması yapılan *Helianthus annuus* L. (LG-5448) fidelerinin yaprak dokularında Oransal Su İçeriği tayini (Farrant, 2000), kök ve yaprak dokularında Toplam Protein İçeriği (Bradford, 1976), Süperoksit dismutaz (Beyer ve Fridovich, 1987), Katalaz (Chandlee ve Scandalias, 1984), Askorbat peroksidaz enzim aktiviteleri (Miyake ve Asada, 1992), Malondialdehit (MDA) miktarı (Madhava Rao ve Sresty, 2000), Klorofil miktarları (Lichtenthaler, 1987), Si miktar tayini (Lukacova vd. 2013), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) analizleri yapılmıştır.

3.7.1. Oransal Su İçeriği (OSİ) Tayini

Kontrol ve SiO₂ nanopartikülü uygulanan bitkilerin yaprak dokularındaki oransal su içeriği belirlemek için ayçiçeği bitkilerden 3 tekrarlı ve her tekrardan iki adet bitki olmak üzere 6 adet bitkiden 6 adet yaprak diski (R=0.5 cm) çıkarılmış ve tartılmıştır (taze ağırlık). Tartılan diskler 5 ml distile su içeren falkon tüplere konulmuş ve tüpler çalkalayıcıda 100 rpm'de 24 saat çalkalanmıştır. Daha sonra hidrate hale gelen yaprak diskleri tekrar tartılarak turgor durumundaki ağırlıkları saptanmıştır. Turgor ağırlıkları alınmış bu yaprak diskleri 75°C'lik etüvde 48 saat kurutulmuş ve ağırlıkları yeniden tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Yaprak dokularındaki oransal su içeriği (OSİ) (%) Farrant (2000)'a göre hesaplanmıştır;

$$\text{OSİ (\%)} = (\text{TA-KA}) / (\text{HA-KA}) \times 100$$

Bu formüllerde; TA taze ağırlığı, HA hidrate (turgor) ağırlığı ve KA kuru ağırlığı ifade etmektedir.

3.7.2. Toplam Protein İçeriğinin Belirlenmesi

Yaprak ve kök dokularındaki toplam çözümlü protein miktarı; Bradford M.M. (1976) metoduna göre belirlenmiştir. Bu amaçla alınan taze yaprak örnekleri sıvı azotta öğütülmüştür. Daha sonra tüplere alınan öğütülmüş yaprak örneklerinin üzerine 1.5 ml KH₂PO₄ tamponu (pH 7) eklenerek 14000 rpm'de +4°C'de 20 dakika santrifüj edilmiştir. Elde edilen süpernatanttan 20 µl alınarak üzerine sırasıyla 480 µl distile su ve 5000 µl Bradford çözeltisi ilave edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan

reaksiyon karışımları vorteksle karıştırılarak, karışımların absorbans değerleri 595 nm dalga boyunda spektrofotometrik (Biochrom Libra S22) olarak belirlenmiştir. Yaprak ve kök dokularındaki toplam çözüner protein miktarı bovine serum albumin (BSA) ile hazırlanan standart grafik yardımıyla hesaplanmıştır.

3.7.3. Süperoksit Dismutaz (SOD) Aktivitesinin Belirlenmesi

Süperoksit dismutaz aktivitesi; Beyer ve Fridovich (1987) tarafından belirlenen, nitroblue tetrazolium klorodin (NBT) fotokimyasal azalmayı inhibe etmesinin ölçümü ile belirlendi. Reaksiyon karışımı (3 mL); 50 mM potasyum fosfat tamponunda (pH 7.8) 57 µM NBT, 9.9 mM metionin, 0.1 mM EDTA, 2 µM riboflavin ve enzim ekstraktı içermektedir. Riboflavin en son karanlık ortamda ilave edilmiştir ve reaksiyon karışımı 300 µmol m-2s-1 floresan ışığı altında 15 dakika inkübe edilmiştir. Daha sonra örneklerin absorbans değerleri 560 nm'de spektrofotometrede (Biochrom Libra S22) okunmuş ve SOD aktivitesi, 560 nm'de ölçülen NBT indirgenmesi oranının % 50'sinin engellenebilmesi için gereken enzim miktarı olarak ifade edilmiştir. SOD aktivitesi U/mg protein olarak hesaplanmıştır.

3.7.4. Katalaz (CAT) Aktivitesinin Belirlenmesi

Katalaz aktivitesi; Chandlee ve Scandalias (1984)'ın yöntemine göre modifiye edilerek ölçülmüştür. Ekstraksiyon, kontrol ve SiO₂NP uygulanan gruplara ait bitkilerden alınan 0.5 g taze yaprak ve kök örneği sıvı azot ile ezildikten sonra 2.6 mL 0.1 M sodyum fosfat tamponunda (pH 6.5) homojenize edilmiştir. Analiz karışımı, 2.6 mL 50 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7), 0.4 mL 15 mM H₂O₂ ve 0.04 mL enzim ekstraktı içermektedir. Ekstrakt 4°C'de 20 dakika 12.500 rpm'de santrifüjlendi. Süpernatant enzim ölçümü için kullanıldı. H₂O₂'nin ayrışmasını, 240 nm'de absorbanstaki düşüş izledi. Reaksiyon, H₂O₂'nin ortama eklenmesiyle başlamıştır. Örneklerin absorbansı spektrofotometrede 240 nm'de okunmuştur. Toplam CAT enzim aktivitesi, H₂O₂'nin ekstinksiyon katsayısı (40 mM cm⁻¹; 240 nm) kullanılarak reaksiyon başlangıç hızından µmol/dak./gTA olarak hesaplanmıştır.

3.7.5. Askorbat peroksidaz (APX) Aktivitesinin Belirlenmesi

Askorbat peroksidaz enzim aktivitesi; Miyake ve Asada (1992)'ya göre 290 nm dalga boyunda askorbik asit oksidasyonuna bağlı olarak absorbanstaki azalma dikkate alınarak ölçülmüştür. Reaksiyon karışımı (1 ml) 50 mM fosfat tamponu (pH

7.6), 0.1 mM EDTA, 12 mM H₂O₂ ve 0.12 mM askorbik asit ve enzim ekstratından oluşmaktadır.

3.7.6. Malondialdehit (MDA) Düzeylerinin Ölçülmesi

Yapraklarda ve köklerde meydana gelen lipid peroksidasyon derecesinin belirlenmesi için, lipid peroksidasyonunun son ürünü olan malondialdehit (MDA) seviyesi ölçülmüştür. MDA miktarı; Madhava Rao ve Sresty (2000)'e göre belirlenmiştir. Bunun için 0.5 g yaprak örneği, TCA (trikloroasetik asit) ile homojenize edilmiştir. Santrifüjden sonra süpernatanta TBA (tiobarbitürik asit) ve TCA içeren reaksiyon karışımı pipetlenmiş ve tüm deney tüpleri 95°C'de 30 dk. tutulmuştur. Karışım 10.000g x15 dk santrifüjlenmiştir. Oluşan süpernatantın 532 ve 600 nm'deki absorbans değerleri spektrometrede okunmuştur. MDA konsantrasyonu ekstinksiyon katsayısı ($\epsilon=155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) kullanılarak hesaplanmıştır. Yaprak ve kök dokularındaki MDA miktarı $\mu\text{mol/g.TA}$ olarak belirlenmiştir.

3.7.7. Klorofil Miktarının Belirlenmesi

Klorofil miktarları; Lichtenthaler (1987)'e göre saptanmıştır. Yaprak dokularındaki toplam klorofil içeriklerinin belirlenmesi için kontrol ve uygulama grubundaki bitkilerden 3 tekrarlı ve her bir tekrardan 2 bitki olmak üzere 6 adet yaprak (n=6) kullanılmıştır. Bitkilerin yaprak dokularından alınan diskler (R=0.5 cm) (n=6) ependorf tüplere konulmuş ve klorofil içeriğini belirlemek amacıyla tüplere 1 ml, % 100'lük aseton eklenmiştir. Örnekler, pigmentlerin yaprak dokusundan çözültüye geçmesi için 1 hafta buzdolabında (+4°C), karanlıkta bekletilmiştir. Bir hafta süresince buzdolabında bekletilen örnekler, 5000 rpm'de 15 dakika santrifüj edildikten sonra süpernatantların 661.1 ve 644.8 nm dalga boylarındaki absorbans değerleri spektrofotometrik (Biochrom Libra S22) olarak belirlenmiştir. Yaprak dokularındaki fotosentetik pigment miktarları aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\text{Klorofil a (Klo-a)} = (11.24 \times A_{661.6}) - (2.04 \times A_{644.8})$$

$$\text{Klorofil b (Klo-b)} = (20.13 \times A_{644.8}) - (4.19 \times A_{661.6})$$

$$\text{Toplam Klorofil (Klo a+b)} = (7.05 \times A_{661.6}) + (18.09 \times A_{644.8})$$

3.7.8. Silisyum Miktar Tayini

Kök ve yaprak dokularında silisyum seviyesinin belirlenmesi; Lukacova vd. (2013)'ne göre, modifiye edilerek saptanmıştır. Bunun için her bir numuneden 0.3 gr kuru ağırlık alınarak, HNO₃: HClO₄; 85: 15, v/v oranında asit ile karıştırıldı ve şeffaf çözelti elde edilene kadar 150°C'de 2 saat ısıtıldı. Daha sonra H₂O₂ ve HF (Hidrojen florür) eklendi ve 2 saat boyunca 150°C'de ısıtıldıktan sonra H₃BO₃ ilave edildi. Örnekler çift damıtılmış su ile 30 mL hacme tamamlandı ve daha sonra silisyum konsantrasyonu AAS alevli atomik spektrofotometresi (Perkin Elmer Analyst 800) ile analiz edildi.

3.7.9. SiO₂ Uygulanmış Ayciçeği Bitkisi Dokularında SEM, EDX ve AFM Analizleri

SEM ve AFM analizleri çalışma kapsamında ~50 ve ~100 nm SiO₂ uygulanmış olan numunelerde uygulama öncesi ve uygulama sonrası SEM ve AFM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri bitki üzerinde özellikle kök ve yaprak dokusu üzerinde çalışılmış olup analiz öncesinde ilgili numune kurutulmuş kullanılmıştır. Gerek kök gerekse de gövde numuneleri analiz sırasında oluşabilecek olan yapısal deformasyonlara karşı korumak için 20 nm'lik Au/Pd kaplama ile kaplanarak analizlenmiştir. Kaplama işlemi BAL-TEK marka bir spatter kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerine Ag kontak kullanılarak iletkenlik sağlanmıştır ve örnekler analize hazırlanmıştır. Her bir örnek; 500X, 1000X, 2500X, 5000X, 10000X ve 20000X olmak üzere farklı büyütmelerde analizlenmiştir. Ayrıca 150X'lik büyütme boyutunda Na, Mg, K, Ca, C, O, Si ve P elementel haritalarive EDX spektrumları alınmıştır. Kök numunelerinde bu elementlere ek olarak Fe ve S elementlerinin mapping haritalarında çalışılmıştır. Özellikle yaprak numuneleri için AFM analizleri 5 µm'ye 5 µm olacak şekilde atomik kuvvet mikroskopunda non-kontakt çalışma modu dahilinde gerçekleştirilmiştir. AFM analizleri, oda sıcaklığında gerçekleştirildi ve kurutulmuş numuneler direkt olacak şekilde analizlenmiştir.

3.7.10. İstatistik Analizler

Denemeler 3 kez tekrar edilmiştir ve her bir veri 3 teknik tekrar olarak verilmiştir. Sonuçlar ortalama ± standart hata olarak verilmiştir. Analizler sonucu

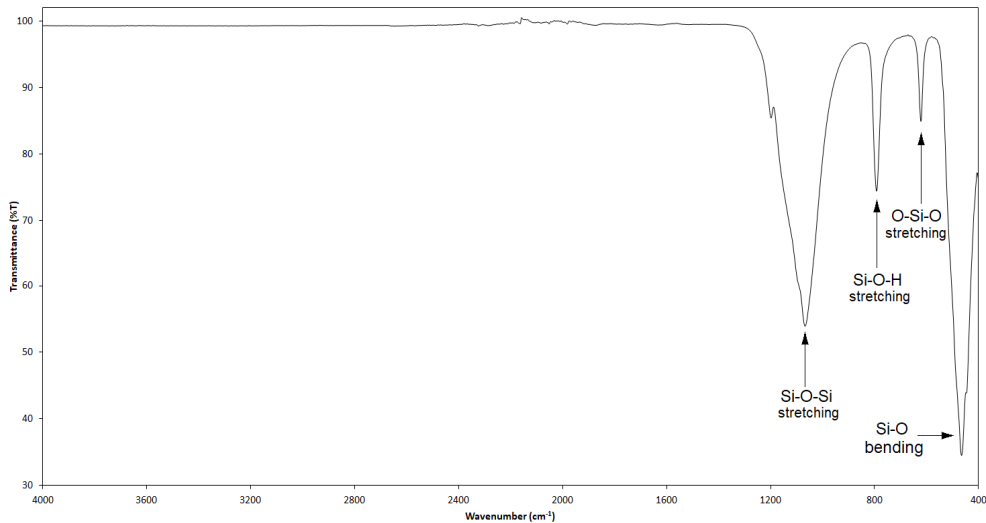
elde edilen verilerin varyans analizleri SPSS 22.0 programı kullanılarak Friedman ve Kruskal-Wallis testine göre belirlendi.

4. BULGULAR

Çalışmamızda, 16 saat aydınlık–8 saat karanlık fotoperiyodunda 23 ± 2 °C sıcaklıkta, % 50-60 neme ayarlanmış bitki büyütme odasında 21 gün büyütülmüş ayçiçeği bitkilerine, ~50 ve ~100 nm boyutunda ve 20 mg/L ve 50 mg/L konsantrasyonlarda SiO₂NP'leri uygulanmıştır. Uygulamadan sonra 1. 4. ve 8. günlerde yaprak ve kök dokularında SiO₂NP'lerin fizyolojik ve biyokimyasal etkileri çeşitli analizlerle belirlenmiştir.

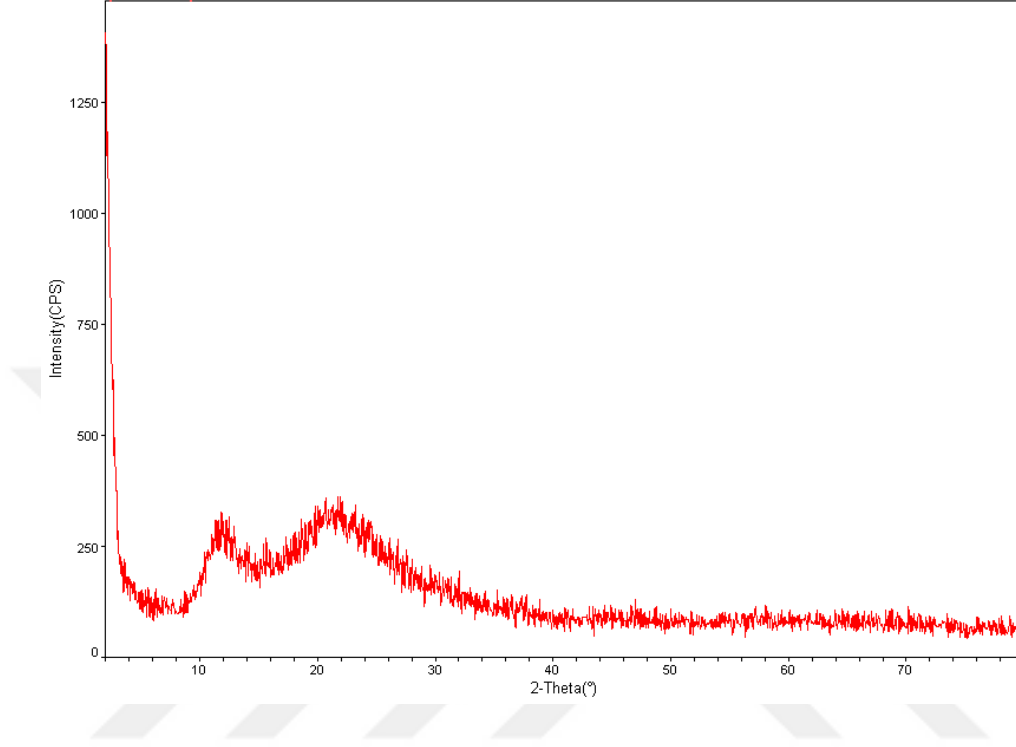
4.1. SiO₂NP'lerin Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

Çalışma kapsamında 2 farklı partikül boyutunda SiO₂NP'leri kullanılmıştır. ~100 nm'lik SiO₂ yapısının yapısal analizinde öncelikle FTIR tekniği kullanılmıştır. SiO₂NP'lerinin FTIR spektrumu Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu spektrumda 1000-1100 cm⁻¹ de keskin ve güçlü Si-O-Si bağı görülmektedir. 560-450 cm⁻¹ de sırasıyla O-Si-O gerilme ve Si-O bending pikleri görülmektedir. Yaklaşık 780 cm⁻¹ de ise Si-O-H gerilme titreşimi sentezlenen SiO₂ yapısının hedeflendiği şekilde sentezlendiğini göstermektedir.



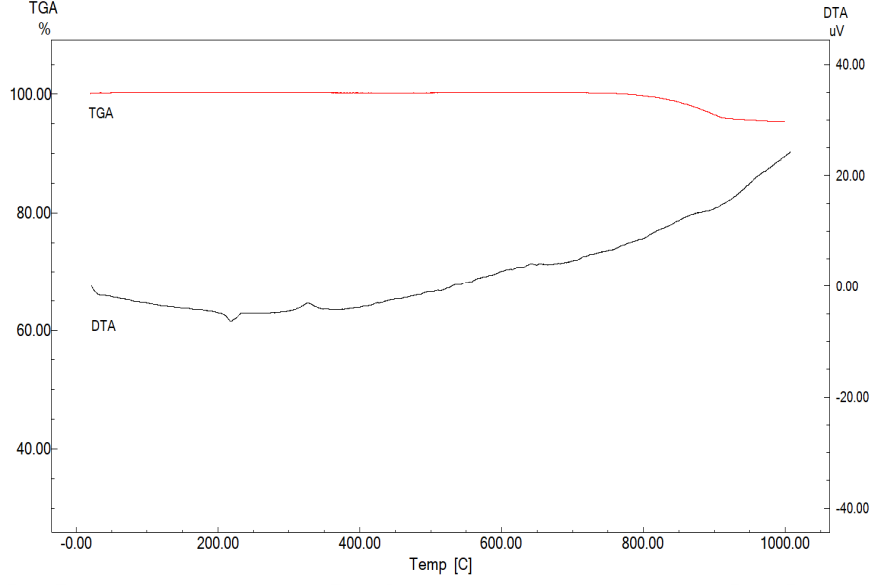
Şekil 4.1 ~100 nm SiO₂NP FTIR spektrumu

Ayrıca Şekil 4.2’de 100 nm’lik SiO₂NP’lerinin X-Ray spektrumu görülmektedir. Bu spektrumda 15-30 Θ değerleri arasında görülen geniş bir bant karakteristik olarak amorf SiO₂ yapısını ispatlamaktadır.



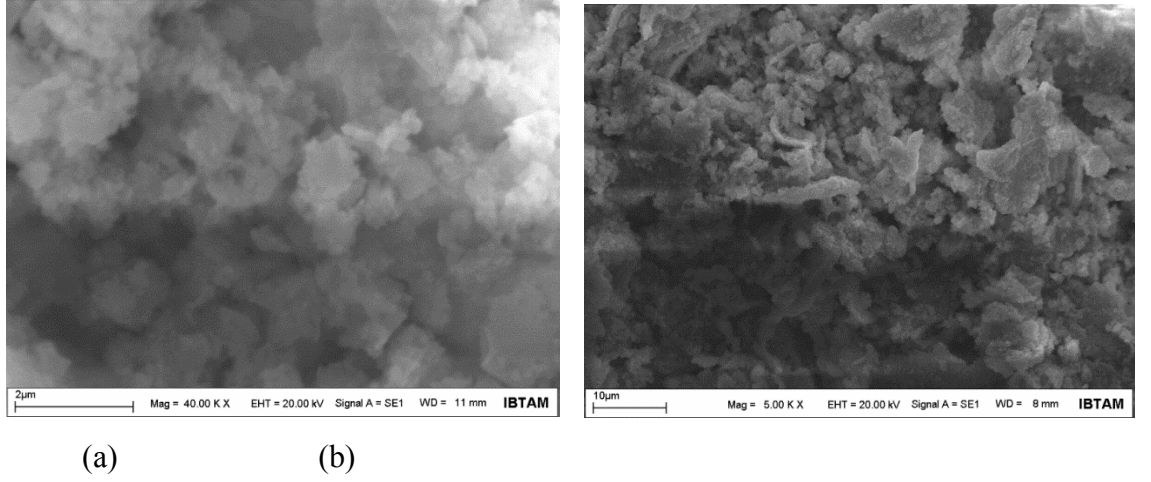
Şekil 4.2 ~100 nm SiO₂NP X-ray spektrumu

Bu yapının saflığının doğrulanması için şekil 4.3’te görülen termal analizler gerçekleştirilmiştir. Özellikle TGA termogramı incelendiğinde 0 ve 800 °C aralığında belirgin bir kütle kaybı görülmemektedir. Bu sonuç, elde edilen SiO₂ yapısının oldukça saf olduğunu bize ispatlamaktadır. Benzer yorumlama 1000 °C’ye kadar alınan DTA termogramlarında da görülmektedir. Her iki sonuçta literatürle (Elias vd. 2014) uyumlu olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen SiO₂ yapısı oldukça saf ve başlangıç malzemelerinden arındırılmış olarak elde edilebilmiştir.



Şekil 4.3 ~100 nm SiO₂NP DTA ve TGA termogramı

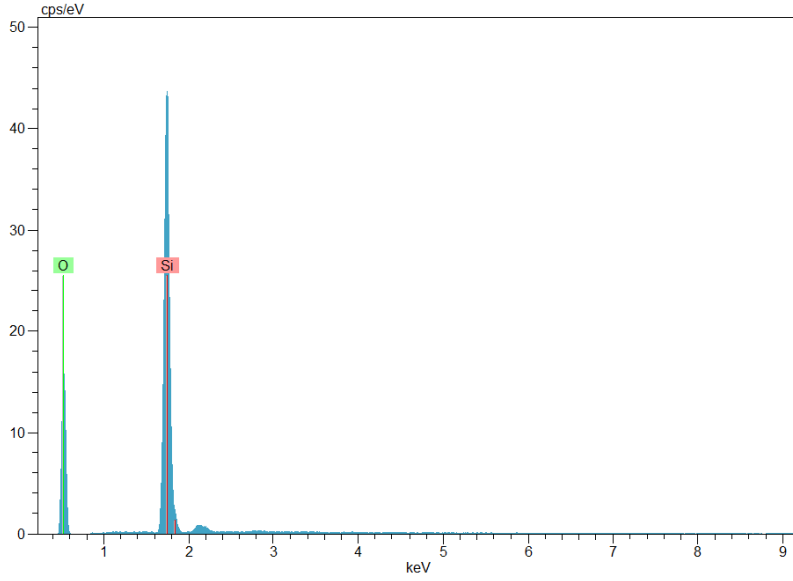
Şekil 4.4 (a,b)'te sentezi gerçekleştirilen NP yapıları için SEM görüntüleri, 5.000 ve 40.000 büyütmede gösterilmiştir. İlgili SEM yapılarında partiküler boyuttan oldukça küçük olduğu ve yapının her yönde ayrı özelliği verecek şekilde homojen dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.4 ~100 nm SiO₂NP 40000X (a) ve 5000X (b)'te SEM görüntüleri

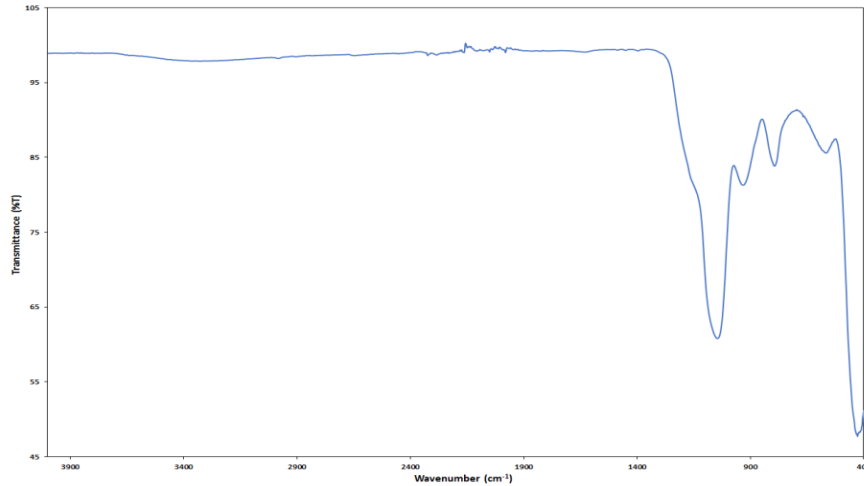
Şekil 4.5'te görüldüğü üzere ~100 nm'lik SiO₂NP'lerin EDX analizinde belirgin olarak 2 temel pik görülmektedir. Birinci pik 0.5247 keV değerinde gelmiş olup oksijenin K α pikidir. İkinci pik ise 1.7390 keV değerinde gelmiş olup silisyum elementinin K α pikidir. Spektrumdan başka bir pik olmadığı ve bu değerlerin

literatürle uygun olduğu görülen sentezi gerçekleştirilmiş olan SiO₂NP'lerin ~100 nm'lik boyut dahilinde saf bir yapıda elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.1 ~100 nm SiO₂NP EDX spektrumu

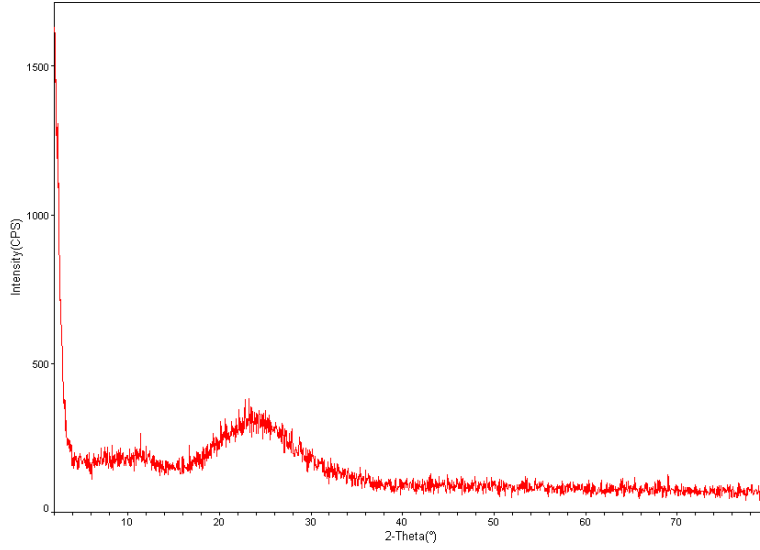
Çalışma kapsamında ayrıca ~50 nm'lik SiO₂ yapıları sentezlenmiş ve FTIR tekniği ile yapısal olarak karakterize edilmiştir. Bu analizlerde ~100 nm'lik yapıya benzer şekilde şekil 4.6'da 420 cm⁻¹'de Si-O bending piki, 500 cm⁻¹'de O-Si-O gerilme titreşimi, 740 cm⁻¹'de Si-O-H gerilme titreşimi ve oldukça belirgin olarak 1000-1100 cm⁻¹ aralığında Si-O-Si gerilme titreşimleri görülmektedir.



Şekil 4.6 ~50 nm SiO₂NP FTIR spektrumu

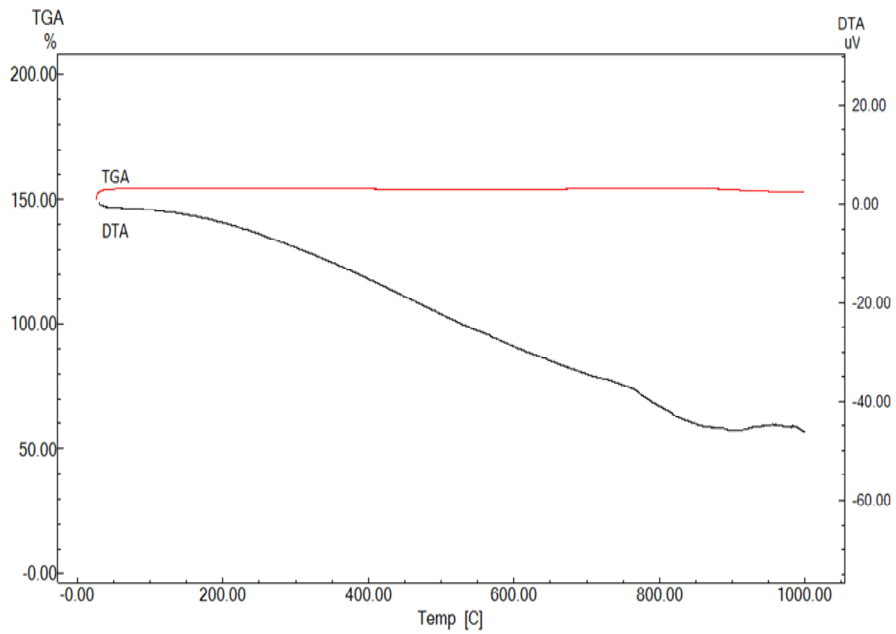
Bu yapı şekil 4.7'de verilen X-Ray spektrumu ile doğrulanmıştır. Bu spektrumda 15 ve 30 Θ değerleri arasında yaygın bant amorf SiO₂ morfolojisini

doğrulamaktadır. Partiküler boyut küçük olduğundan dolayı 15 Θ değerinin altında belli bir pik oluşumu görülmektedir.



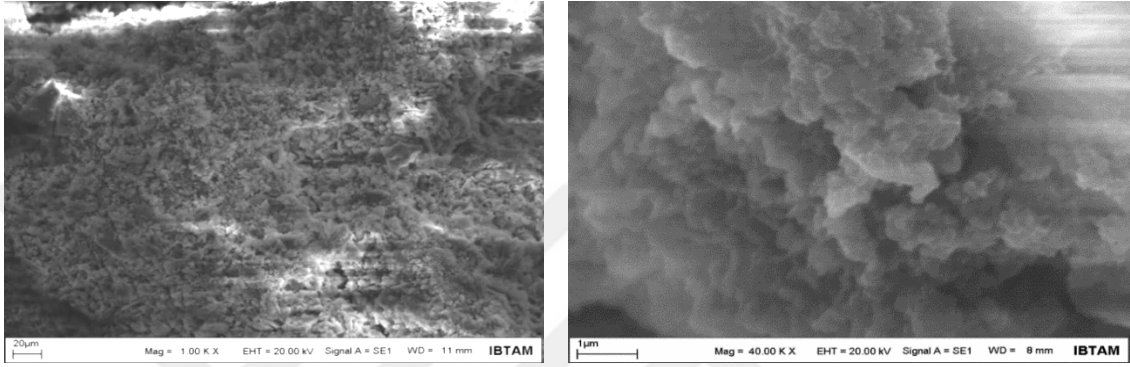
Şekil 4.7 ~50 nm SiO₂NP X-ray spektrumu

Şekil 4.8’de bu SiO₂ yapılarına ait TGA ve DTA termogramları verilmiştir. Yine 100 nm’lik yapıya benzer olarak yorumlandığında TGA termogramlarında 0 ve 800 °C aralığında organik bir yabancı grup ya da maddeden kaynaklı belirgin bir kütle kaybı görülmemiştir. Bu yapı herhangi bir kirlenmenin olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Şekil üzerinde bulunan DTA termogramında ise bu sonucu doğrular bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.8 ~50 nm SiO₂NP DTA ve TGA termogramı

~ 50 nm partikül boyutuna sahip olan SiO₂ yapılarının SEM analizinde 1000 ve 40.000 büyütmeyle alınan SEM görüntüleri şekil 4.9 (a,b)'de verilmiştir. Bu şekil dahilinde SiO₂ yapısının homojen ve partiküler yapıya sahip olduğu parçacık boyutunun ise oldukça küçük olduğu literatürle uyumlu olarak tespit edilmiştir. SEM analizlerinde yüzey yapısının homojen olduğu ve herhangi bir safsızlık içermediği açıkça görülmektedir.

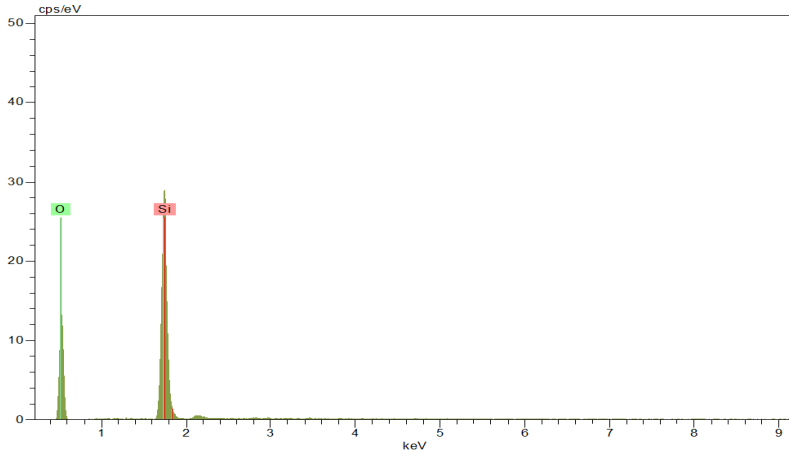


(a)

(b)

Şekil 4.9 ~50 nm SiO₂NP'nin 1000X (a) ve 40000X (b)'te SEM görüntüleri

Şekil 4.10'da ise ~50 nm SiO₂ NP'lerin yapılarının EDX spektrumu verilmiştir. Bu spektrumda Oksijen ve Silisyuma ait belirgin ve keskin 2 adet pik olduğu görülmektedir. Oksijen için 0.5230, silisyuma ait değer ise 1.7385 olarak tespit edilmiştir. İlgili EDX spektrumu SiO₂ yapısının saf ve herhangi bir başka element içermediğini bize ispatlamaktadır.



Şekil 4.10 ~50nm SiO₂NP EDX spektrumu

4.2. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak *Helianthus annuus* L. Bitkisi Yaprak Dokusunda Oransal Su İçeriği (OSİ)'nin Değişimi

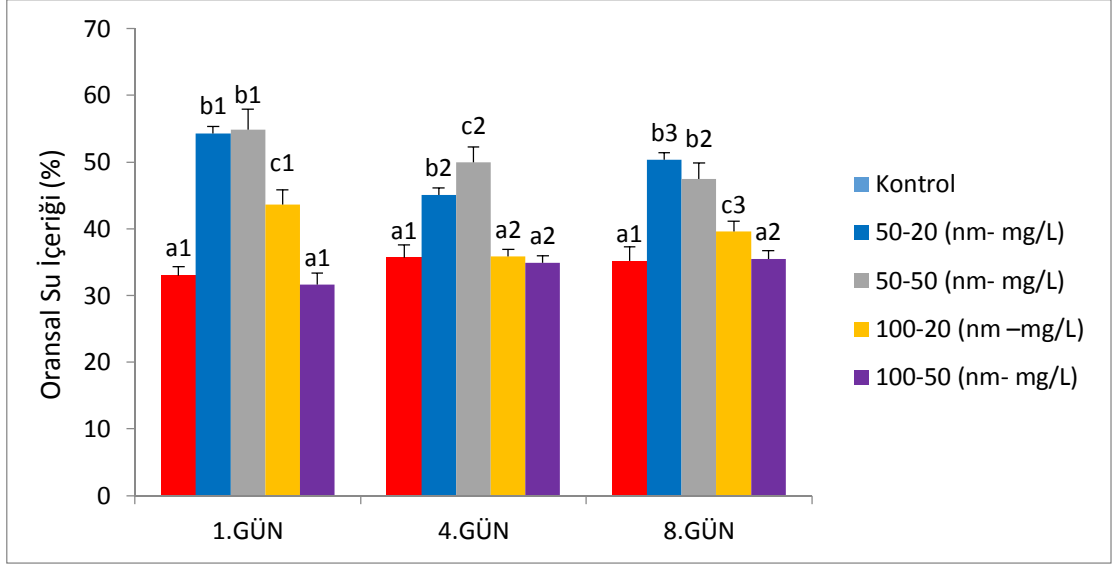
Kontrol ve farklı boyut / konsantrasyonlarda nano-Si uygulanan ayçiçeği bitkisi yaprak dokusunda konsantrasyona ve zamana bağlı olarak OSİ içerikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, kontrol grubunda OSİ içerikleri günlere bağlı olarak sırasıyla, % 33.02 ± 0.24 , 35.67 ± 0.38 , 35.19 ± 0.19 olarak bulunmuştur. 50-20 ve 50-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında OSİ miktarları kontrole göre, yaklaşık 1.2-1.5 katı kadar artış göstermiştir. Kontrol grubuna göre, 100-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda bir artış, 50-20 ve 50-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarına göre ise, bir azalış göstermiştir ($p \leq 0.05$). 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda OSİ miktarları kontrol ve diğer uygulama gruplarına göre azalma göstermiştir. En yüksek OSİ miktarı 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunun 1. gününde % 54.85 ± 0.01 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.1 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak dokusunda oransal su içerikleri

| | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | 33.02 ± 0.24^{a1} | 54.33 ± 0.50^{b1} | 54.85 ± 0.10^{b1} | 43.61 ± 0.09^{c1} | 31.66 ± 0.20^{a1} |
| 4. Gün | 35.67 ± 0.38^{a2} | 45.1 ± 0.38^{b2} | 49.93 ± 0.10^{c2} | 35.87 ± 0.07^{a2} | 34.93 ± 0.09^{a2} |
| 8. Gün | 35.19 ± 0.19^{a2} | 50.36 ± 0.48^{b3} | 47.47 ± 0.37^{c2} | 39.59 ± 0.29^{d3} | 35.17 ± 0.03^{a2} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması \pm standart hata olarak verilmiştir. Satırlarda farklı harfler ve sütunlarda farklı rakamlarla gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).



Şekil 4.2 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak dokusunda oransal su içerikleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf ve rakamlarla gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

Yapılan istatistik analize göre, yaprak dokusunda nano-Si uygulamasının kontrol grubuna göre, 1. günde 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubu, 4. gün 100-20 ve 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubu, 8. gün 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubu hariç OSİ miktarları arasındaki farkların istatistiksel açıdan önemli olduğu bulunmuştur ($p \leq 0.05$).

4.3. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak *Helianthus annuus* L. Bitkisi Yaprak ve Kök Dokusunda Toplam Protein Miktarındaki Değişim

Kontrol ve değişik konsantrasyonlarda nano-Si uygulanan ayçiçeği bitkisi kök ve yaprak dokusunda konsantrasyona ve zamana bağlı olarak toplam protein miktarları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, *Helianthus annuus* L. bitkisi kontrol kök dokusunda 1. gün toplam protein miktarlarında kontrol grubuna göre; 50-20, 50-50 ve 100-50 (nm-mg/L) uygulamalarında azalma, 100-20 (nm-mg/L) uygulanmasında ise bir artış saptanmıştır. En yüksek toplam protein miktarı kök dokusunda kontrol grubunda 4. gün 37.06 ± 1.61 mg/mL olarak bulunmuştur. Kök dokusunda en düşük toplam protein miktarı 50-20 (nm-mg/L) uygulamasında 8. günde yaklaşık iki katı kadar azalma göstererek 19.21 ± 1.42 mg/mL olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre; nano-Si uygulamasının kontrole göre, 1. günde 100-50 (nm-mg/L) 4.

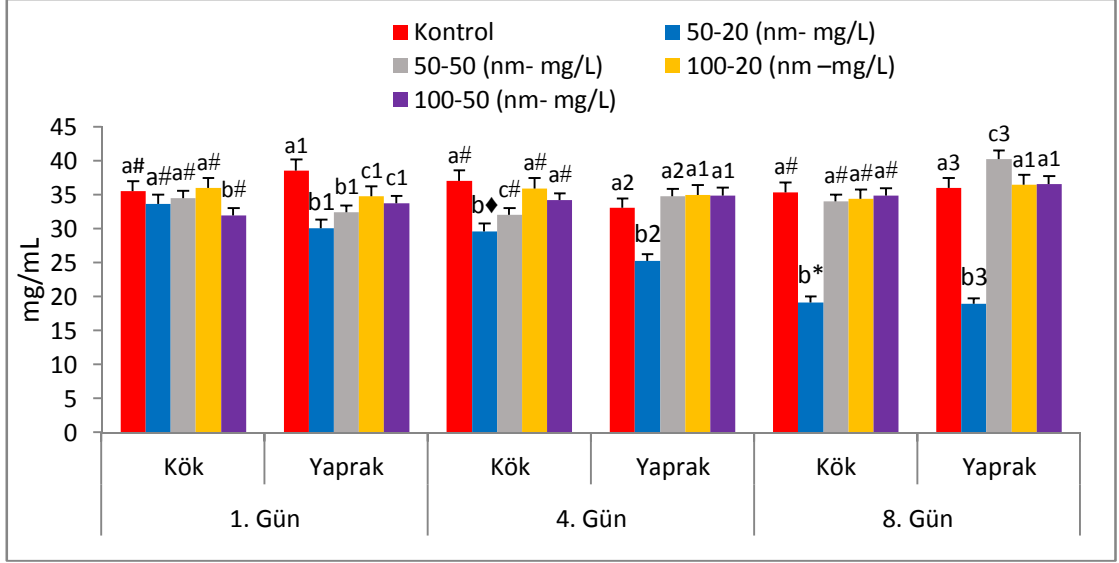
günde 50-20, 50-50 (nm-mg/L), 8. günde ise, 50-20 (nm-mg/L) uygulama grupları arasındaki farklar önemli bulunmuştur ($p \leq 0.05$).

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.12’de görüldüğü gibi, *Helianthus annuus* L. bitkisi kontrol yaprak dokusunda 1. 4. ve 8. günlerde toplam protein miktarları sırasıyla; 38.59 ± 0.03 , 33.08 ± 0.19 ve 36.03 ± 0.34 mg/L olarak bulunmuştur. 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda günlere bağlı olarak toplam protein miktarlarında özellikle 8. günde yaklaşık iki katı kadar bir azalma göstermiş ve 18.98 ± 0.60 mg/L olarak saptanmıştır. 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda ise, 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubuna göre, toplam protein miktarlarında günlere bağlı olarak artış görülürken 8. günde yaklaşık iki katı kadar artış saptanmıştır. 100-20 ve 100-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında kontrol grubuna göre, 1. günde azalma 4. ve 8. günlerde ise çok az artış saptanmıştır.

Çizelge 4.2 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda toplam protein miktarları

| | | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|--------|-------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | Kök | $35.54 \pm 0.26^{a\#}$ | $33.65 \pm 0.16^{a\#}$ | $34.56 \pm 0.75^{a\#}$ | $36.00 \pm 0.54^{a\#}$ | $32.02 \pm 1.95^{b\#}$ |
| | Yaprak | 38.59 ± 0.03^{a1} | 30.08 ± 0.02^{b1} | 32.43 ± 0.46^{b1} | 34.81 ± 0.15^{c1} | 33.76 ± 0.14^{c1} |
| 4. Gün | Kök | $37.06 \pm 1.61^{a\#}$ | $29.61 \pm 1.01^{b\#}$ | $32.06 \pm 0.29^{c\#}$ | $35.98 \pm 0.86^{a\#}$ | $34.20 \pm 0.58^{a\#}$ |
| | Yaprak | 33.08 ± 0.19^{a2} | 25.25 ± 0.28^{b2} | 34.84 ± 0.91^{a2} | 35.04 ± 0.43^{a1} | 34.94 ± 0.15^{a1} |
| 8. Gün | Kök | $35.39 \pm 1.13^{a\#}$ | $19.21 \pm 1.42^{b*}$ | $34.02 \pm 0.27^{a\#}$ | $34.41 \pm 0.35^{a\#}$ | $34.88 \pm 0.59^{a\#}$ |
| | Yaprak | 36.03 ± 0.34^{a3} | 18.98 ± 0.60^{b3} | 40.26 ± 1.18^{c3} | 36.50 ± 0.63^{a1} | 36.64 ± 0.26^{a1} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması \pm standart hata olarak verilmiştir ($\diamond\#^*$). Satırlarda farklı harfler ve sütunlarda farklı rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).



Şekil 4.3 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda toplam protein miktarları. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

Yapılan istatistik analize göre, yaprak dokusunda konsantrasyona bağlı olarak nano-Si uygulamasının 1. 4. (50-50 nm-mg/L hariç) ve 8. gün uygulama grupları kontrole göre, toplam protein miktarları arasındaki farkların istatistiksel açıdan önemli olduğu bulunmuştur ($p \leq 0.05$). Farklı boyut ve konsantrasyondaki uygulama gruplarında ise günlere bağlı olarak; kontrol, 50-20, 50-50, 100-20 ve 100-50 (nm-mg/L) (4.ve 8. gün hariç) uygulama gruplarında toplam protein miktarları arasındaki farkların istatistiksel açıdan önemli olduğu bulunmuştur ($p \leq 0.05$).

4.4. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak *Helianthus annuus* L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Süperoksit Dismutaz (SOD) Enzim Aktivitesinin Değişimi

Kontrol ve değişik boyut/konsantrasyonlarda nano-Si uygulanmış ayçiçeği bitkisi kök ve yaprak dokusunda konsantrasyona ve zamana bağlı olarak SOD aktiviteleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi kök ve yaprak dokusunda SOD enzim aktiviteleri

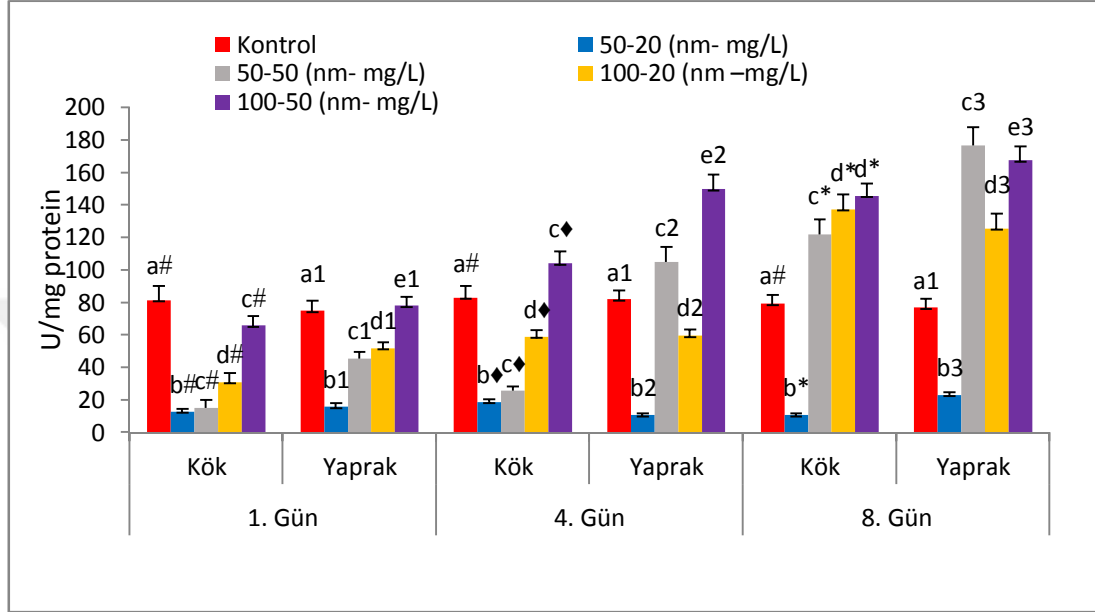
| | | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|--------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | Kök | 81.41±0.34 ^{a#} | 12.86±0.33 ^{b#} | 15.00±0.1b ^{c#} | 31.12±0.63 ^{d#} | 65.87±1.22 ^{e#} |
| | Yaprak | 74.96±1.01 ^{a1} | 15.85±0.50 ^{b1} | 45.67±0.19 ^{c1} | 51.89±0.62 ^{d1} | 78.09±0.10 ^{e1} |
| 4. Gün | Kök | 83.00±0.57 ^{a#} | 18.79±0.06 ^{b*} | 25.74±0.66 ^{c*} | 59.03±0.34 ^{d*} | 104.25±0.43 ^{e*} |
| | Yaprak | 82.09±0.16 ^{a1} | 10.67±0.18 ^{b2} | 104.87±0.08 ^{c2} | 59.66±1.33 ^{d2} | 149.94±0.86 ^{e2} |
| 8. Gün | Kök | 79.42±0.89 ^{a#} | 10.67±0.11 ^{b*} | 121.83±0.80 ^{c*} | 137.53±0.33 ^{d*} | 137.53±0.33 ^{d*} |
| | Yaprak | 76.90±0.56 ^{a1} | 23.23±0.52 ^{b3} | 176.61±0.73 ^{c3} | 125.60±0.17 ^{d3} | 167.67±0.24 ^{e3} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir (♦#*). Satırlarda farklı harfler ve sütunlarda farklı rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir (P<0.05).

Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi, *Helianthus annuus* L. bitkisi kontrol kök dokusunda SOD enzim aktivitesi 1. 4. ve 8. günde sırasıyla; 81.41±0.34, 83.00±0.57, 79.42±0.89 U/mg protein olarak belirlenmiştir. 50-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulaması yapılan gruplarda SOD enzim aktiviteleri kontrol grubuna göre, 1. günde 6.3, 4. günde 4.4, 8. günde 7.4 katı kadar azalmalar göstermiştir (p≤0.05). Kök dokusunda en düşük SOD aktivitesi 50-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulamasının 8. gününde 10.67±0.11 U/mg protein olarak saptanmıştır. 50-50, 100-20, 100-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında ise 50-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulamasına göre, SOD aktiviteleri artış göstermiştir. Kontrol grubu hariç, tüm uygulama gruplarında günlere bağlı olarak kök dokularında SOD enzim aktivitesi arasındaki farklar önemli bulunmuştur (p≤0.05).

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.13'te görüldüğü gibi, 50-50, 100-20, 100-50 (nm-mg/L) SiO₂ uygulamasında 8. günde kök dokusunda SOD aktiviteleri yaklaşık 12 katı kadar artış göstererek sırası ile 121.83±0.80 U/mg Protein ve 137.53 U/mg Protein olarak bulunmuştur. 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda ise, 4. ve 8. günde kontrol ve diğer uygulama gruplarına göre SOD aktivitesi yüksek

bulunmuştur. Kök dokusunda en yüksek SOD aktivitesi 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 8.günde 137.53 U/mg protein olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre, kök dokusunda kontrole göre, nano-Si uygulamasının tüm konsantrasyonlarda 1. 4. ve 8. gün (100-20, 100-50 nm-mg/L hariç) de SOD enzim aktiviteleri arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır ($p \leq 0.05$).



Şekil 4.4 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi kök ve yaprak dokusunda SOD enzim aktiviteleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

Helianthus annuus L. bitkisi yaprak dokusunda, kontrol grubunda SOD aktivitesi 1. 4. ve 8. günlerde sırasıyla; 74.96 ± 1.01 , 82.09 ± 0.16 ve 76.90 ± 0.56 U/mg protein olarak saptanmıştır. 50-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulaması yapılan gruplarda SOD enzim aktiviteleri kontrol grubuna göre, 1. günde 4.7, 4. günde 7.6, 8. günde 3.3 katı kadar azalmalar göstermiştir ($p \leq 0.05$). Yaprak dokusunda en düşük SOD aktivitesi 50-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulamasının 4. gününde 10.67 ± 0.11 U/mg protein olarak saptanmıştır.

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.13'te görüldüğü gibi, 50-50, 100-20, 100-50 (nm-mg/L) SiO₂ uygulamasında 50-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulamasına göre, 8. günde yaprak dokusunda SOD aktiviteleri yaklaşık 5-7 katı kadar artış göstererek sırası ile 176.61 ± 0.73 , 125.60 ± 0.17 ve 167.67 U/mg protein olarak bulunmuştur. Yaprak dokusunda en yüksek SOD aktivitesi 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 8. günde

176.61±0.73 U/mg protein olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre, kontrol grubuna göre, yaprak dokusunda nano-Si uygulamasının tüm konsantrasyonlarda ve zamana bağlı olarak SOD enzim aktiviteleri arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır (p≤0.05).

4.5. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak *Helianthus annuus* L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Katalaz (CAT) Enzim Aktivitesinin Değişimi

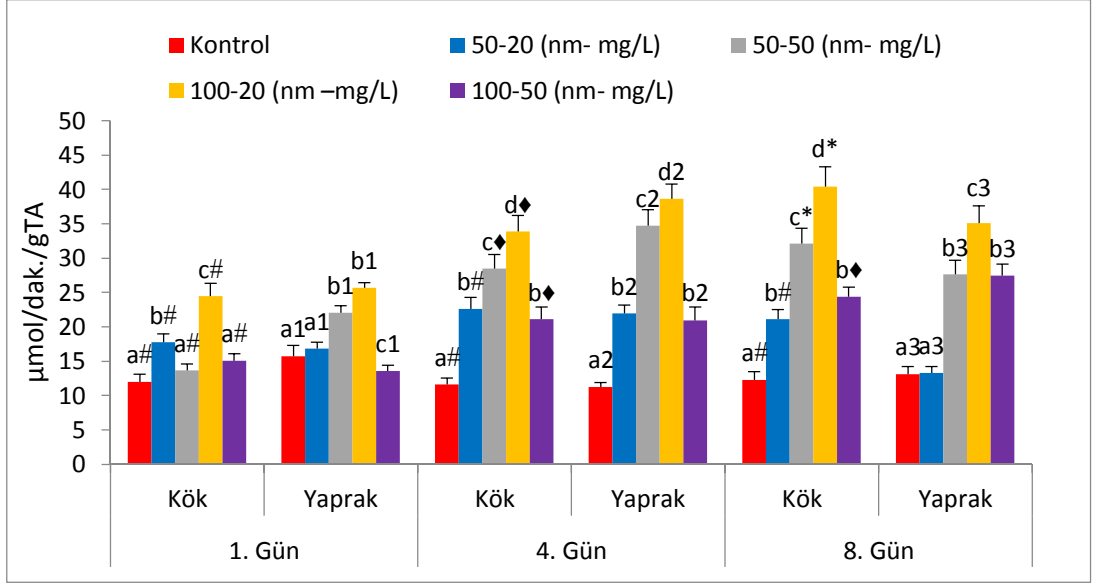
Kontrol ve değişik boyut/konsantrasyonlarda nano-Si uygulanmış ayçiçeği bitkisi kök ve yaprak dokusunda konsantrasyona ve zamana bağlı olarak CAT aktiviteleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi, *H.annuus* L. bitkisi kontrol kök dokusunda CAT enzim aktivitesi kontrol, 1. 4. ve 8. günde sırasıyla, 11.95±0.02, 11.61±0.40, 12.31±0.60 µmol/dak./gTA. olarak belirlenmiştir. Kontrole göre, tüm uygulama gruplarında günlere bağlı olarak CAT aktiviteleri artış göstermiştir. En yüksek CAT aktivitesi 100-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulama grubunda 8. günde yaklaşık 3 katı kadar bir artış göstererek 40.44±0.32 µmol/dak./gTA. olarak saptanmıştır (p≤0.05). Yapılan istatistik analize göre, kök dokusunda nano-Si uygulamasının tüm boyut/konsantrasyonlarda günlere bağlı olarak kontrole göre; 50-50, 100-20, 100-50 (nm-mg/L) (4. ve 8. gün hariç) uygulama gruplarında CAT enzim aktiviteleri arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır (p≤0.05).

Çizelge 4.3 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda CAT enzim aktivitesi

| | | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|--------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | Kök | 11.95±0.02 ^{a#} | 17.74±0.15 ^{b#} | 13.66±0.69 ^{a#} | 24.43±0.39 ^{c#} | 15.04±0.24 ^{a#} |
| | Yaprak | 15.76±0.70 ^{a1} | 16.86±0.61 ^{a1} | 22.01±0.69 ^{b1} | 25.71±0.30 ^{b1} | 13.54±0.43 ^{c1} |
| 4. Gün | Kök | 11.61±0.40 ^{a#} | 22.62±0.70 ^{b#} | 28.47±0.39 ^{c*} | 33.90±0.43 ^{d*} | 21.13±0.58 ^{b*} |
| | Yaprak | 11.21±0.32 ^{a2} | 21.96±0.49 ^{b2} | 34.72±0.16 ^{c2} | 38.66±0.30 ^{d2} | 20.98±0.13 ^{b2} |
| 8. Gün | Kök | 12.31±0.60 ^{a#} | 21.08±0.98 ^{b#} | 32.08±0.60 ^{c*} | 40.44±0.32 ^{d*} | 24.39±0.09 ^{b*} |
| | Yaprak | 13.14±0.19 ^{a3} | 13.26±0.21 ^{a3} | 27.60±0.21 ^{b3} | 35.14±0.95 ^{c3} | 27.42±0.34 ^{b3} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir (♦#*). Satırlarda farklı harfler ve sütunlarda farklı rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir (P<0.05).



Şekil 4.5 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda CAT enzim aktivitesi. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

Helianthus annuus L. bitkisi yaprak dokusunda kontrol grubunda CAT aktivitesi 1. 4. ve 8. günlerde sırasıyla; 15.76 ± 0.70 , 11.21 ± 0.32 ve 13.14 ± 0.19 $\mu\text{mol/dak./gTA}$. olarak saptanmıştır. Kontrol grubuna göre, tüm uygulama gruplarında (100-50 nm-mg/L SiO₂ uygulaması 1.gün hariç) günlere bağlı olarak CAT aktiviteleri artış göstermiştir. 50-50 ve 100-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulamalarındaki CAT aktiviteleri 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubuna göre, günlere bağlı olarak yaklaşık 1.3-1.7 katı kadar artış göstermiştir. 100-50 (nm-mg/L) SiO₂ uygulama grubunda ise, 1. ve 4. günlerde diğer uygulama gruplarına göre CAT aktivitesinde bir azalma 8. günde ise 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubundaki miktarına benzer bulunmuştur. Yaprak dokusunda en yüksek CAT aktivitesi 100-20 (nm-mg/L) SiO₂ uygulama grubunda 4. günde 38.66 ± 0.30 $\mu\text{mol/dak./gTA}$. olarak bulunmuştur. Yapılan istatistik analize göre, kontrol grubuna göre, yaprak dokusunda nano-Si uygulamasının tüm konsantrasyonlarda ve zamana bağlı olarak CAT enzim aktiviteleri arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır ($p \leq 0.05$).

4.6. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak *Helianthus annuus* L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Askorbat Peroksidaz (APX) Enzim Aktivitesinin Değişimi

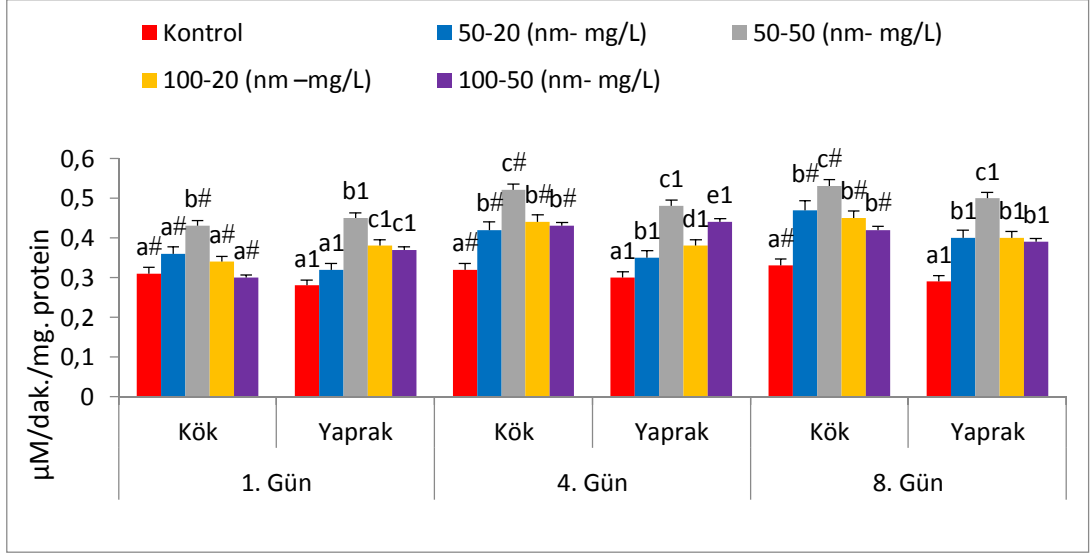
Kontrol ve değişik boyut/konsantrasyonlarda da nano-Si uygulanmış ayçiçeği bitkisi kök ve yaprak dokusunda konsantrasyona ve zamana bağlı olarak APX aktiviteleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi, *Helianthus annuus* L. bitkisi kontrol kök dokusunda APX enzim aktivitesi 1. 4. ve 8. günde sırasıyla, 0.31 ± 0.01 , 0.32 ± 0.01 , 0.33 ± 0.01 $\mu\text{M}/\text{dak.}/\text{mg.protein}$ olarak belirlenmiştir. Kontrole göre, tüm uygulama gruplarında (1. gün 100-50 nm-mg/L uygulama grubu hariç) günlere bağlı olarak APX aktiviteleri artış göstermiştir. En yüksek APX aktivitesi 50-50 (nm-mg/L) SiO₂ uygulama grubunda 8. günde 0.53 ± 0.01 $\mu\text{M}/\text{dak.}/\text{mg.protein}$ olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre, kök dokusunda kontrole göre, 1.gün (50-50 nm-mg/L hariç), 4. ve 8. gün (kontrol ve 50-50 nm-mg/L uygulama grubu hariç) tüm uygulama gruplarında boyut/konsantrasyona bağlı olarak APX enzim aktivitesi arasındaki farkın önemsiz olduğu bulunmuştur ($p\geq 0.05$).

Çizelge 4.4 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda APX enzim aktivitesi

| | | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|--------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | Kök | $0.31\pm 0.01^{a\#}$ | $0.36\pm 0.02^{a\#}$ | $0.43\pm 0.01^{b\#}$ | $0.34\pm 0.01^{a\#}$ | $0.30\pm 0.01^{a\#}$ |
| | Yaprak | 0.28 ± 0.01^{a1} | 0.32 ± 0.01^{a1} | 0.45 ± 0.01^{b1} | 0.38 ± 0.01^{c1} | 0.37 ± 0.02^{c1} |
| 4. Gün | Kök | $0.32\pm 0.01^{a\#}$ | $0.42\pm 0.01^{b\#}$ | $0.52\pm 0.01^{c\#}$ | $0.44\pm 0.01^{b\#}$ | $0.43\pm 0.01^{b\#}$ |
| | Yaprak | 0.30 ± 0.01^{a1} | 0.35 ± 0.01^{b1} | 0.48 ± 0.01^{c1} | 0.38 ± 0.01^{d1} | 0.44 ± 0.01^{c1} |
| 8. Gün | Kök | $0.33\pm 0.01^{a\#}$ | $0.47\pm 0.01^{b\#}$ | $0.53\pm 0.01^{c\#}$ | $0.45\pm 0.01^{b\#}$ | $0.42\pm 0.01^{b\#}$ |
| | Yaprak | 0.29 ± 0.01^{a1} | 0.40 ± 0.02^{b1} | 0.50 ± 0.02^{c1} | 0.40 ± 0.01^{b1} | 0.39 ± 0.01^{b1} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması \pm standart hata olarak verilmiştir ($\diamond\#^*$). Satırlarda farklı harfler ve sütunlarda farklı rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P<0.05$).



Şekil 4.6 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda APX enzim aktivitesi. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

Helianthus annuus L. bitkisi yaprak dokusunda, kontrol grubunda APX aktivitesi 1. 4. ve 8. günlerde sırasıyla, 0.28 ± 0.01 , 0.30 ± 0.01 ve 0.29 ± 0.01 $\mu\text{M/dak./mg.protein}$ olarak saptanmıştır. Çizelge 4.5 ve Şekil 4.15 incelendiğinde, kontrol grubuna göre, tüm uygulama gruplarında APX aktivitesi zamana bağlı olarak artış göstermiştir. En yüksek yaprak dokusunda APX aktivitesi 50-50 (nm-mg/L) SiO_2 uygulama grubunda 8. günde 0.50 ± 0.02 $\mu\text{M/dak./mg.protein}$ olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre, yaprak dokusunda kontrole göre, nano-Si uygulamasının tüm konsantrasyonlarda (1. gün 50-20 nm-mg/L hariç) zamana bağlı olarak APX enzim aktiviteleri arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır ($p \leq 0.05$).

4.7. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak *Helianthus annuus* L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Malondialdehit (MDA) Düzeylerindeki Değişim

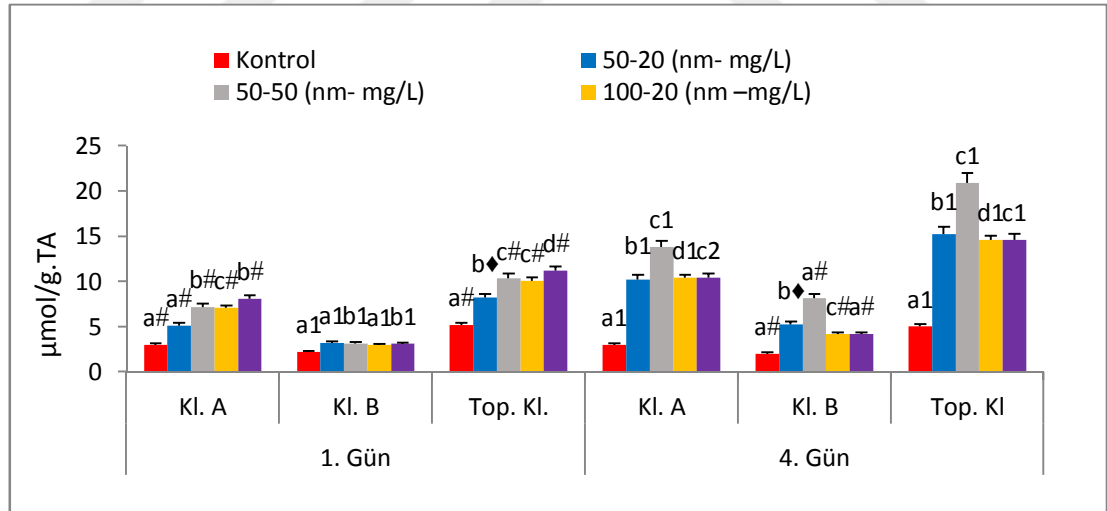
Kontrol ve değişik boyut/konsantrasyonlarda nano-Si uygulanmış ayçiçeği bitkisi kök ve yaprak dokusunda, konsantrasyona ve zamana bağlı olarak MDA düzeyleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi, *Helianthus annuus* L. bitkisi kontrol kök dokusunda, MDA düzeyleri 1. 4. ve 8. gün sırasıyla, 2.97 ± 0.07 , 2.48 ± 0.04 ve 2.31 ± 0.25 $\mu\text{mol/g.TA}$ olarak saptanmıştır. 50-20 (nm-mg/L) SiO_2 uygulama grubunda kontrole göre, 1. 4. ve 8. günlerde MDA düzeylerinde azalma görülmüştür. 50-50, 100-20 ve 100-50 (nm-mg/L) SiO_2 uygulamalarındaki

MDA düzeyleri kontrole göre (50-50 nm-mg/L 1.gün hariç), artış göstermiştir. En yüksek MDA düzeyi kök dokusunda 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 8. günde 6.06 ± 0.47 $\mu\text{mol/g.TA}$ olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre, kök dokusunda kontrole göre, nano-Si uygulamasının tüm konsantrasyonlarda (1. gün 100-50 nm-mg/L hariç, 8. günde 50-20, 50-50 nm-mg/L hariç) zamana bağlı olarak MDA düzeyleri arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır ($p \leq 0.05$).

Çizelge 4.5 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda MDA düzeyleri

| | | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|--------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | Kök | $2.97 \pm 0.07^{a\#}$ | $2.06 \pm 0.02^{b\#}$ | $2.37 \pm 0.08^{b\#}$ | $3.92 \pm 0.05^{c\#}$ | $3.09 \pm 0.18^{a\#}$ |
| | Yaprak | 4.60 ± 0.04^{a1} | 2.18 ± 0.02^{b1} | 2.21 ± 0.07^{b1} | 4.08 ± 0.02^{a1} | 4.97 ± 0.02^{a1} |
| 4. Gün | Kök | $2.48 \pm 0.04^{a\#}$ | $1.96 \pm 0.02^{d\#}$ | $3.39 \pm 0.03^{c\#}$ | $3.52 \pm 0.18^{c\#}$ | $5.23 \pm 0.25^{b\#}$ |
| | Yaprak | 4.12 ± 0.05^{a1} | 2.83 ± 0.04^{c2} | 2.82 ± 0.04^{c1} | 3.63 ± 0.04^{d1} | 5.63 ± 0.04^{b1} |
| 8. Gün | Kök | $2.31 \pm 0.25^{a\#}$ | $1.96 \pm 0.05^{a\#}$ | $2.42 \pm 0.19^{a\#}$ | $3.78 \pm 0.03^{c\#}$ | $6.06 \pm 0.47^{b\#}$ |
| | Yaprak | 4.01 ± 0.03^{a1} | 2.06 ± 0.03^{c1} | 2.49 ± 0.09^{c1} | 3.25 ± 0.04^{d1} | 5.44 ± 0.47^{b1} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması \pm standart hata olarak verilmiştir ($\diamond\#$). Satırlarda farklı harfler ve sütunlarda farklı rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).



Şekil 4.7 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda MDA düzeyleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.16'da görüldüğü gibi *H.annuus* L. bitkisi kontrol yaprak dokusunda MDA düzeyleri 1. 4. ve 8. gün de sırasıyla, 4.60, 4.12, ve 4.01 $\mu\text{mol/g.TA}$ olarak saptanmıştır. 50-20 ve 50-50 (nm-mg/L) SiO_2 uygulamasında

kontrole göre, MDA içeriğinde günlere bağlı olarak yaklaşık 2 katı kadar bir azalma saptanmıştır. 100-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda kontrole göre, 1. günde azalma 4. ve 8. günlerde çok az bir artış, 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda ise; kontrole göre MDA içeriğinde azalma bulunmuştur. En yüksek MDA düzeyi yaprak dokusunda 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 4. günde 5.63 ± 0.04 $\mu\text{mol/g.TA}$ olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre, yaprak dokusunda kontrole göre, nano-Si uygulamasının 1. gün (100-20 ve 100-50 nm-mg/L uygulama grupları hariç), 4. ve 8. günlerde tüm konsantrasyonlarda zamana bağlı olarak MDA düzeyleri arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır ($p \leq 0.05$).

4.8. Nano-Si Uygulamasına Bağlı Olarak *Helianthus annuus* L. Bitkisi Yaprak Dokusunda Klorofil a, Klorofil b, Toplam Klorofil Miktarları Üzerine Etkisi

Kontrol ve değişik konsantrasyonlarda nano-Si uygulanmış ayçiçeği bitkisi yaprak dokusunda konsantrasyona ve zamana bağlı olarak klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil miktarları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

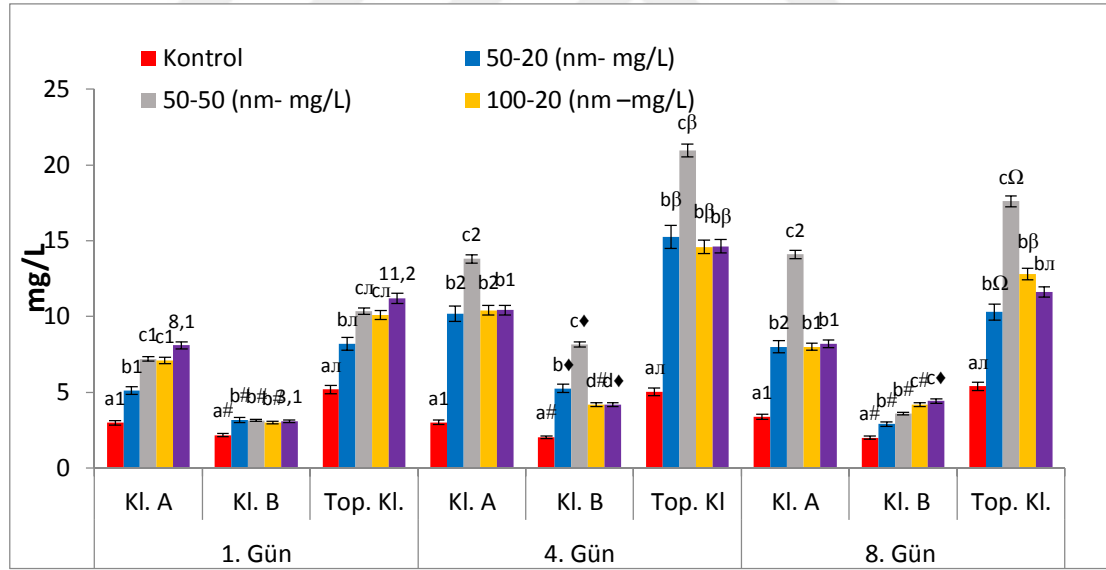
Kontrol bitki yaprak dokusunda 1. gün 3.00 ± 0.05 mg/L olarak bulunan klorofil a miktarı tüm uygulama gruplarında konsantrasyon ve zamana bağlı olarak artış göstermiştir. Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi, klo-a miktarları tüm uygulama gruplarında kontrole göre yaklaşık 2-3 katı, 4. günde 3-4.5 katı, 8. günde ise yaklaşık 2-4 katı kadar artış göstermiştir. En yüksek klorofil a miktarı 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 8. günde 14.10 ± 0.38 mg/L olarak bulunmuştur. Yapılan istatistik analize göre, kontrole göre, tüm uygulama gruplarında zamana bağlı olarak klo-a miktarları arasındaki fark önemli bulunmuştur ($p \leq 0.05$).

Klo-b miktarları ise, kontrol grubunda 1. 4. ve 8. günlerde 2.18 ± 0.04 , 2.03 ± 0.05 , 2.00 ± 0.01 mg/L olarak saptanmıştır. Tüm uygulama gruplarında konsantrasyon ve zamana bağlı olarak klo-b miktarlarında da artış bulunmuş ve en yüksek miktar 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 4. günde 8.15 ± 0.36 mg/L olarak saptanmıştır. Yapılan istatistik analize göre, kontrol grubuna göre tüm uygulama gruplarında zamana bağlı olarak klo-b miktarları arasındaki fark önemli bulunmuştur ($p \leq 0.05$).

Çizelge 4.6 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak dokusunda klorofil a, klorofil b, toplam klorofil miktarları

| | | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Klorofil Miktarı (mg/L) | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | Klorofil a | 3.00±0.05 ^{a1} | 5.11±0.05 ^{b1} | 7.20±0.13 ^{c1} | 7.10±0.06 ^{c1} | 8.10±0.06 ^{d1} |
| | Klorofil b | 2.18±0.04 ^{a#} | 3.18±0.14 ^{b#} | 3.14±0.06 ^{b#} | 3.00±0.05 ^{b#} | 3.10±0.01 ^{b#} |
| | Toplam Klorofil | 5.18±0.21 ^{aπ} | 8.20±0.27 ^{bπ} | 10.34±0.25 ^{cπ} | 10.10±0.12 ^{cπ} | 11.20±0.12 ^{cπ} |
| 4. Gün | Klorofil a | 3.01±0.12 ^{a1} | 10.20±0.59 ^{b2} | 13.80±0.51 ^{c2} | 10.41±0.08 ^{b2} | 10.43±0.32 ^{b1} |
| | Klorofil b | 2.03±0.05 ^{a#} | 5.26±0.35 ^{b*} | 8.15±0.36 ^{c*} | 4.18±0.40 ^{d#} | 4.20±0.19 ^{d*} |
| | Toplam Klorofil | 5.04±0.05 ^{aπ} | 15.26±0.16 ^{bβ} | 20.95±0.14 ^{cβ} | 14.59±0.52 ^{bβ} | 14.63±0.23 ^{bβ} |
| 8. Gün | Klorofil a | 3.40±0.06 ^{a1} | 8.00±0.02 ^{b2} | 14.10±0.38 ^{c2} | 8.00±0.06 ^{b1} | 8.20±0.17 ^{b1} |
| | Klorofil b | 2.00±0.01 ^{a#} | 2.90±0.06 ^{b#} | 3.60±0.06 ^{b#} | 4.18±0.04 ^{c#} | 4.42±0.08 ^{c*} |
| | Toplam Klorofil | 5.40±0.01 ^{aπ} | 10.29±0.21 ^{bΩ} | 17.61±0.28 ^{cΩ} | 12.81±0.10 ^{bβ} | 11.62±0.09 ^{bπ} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Satırlarda farklı harfler ve sütunlarda farklı rakam (klorofil a) ve simgelerle (klorofil b: ♦#* toplam klorofil: πβΩ) gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir (P<0.05).



Şekil 4.8 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak dokusunda klorofil a, klorofil b, toplam klorofil miktarları. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir (P<0.05).

Toplam klorofil miktarları kontrol grubuna göre, 1. gün de konsantrasyon ve zamana bağlı olarak yaklaşık 1.5-2 katı, 4. gün yaklaşık 3-4 katı, 8. gün ise yaklaşık 3 katı artış göstermiştir. En yüksek toplam klorofil miktarı 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 20.95±0.14 mg/L olarak bulunmuştur. Toplam klorofil

miktarlarında tüm konsantrasyonlarda (100-20 nm-mg/L 1.gün hariç) zamana bağlı olarak toplam klorofil miktarları arasındaki fark önemli bulunmuştur ($p \leq 0.05$).

4.9. Nano-Si Uygulamasının *Helianthus annuus* L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda Silisyum Miktarları Üzerine Etkisi

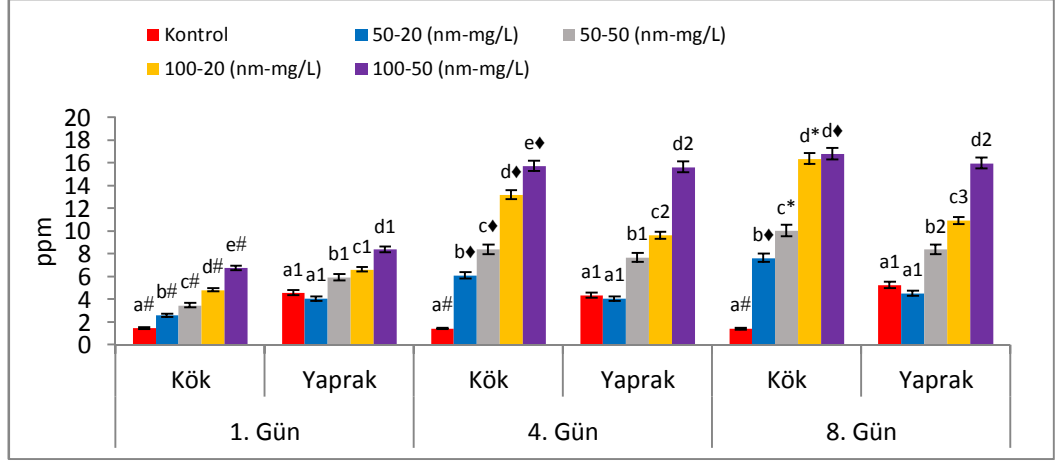
Kontrol ve değişik konsantrasyonlarda nano-Si uygulanmış ayçiçeği bitkisi yaprak dokusunda konsantrasyona ve zamana bağlı olarak silisyum miktarları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8’de görüldüğü gibi, *Helianthus annuus* L. bitkisi kontrol kök dokusunda Si düzeyleri kontrol grubuna göre, hem uygulama gruplarına hem de zamana bağlı olarak artış göstermiştir. En yüksek Si düzeyi kök dokusunda 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 8. günde 16.78 ± 0.15 ppm olarak saptanmıştır. Kök dokusunda 1. güne göre, 4. ve 8. günlerde Si düzeyleri yaklaşık 2-3 katı kadar artış göstermiştir. Yapılan istatistik analize göre, kontrole göre, kök dokusunda zamana bağlı olarak Si miktarları arasında tüm uygulama grupları arasında farkın önemli olduğu saptanmıştır ($p \leq 0.05$).

Çizelge 4.7 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda Silisyum düzeyleri

| | | Nano-Si (Boyut/Konsantrasyon) | | | | |
|--------|--------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Kontrol | 50-20 (nm-mg/L) | 50-50 (nm-mg/L) | 100-20 (nm-mg/L) | 100-50 (nm-mg/L) |
| 1. Gün | Kök | 1.47±0.09 ^{a#} | 2.59±0.14 ^{b#} | 3.48±0.16 ^{c#} | 4.81±0.11 ^{d#} | 6.76±0.14 ^{e#} |
| | Yaprak | 4.57±0.18 ^{a1} | 4.05±0.08 ^{a1} | 5.93±0.05 ^{b1} | 6.61±0.16 ^{c1} | 8.38±0.31 ^{d1} |
| 4. Gün | Kök | 1.42±0.13 ^{a#} | 6.10±0.13 ^{b*} | 8.39±0.16 ^{c*} | 13.21±0.28 ^{d*} | 15.73±0.13 ^{e*} |
| | Yaprak | 4.34±0.08 ^{a1} | 4.06±0.16 ^{a1} | 7.69±0.19 ^{b1} | 9.62±0.07 ^{c2} | 15.63±0.14 ^{d2} |
| 8. Gün | Kök | 1.41±0.06 ^{a#} | 7.64±0.26 ^{b*} | 10.05±0.83 ^{c*} | 16.36±0.51 ^{d*} | 16.78±0.15 ^{d*} |
| | Yaprak | 5.26±0.24 ^{a1} | 4.54±0.39 ^{a1} | 8.38±0.46 ^{b2} | 10.92±0.39 ^{c3} | 15.97±0.34 ^{d2} |

Değerler 3 tekrarın ortalaması \pm standart hata olarak verilmiştir ($\diamond\#*$). Satırlarda farklı harfler, sütunlarda farklı rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

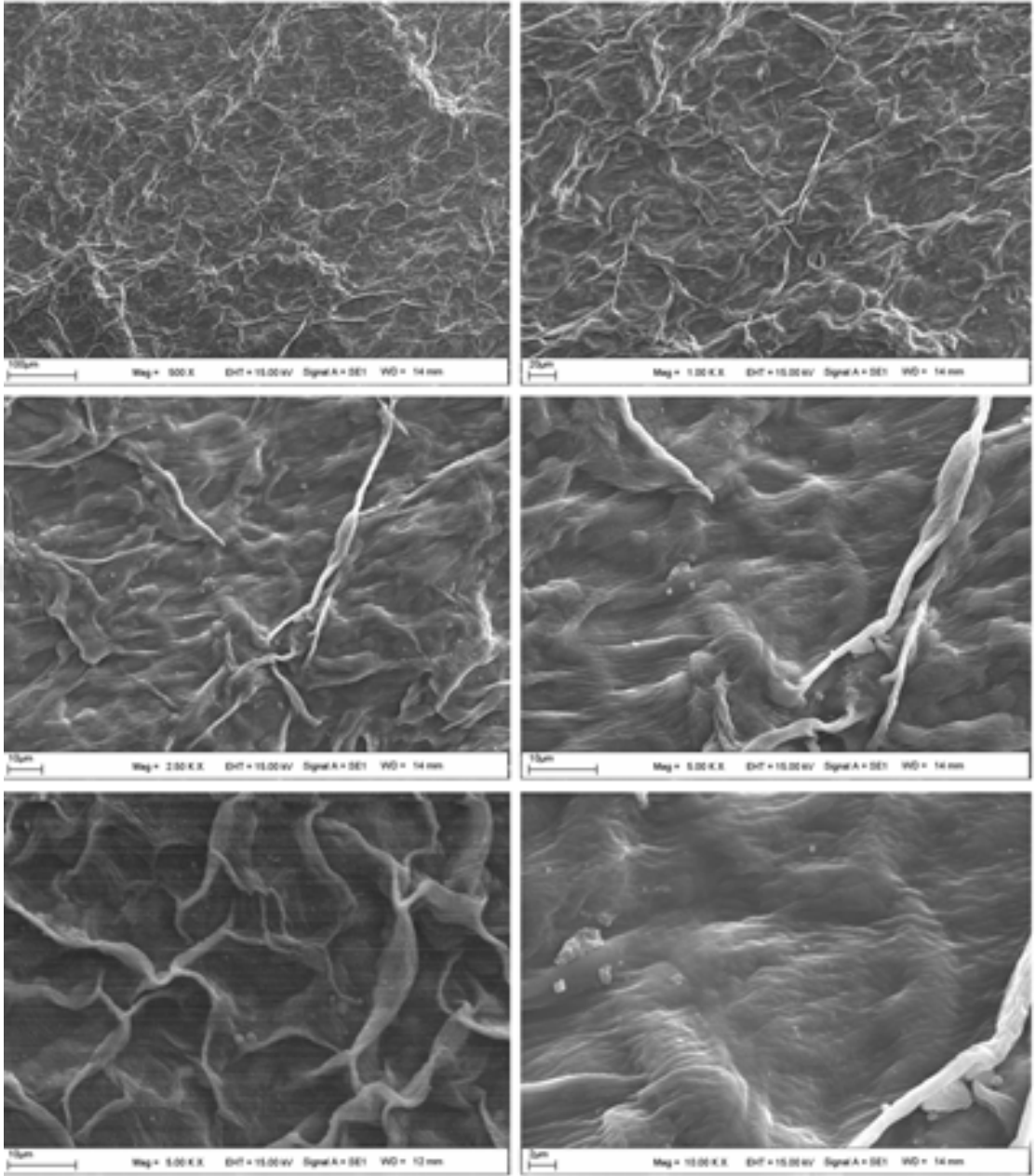


Şekil 4.9 Kontrol ve değişik boyut ve konsantrasyonlarda nano-Si uygulamasının *Helianthus annuus* L. bitkisi yaprak ve kök dokusunda Si düzeyleri. Sütunlar üzerindeki farklı harf, rakam ve simgelerle gösterilen sonuçlar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.05$).

Helianthus annuus L. bitkisi yaprak dokusunda Si miktarları 1. 4. ve 8. günde kontrol grubunda sırasıyla; 4.57 ± 0.18 , 4.34 ± 0.08 ve 5.26 ± 0.24 ppm olarak saptanmıştır. 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda kontrole göre, 1. 4. ve 8. günlerde azalma saptanmıştır. Diğer uygulama gruplarında da zamana bağlı olarak yaprak dokusunda Si düzeyleri artış göstermiştir. Yaprak dokusunda en yüksek Si düzeyleri 100-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda 8. günde 15.97 ± 0.34 ppm bulunmuştur. Yapılan istatistik analize göre, yaprak dokusunda tüm uygulama gruplarında (1. 4. ve 8. gün 50-20 nm-mg/L uygulama grubu hariç) zamana bağlı olarak Si miktarları arasında fark önemli bulunmuştur ($p \leq 0.05$).

4.10. Nano-Si Uygulamasının *Helianthus annuus* L. Bitkisi Kök ve Yaprak Dokusunda SEM, EDX ve AFM Analizleri

Çalışma kapsamında ~50 ve ~100 nm'lik SiO_2 partiküller kullanılarak gerçekleştirilen denemeler sonucunda elde edilen yapılara ait yaprak ve kök numunelerinin SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu SEM analizlerinde Şekil 4.19'da SiO_2 uygulanmamış yaprak yüzeyine ait SEM görüntüleri 500X, 1000X, 2500X, 5000X ve 10000X olacak şekilde farklı büyütme oranlarında verilmiştir.

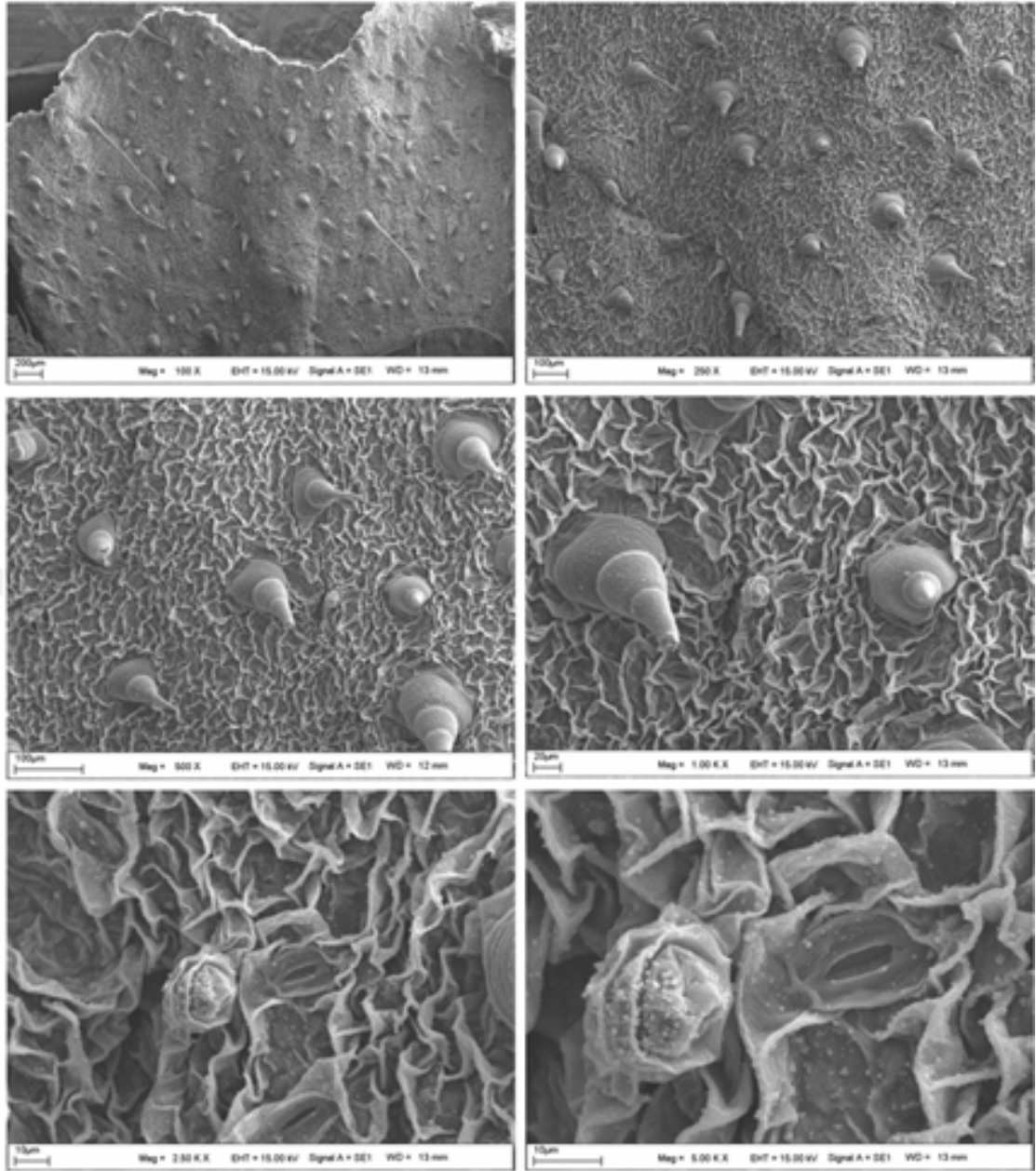


Şekil 4.10 Kontrol grubu ayçiçeği yaprak dokusu SEM görüntüleri

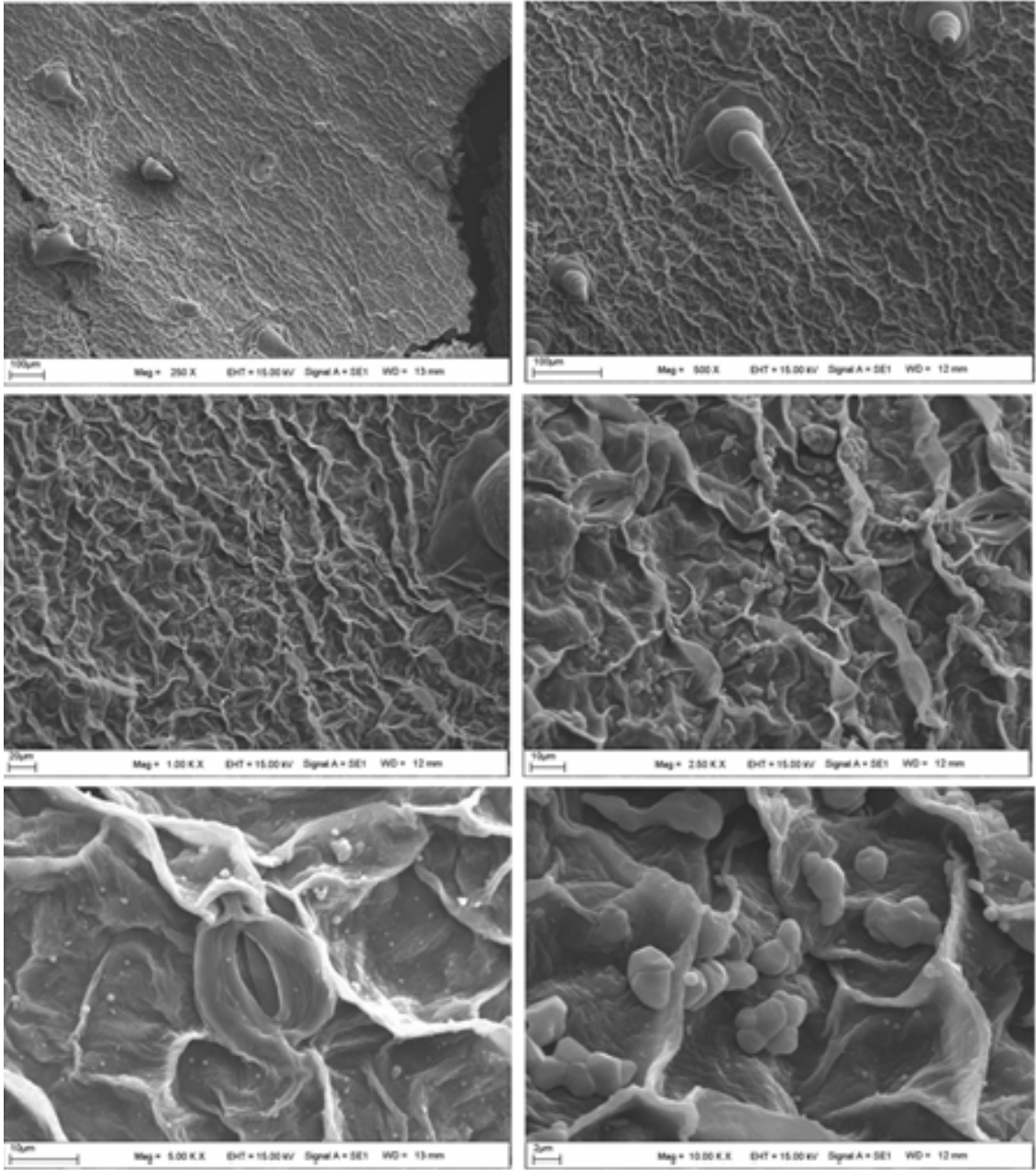
Ayçiçeğinin yapraklarının anatomisi Astereceae familyasının tipik bir örneğidir. Mezofil yapısı dorsiventraldir. Adaksiyal bölgesi pek çok klorofil içeren 2-3 tabakalı palizat parankima tabakasından oluşur. Abaksiyal tarafı ise 5-7 tabakalı süngerimsi parankimadan oluşur. Vasküler demetler kolleteraldir ve ağsı damarlanmadan dolayı düzensiz ve dağınıktır. Merkezdeki demetler daha büyük ve daha olgun ve orta büyüklükteki vasküler demetler sklerenkima ile kaplanmıştır (Zanão Júnior vd. 2017).

Genel olarak bu dağılıma sahip olan yaprak yüzeyleri SEM analizleri ile incelendiğinde doğal kavital yapıya sahip olduğu kısmi bölgelerde multisellüler uzun trikomlar gösterdiği (Şekil 4.19 - 4.27), kısmi bölgelerde ise yine trikomlar multisellüler olarak spiral trikomlara sahip olduğu görülmektedir. Uzun hücreli trikomların yoğunluğu damarlar boyunca, özellikle de abaksiyal yüzeyde ve çıplak gözle görülebilen yaprak kenarlarında daha yüksektir. Tüm yapı Zanao Júnior vd. (2017)'nin yaptıkları çalışma ile uyum içerisinde görünmekle beraber hızlı kurumadan ve aşırı dehidrasyondan kaynaklanan katlanma bölgeleri özellikle düşük büyütmelemlerde belirgin olarak görülmüştür. Yapıda herhangi bir yabancı cisim ya da morfoloji bozulması tespit edilmemiştir. 10.000X büyütmede yüzey yapısının homojenliğinin bozulmadığı tespit edilmiştir. Yaprakların her iki tarafında sayısız trikomlar saptanmıştır.

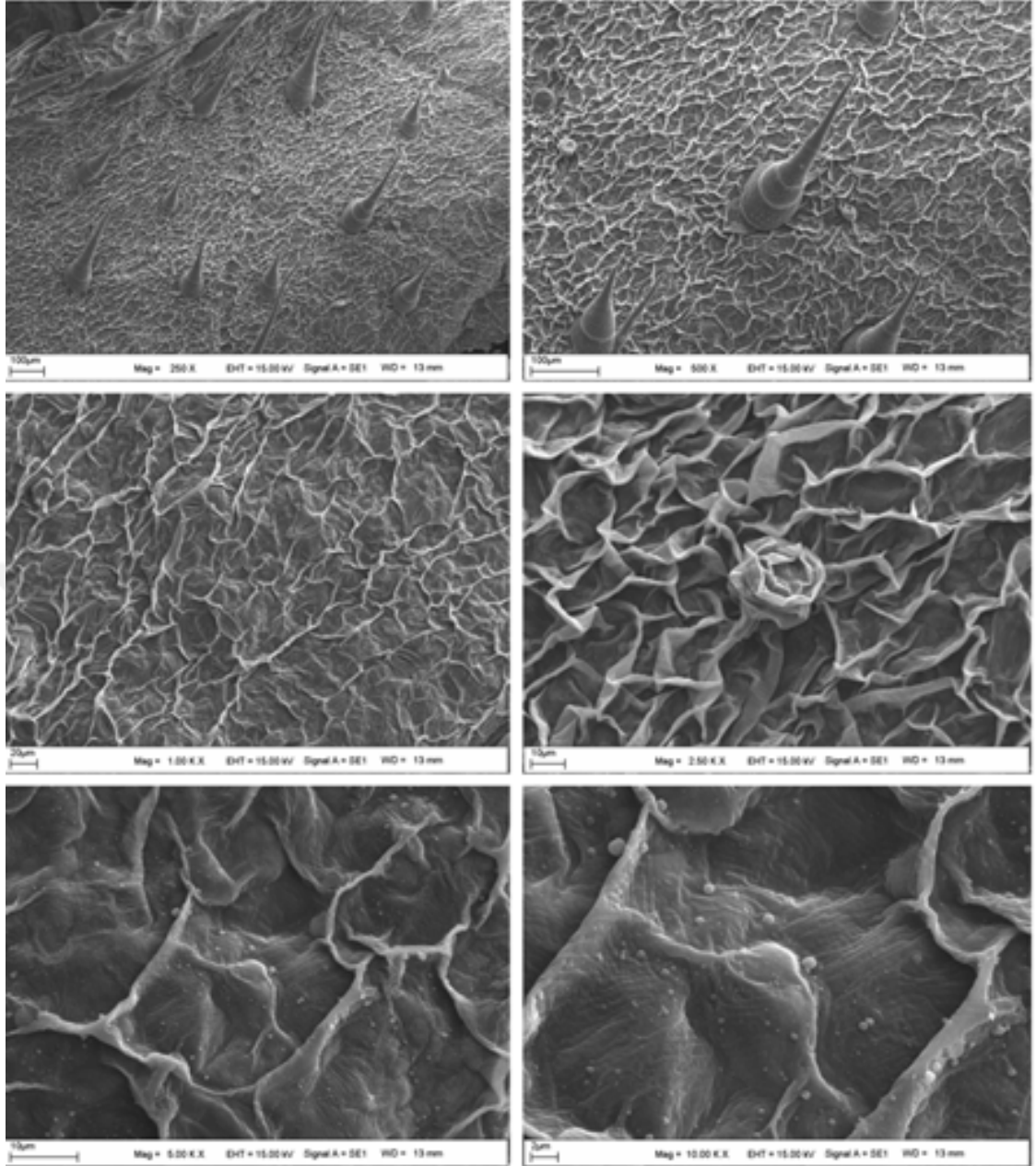
Şekil 4.20 - 4.23 arasında farklı doz ve boyutlarda SiO₂ uygulanmış yapılara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde özellikle, Şekil 4.20'de düşük konsantrasyonda ~50 nm'lik SiO₂ uygulandığında yaprak morfolojisinde herhangi bir değişimin olmadığı, yaprak şeklinin korunduğu açıkça görülmektedir. Kısa ve uzun trikomlar literatürle uyum gösterecek şekilde gelişmiştir. Trikomların dağılımı yaprak yüzeyinde oldukça belirgindir. ~50 nm boyutundaki SiO₂NP'ler 50 ppm olacak şekilde uygulandığında elde edilen sonuçlar Şekil 4.2'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre yaprak yüzey morfolojisinin değişmediği ancak özellikle yüksek büyütmelemlerde yüzey yapısında dahil bazı SiO₂NP'lerinin bulunmaya başladığı tespit edilmiştir.



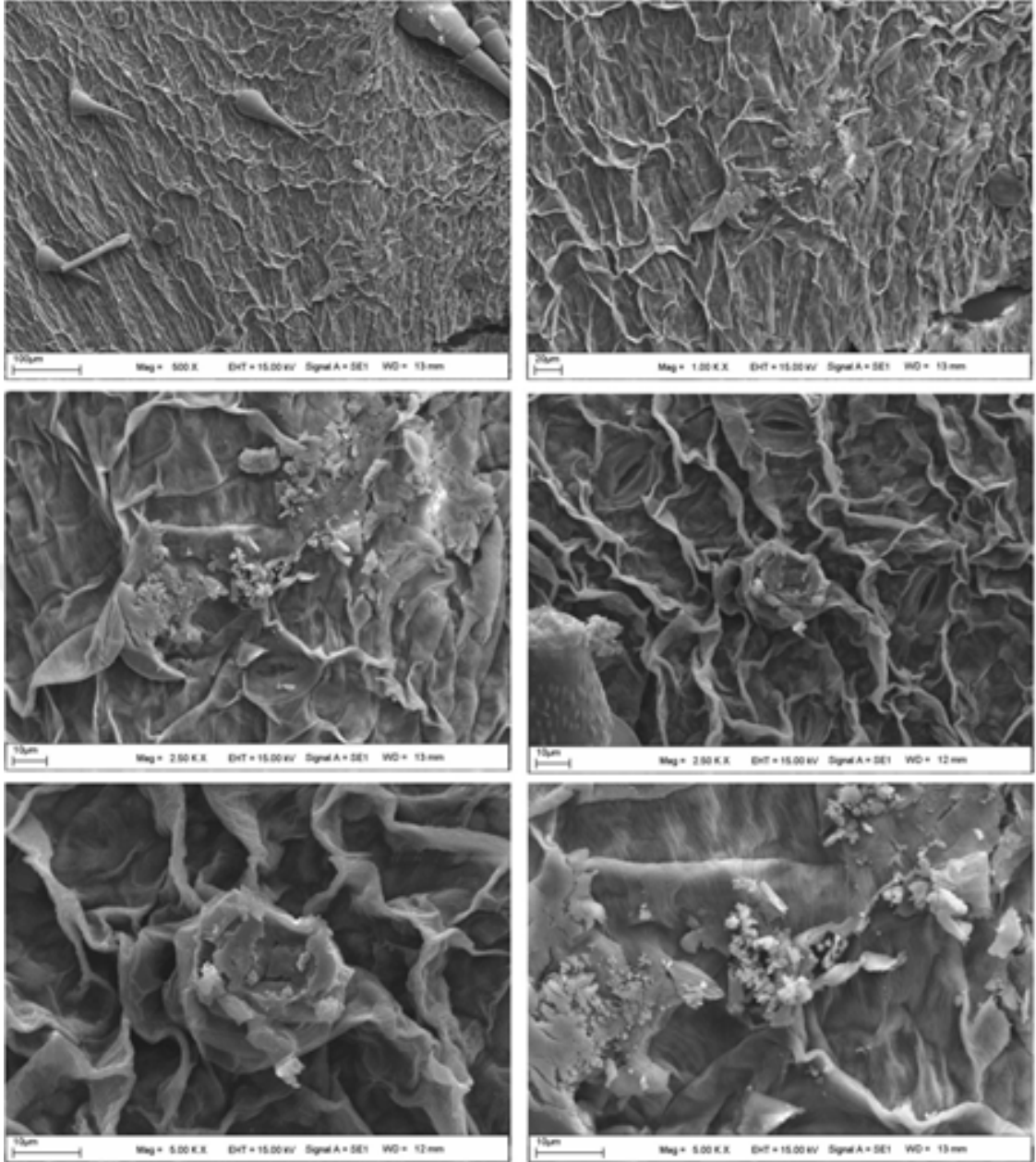
Şekil 4.11 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri



Şekil 4.12 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri



Şekil 4.13 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri

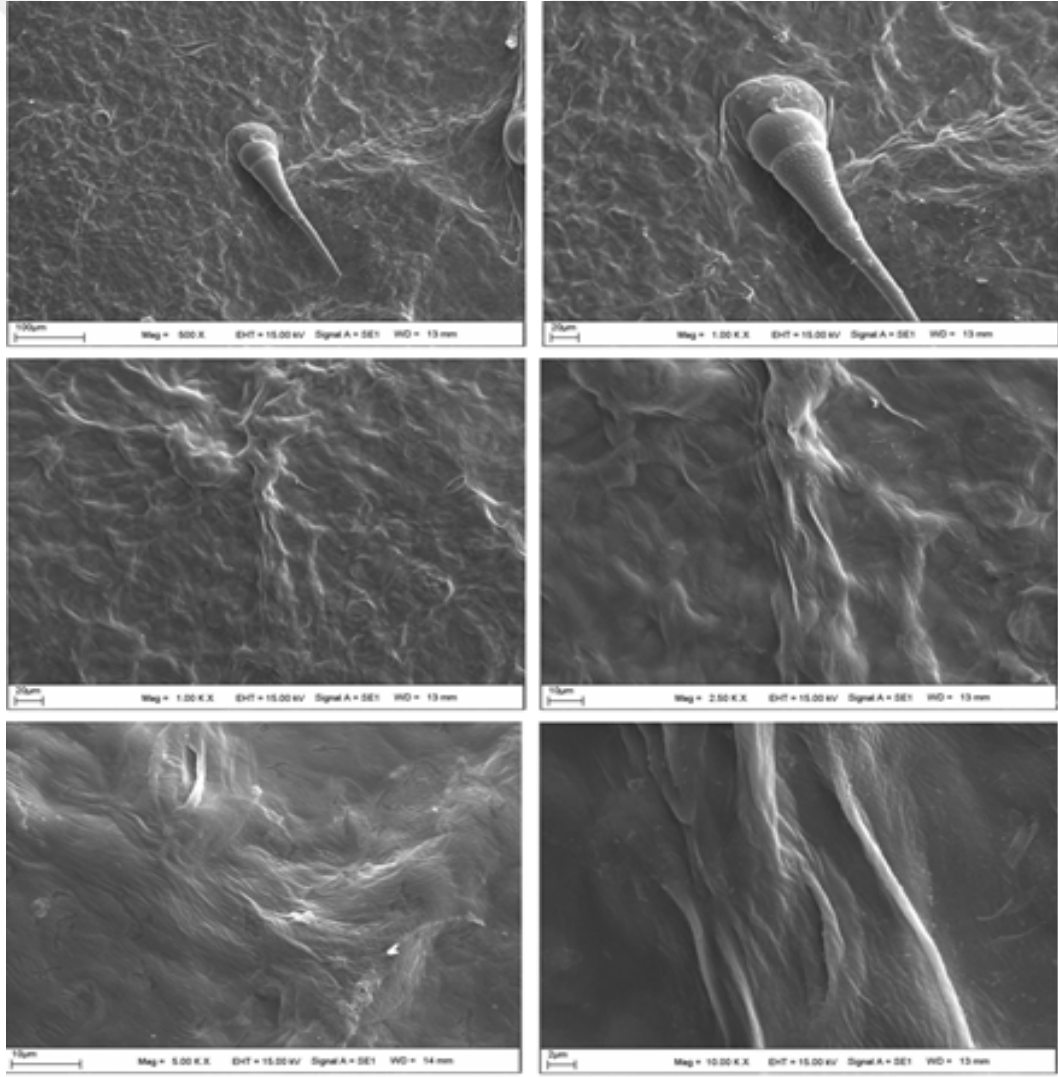


Şekil 4.14 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün SEM görüntüleri

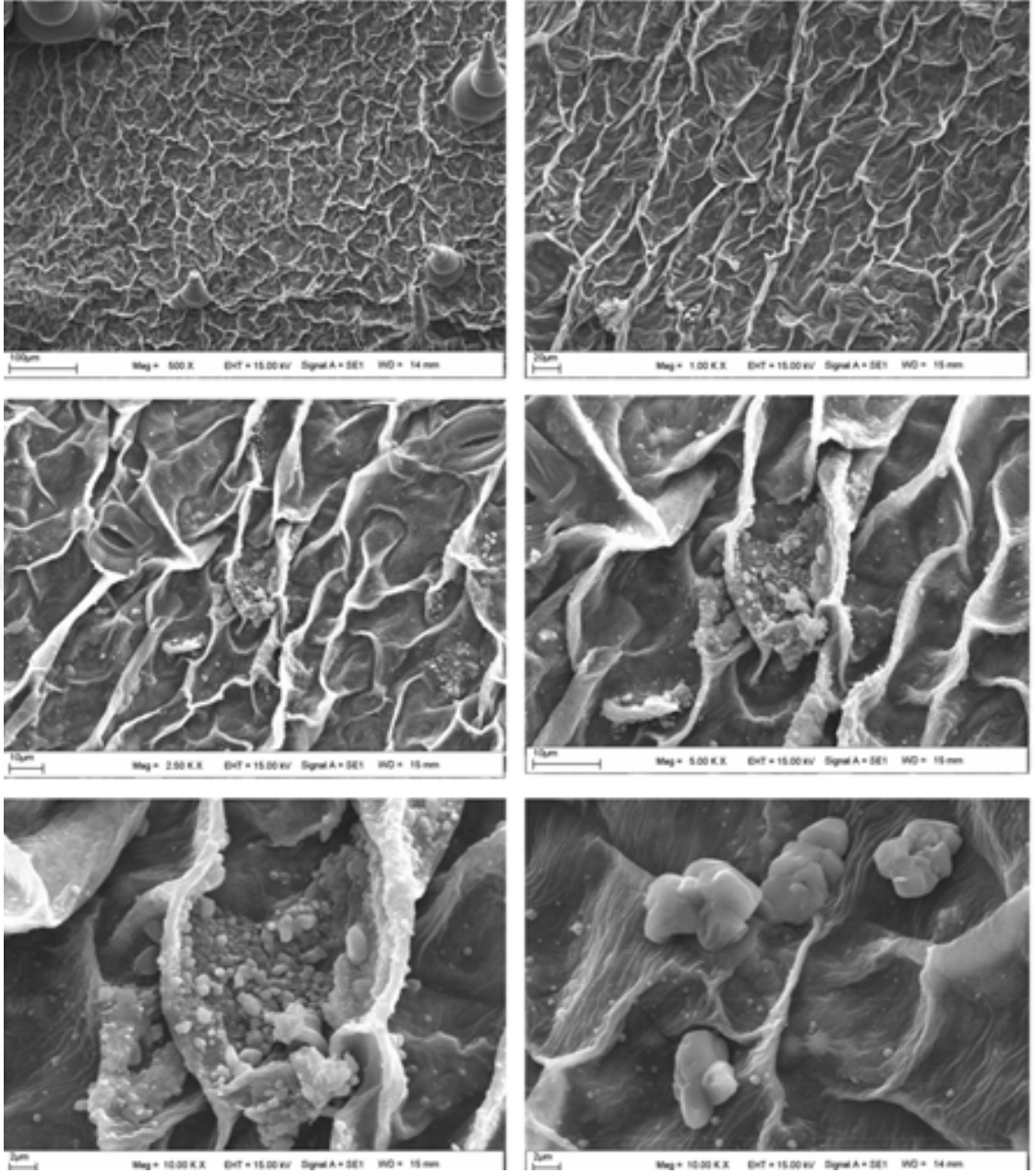
~100 nm'lik SiO₂'nin 20 mg/L uygulandığı bitkilerde yaprak gelişiminin oldukça belirgin olduğu, yaprak yüzey trikومlarının oldukça sağlıklı bir morfoloji gösterdiği, stomaların sayısı, stomalar arası mesafenin literatüre uygun olduğu tespit edilmiştir (Zanão Júnior vd. 2017). Yaprak yüzey epidermis yapısının kontrol grubuna benzer olduğu şekil 4.22'de görülmektedir.

Şekil 4.23'te görüldüğü gibi, 4 günlük kısa bir süre dahilinde bile olsa 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış bitkilerde SEM görüntüleri incelendiğinde kısmi bölgelerde kümelenmiş SiO₂NP'leri gözlenmiştir. Stoma sayısı bu partiküllerin bulunduğu bölgelerde daha sık olacak şekilde görülmüştür. Stomalar arası mesafelerin daraldığı düşünülmektedir ve yaprak tüylerinin sayısı azalmış görülmektedir.

Şekil 4.24-4.25-4.26 ve 4.27'de farklı boyut ve konsantrasyonlarda SiO₂ uygulanmış ayçiçeği yapraklarının 8. gün görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde kontrol grubundan farklı olarak bir yaprak yüzey morfolojisi görülmektedir. Ancak trikrom yapılarının bozulmadığı ve kontrol grubuna benzediği görülmektedir.

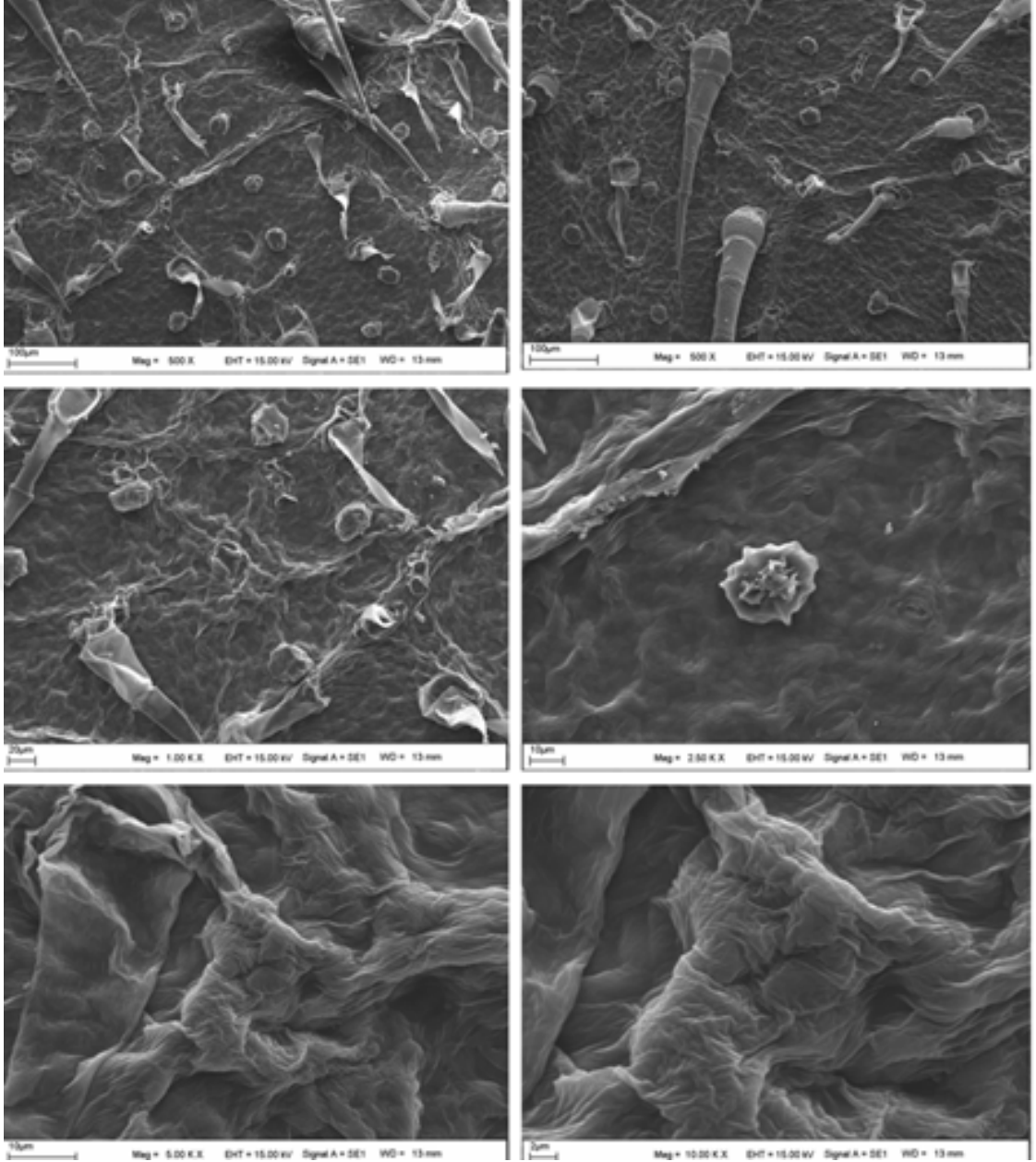


Şekil 4.15 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün SEM görüntüleri



Şekil 4.16 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün SEM görüntüleri

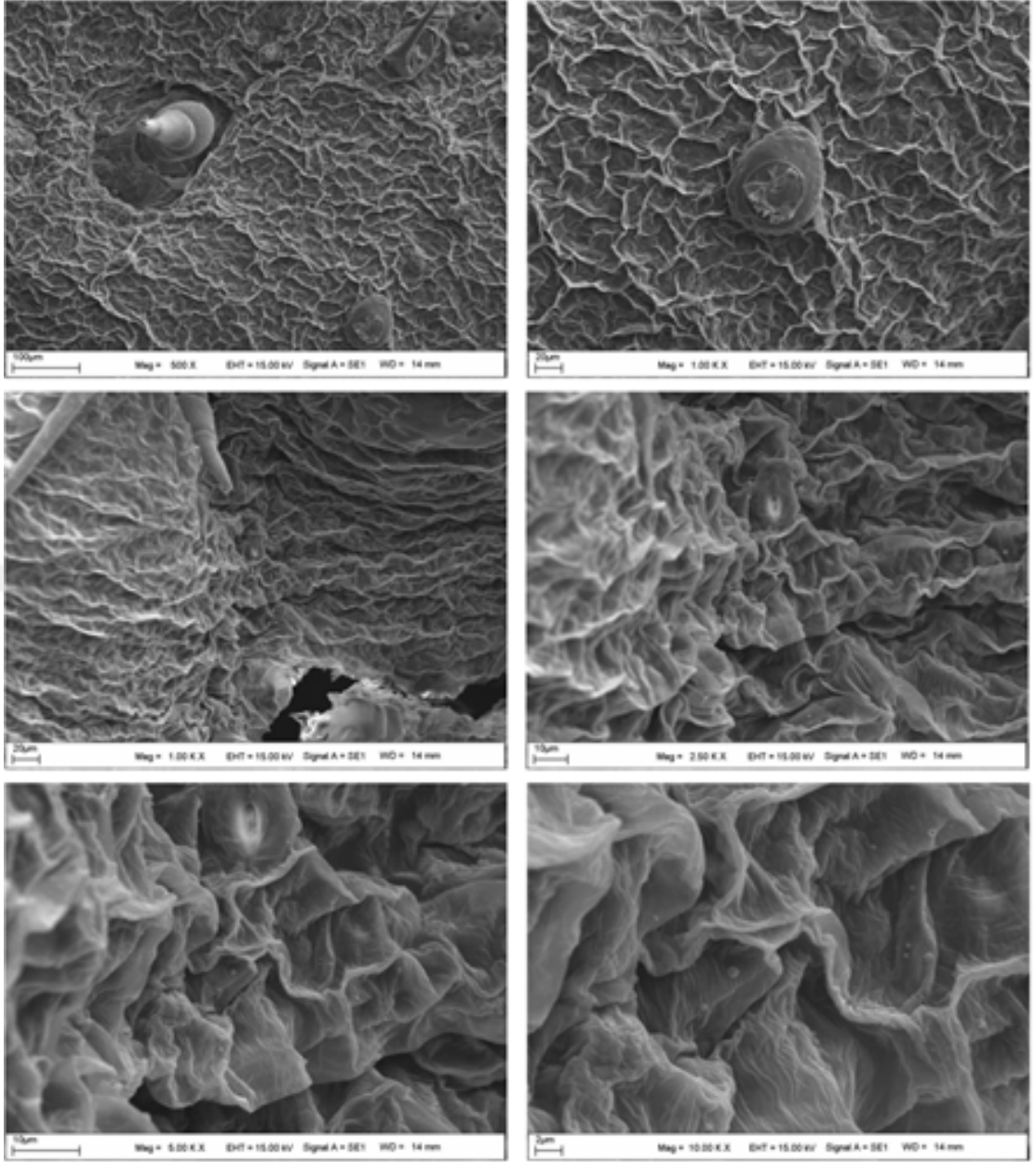
Şekil 4.25'te ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂ uygulanmış ayçiçeği yaprağının SEM görüntüleri incelendiğinde; 4 günlük görüntülere oranla daha fazla SiO₂ partikül kümelenmesi olduğu görülmektedir. 10.000X büyütmede yaprak yüzeyine tutulmuş SiO₂ partikülleri oldukça net bir şekilde görülmektedir. Ama buna rağmen hücre epidermis yapısı kontrol grubuna benzemektedir. Multisellular tektör yapılarında dokusal canlılık ve stoma yapılarının morfolojisi oldukça sağlıklı görülmektedir.



Şekil 4.17 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün SEM görüntüleri

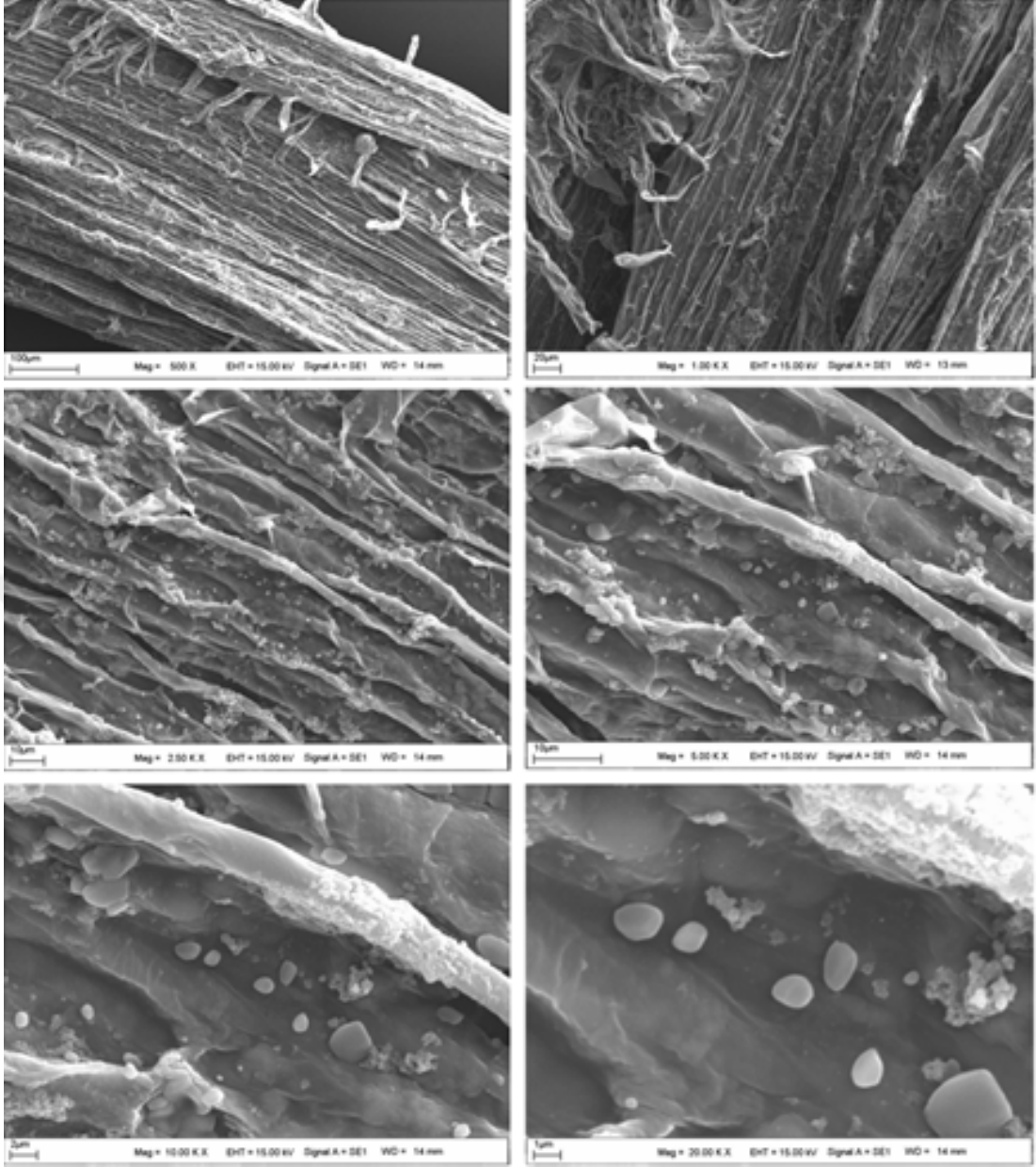
Şekil 4.26'da ~100 nm boyutunda 20 mg/L nanopartikül uygulanmış yapraklarda SiO₂ partikül yığılması görülmemektedir. Hücre yüzey görünümü kurumaya bağlı olarak farklılaşmıştır.

Şekil 4.27'de ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış bitki örneklerinin genel yapısı incelendiğinde; belli bölgelerde SiO₂NP'lerinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca stomalar üzerinde bazı bozulmalar tespit edilmiştir.



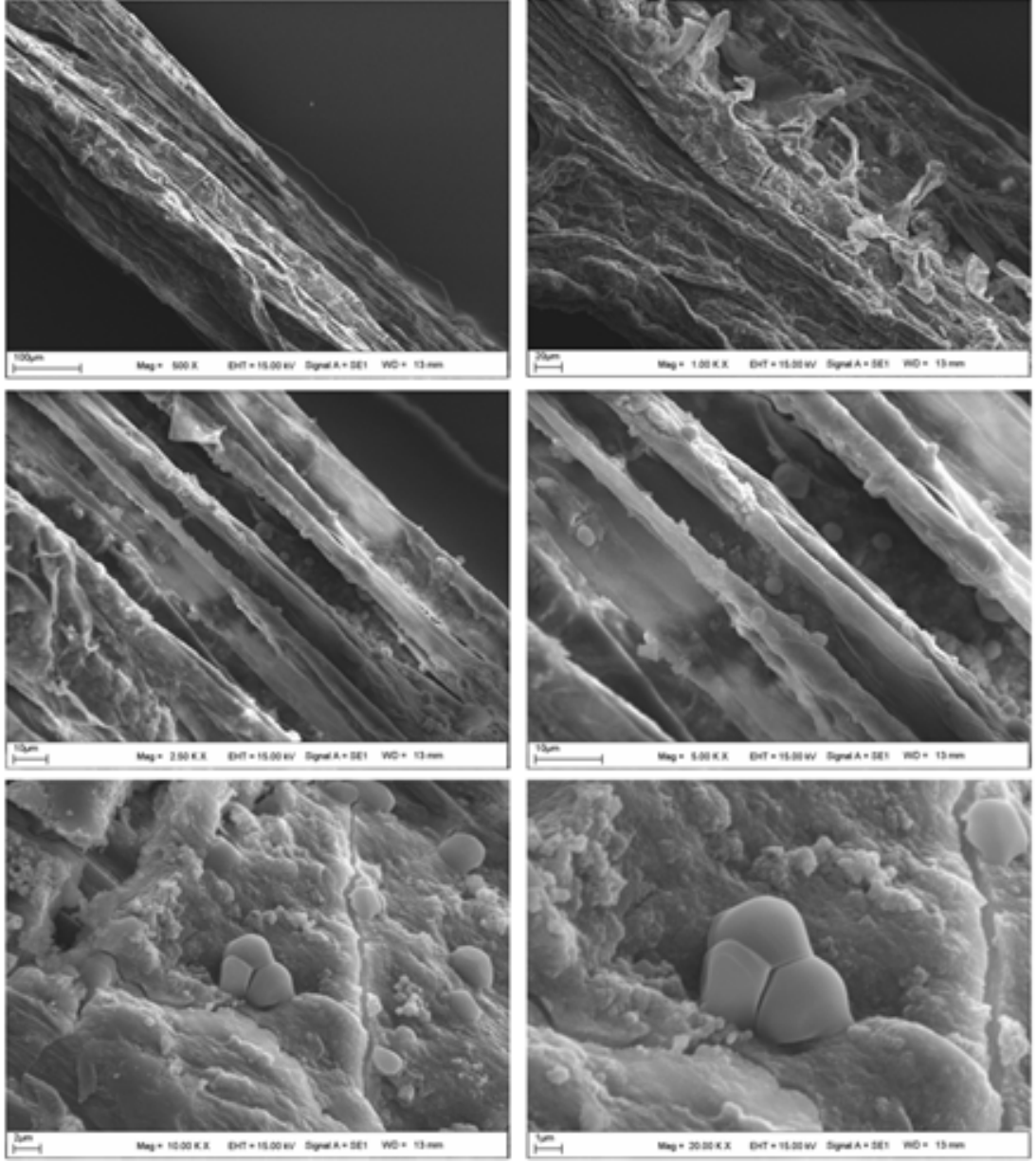
Şekil 4.27 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8.gün SEM görüntüleri

Şekil 4.28 - 4.36 arasındaki tüm SEM görüntülerindeki kök yapısı incelenmiş ve kök yapısı üzerindeki kavital hücre kanalları ve kök hücre morfolojileri değerlendirilmiştir. SEM görüntülerinde özellikle yüksek büyütmelerde kontrol grubu üzerinde maksimum boyutu 1 µm civarında tuz kümelenmeleri görülmektedir. Kök morfolojisi normal ve literatüre uygun olarak tespit edilmiştir (Elias vd. 2014). Fibriller yapıda bir kök morfolojisi görülmektedir.

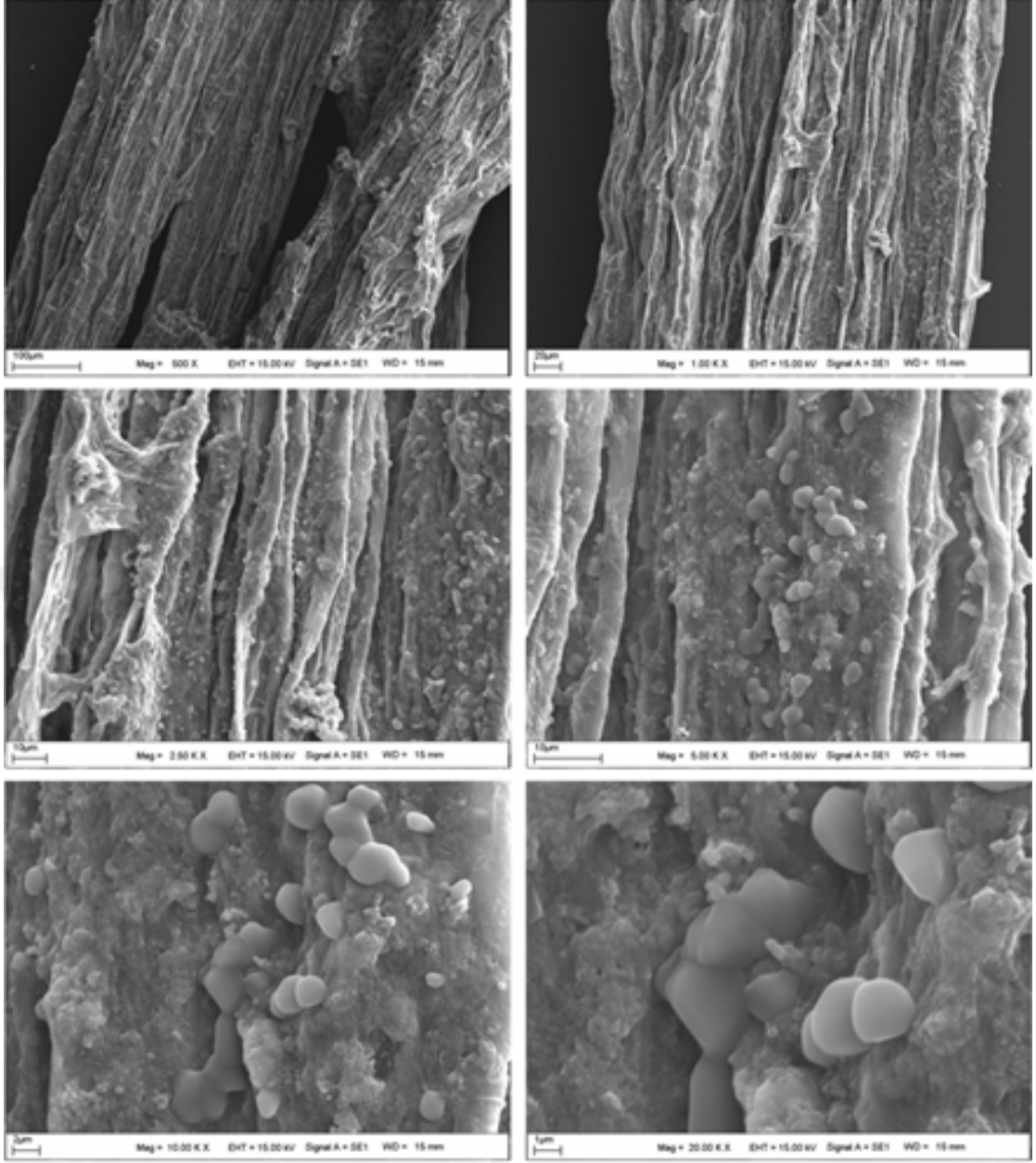


Şekil 4.18 Kontrol grubu ayçiçeği kök dokusu SEM görüntüleri

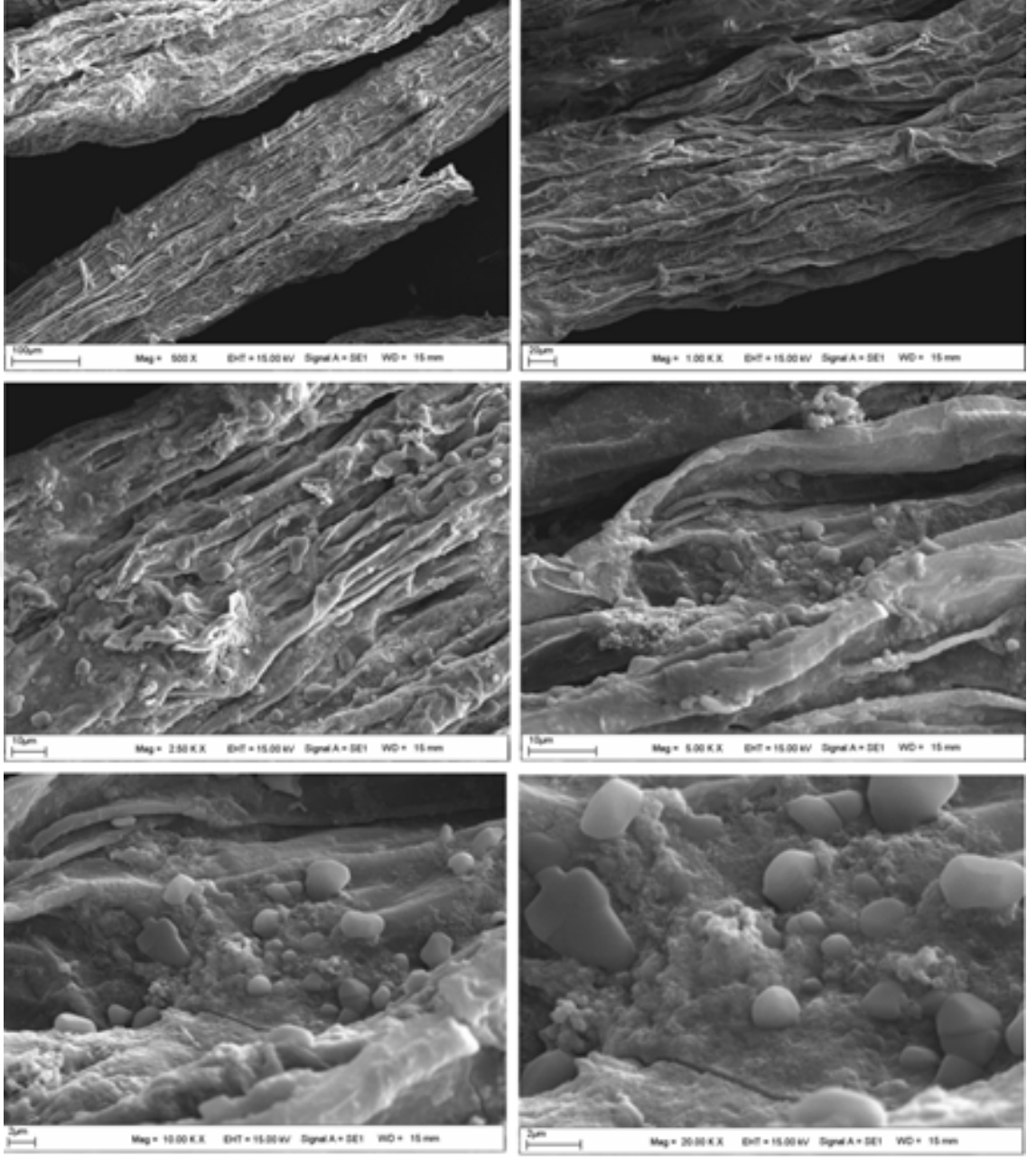
Şekil 4.29 - 4.32'de farklı boyut ve morfolojide SiO₂ uygulanmış ayçiçeği yapılarının 4. gün de kök yapılarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. Bu yapılar tamamen kontrol grubundan farklı olarak yoğun SiO₂ yapılarıyla kaplanmış olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek büyütmelerde SiO₂ yapıları çok bariz ve belirgindir. SiO₂ partikülleri yüzeyde birikerek kümeleşme göstermiştir. 50 ppm'lik SiO₂ uygulamalarında yüzeydeki birikmeler monolitik SiO₂ kümelerine dönüşmüştür.



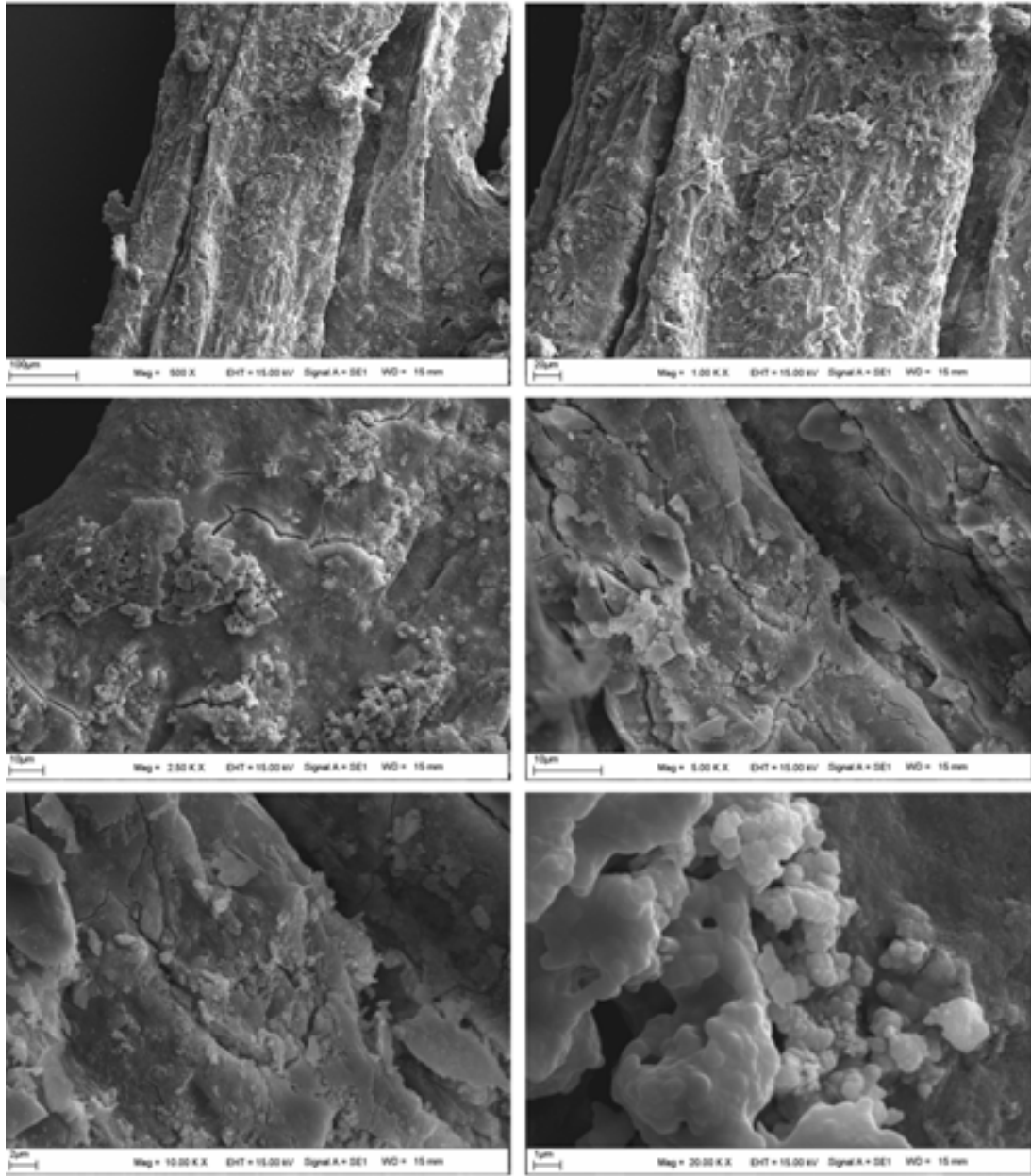
Şekil 4.19 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri



Şekil 4.20 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri

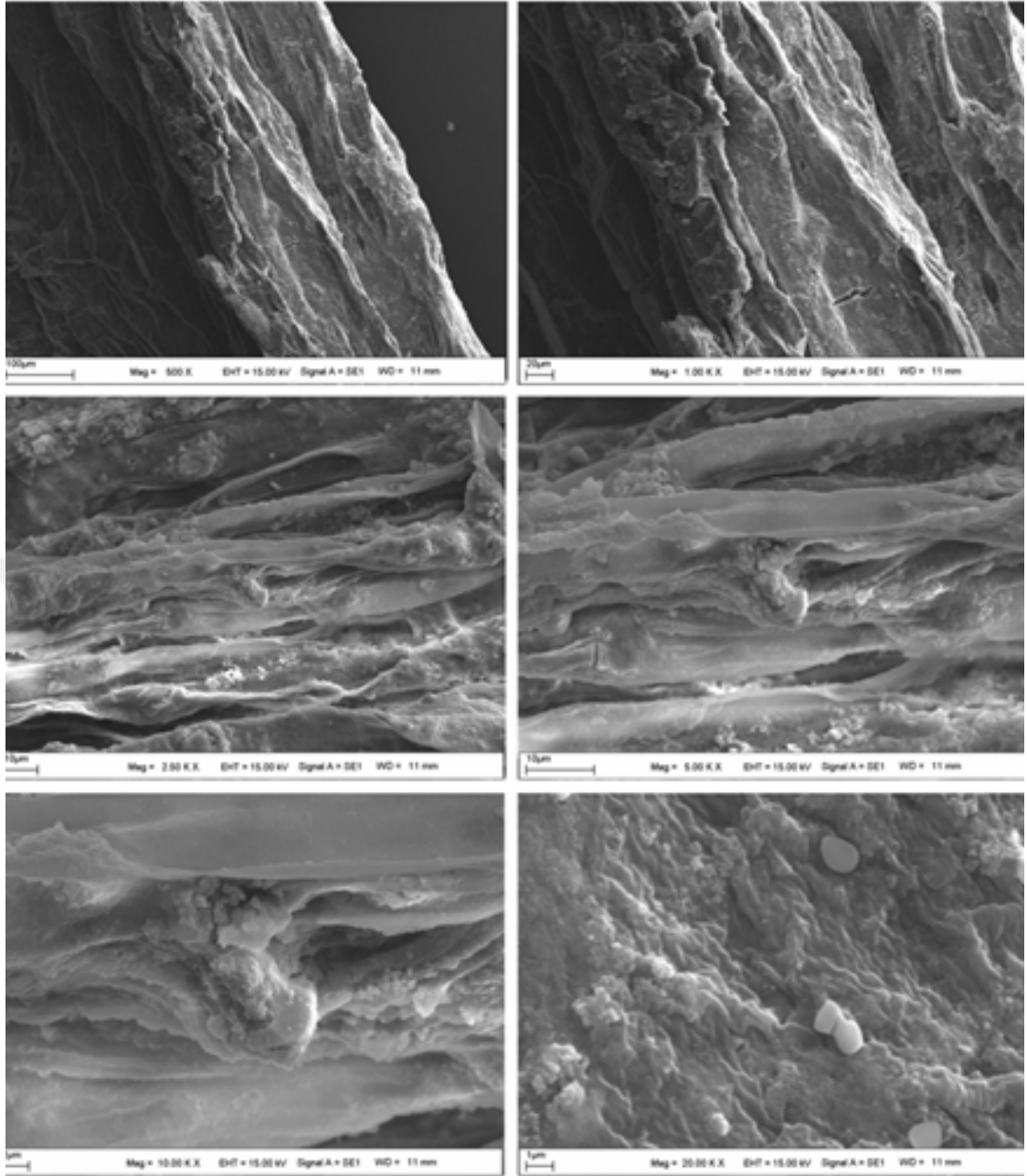


Şekil 4.21 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri

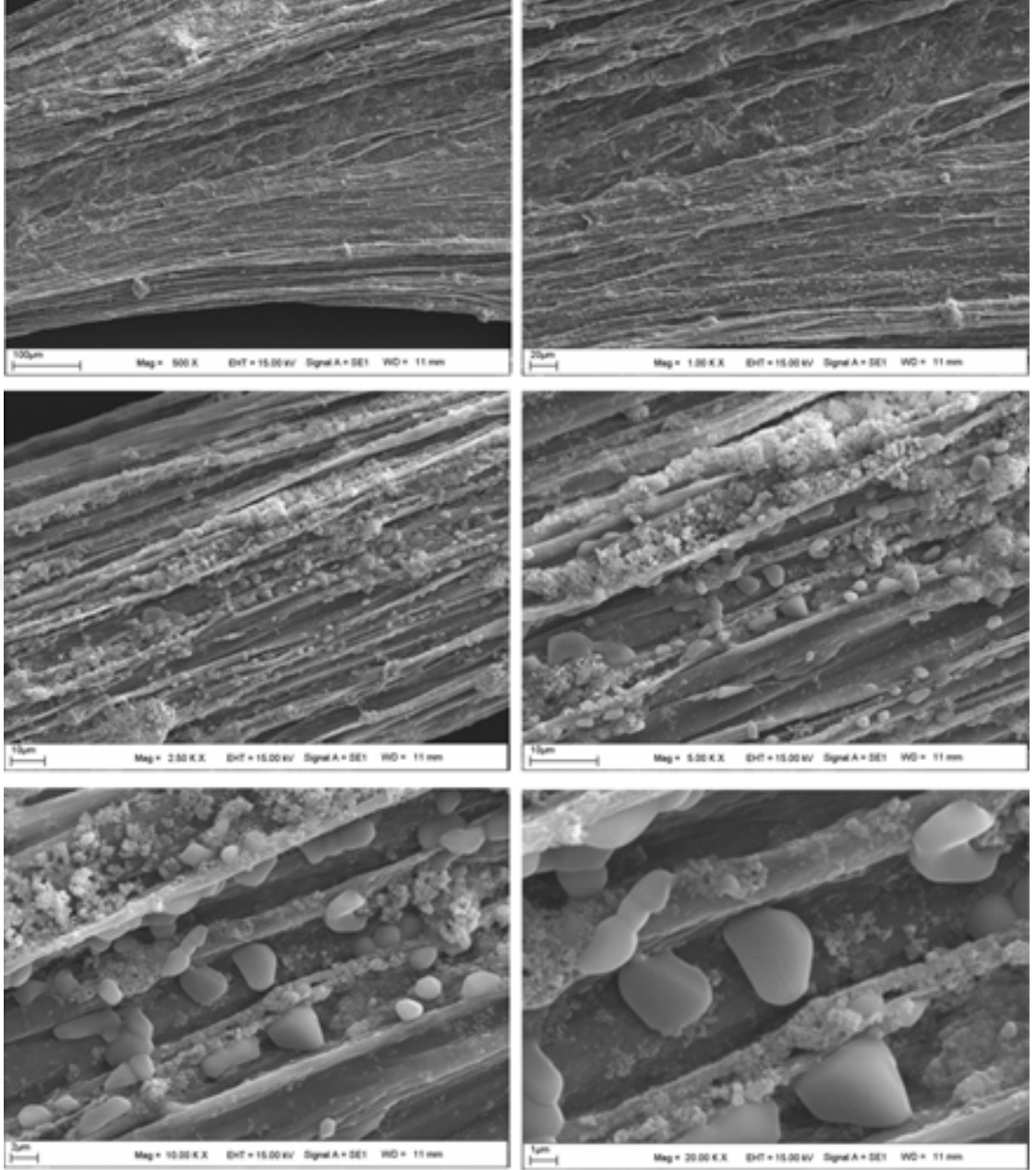


Şekil 4.22 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün SEM görüntüleri

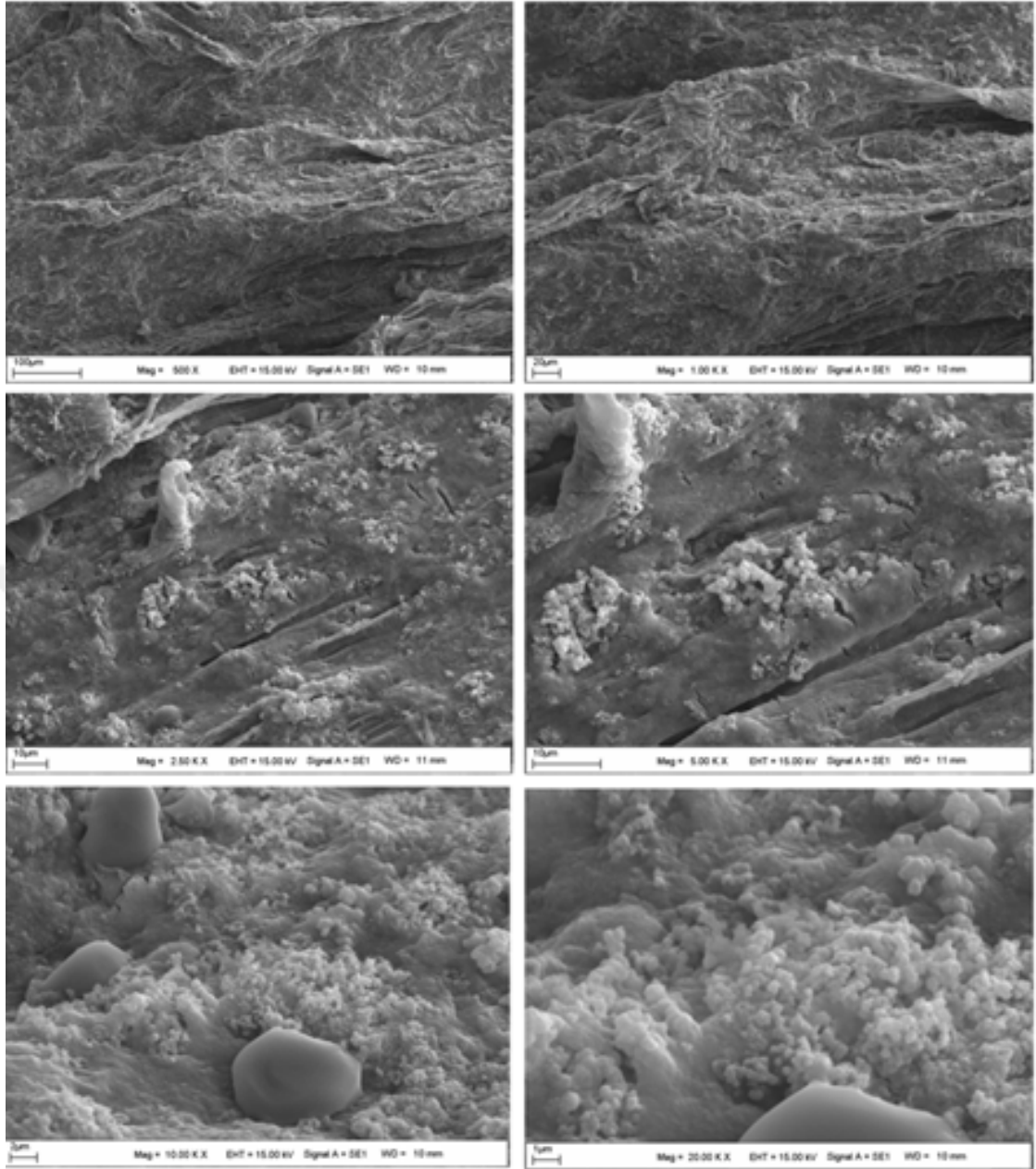
Şekil 4.33-4.36'da 8.gün de kök dokusuna ait SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde özellikle Şekil 4.35 ve 4.36 çok yoğun SiO₂ birikimi tespit edilmiştir. Geniş yığınlar şeklinde kök morfolojisini SiO₂ yapılar kapatmıştır.



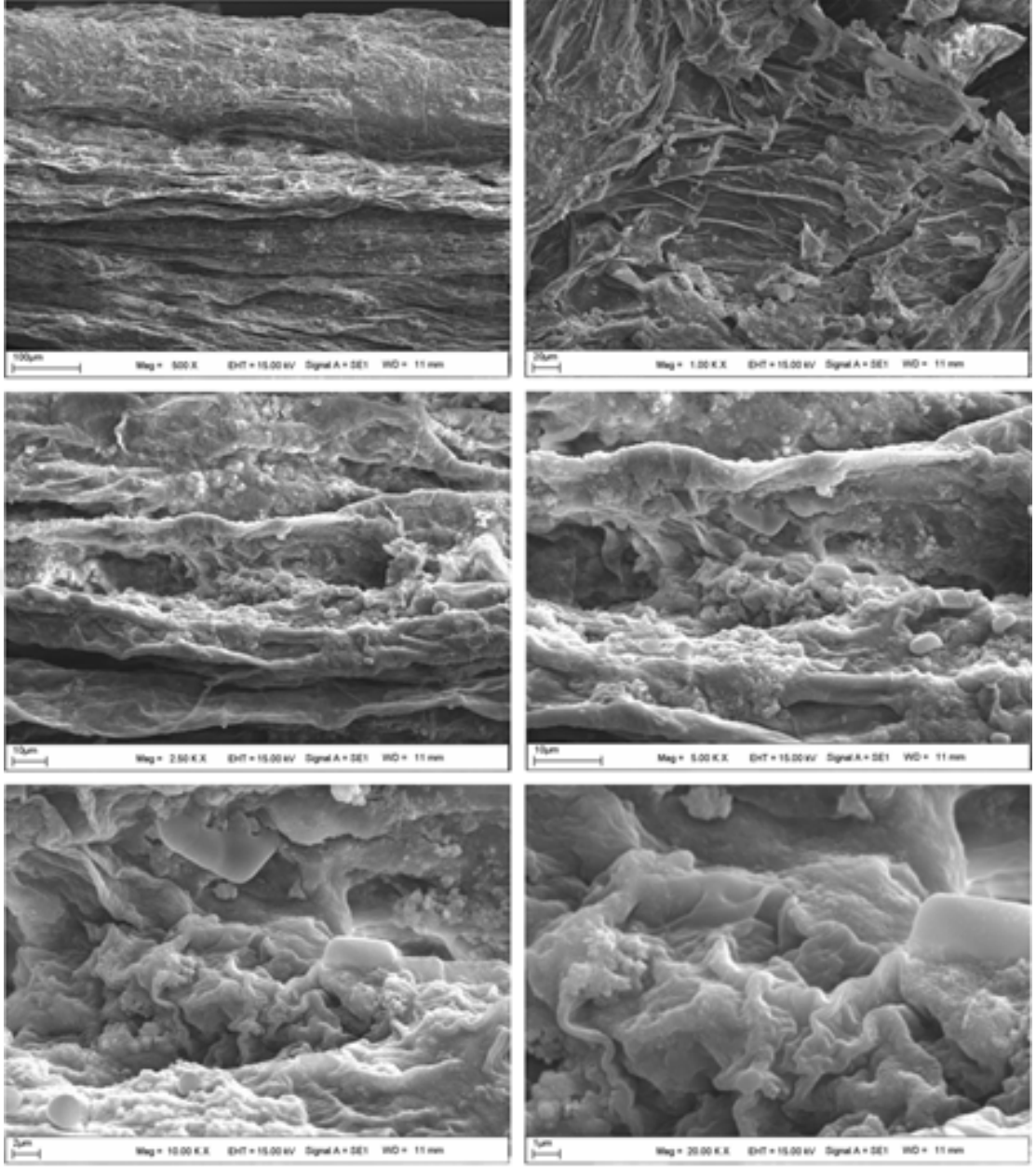
Şekil 4.23 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri



Şekil 4.24 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri



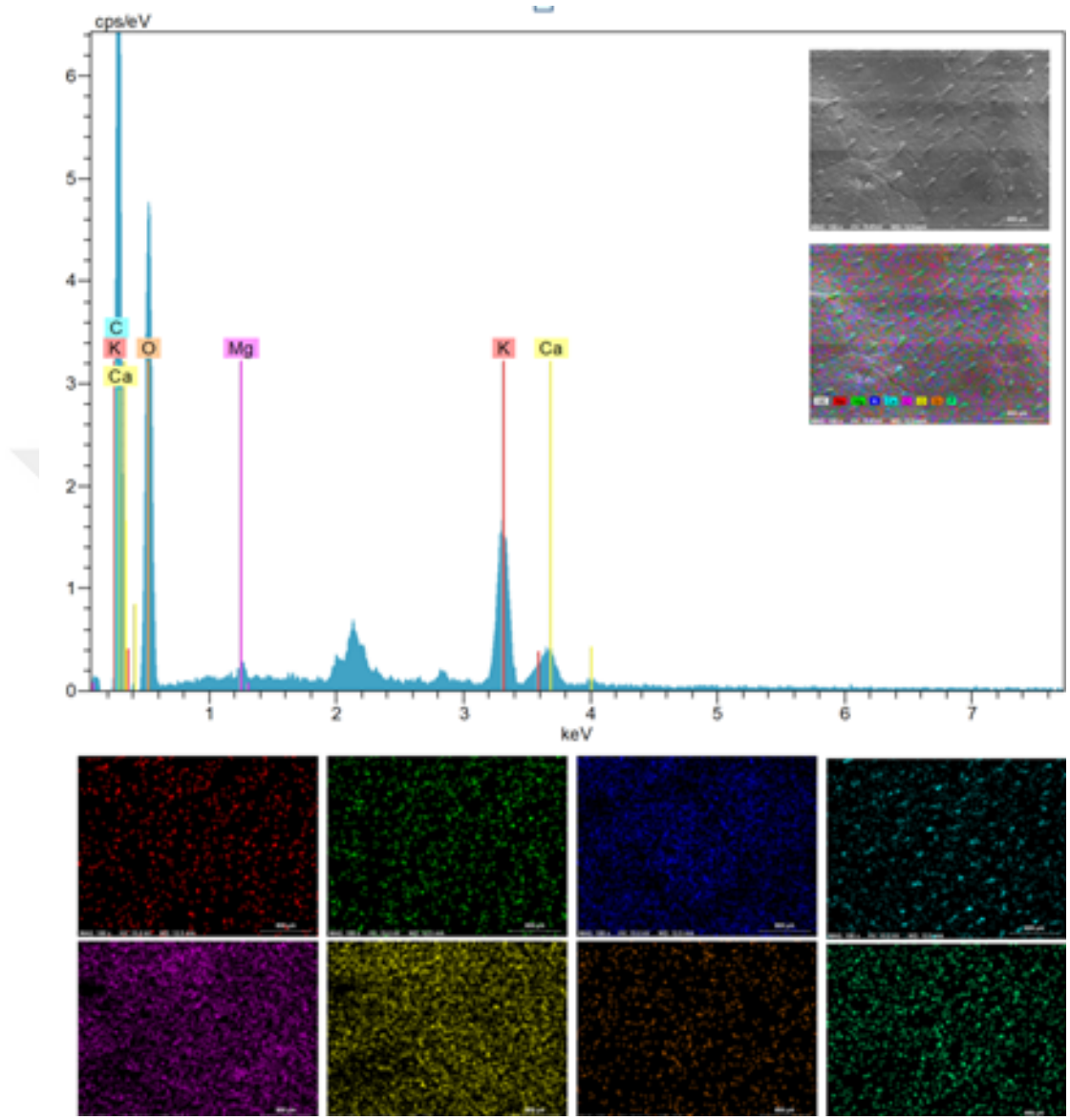
Şekil 4.25 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri



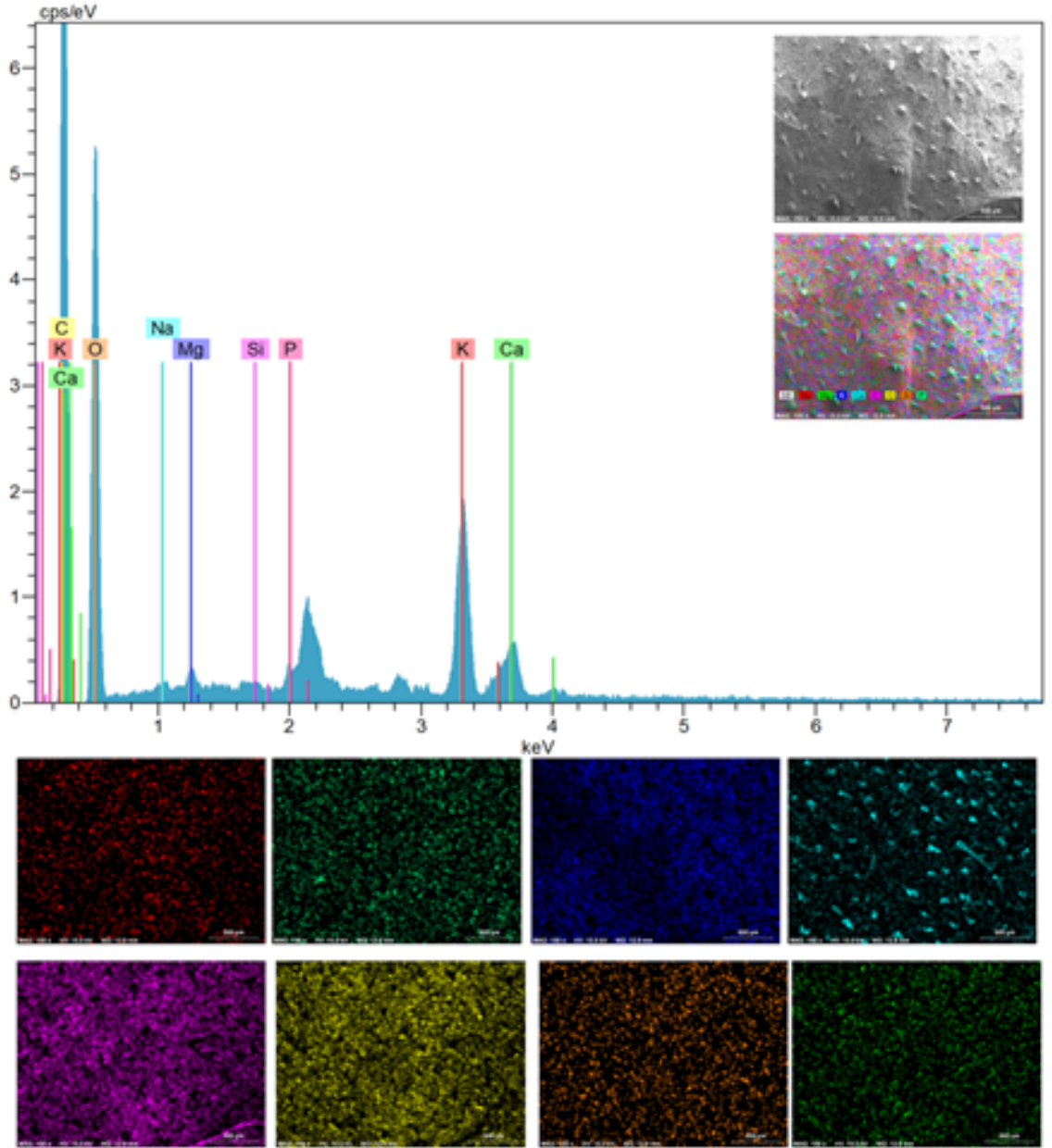
Şekil 4.26 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün SEM görüntüleri

Şekil 4.37'den 4.54'e kadar ayçiçeği kök ve yaprak dokularına ait farklı temel elementler için oluşturulmuş element haritaları ve EDX spektrumları verilmiştir. Şekil 4.37'de SiO₂ uygulanmamış yaprak yüzeyine ait EDX spektrumları görülmektedir. Bu spektrumda, yaprak yüzeyinde Na, Mg, K, Ca, C, O, P, Si elementel haritaları alınmıştır. Ancak spektrumda C, K, Ca, O, Mg pikleri görülmektedir. Özellikle trikomlar üzerinde Ca birikmesi tespit edilmiştir. Si elementine ait herhangi bir pik kontrol grubu üzerinde tespit edilmemiştir. Diğer

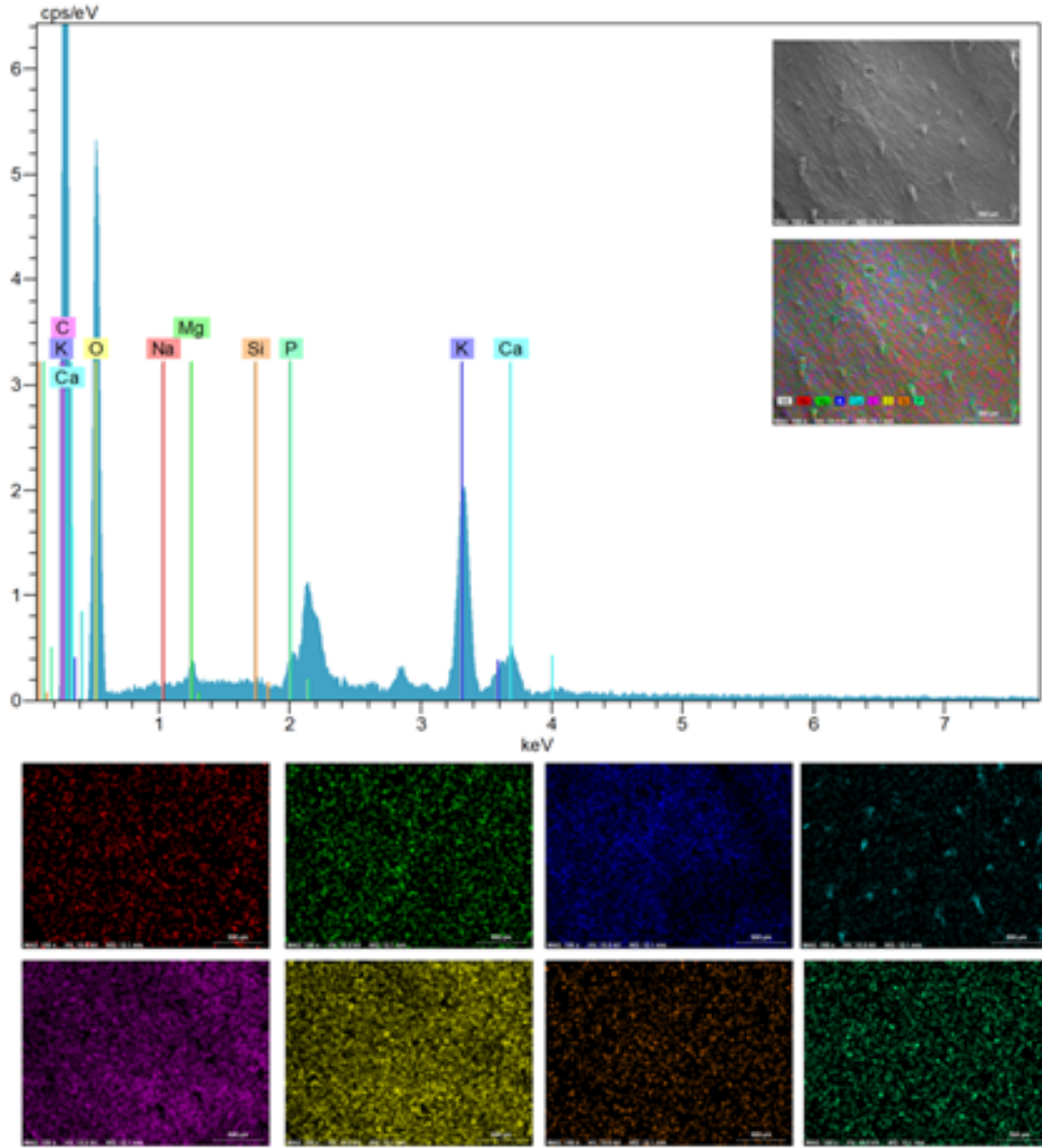
EDX spektrum ve haritaları bu gruba bağlı olarak yorumlandığında Na, Si ve P elementlerine ait sinyallerde belirgin şekilde artış görülmüştür.



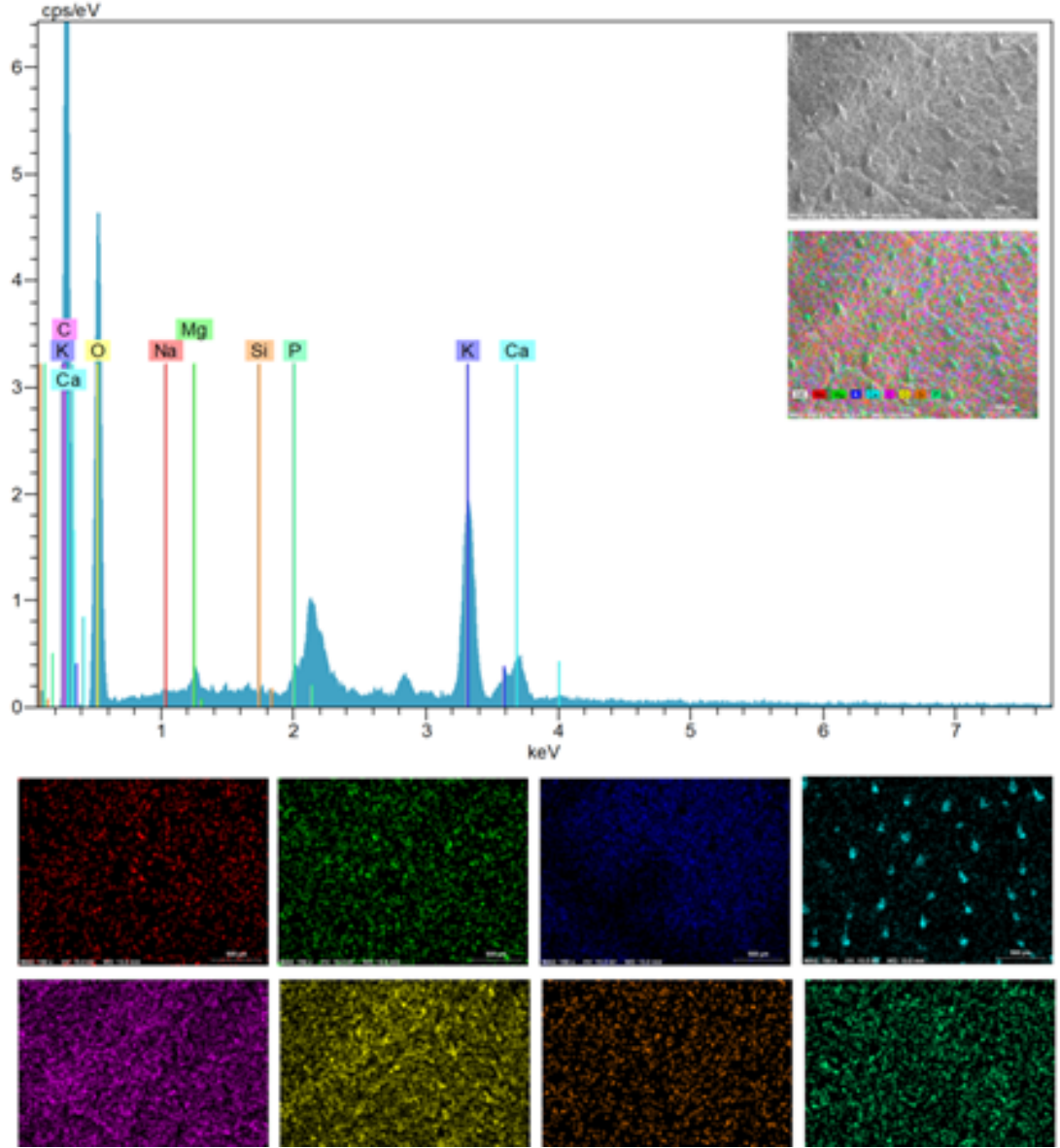
Şekil 4.27 Kontrol grubu ayçiçeği yaprak dokusu EDX görüntüleri



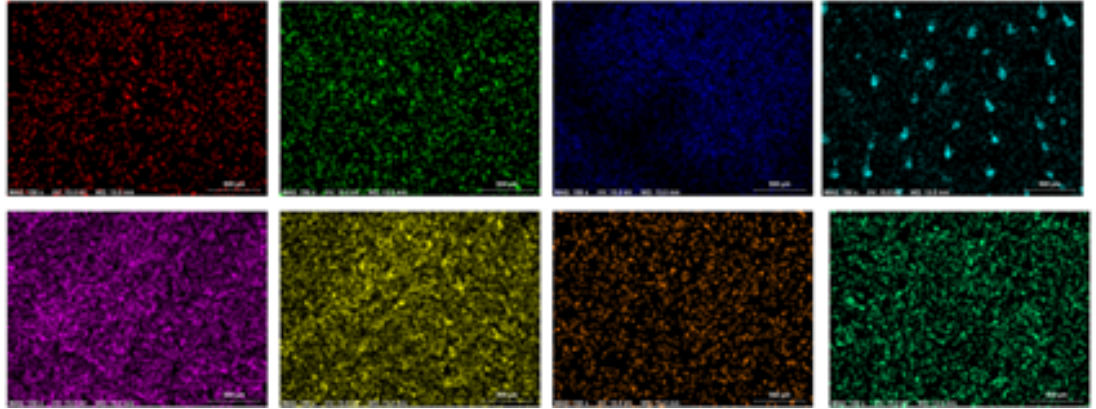
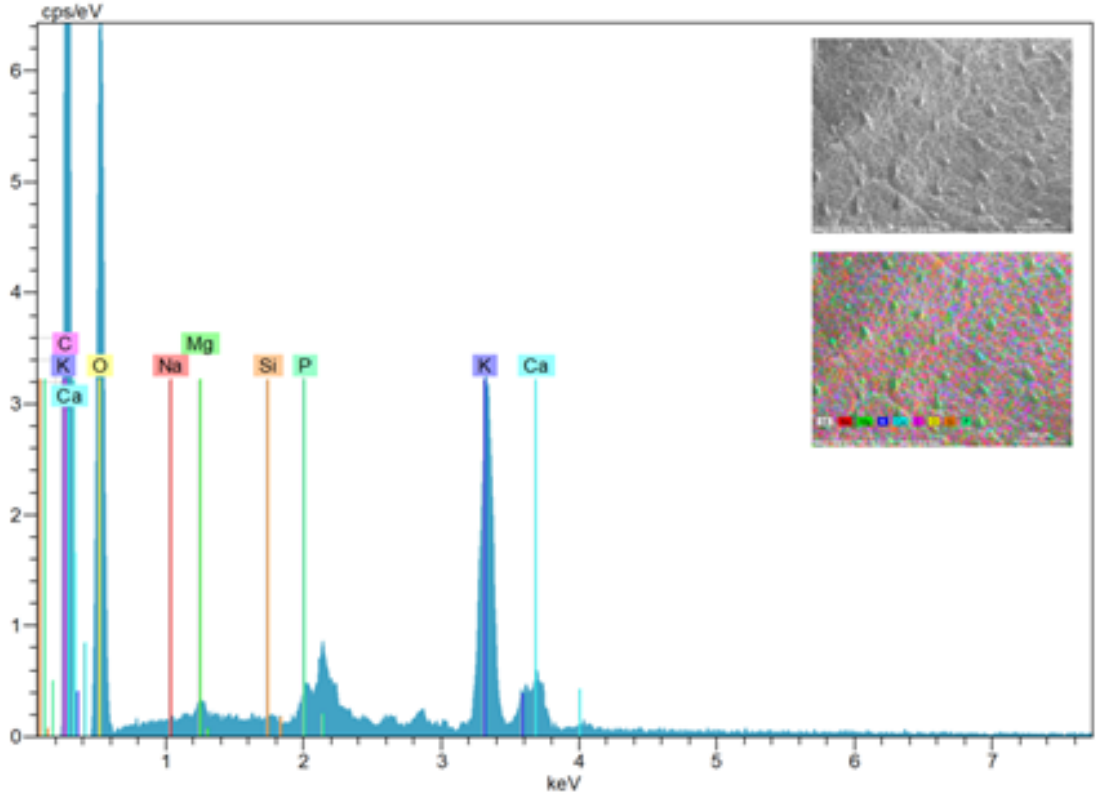
Şekil 4.28 ~50 nm boyutunda 20mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri



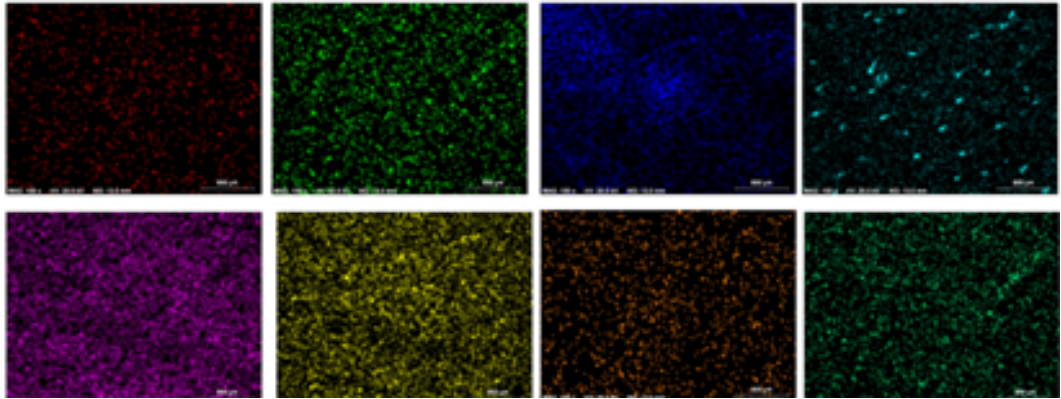
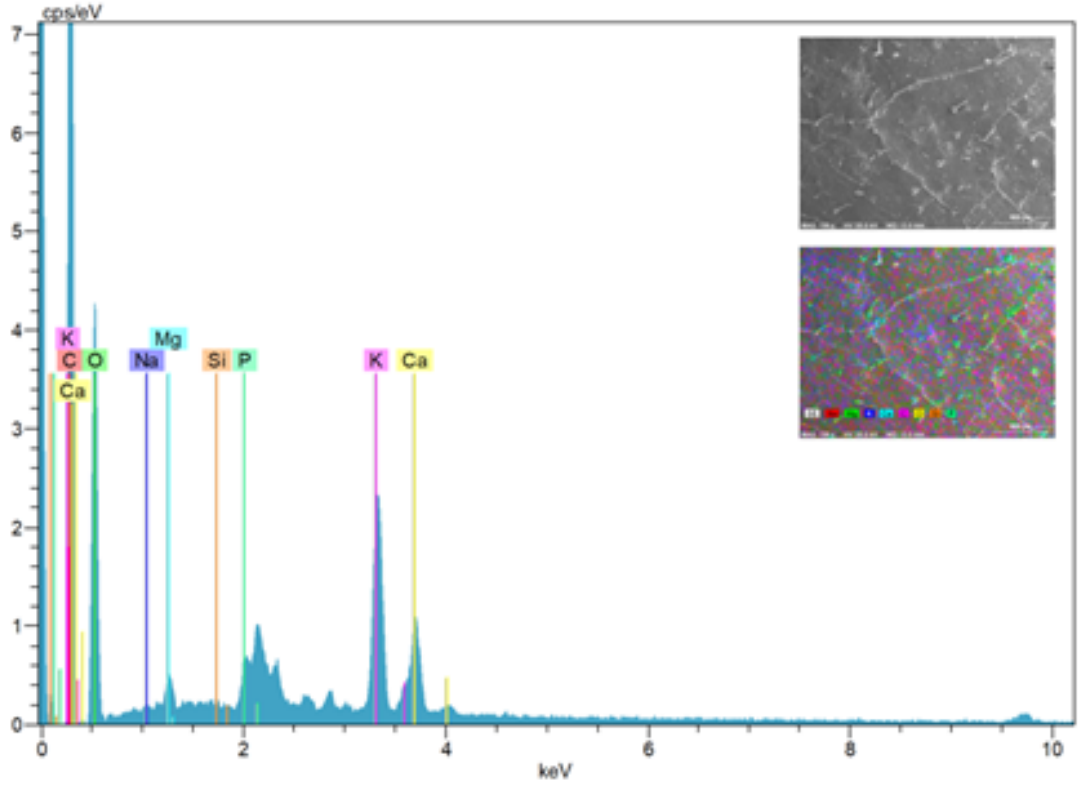
Şekil 4.29 ~50 nm boyutunda 50mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri



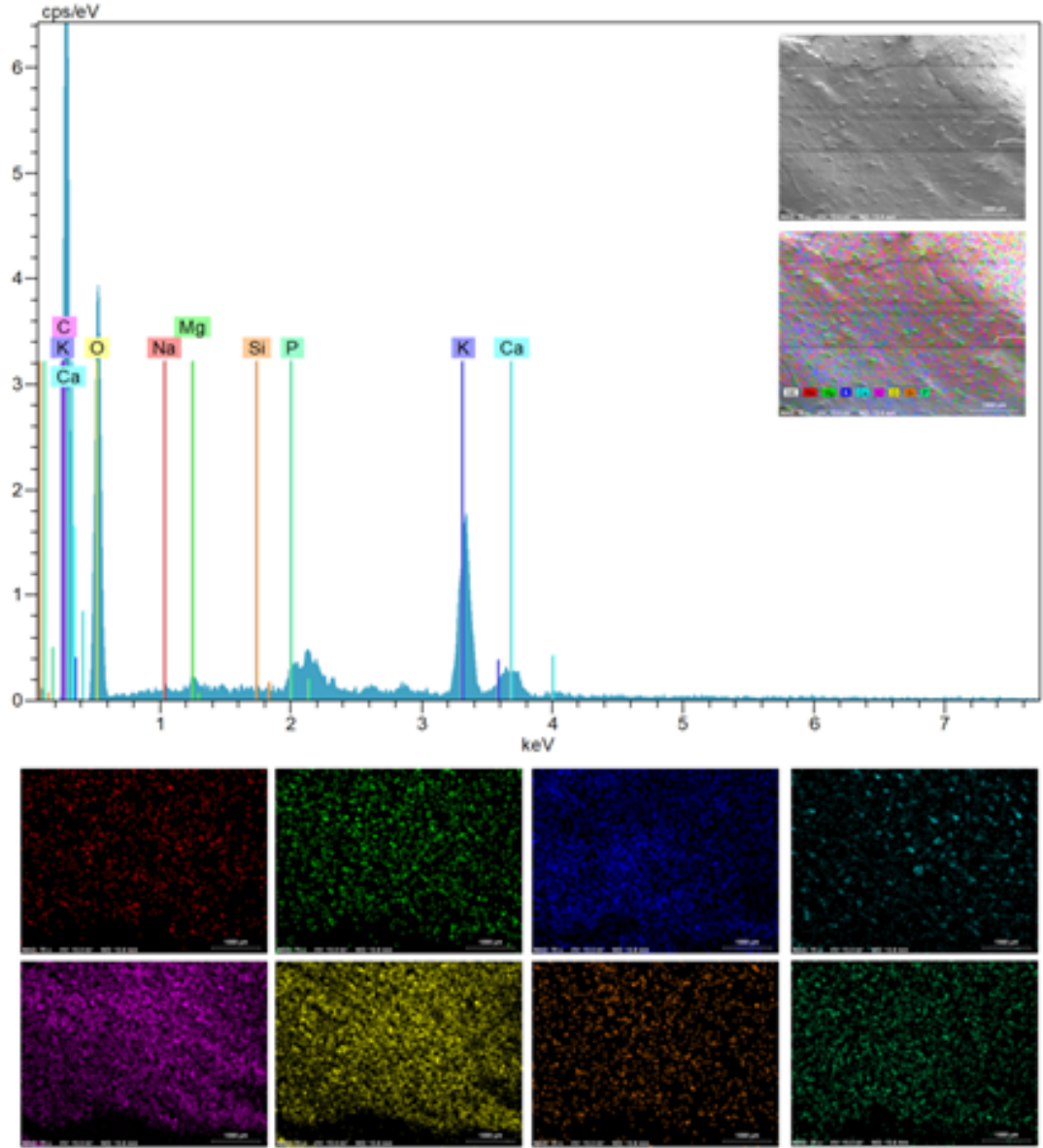
Şekil 4.30 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri



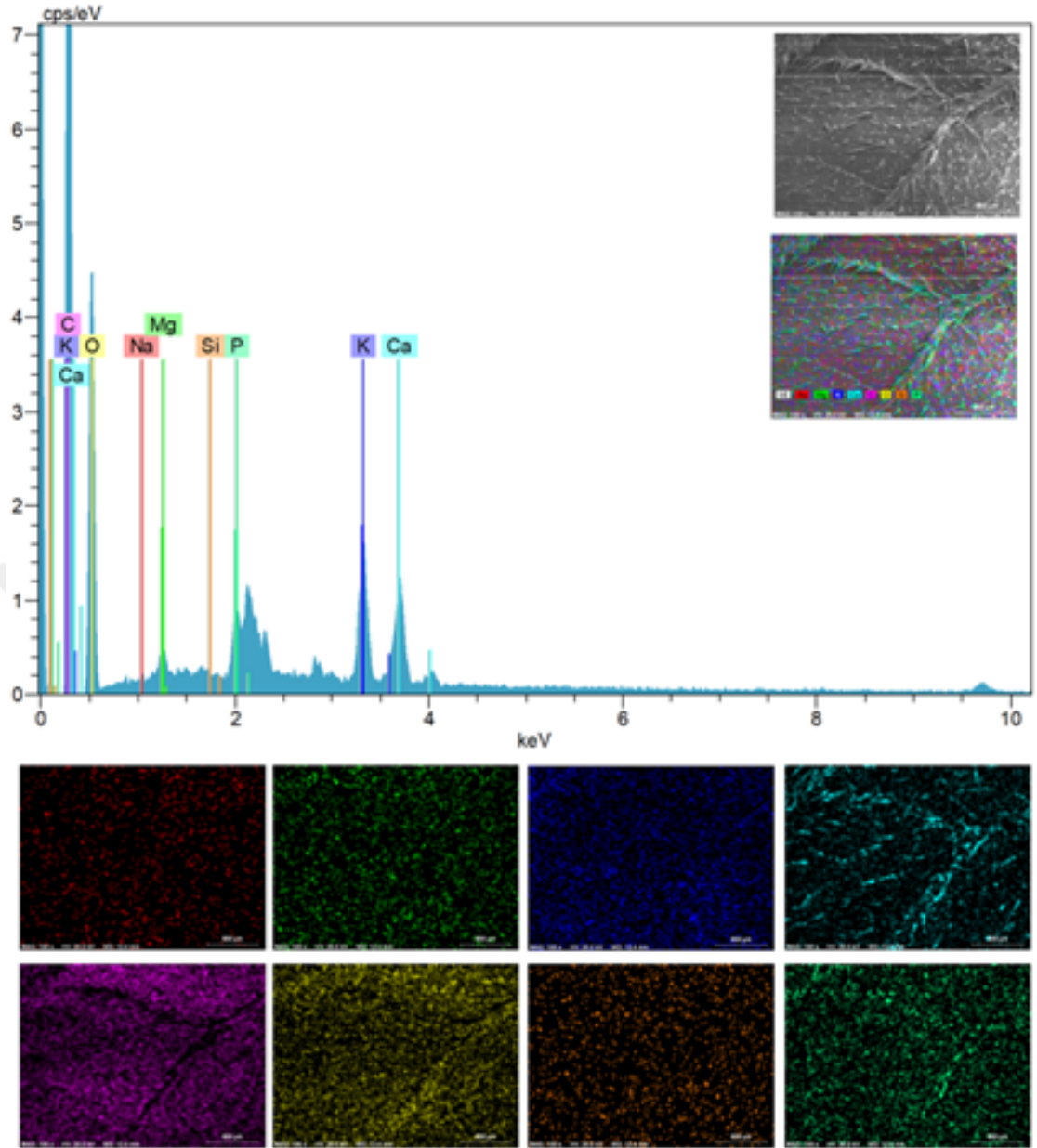
Şekil 4.31 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 4. gün EDX görüntüleri



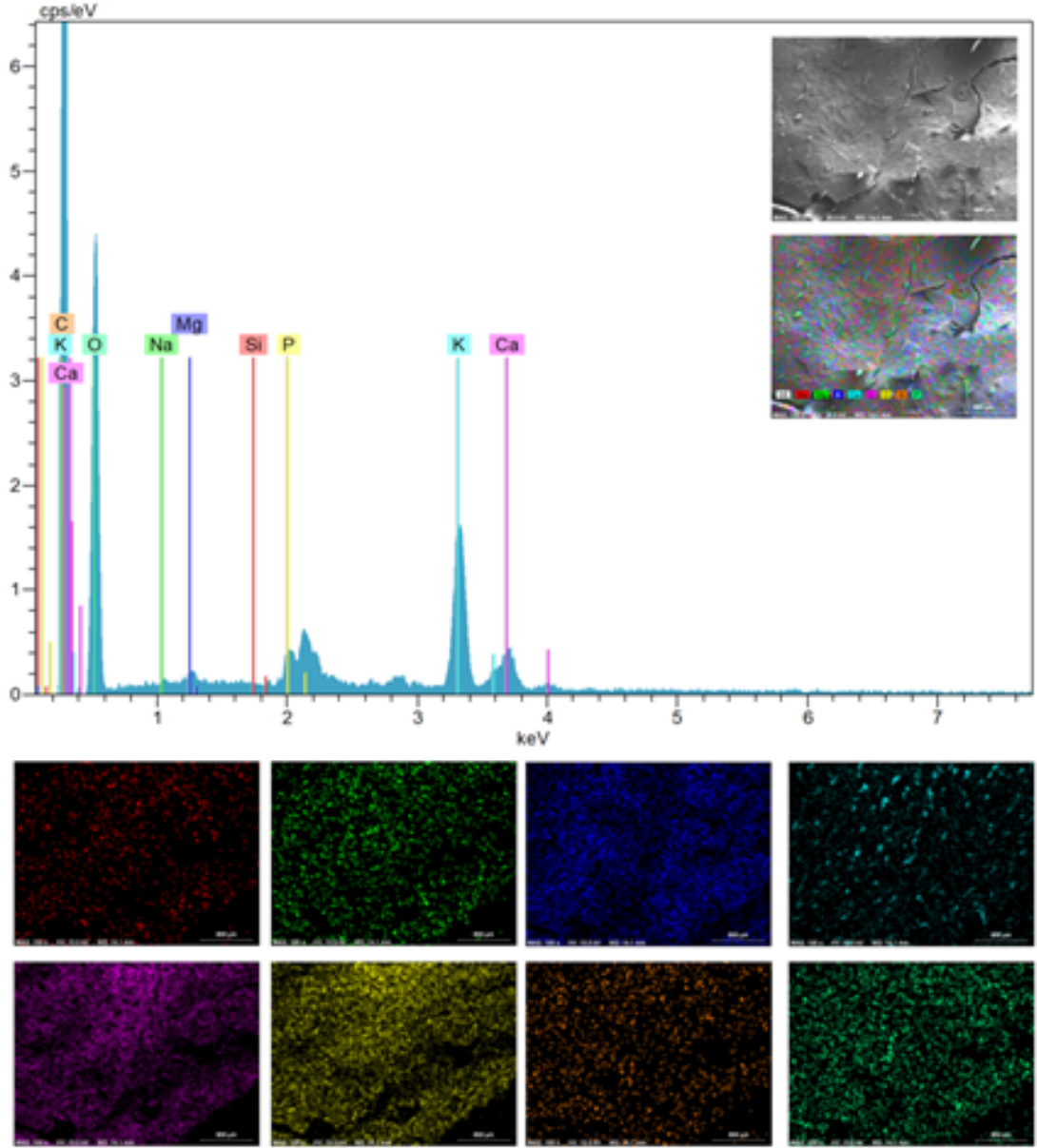
Şekil 4.32 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri



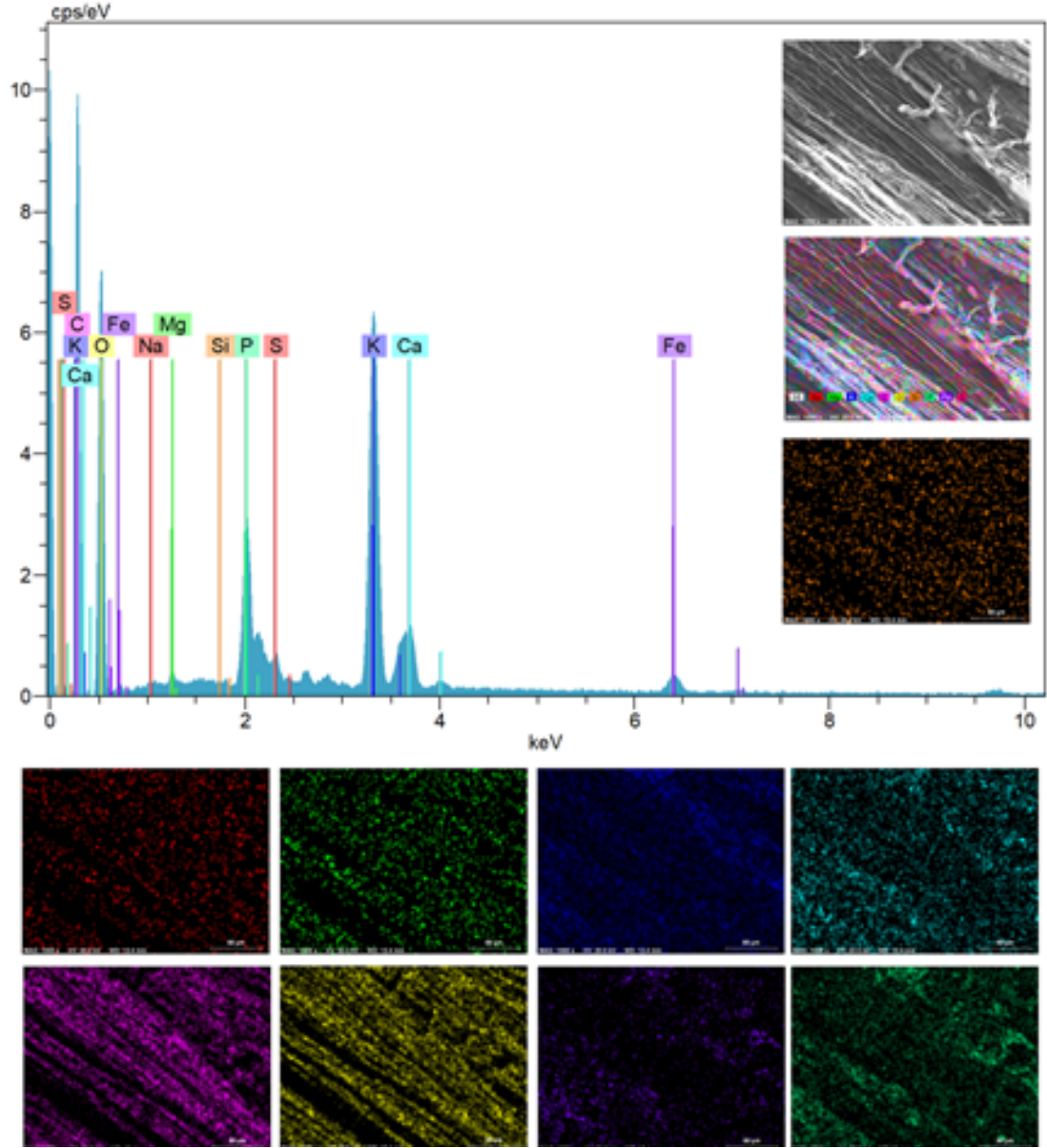
Şekil 4.33 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri



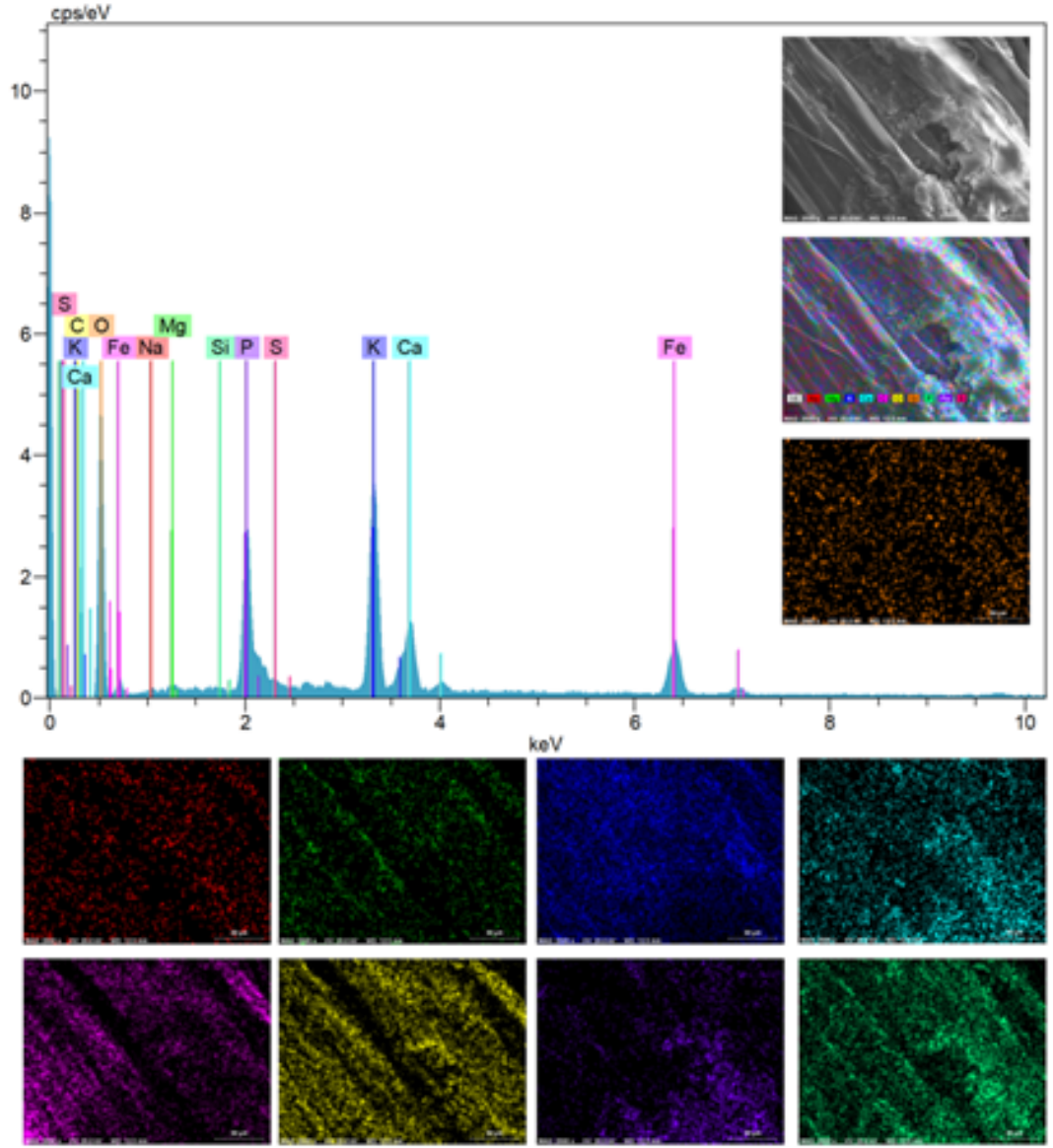
Şekil 4.34 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri



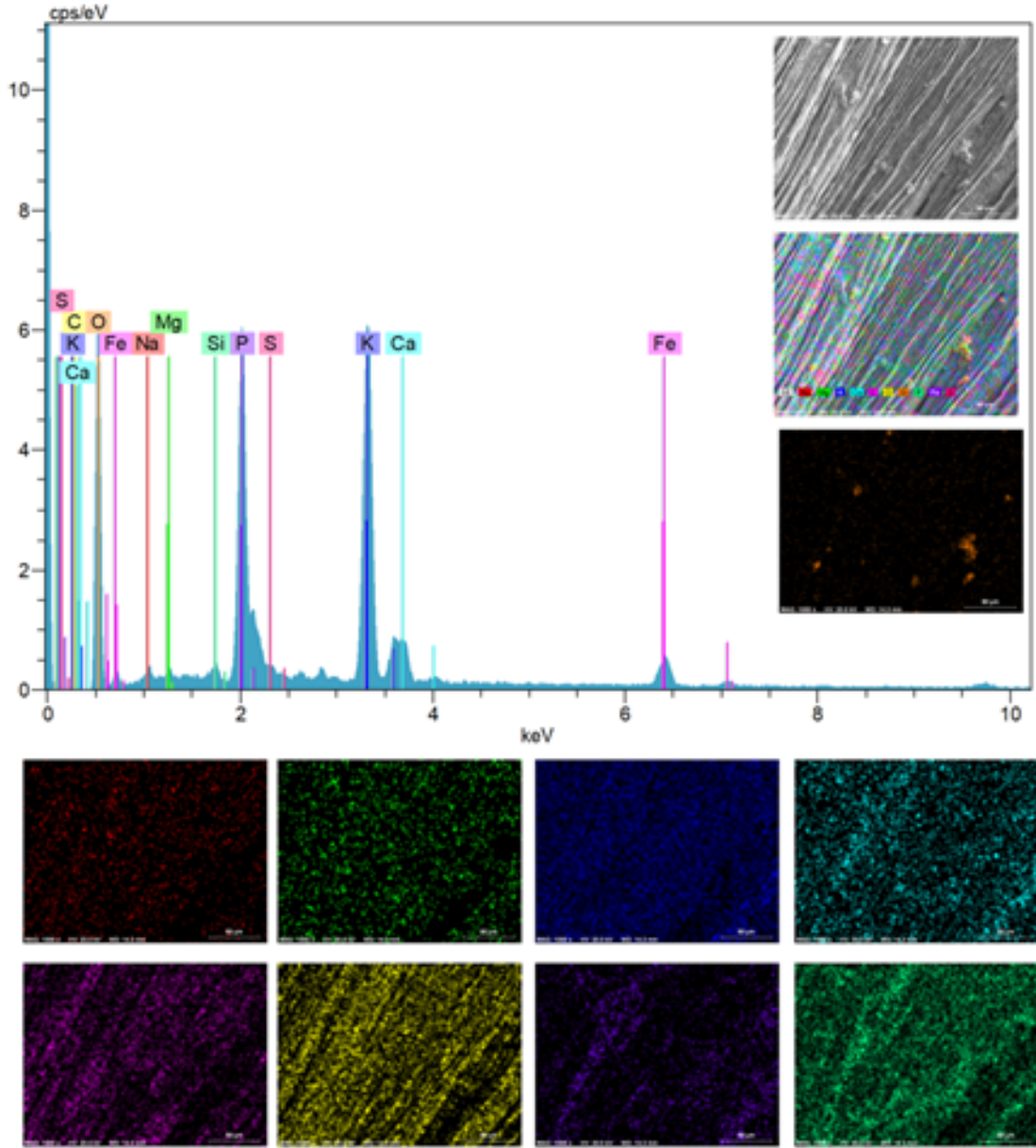
Şekil 4.35 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği yaprak dokusu 8. gün EDX görüntüleri



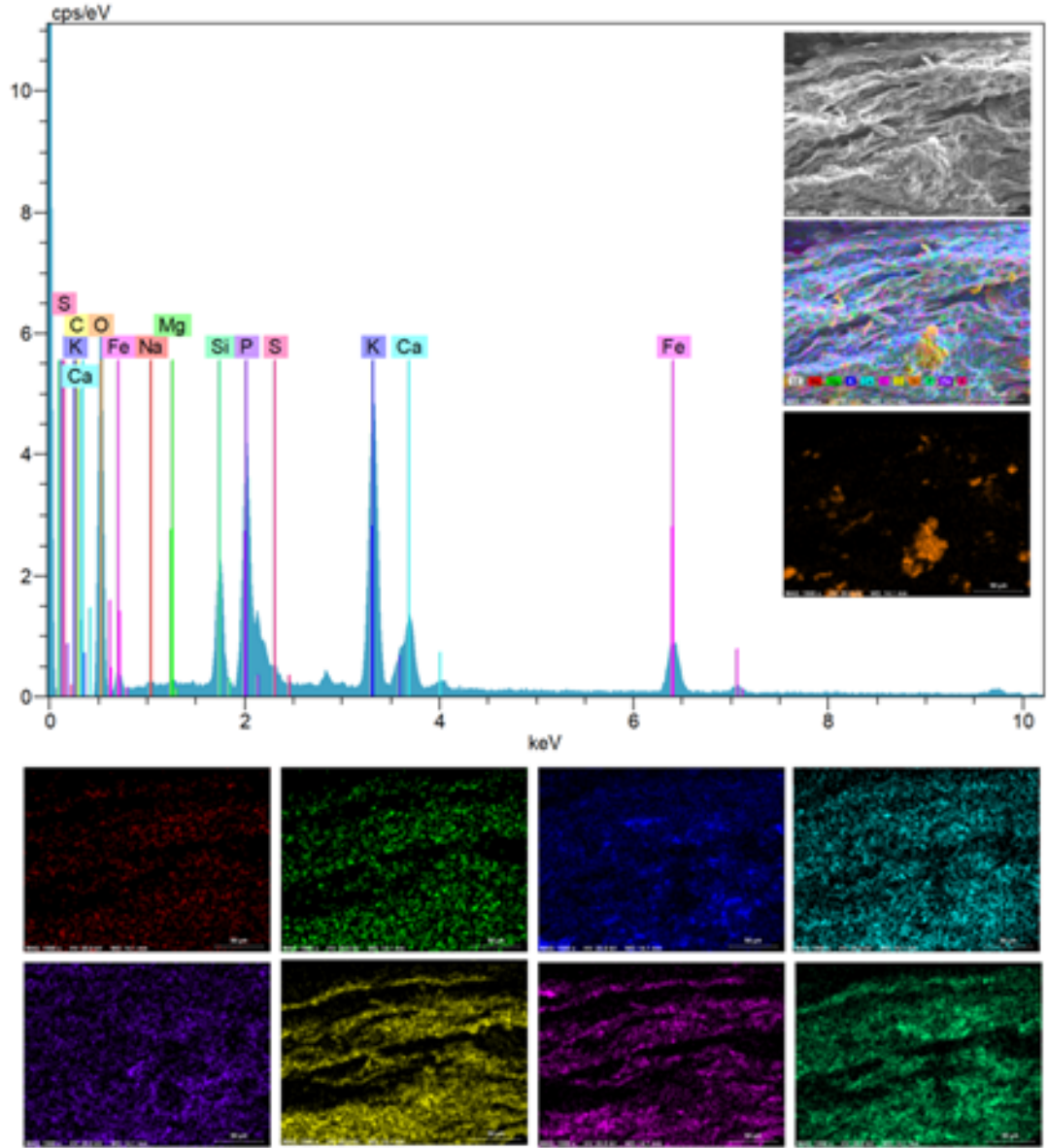
Şekil 4.36 Kontrol grubu kök dokusu EDX görüntüleri



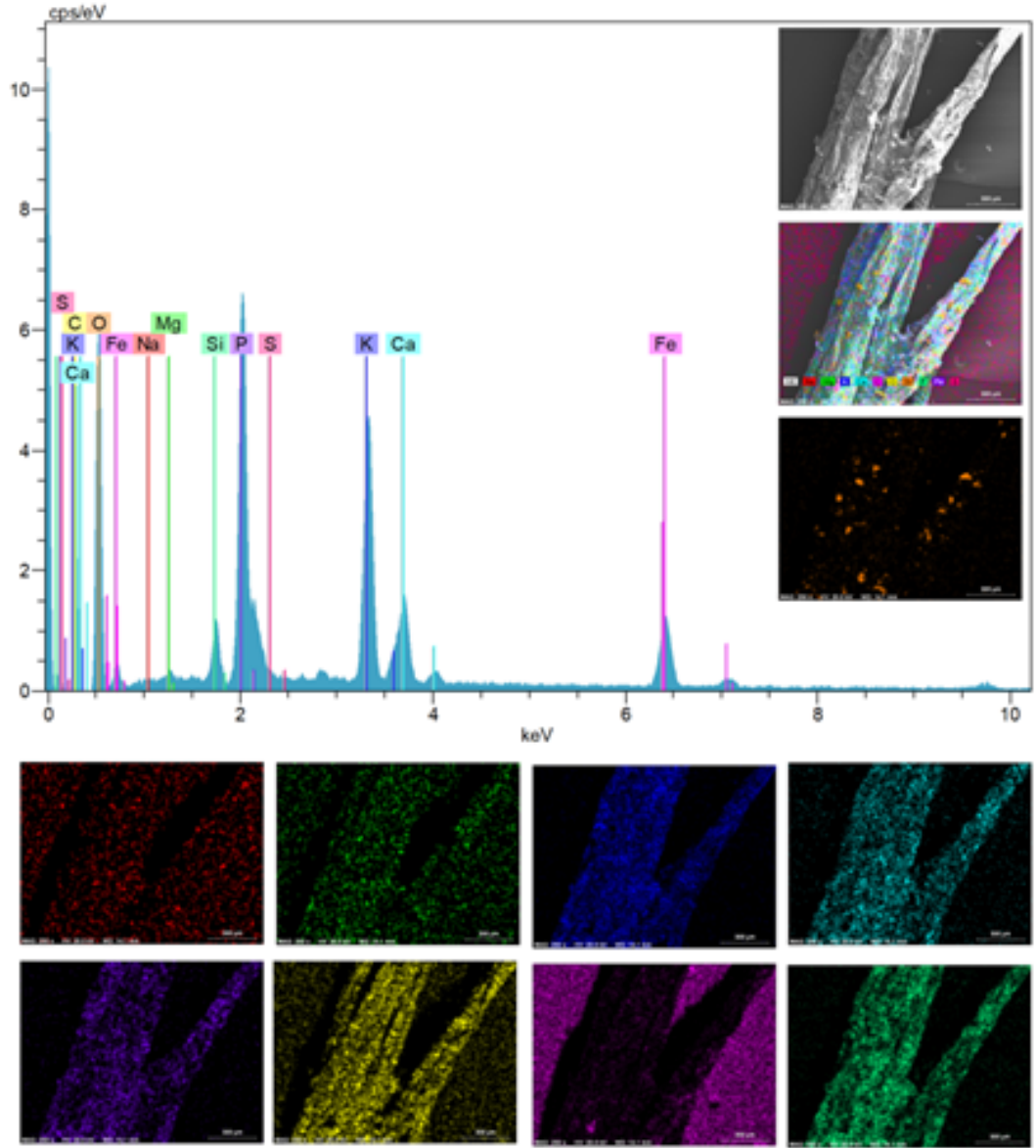
Şekil 4.37 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri



Şekil 4.38 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri

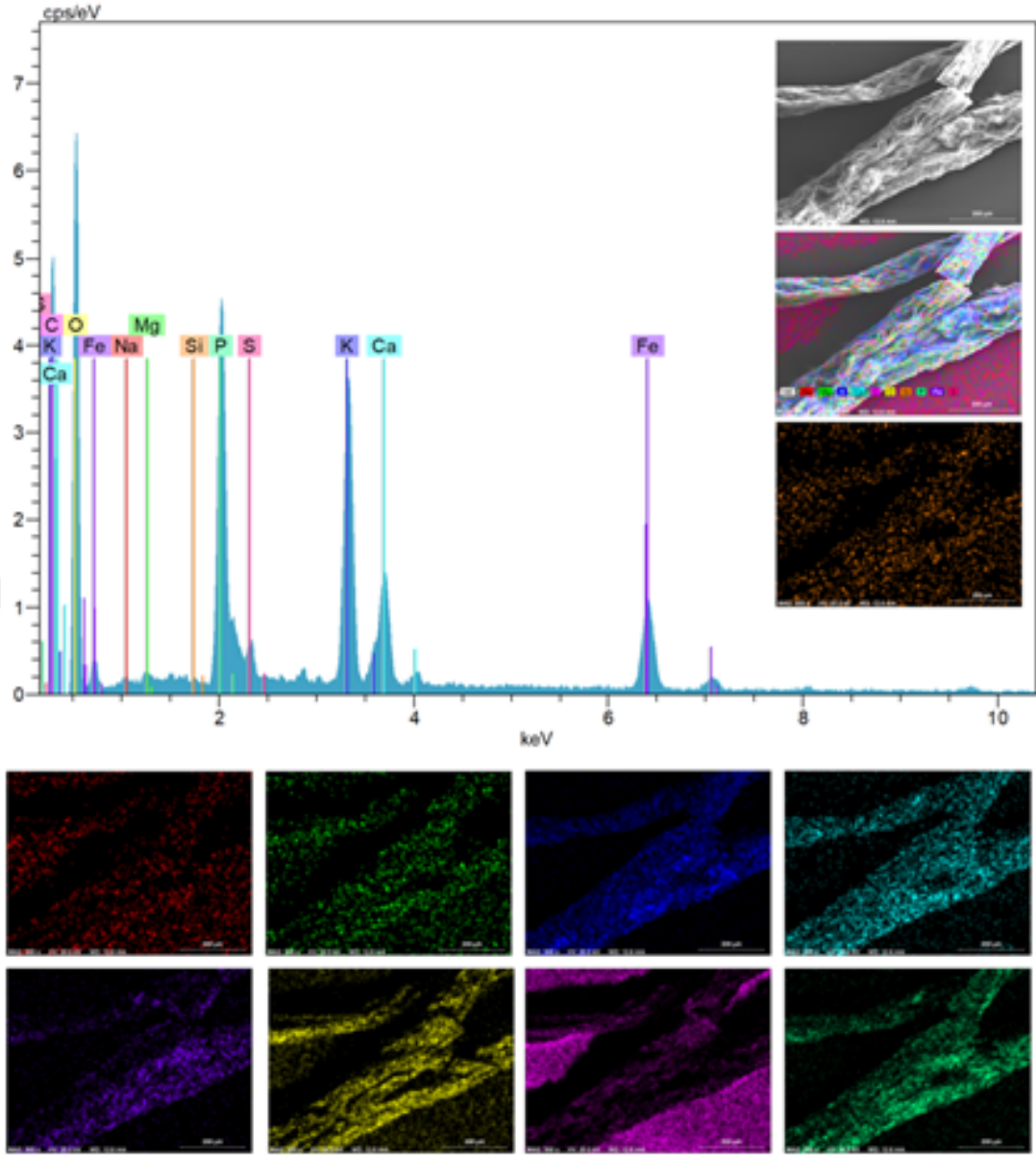


Şekil 4.39 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri

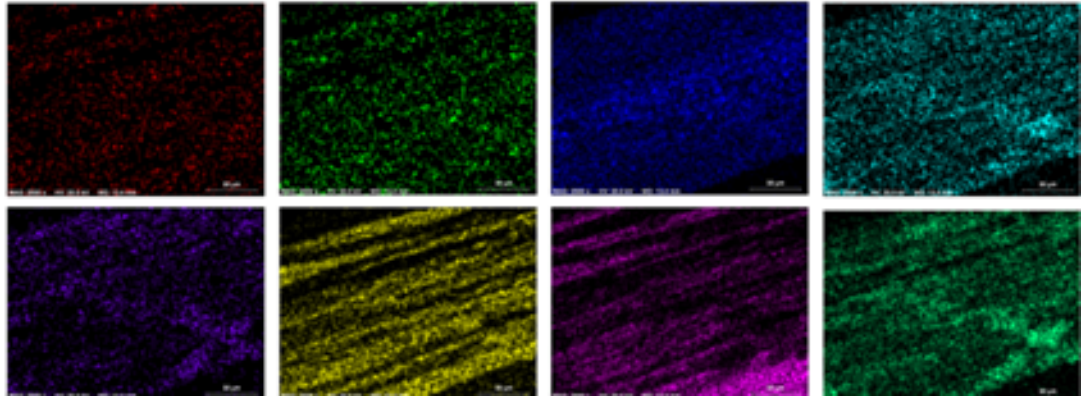
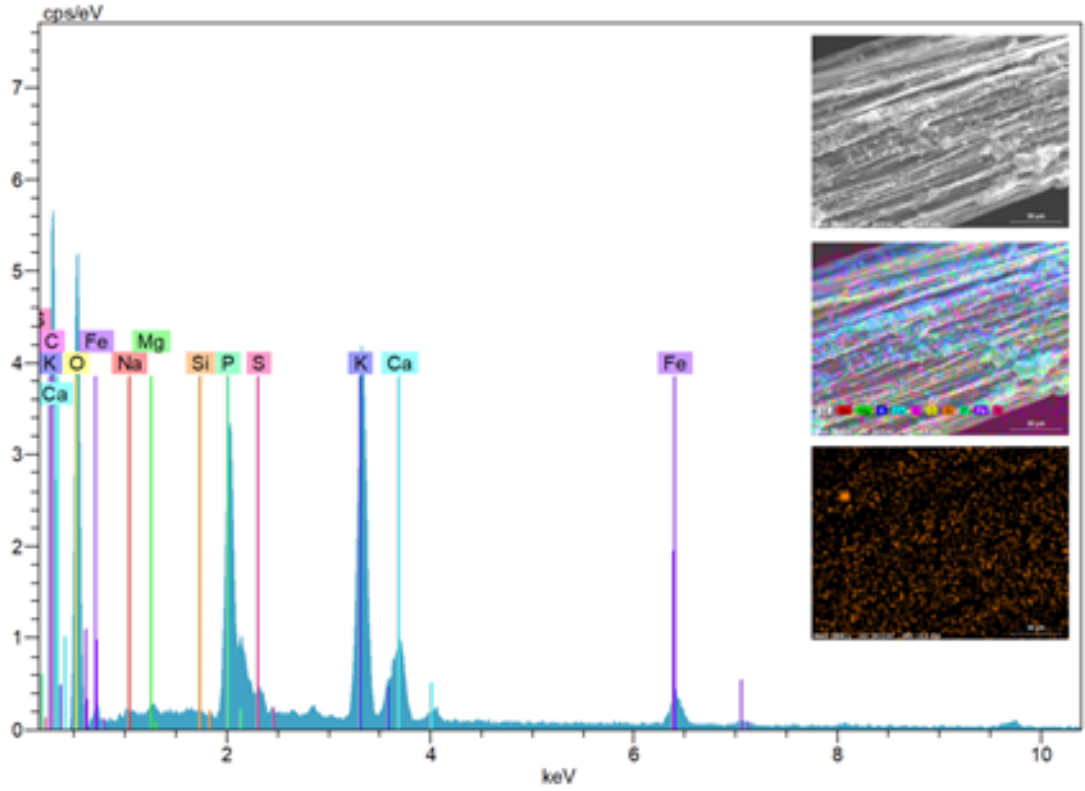


Şekil 4.40 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 4. gün EDX görüntüleri

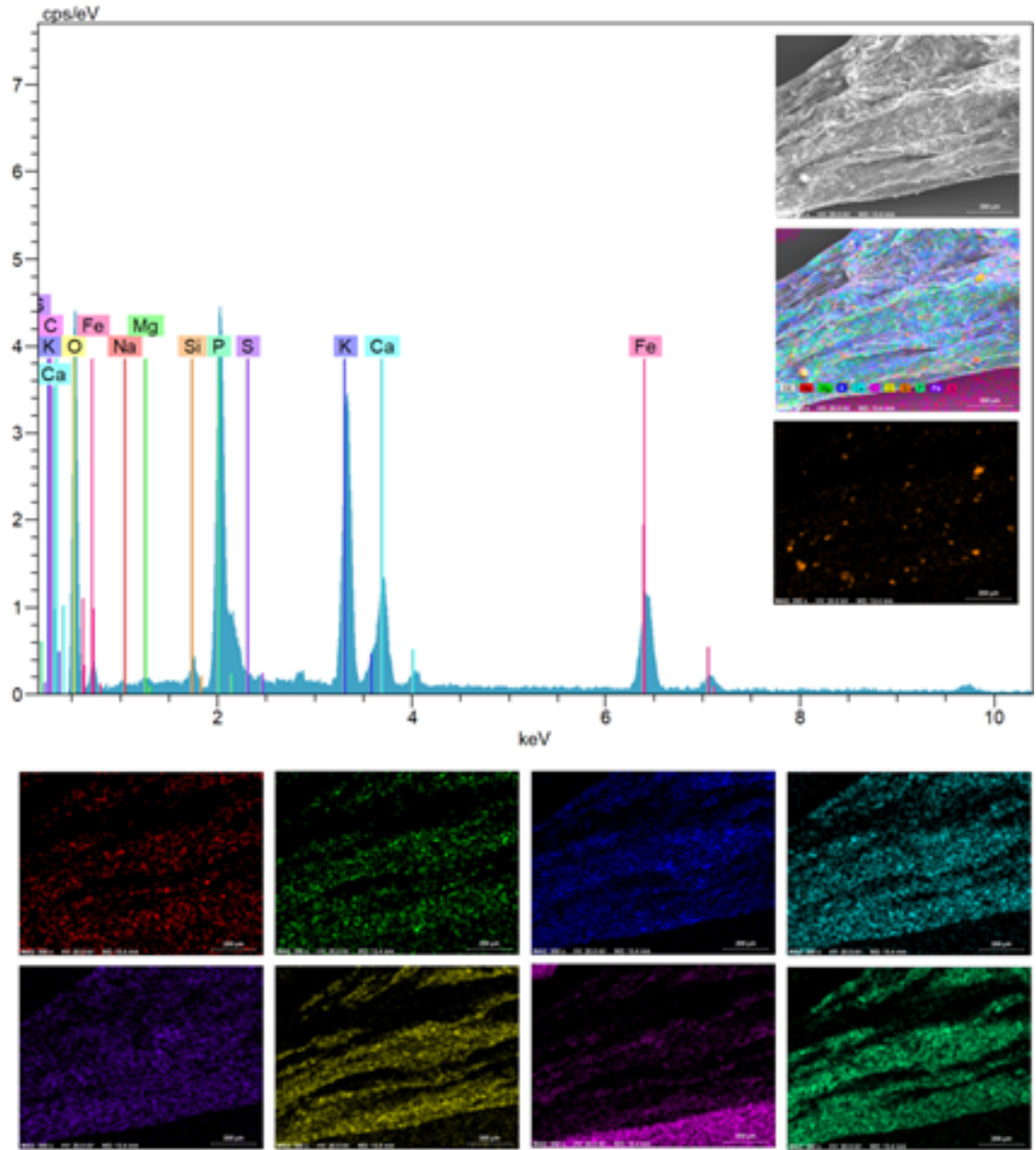
Şekil 4.46'da kök yapısına ait kontrol grubu görülmektedir. Burada fibriller kök yapısı belirgin ve net olarak görülmektedir ve S, Fe elementlerinden kaynaklı pikler spektruma dahil olmaktadır.



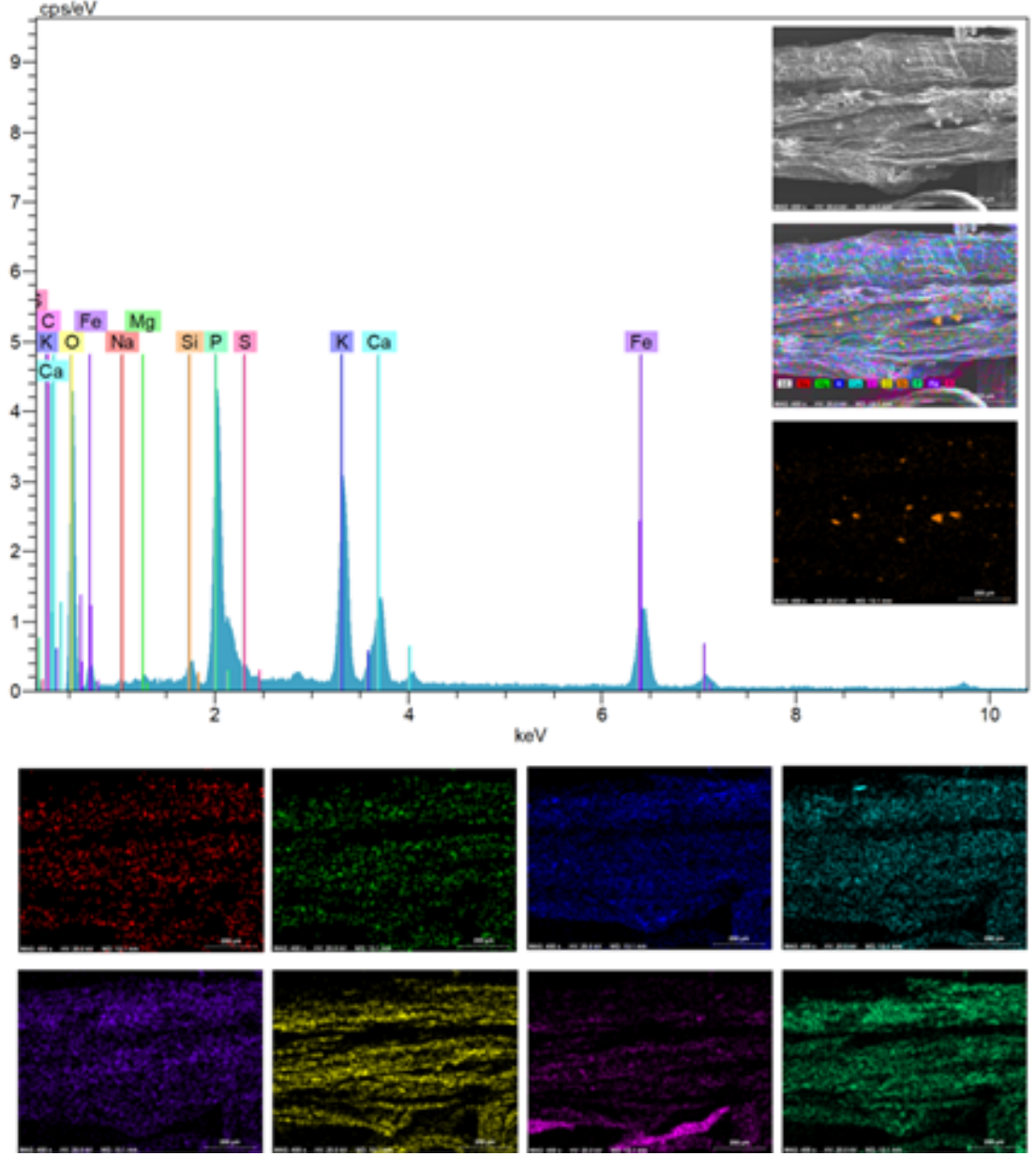
Şekil 4.41 ~50 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri



Şekil 4.42 ~50 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri



Şekil 4.43 ~100 nm boyutunda 20 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri

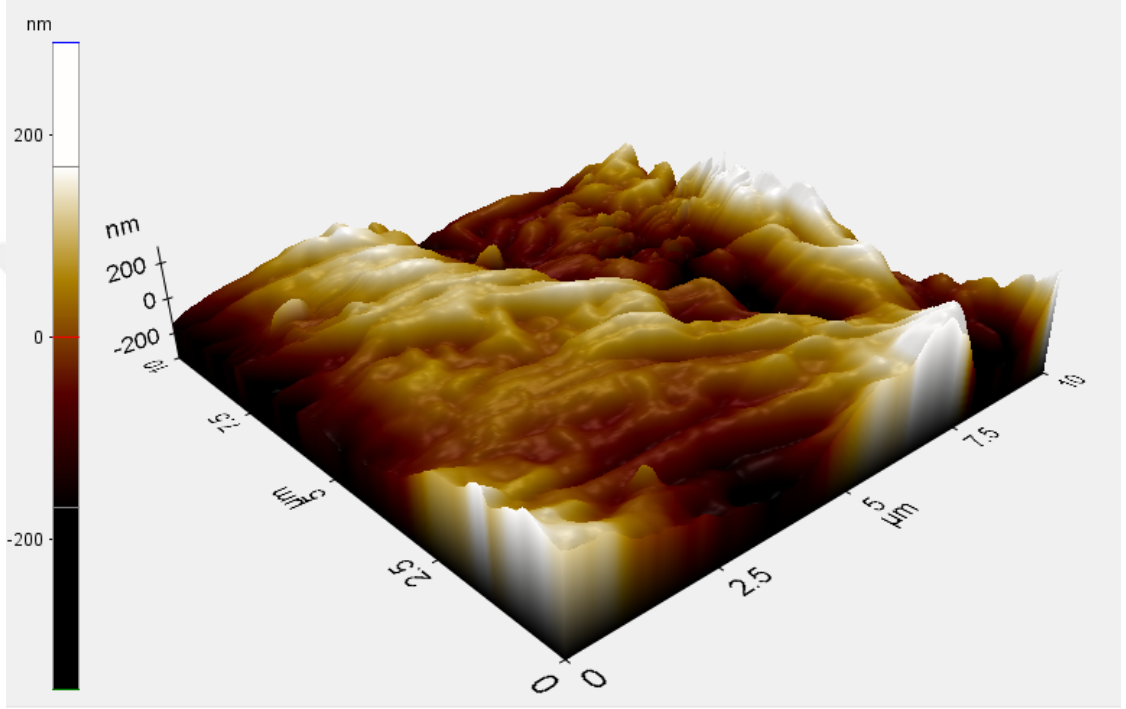


Şekil 4.44 ~100 nm boyutunda 50 mg/L SiO₂NP uygulanmış ayçiçeği kök dokusu 8. gün EDX görüntüleri

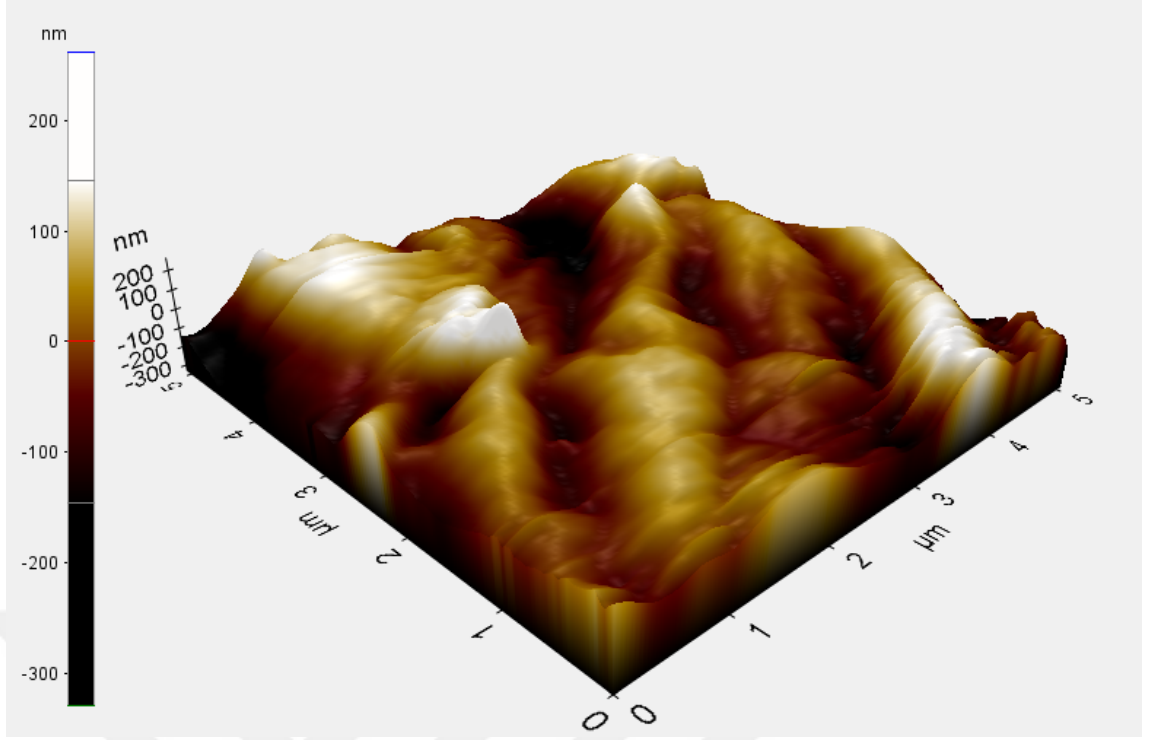
Şekil 4.47'den 4.54'e kadar farklı boyut ve konsantrasyonlarda SiO₂ uygulanmış kök yapılarının EDX spektrumları görülmektedir. Bu spektrumlarda SiO₂ miktarındaki artış ve boyuttaki büyümeye bağlı olarak Si element sinyalinin arttığı ayrıca yüzeyde belirli bölgelerde Si kümelenmelerinin olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.55-63 arasında farklı boyut ve konsantrasyonda SiO₂ uygulanmış yaprak yüzeylerine ait AFM görüntüleri verilmiştir.

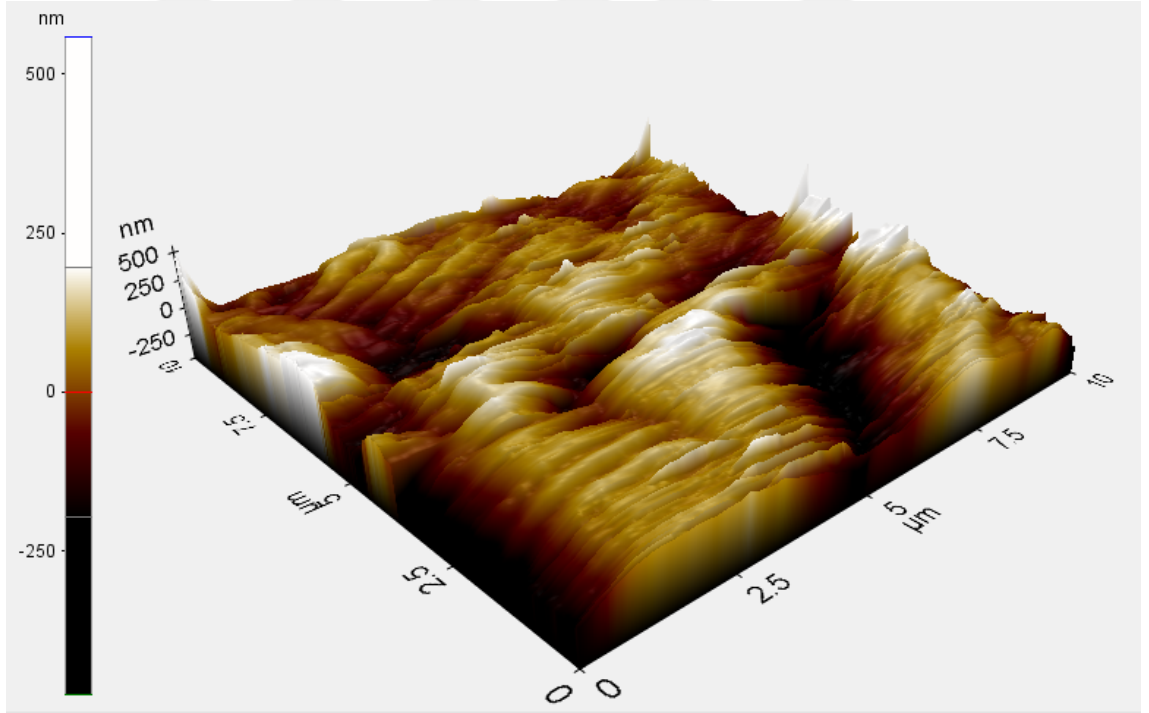
Şekil 4.55'te kontrol grubu yaprak yüzeyine ait AFM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde yaprak yüzeyinin kuruma yapısına bağlı olarak kaviteli morfolojisi görülmektedir. Kontrol grubuna göre SiO₂ uygulaması yapılan bitkilerin yaprak yüzeylerinde bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. Yüzeyde herhangi bir SiO₂ birikmesi ve kümelenmesi görülmemektedir. Tüm bu bulgular SiO₂ etkisinin yapraktan daha çok kök yapısı üzerine birikmesi ile ilgili olduğunu göstermektedir.



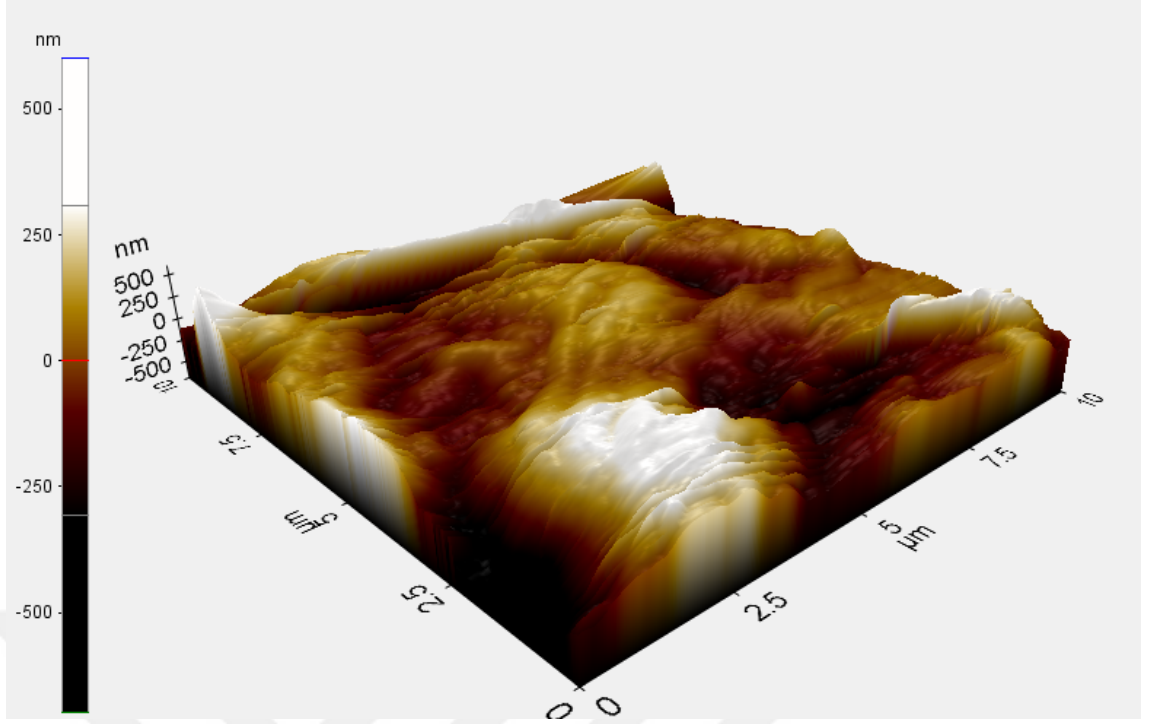
Şekil 4.45 Kontrol yaprak dokusuna ait AFM görüntüsü



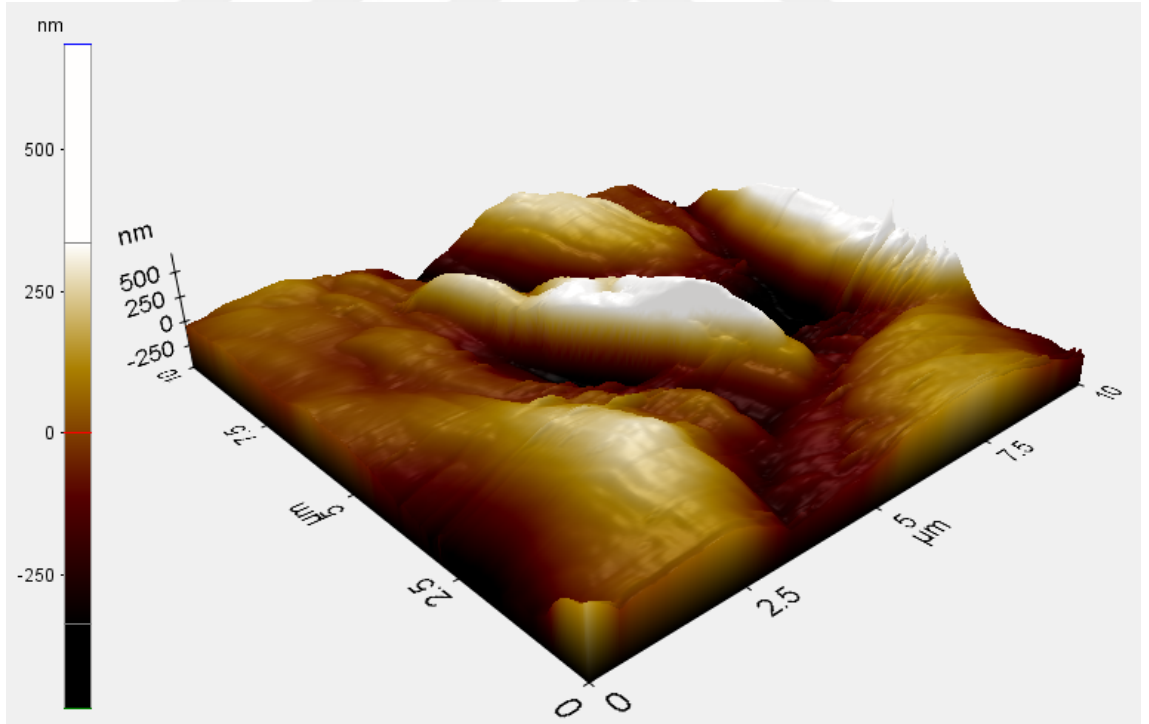
Şekil 4.46 Yaprak dokusunda 4. gün 50-20 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü



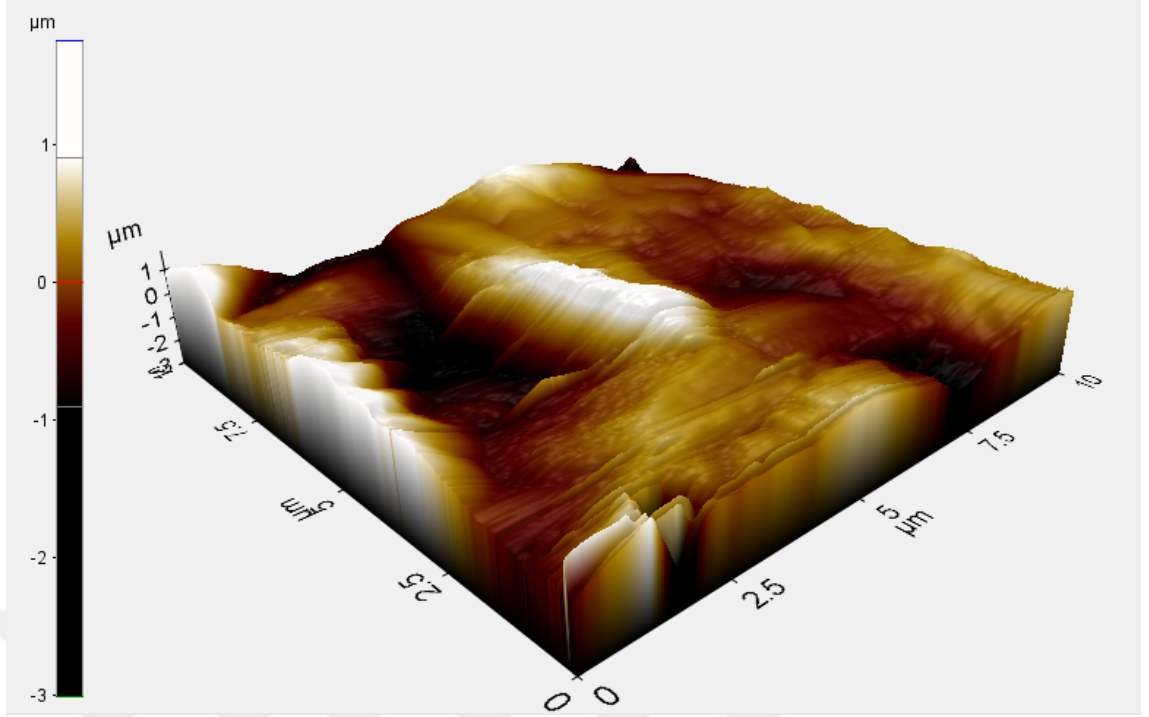
Şekil 4.47 Yaprak dokusunda 4. gün 50-50 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü



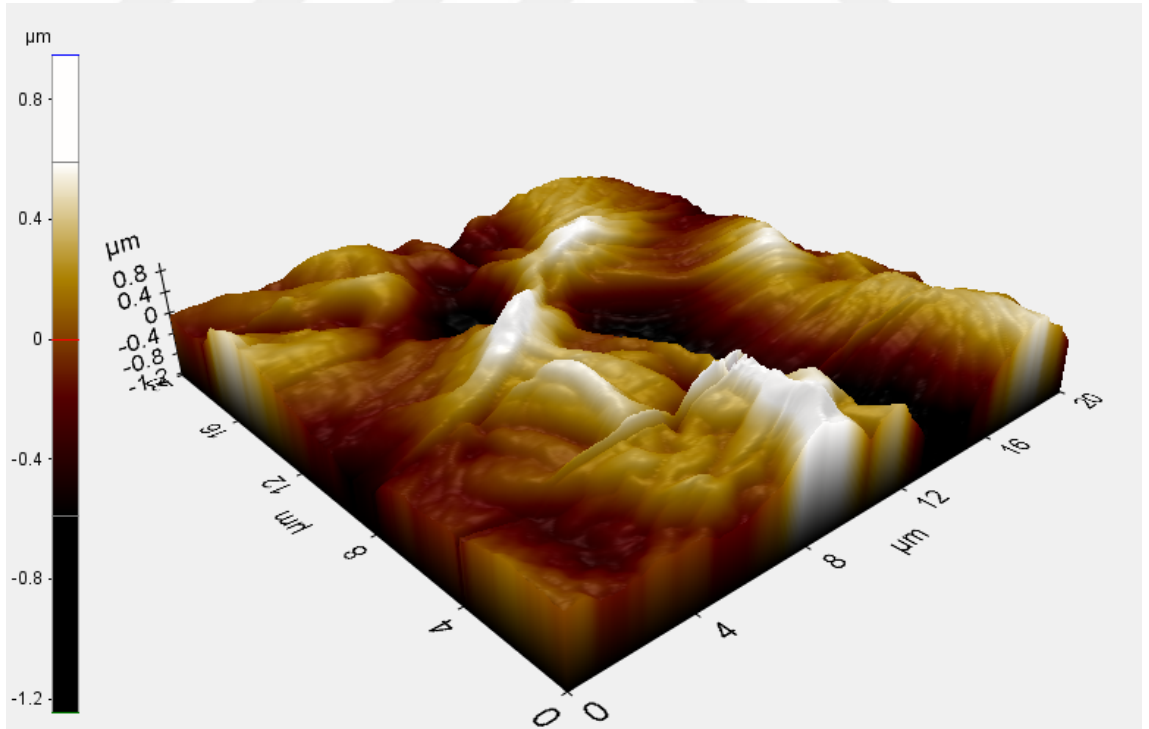
Şekil 4.48 Yaprak dokusunda 4. gün 100-20 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü



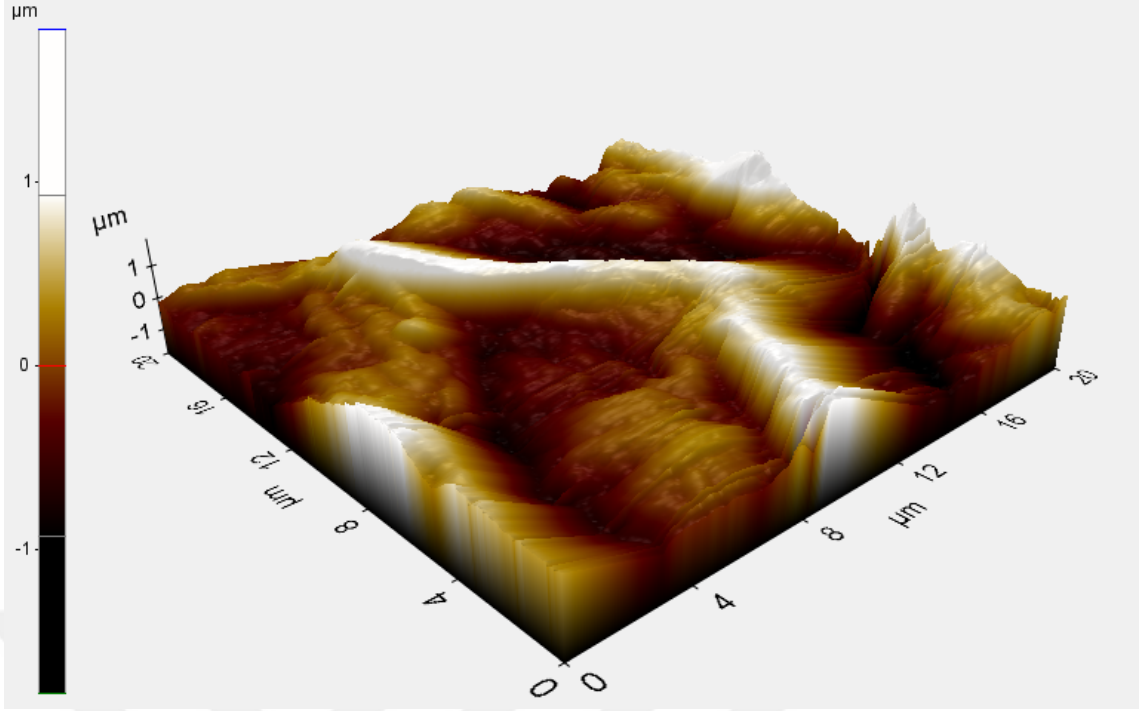
Şekil 4.49 Yaprak dokusunda 4. gün 100-50 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü



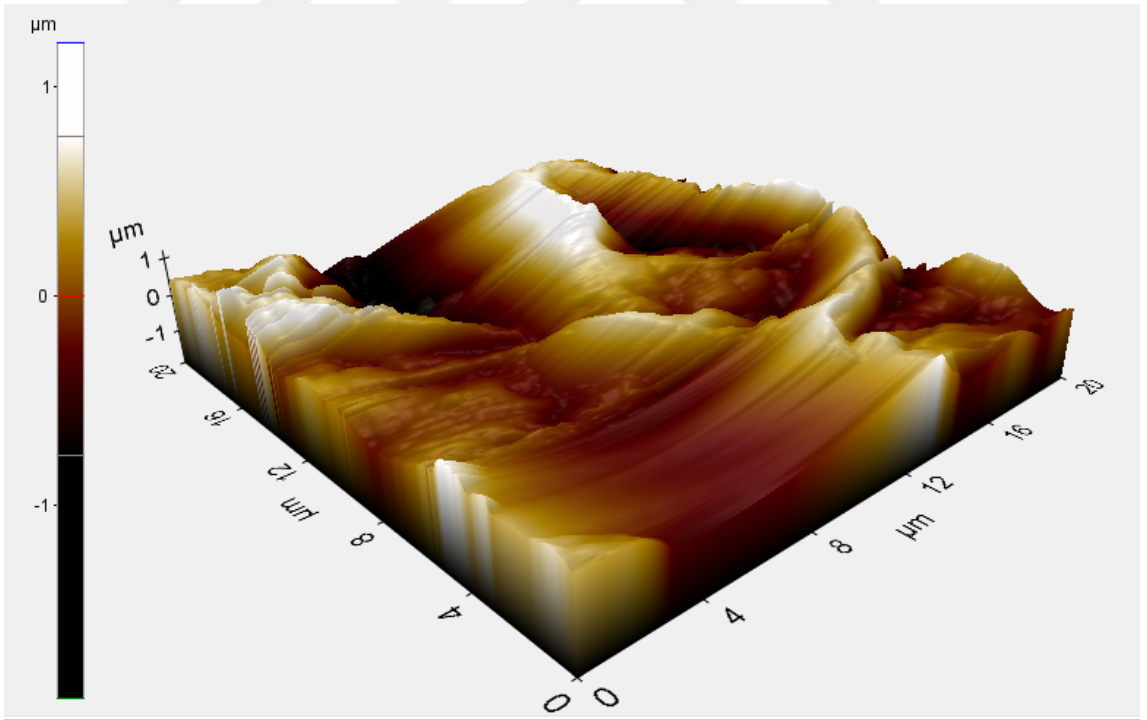
Şekil 4.50 Yaprak dokusunda 8. gün 50-20 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü



Şekil 4.51 Yaprak dokusunda 8. gün 50-50 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü



Şekil 4.52 Yaprak dokusunda 8. gün 100-20 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü



Şekil 4.53 Yaprak dokusunda 8. gün 100-50 nm-mg/L SiO₂NP uygulamasının AFM görüntüsü

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Nanoteknolojinin yeni bir sanayi ve bilgi devrimi olarak 21. yüzyıla damgasını vuracağına ve 2025 yılına kadar gelişmesini tamamlayarak hayatımızın her alanına gireceğine inanılmaktadır. Nanoteknolojinin öncelikli olarak malzeme ve biyoteknoloji alanında ağırlığını hissettirmesi beklenmektedir. Bu yolla hızla hayatımıza giren NP'lerin önerilen yararlarının yanı sıra toksisiteleri ile ilgili bilgilerin ve çalışmaların artması gerekmektedir. Yapılan bilimsel araştırmalar incelendiğinde, NP'lerin insan ve hayvan sağlığı üzerindeki olası toksik etkileri çalışılmıştır. Bunun yanında bitkiler ile ilgili çalışmalar daha azdır. Ancak insan ve hayvanların hayatını sürdürebilmesinde önemli bir rolü olan bitkiler, NP'lerin biriktiği hava, su ve toprakla birebir ilişki halinde olan canlılardır. Literatür verilerine göre; NP'lerin olası toksik etkilerinin uygulanan doza ve maruz kalma süresi yanında partikül boyutu, kimyasal kompozisyon ve yüzey alanı ile de ilişkili olduğu ortaya çıkarılmıştır (Siddiqui vd. 2015; Wang vd. 2016).

Çalışmamızda değişik boyut ve konsantrasyonda olan SiO₂NP'nin ayçiçeği bitkisinde zamana bağlı olarak oransal su içeriğinin değişimi incelendiğinde (Çizelge 4.1 ve Şekil 4.11) yaprak dokularında kontrol grubuna göre, 50-20, 50-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında OSİ miktarları yaklaşık 1.5 katı kadar artış göstermiş 100-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda ise 1. ve 8. günlerde kontrole göre bir artış 4. günde ise azalma saptanmıştır. 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda ise kontrol grubuna göre, 1. ve 4. günlerde azalma 8.günde ise bir artış saptanmıştır.

Behboudi vd. (2018); kuraklık stresi altındaki buğday bitkilerine SiO₂NP (0, 30, 60 ve 90 ppm) uygulaması yaptıkları çalışmada, özellikle 90 ppm SiO₂NP'nin kontrole göre, OSİ değerini artırdığını rapor etmişlerdir. Kuraklık stresi uygulanmamış bitkilerde 90 ppm SiO₂NP uygulamasında OSİ'nin en yüksek değer olan % 88.27 olduğu buna karşılık strese maruz kalan ve NP uygulanmayan bitkilerde ise OSİ'nin % 21.94 olarak saptandığı bildirilmiştir. Ayrıca kuraklık stresi OSİ değerini düşürürken SiO₂NP uygulamalarının kontrole göre anlamlı derecede arttığı bildirilmiştir. Araştırmacılar, SiO₂NP'lerin köke uygulamasının yaprak uygulamasına göre OSİ'de daha etkili olduğunu da ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, Si'nin, bir Si-kütikula çift tabakası oluşturarak yaprak kütiküllerinin altına depolandığını, dolayısıyla kütikül yoluyla geçişinde Si birikimi ile azaltılabileceğini

bu nedenle yaprak epidermal dokusu üzerinde oluşan bir silika-kütikula çift katmanının, yaprakların daha yüksek OSİ'den sorumlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Yapılan bir çalışmada, *Helianthus annuus* L.'nin tohumları perlit içerisinde 20 gün büyütüldükten sonra hidroponik kültür çözeltilisine aktarılmıştır. Daha sonra 25 günlük bitkilere γ -Fe₂O₃NP; kontrol, NP'siz, 50 ve 100 mg/L NP'li olmak üzere uygulanmış ve 5 gün boyunca devam ettirilmiştir. NP (γ -Fe₂O₃)'nin partikül büyüklüğü ~ 20-100 nm olarak hazırlanmıştır. Kontrol grubunda OSİ miktarı % 82.17, 50 mg/L NP uygulamasında % 81.66, 100 mg/L NP uygulamasında ise, % 81.15 olarak bulunmuştur. Araştırmacılar, hidroponik deneylerin bitki fizyolojisi çalışmalarında ön adımlar olarak çok faydalı olsa da tutarlı sonuçlar için farklı deneysel seviyeler/ölçeklerin gerekli olduğunu ve hidroponik koşullarda yüksek su mevcudiyetinin, kök hidrolik iletkenliğinin azalmasına rağmen suyun bitkilerin içinde taşınmasını kolaylaştırabileceği ve böylece NP'ye maruz kalma sırasında OSİ'nin korunmasına yardımcı olabileceğini de ifade etmişlerdir. Ayrıca bu hidroponik deney sayesinde, NP'nin kök hidrolik iletkenliği üzerine etkisi ile NP'ler tarafından kök fonksiyonelliğinde bir azalma tespit edilmiştir. Bu hidrolik kök iletkenliğinin, mahsullerin etkinliğini ve kullanılmasını araştırırken daha özel su koşullarında su ilişkilerinin sürdürülmesinde dikkate alınması gereken önemli bir faktör olabileceği de öne sürülmüştür (Lazcano-Ferrat ve Lovatt, 1999).

Martínez-Fernández vd. (2015), NP'ler ile işlenmiş kirli bir toprakta yetişen *Helianthus annuus* L. bitkilerinin OSİ durumlarında bir değişiklik olmadığını bildirmişlerdir.

Bir çalışmada, Hoagland çözeltilisinde farklı konsantrasyonlarda AgNP'leri domates fidelerine uygulanmıştır. Toplam klorofil içeriği, OSİ, antioksidan enzim aktiviteleri ve MDA içeriği analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda OSİ'nin AgNP uygulamaları altında değişmediği, bununla birlikte toplam klorofil içeriğinin AgNP uygulamaları ile önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir. En yüksek OSİ kontrol gruplarında bulunurken, en düşük OSİ 20 mg/L AgNP ile işlem görmüş bitkilerde, kontrol bitkilerine göre % 6.81 daha düşük saptanmıştır. Düşük konsantrasyonlarda AgNP uygulamalarında SOD ve APX aktivitelerinin arttığı, bununla birlikte yüksek konsantrasyonlarda AgNP uygulamalarında SOD ve APX aktivitelerinin azaldığı

rapor edilmiştir. Tüm AgNP uygulamalarında MDA içeriğindeki artış saptanmıştır (Çekiç vd. 2017).

Yapılan bir çalışmada, 3 aylık *Coriandrum sativum* L. bitkilerine 22 gün boyunca her gün; 20, 40 ve 80 ppm, 25 mL farklı nikel NP uygulanmıştır. Araştırmacılar, OSİ'nin bitki organlarındaki su miktarını gösteren bir endeks olduğu ve bitkinin stres koşullarında suyu muhafaza etme yeteneği gösterdiğini bildirmişlerdir. Bu nedenle deneysel olarak kontrol edilen bir ortamda ölçülen OSİ'nin, açıkça bir bitkinin cevabını gösterdiğini ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda, nikel NP'nin fotosentetik pigmentlerin içeriğini, kök ve sürgün uzunluğunu ve OSİ'yi düşürdüğünü rapor etmişlerdir. Araştırmacılar, NP'lerin antioksidan aktiviteyi azaltsa da nikel NP'lerin *C. sativum* L. bitkisi üzerinde toksik etkilere sahip olduğunu bildirmişlerdir (Mırı vd. 2017).

Prunus mahaleb L. tohumlarında, TiO₂ ve ZnONP'lerin % 0.5, 1, 2 veya 3 konsantrasyonlarında 10, 20 ve 30 dakika boyunca uygulamalarının yapıldığı bir çalışmada, üretilen fideler sera koşullarında 7 ay boyunca % 1.5 ve 10 konsantrasyonda NP çözeltileri ile sulanmıştır. Tohumların % 1 konsantrasyonunda TiO₂NP'lerin 20 dk boyunca muamele edilmesi, en yüksek çimlenme yüzdesiyle (% 65) sonuçlanmış ve 30 dakika boyunca % 3'lük konsantrasyonda ise en düşük çimlenme yüzdesini (% 13) gösterdiği rapor edilmiştir. En yüksek toplam fide uzunluğu, tohumların % 0.5'lik TiO₂NP'lere maruz bırakılmasından sonra elde edilmiş. Fidelerin % 1 konsantrasyonunda TiO₂NP'lerle sulanması, toplam boy, canlı kalma ve toplam kuru ağırlığı artırmada uygun bir yöntem gibi görüldüğü bildirilmiştir. NP seviyelerinin yüksek uygulanmasına bağlı olarak OSİ'de bir azalma ve prolinde bir artış göstermiştir (Goodarzi vd. 2017).

Si ile muamele edilmiş arpa bitkilerinde büyüme, kök hidrolik iletkenliği, transpirasyon hızı, stoma iletkenliği ve OSİ'nin arttığı bildirilmiştir (Liu vd. 2014; Shi vd. 2016).

Çalışmamızda, 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda OSİ'deki azalma, nano-SiO₂ alınımının artışına bağlı olarak gerçekleşen su alınımı ve taşınımındaki bozulmayla bağlantılı olabileceğini akla getirmektedir. OSİ'nin azalması NP'nin hem partikül hem de konsantrasyonun strese bağlı membran geçirgenliğindeki bozulma ve

bunu takiben su kaybının tetiklenmesiyle bağlantılı olabilir. Ayrıca, 50-20 ve 50-50 (nm-mg/L) nano-SiO₂ uygulamalarının su içeriğinin korunmasında daha etkili olduğu söylenebilir.

Goodarzi vd. (2017)'nin NP seviyelerinin yüksek uygulanmasına bağlı olarak OSI'de bir azalma görülmesi bulgusu, bizim çalışmalarımızda elde ettiğimiz sonuçlarla uygunluk göstermektedir. Çalışmamızda, OSI değeri kontrol grubuna göre, 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda azalma göstermesi diğer uygulama gruplarında ise artış göstermesi, Çekiç vd. (2017)'nin OSI'nin NP uygulamaları altında değişmediği en yüksek OSI'nin kontrol gruplarında saptandığı bulgusu ile uygunluk göstermemektedir.

Çalışmamızda değişik boyut ve konsantrasyonda olan SiO₂NP'nin ayçiçeği bitkisinde zamana bağlı olarak toplam protein miktarlarındaki değişim incelendiğinde (Çizelge 4.2 ve Şekil 4.12) kök ve yaprak dokularında kontrol grubuna göre, 1. günde kök dokusunda (100-20 nm-mg/L uygulama grubu hariç), 4. gün (yaprak dokusu 100-20 nm-mg/L uygulama grubu hariç) ve 8. günde (yaprak dokusu 50-50 nm-mg/L uygulama grubu hariç) toplam protein miktarlarında azalmalar saptanmıştır.

Silika NP'lerinin (1.5 ve 3 mM), bakla (*Vicia faba*) bitkisinde antioksidan aktivitesi üzerine etkilerini değerlendirmek için yapılan çalışmada, nano-silikanın 1.5 mM uygulama grubunda protein içeriğinin kontrole göre, önemli ölçüde farklı olmadığı ifade edilmiştir. Ancak nano-silikanın 3 mM uygulamasında protein içeriğinde kontrol ile karşılaştırıldığında % 9 oranında azaldığı saptanmıştır. Bu oran, 1.5 mM nano-silika uygulamasına kıyasla yaklaşık % 7 olduğu da bildirilmiştir. Bakla yapraklarına, 1.5 ve 3 mM nano-silika uygulamalarının, peroksidaz aktivitesinin sırasıyla kontrol grubuna kıyasla % 25 ve % 27 aralığında arttığı bildirilmiştir. Katalaz aktivitesinin, nano-silikanın 1.5 mM uygulamasında, kontrole göre % 29 oranında önemli ölçüde azaldığını ancak 3 mM nano-silika uygulamasının katalaz aktivitesini artırmasının anlamlı olmadığı ifade edilmiştir. SOD aktivitesinin, kontrol grubuna göre 3 mM'da en yüksek seviyeye (% 71 daha yüksek) sahip olduğunu, kontrol grubu ile 1.5 mM silika uygulaması arasında anlamlı bir farkın olmadığı da bildirilmiştir. Ancak 1.5 ile 3 mM nano-silika uygulamaları arasında SOD aktiviteleri arasındaki farkın önemli olduğu rapor edilmiştir. Araştırmacılar,

toplam protein içeriğindeki değişimin, silika stresinin altında bazı yeni proteinlerin üretilabildiğini veya bazılarının miktarının artırılabilirdiğini veya azaltılabildiğini de rapor etmişlerdir (Roohizadeh vd. 2015).

Bir araştırmada iki tarla bitkisi (*Zea mays* L. ve *Phaseolus vulgaris* L.), iki tıbbi bitki (*Hyssopus officinalis* L. ve *Nigella sativa* L.) ve iki yabancı ot (*Amaranthus retroflexus* L. ve *Taraxacum officinale* FH Wigg) SiO₂NP ile (400, 2.000 ve 4.000 mg/L) ayrı ayrı muamele edilmiştir. Bu uygulamaların bitkilerin morfolojik ve biyokimyasal özellikleri üzerindeki etkileri, çimlenme, kök ve sürgün uzunluğu, kök ve sürgün kuru ağırlık, fotosentetik pigmentler, toplam karbonhidratlar, toplam protein, toplam amino asit ve prolin içeriği incelenmiştir. Tarla bitkilerinde ve tıbbi bitkilerde, 400 mg/L SiO₂NP, tohum çimlenmesini, kök ve sürgün uzunluklarını, taze ağırlıkları (*Hyssopus officinalis* hariç), kuru ağırlıkları, fotosentetik pigmentler, toplam protein ve toplam amino asiti (*Hyssopus officinalis* hariç) önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. Yabancı otlarda SiO₂NP konsantrasyonu 400 mg/L'den 4.000 mg/L'ye çıktığında, çimlenme, kök ve sürgün uzunlukları, taze ve kuru ağırlıklar ve fotosentetik pigmentler ve toplam protein miktarlarının azaldığı rapor edilmiştir. SiO₂NP konsantrasyonunun artmasıyla birlikte total protein içeriğinde, 400 mg/L SiO₂NP uygulama grubunda düşüş olduğu bildirilmiştir (Sharifi-Rad vd. 2016). Bizim sonuçlarımızla, Sharifi-Rad vd. (2016)'nin SiO₂NP konsantrasyonunun artmasıyla birlikte total protein içeriğinde bir düşüşün olduğu bulguları paralellik göstermektedir.

Yapılan bir çalışmada, AgNP'lerin *Pisum sativum* L. tohumunun protein ve karbonhidrat içerikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üç bezelye çeşidine (Climax, Meteor ve PF-400), dört konsantrasyon (0, 30, 60 ve 90 ppm) AgNP'leri uygulanmış. Tohumlar büyüme mevsiminin sonunda toplanmış ve toplam protein ve karbonhidrat miktarları analiz edilmiştir. Gümüş NP'lerin, 2013-14 ve 2014-15 büyüme mevsimlerinde *P. sativum* tohumlarının protein ve karbonhidrat içerikleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir artırıcı etkisi olduğu rapor edilmiştir (Mehmood ve Murtaza, 2017).

Bir çalışmada, börülce bitkileri $\sim 8 \pm 1$ nm *nCeO₂* (62.5 ile 500 mg/L) süspansiyonlarında hidroponik koşullarda 15 gün boyunca büyütülmüştür. Bitki dokuları; 1, 7 ve 15 günlük *nCeO₂* uygulamasından sonra seryum birikimi için analiz

edilmiştir. Çalışmada, lipid peroksidasyonu, antioksidan enzim aktiviteleri, toplam çözünür protein ve klorofil içerikleri gibi stresin ana göstergeleri incelenmiştir. Kök epidermisinde, küçük bir fraksiyon (% 12) Ce (III) bileşiğine biyotransforme edilmesine rağmen seryumun öncelikle $n\text{CeO}_2$ olarak bulunduğu gösterilmiştir. Seryumun kök vasküler dokulara ulaştığı ve zamanla hava kısımlarına taşındığı bildirilmiştir. Börülce bitkisi 500 mg/L $n\text{CeO}_2$ 'ye uzun süre maruz kaldıktan sonra, kök antioksidan enzim aktivitelerinin önemli ölçüde azaldığı, aynı anda kökte çözünür proteinin % 204 oranında arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca, hücrel homeostasiyi korumak için, yaprakta guaiacol peroksidaz aktivitesinde $n\text{CeO}_2$ uygulaması ile arttığı bildirilmiştir (Majumdar vd. 2014). Bu çalışmada, NP uygulamasının kökte çözünür protein miktarını arttığı bulguları ile bizim çalışmamızda elde ettiğimiz bulgular uygunluk göstermemektedir.

Rico vd. (2014), seryum oksit NP'lerinin ($n\text{CeO}_2$), buğdaydaki (*Triticum aestivum* L.) büyüme ve verim özellikleri ve besinsel kompozisyon üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Buğday, 0, 125, 250 ve 500 mg/kg $n\text{CeO}_2$ (sırasıyla kontrol, $n\text{CeO}_2$ -L, $n\text{CeO}_2$ -M ve $n\text{CeO}_2$ -H) ile değiştirilen toprağa ekilmiştir. Hasat sonrası, tane ve dokular mineral, yağ asidi ve amino asit içeriği için analiz edilmiştir. $n\text{CeO}_2$ -H'nin kontrole göre bitki büyümesini artırdığını, sürgün biyokütlesini ve tane veriminin sırasıyla % 9.0, % 12.7 ve % 36.6 olduğunu bildirmişlerdir. Köklerde $n\text{CeO}_2$ konsantrasyonu artıkça Ce birikimi artmış, ancak yaprak, gövde ve tanelerdeki işlemlerde değişiklik göstermediği, buda yer üstü dokulara Ce taşınımının olmadığını gösterdiği bildirilmiştir. Rico vd. (2014), ayrıca CeO_2NP 'lerin bitkilerde amino asitlerin, yağ asitlerinin, indirgenmeyen şekerlerin ve fenoliklerin içeriğini değiştirdiğini rapor etmişlerdir.

Rani vd. (2016), karbonhidratlarla karşılaştırıldığında protein içeriğinin AgNP uygulamasına karşı duyarsız olduğunu ancak protein içeriğinin sadece yüksek AgNP konsantrasyonlarında (100 mg/L) arttığını bildirmişlerdir.

Protein ve lipitlerin değişimi, her türlü stres altında bitki metabolizmasında önemli bir rol oynar. Değişen çevresel koşullara hızlı bir şekilde yanıt veren enzim kompleksleri gibi protein bileşikleri ve novo olarak sentezlenen stres proteinleri, bitkinin strese karşı direncini sağlar. Bir çalışmada, biyolojik olarak sentezlenmiş AgNP'lerin hidroponik olarak yetiştirilen *Bacopa monnieri* (Linn.) Wettst. bitkisinde

protein, karbonhidrat, toplam fenol, ayrıca, katalaz ve peroksit gibi antioksidan enzim aktivitelerine bakılmıştır. Bu çalışmada kullanılan AgNP'ler, bir indirgeyici kaynağı olarak tıbbi bir bitki olan *Acalypha indica* L.'nin sulu yaprak ekstrasına AgNO₃ uygulanmasıyla sentezlenmiştir. Protein, karbonhidrat ve toplam fenol içeriğinin, bitkinin farklı organlarında büyük farklılıklar gösterdiği ve sırasıyla AgNO₃ ve AgNP'ler ile muamele edilen bitkilerin farklı organlarındaki protein içeriği, normal şartlar altında yetişen bitkilerde bulunanlardan daha az olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, AgNP uygulamasının 5. günde protein içeriğinin AgNP uygulanmış yapraklarda daha yüksek olduğu da bildirilmiştir. Fakat protein içeriğinin ancak sonraki günlerde büyük ölçüde azaldığını da ifade etmişlerdir. Uygulamanın 10. ve 15. günlerinde yaklaşık % 45-50 oranında protein içeriğinde azalma kaydedilmiştir; bununla birlikte, protein içeriği uygulamanın 20. ve 30. günlerinde hafifçe artmış, kök ve gövdede, 20. güne kadar minimum protein seviyelerinin gözlemlendiği ve 20. günden sonra, protein içeriğinin önemli ölçüde arttığı rapor edilmiştir. Araştırmacılar, şaşırtıcı olmayan bir şekilde, AgNO₃ ile muamele edilmiş bitkilerin, kontrol ve AgNP ile muamele edilmiş bitkilerden daha düşük seviyelerde protein, karbonhidrat ve yüksek fenol, CAT ve POX aktiviteleri gösterdiğini bildirmişlerdir (Krishnaraj vd. 2012).

Çalışmamızda, değişik boyut ve konsantrasyonda SiO₂NP'nin ayçiçeği bitkisinde zamana bağlı olarak SOD enzim aktivitesinde değişim incelendiğinde (Çizelge 4.3 ve Şekil 4.13) kontrol grubuna göre, 1. günde kök ve yaprak dokusunda (100-50 nm-mg/L uygulama grubu hariç) azalmalar meydana gelmiştir. 4. günde kök dokusunda tüm uygulama gruplarında (100-50 nm-mg/L uygulama grubu hariç) kontrol grubuna göre, SOD enzim aktivitesi azalmış yaprak dokusunda ise 50-50 ve 100-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında kontrole göre yaklaşık 1.5 katı bir artış görülmüştür. 8. günde ise kök ve yaprak dokusunda 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubu hariç tüm uygulama gruplarında kontrole göre, SOD enzim aktivitelerinde artış saptanmıştır.

ROT oluşumu ökaryot hücrelerin biyotik ve abiyotik streslere karşı oluşturduğu en erken biyokimyasal cevaptır. ROT oluşumu bir takım zincir reaksiyonunu tetikleyerek hızlı hücre zararına neden olmaktadır. ROT oldukça reaktiftir ve koruma mekanizmalarının olmadığı durumlarda lipitler, proteinler ve

nükleik asitler üzerinde oksidatif hasar oluşturarak normal metabolizmada ciddi zararlar oluşturur. Bitkiler stres koşulları altında yaşamlarını devam ettirmek amacıyla antioksidant molekülleri (askorbik asit, glutatyon, α -tokoferol, karotenoid, flavanoid vd.) ve oksijen radikali süpürücü enzimleri oluşturmaktadırlar. Antioksidan mekanizma, bitkilerde stres toleransını artırmayı sağlayacak bir strateji sağlamaktadır. SOD, savunma mekanizmasının ilk savunma hattını oluşturur ve süperoksit radikallerini temizler. SOD aktivitesi, iki Haber-Weiss reaksiyon substratı olan O_2^- ve H_2O_2 'nin reaktif miktarlarını ayarlar ve yüksek oranda reaktif olan ve membran, protein ve DNA'da ciddi hasara neden olabilen HO^* radikal oluşumu riskini azaltır (Koyro vd. 2012).

Çalışmamızda, 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda kök ve yaprak dokusunda SOD aktivitelerinde hem kontrol hem de diğer uygulama gruplarına göre azalmanın bu uygulama grubunda nano- SiO_2 'nin bitkinin ROT'un yarattığı zararlı etkilere karşı geliştirdiği savunma mekanizmasını çalıştırmadığını söyleyebiliriz. Bunun yansısı 50-50, 100-20 ve 100-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında zamana bağlı olarak özellikle 8. günde her iki dokuda da SOD aktivitelerinin artışı, süre uzadıkça bitki savunmaya girerek SOD aktivitelerini artırdığı fikrini vermektedir.

Konate vd. (2018), salatalık (*Cucumis sativus* L.) bitkilerini deiyonize su içinde 3 günlük çimlenmeden sonra, 100 mL $\frac{1}{4}$ oranında Hoagland besin çözeltisi içeren 250 mL'lik bir behere koymuşlardır. 10 gün sonra nano veya yığın- Fe_3O_4 , besin çözeltisine ilave edilmiş ve 40 dakika süreyle sonifiye edilmiştir. Her bir NP'nin konsantrasyonu 50, 500 ve 2000 mg/L'ye ayarlanmış ve bir kontrol grubu ilave edilmesiyle toplam 7 uygulama grubu oluşturulmuştur. Fideler tekrar büyüme odasına yerleştirilmiş ve 21 gün daha büyümeye bırakılmıştır. 21 gün boyunca nano veya yığın- Fe_3O_4 uygulanan bitkiler de antioksidan aktiviteleri ve MDA konsantrasyonu belirlenmiştir. 500 ve 2000 mg/L yığın- Fe_3O_4 varlığı, kontrol grubuna göre, köklerdeki SOD aktivitesini sırasıyla % 49.4 ve % 61,2 oranında artırmıştır; kontrol ile kıyaslandığında tüm uygulamalar için sürgünlerde normalden fazla etki görüldüğü rapor edilmiştir. Sadece düşük konsantrasyonda (50 mg/L), nano- Fe_3O_4 uygulamasının, hem kök hem de sürgünde antioksidan enzim aktivitelerini önemli ölçüde baskıladığını bildirmişlerdir. Salatalık bitkisinde hem kök hem de sürgünde SOD aktiviteleri, kontrol ile karşılaştırıldığında, sırasıyla %

49.1 ve % 37.2 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, nano-Fe₃O₄'e maruz kalan köklerdeki SOD aktiviteleri, kontrol ile karşılaştırıldığında 2000 mg/L uygulama grubunda belirgin olarak % 32.7 arttığı bildirilmiştir. Araştırmacılar, yüksek nano-Fe₃O₄ konsantrasyonu salatalık bitki köklerinde, SOD ve POD aktivitelerini hızlı bir şekilde uyardığını ve bu da salatalık köklerinin O₂⁻ radikalini artırma yeteneğine ve bitki hücrelerinde oksidatif stresi engellemesine neden olduğunu bildirmişlerdir.

Çalışmamızda ise, ayçiçeği kök ve yaprak dokusunda kontrole göre, özellikle 8. günde 50-50, 100-20 ve 100-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında SOD enzim aktivitesinin yaklaşık sırasıyla 1.5-1.8 katı ve yaklaşık 2 katı kadar artış gösterdiği, yukarıda bahsedilen çalışmada 2000 mg/L yığın-Fe₃O₄ uygulamasının kontrol grubuna göre, köklerdeki SOD aktivitesini sırasıyla % 49.4 ve % 61.2 oranında artırdığı verilerle paralellik göstermektedir. Bitkiler, ROT'un zararlı etkilerini en aza indirmek ve böylece oksidatif stresi önlemek için POD ve SOD gibi enzimatik mekanizmalara sahiptir. Çalışmamızda da, 100-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında hem kök hem de yaprak dokusunda özellikle 4. ve 8. günlerde SOD enzim aktivitesinin artışının O₂⁻ radikalini artırma yeteneğine ve bitki hücrelerinde oksidatif stresi engellediğini düşünebiliriz. Diğer yandan, sonuçlarımız, antioksidan enzim aktivitelerinin, nano-SiO₂'nin neden olduğu oksidatif hasarı savunmak için ayçiçeği bitkileri tarafından aktive edildiğini göstermiştir.

ZnSeNP'lerin hidrotermal yöntemle sentezlendiği ve *Lemna minor* üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, *L. minor* bitkisine, 1-80 mg/L ZnSeNP (0.007 mM-0.55 mM'ye eşit) ve aynı zamanda çinko asetatı içeren (C₄H₆O₄Zn) çinko (Zn⁺²)'nun iyonik formu ve 0.007 mM-0.55 mM aralığında çinko sülfat (ZnSO₄) içeren ortamda uygulama yapılmış ve bir hafta boyunca kontrollere göre enzim aktiviteleri araştırılmıştır. Tüm çalışma boyunca, SOD aktivitesinde, ZnSeNP'nin \geq 5mg/L'sinde (p<0.05) dramatik bir değişimin olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, SOD aktivitesi, kontrol ile karşılaştırıldığında, sırasıyla ZnC₄H₆O₄ ve ZnSO₄ (Zn⁺²) ile muamele edilen bitkilerde 20 ve 1 mg/L ve üst seviyelerde (p<0.05) arttıgıda bildirilmiştir (Tarrahi vd. 2018).

SOD aktivitesinde NiONP uygulamasında domates (Faysal vd. 2013) ve CeO₂NP'lere maruz kalmış pirinç (Ma vd. 2016) bitkilerinde de önemli bir artış gösteren diğer çalışmalarda rapor edilmiş. Ayrıca SOD aktivitesinin, *L. Minor*'da

CuONP ve Cu^{+2} ile indüklendiğinde bildirilmiştir. Bir metalloenzim olarak SOD, oksidatif stresi ortadan kaldırmak için antioksidan savunma sisteminde önemli bir rol oynar. Oksijen radikallerini daha az toksik H_2O_2 ve O_2 'ye katalizler ve yüksek ROT düzeylerinin toksik etkilerini inhibe eder (Song vd. 2016).

Bazı çalışmalar, SOD, CAT, POD, GR'nin aktivitelerinin ve indüklenmiş glutatyonun birikiminin artırılmasıyla antioksidan sisteminin yukarı regülasyonuna Si'nin aracılık ettiğini rapor etmişlerdir (Habibi ve Hajiboland, 2013; Shekari vd. 2015).

Çalışmamızda değişik boyut ve konsantrasyonda olan SiO_2NP 'nin ayçiçeği bitkisinde zamana bağlı olarak CAT enzim aktivitesindeki değişim incelendiğinde (Çizelge 4.4 ve Şekil 4.14) kontrol grubuna göre, 1. günde kök ve yaprak (100-50 nm-mg/L uygulama grubu hariç) dokusunda CAT aktivitelerinde artış saptanmıştır. Ayçiçeği bitkisinde hem kök hem de yaprak dokusunda en fazla artış tüm uygulama gruplarına göre, 100-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda kök dokusunda 8. günde $40.44 \pm 0.32 \mu\text{mol/dak./gTA}$ yaprak dokusunda ise, 4. gün $38.66 \pm 0.32 \mu\text{mol/dak./gTA}$ olarak saptanmıştır.

Yulaf bitkileri ile yapılan bir çalışmada, tohumlar distile su (kontrol grubu) ve 2 konsantrasyon (5 ve 10 mM) silikat ve Si-NP çözeltileri içeren 10 cm petri kaplarının içine yerleştirilmiştir. Petri kapları, 16/8 ışık/karanlık, $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de inkübe edilmiştir. Fideler 7 gün sonra besin çözeltileri içeren 1.5L'lik saksılara aktarılmıştır. Bitkilere silikat ve Si-NP (5 ve 10 mM) ilave edilmiştir. Silikat bir sodyum trisilikat ($Na_2O_7Si_3$) ve silikon dioksit (SiO_2) nano-toz olarak Si-NP formunda kullanılmıştır. Bitkilerin büyüme parametrelerinin ölçülmesi ile kontrol grubu ile karşılaştırıldığında, Silikat ve Si-NP uygulamaları ile bitkilerde büyüme artışı olduğu bildirilmiştir. Sürgünlerin ve köklerin taze ağırlığı ve kuru ağırlığı, özellikle yüksek konsantrasyonlarda silikat ve Si-NP uygulamaları altında önemli ölçüde artmıştır. Ancak hem silikat hem de Si-NP'ler ile muamele edilmiş bitkilerde kök uzunluğunda önemli bir azalma gözlenmiştir. Silikon varlığında POD ve CAT aktivitelerinin arttığı, POD aktivitesinde silikat ve Si-NP uygulamaları arasında farkın olmadığı, ancak CAT aktivitesinin, Si-NP uygulanan bitkilerde en yüksek olduğu bulunmuştur (Asgari vd. 2018).

Patates bitkileri 30 gün süreyle tuber oluşmayan koşullarda (24°C gündüz/gece sıcaklığı ve 24 saat fotoperiyod) büyüme odalarında yetiştirilmiştir. 30 günlük bitkilere daha sonra, tuberizasyon için uygun şartlar yani 24°C/18°C gündüz/gece sıcaklığı ve 12 saat fotoperiyod oluşturulmuştur. Patates bitkilerine 100, 300 ve 500 ppm çinko NP'ler yapraklara sprey şeklinde uygulanmıştır. İlk sprey 25 gün sonra ve ikincisi 45 gün ekimden sonra verilmiştir. Enzimatik antioksidanlar (katalaz ve peroksidaz), enzimatik olmayan antioksidanlar (toplam fenolikler ve antosiyaninler) ve karbonhidratlar (nişasta ve toplam çözünür şekerler) analiz edilmiştir. CAT aktivitesinin, Zn-NP ile muamele edilmiş bitkilere kıyasla kontrol bitkilerinde düşük olduğu bulunmuştur. Zn-NP uygulamaları ile katalaz aktivitesinde anlamlı artış olduğu ifade edilmiştir. 100, 300 ve 500 ppm Zn-NP konsantrasyonu ile muamele edilen patates bitkilerinde CAT aktivitesinde sırasıyla % 142, % 109 ve % 212 artış saptanmış ayrıca CAT aktivitesinin 100 ve 500 ppm'de yüksek ve 300 ppm'de düşük olduğu da vurgulanmıştır. Araştırmacılar, oksidatif stres sırasında CAT aktivitesinin, muhtemelen savunma mekanizmasının aktivasyonu artırdığını böylece, ROT'un daha fazla temizlenmesine ve dolayısıyla hücrelerin bu ROT'a bağlı hasarlardan korunmasına neden olduğunu bildirmişlerdir (Raigond vd. 2017). Çalışmamızda da, kontrol grubuna göre, tüm uygulama gruplarında CAT aktivitelerinde artışın bulunması Raigond vd. (2017)'nin bulguları ile paralellik göstermektedir.

Bitkilerin NP'ye maruz kalmasının, ROT'un hücresel oluşumuna yol açtığı ve bitki büyümesi üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkilere yol açtığı, ayrıca NP boyutu, şekli, yüzey kaplaması ve konsantrasyonu gibi faktörlerin yapılan çalışmalarda büyük farklılıklar gösterdiği bildirilmiştir (Cox vd. 2016; Tripathi vd. 2015). Si-NP'nin koruyucu bir etkisinin olduğu ve bezelye fidelerinde, Cr (VI) fitotoksitesine karşı Si-NP'nin Cr birikimini ve oksidatif stresi azalttığı ve yukarı regüle eden antioksidan savunma sistemleri ve antioksidan enzimler ile korunduğunu bildirmişlerdir. Silikonun, örneğin; SOD enzim aktivitesini artırarak peroksidaz enzim aktivitesini azaltarak antioksidan aktiviteyi artırdığı da rapor edilmiştir (Bokor vd. 2014).

Silikonun, SOD ve askorbat-glutasyon yolundaki enzimler gibi kloroplastlardaki ROT süpürücü enzimlerin faaliyetlerinin azalmasının

bastırılmasında önemli bir rol oynadığı rapor edilmiştir (Cao vd. 2015). Siddiqui vd. (2014), Si-NP'nin büyüme özelliklerini iyileştirdiğini ve CAT, POD ve SOD gibi enzimlerin oksidatif hasarı ve antioksidan enzimlerin ekspresyonunu azalttığını rapor etmişlerdir. Si-NP'nin, buğday fidelerini oksidatif ve fotosentez hasarlarına karşı koruyabildiği, ayrıca Si-NP'nin, buğday fidelerinde daha fazla bulunmasıyla ilişkili olarak, UV-B stresini azaltmada daha etkili olduğu bildirilmiştir (Tripathi vd. 2017).

Çemen otu (*Trigonella foenum graceum* L.) bitkileri aşağıdaki konsantrasyonlarda silikon uygulamaları altında yetiştirilmiştir; 0, 0.5, 1, 1.5, 2 ve 2.5 mM (0, 14000, 28000, 42000, 56000, 70000 mg/L) Na₂SiO₃ ve 0-2.5 (0-70000 mg/L) mM SiO₂ (Si-NP) eklenmiştir. Kök ve sürgündeki Si konsantrasyonu, artan Si ilavesiyle arttığı, sodyum silikat varlığında Si konsantrasyonu, kökte % 25 ve fidede % 75'e varan oranlarda artmış Si-NP varlığında ise kökte % 30 ve fidede % 80 artış göstermiştir. Köklerdeki Si konsantrasyonu, aynı Si muamelesindeki sürgünlerden daha yüksek olduğu, en yüksek iki Si konsantrasyonu olan 2.0 ve 2.5 mM Si ile muamele edildiğinde, Si konsantrasyonunun hem kökte hem de sürgünde yığın sodyum silikat ilavesine kıyasla Si-NP uygulamasında önemli ölçüde daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Çalışmada, 20 günlük bitkilerin 3. ve 4. yapraklarında Si'nin SOD, POD ve CAT aktivitesi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. SOD aktivitesi, sodyum silikat ile önemli ölçüde azalırken, üçüncü yapraklarda Si-NP ile hiçbir etki görülmemiştir. Bununla birlikte, sodyum silikatın ve Si-NP'nin, ne üçüncü ne de dördüncü yapraktaki etkisi arasında önemli bir farklılık göstermemiştir. Kontrol ile karşılaştırıldığında, POD aktivitesi üçüncü yaprakta sodyum silikat muamelesi ile artmış, ancak Si-NP ile artmamıştır. Bununla birlikte, herhangi bir yaprakta sodyum silikat veya Si-NP uygulamasını POD aktivitesinde belirgin bir artış veya azalma göstermemiştir. CAT aktivitesi, herhangi bir yaprakta Si uygulamalarının hiçbirisiyle değişmediği ve Si-NP ve sodyum silikatın çalışılan enzim aktiviteleri üzerindeki etkisi arasında anlamlı bir farkın olmadığını da rapor etmişlerdir. Araştırmacılar, Si'nin NP formunda alınım mekanizması henüz bilinmemekle birlikte, çemen bitkilerinde alınmadan önce Si-NP'nin silikat formuna dönüştürülebileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmadan çıkardıkları sonuç ise, hem sodyum silikatın hem de Si-NP'nin bitkiler üzerinde benzer etkilere sahip olmaları, toksik olmamaları ve bu nedenle, her iki Si formunun kullanılabilirliği (Nazaralian vd. 2017).

Silisyumun bir abiyotik stres olan kuraklık şartları altında bitki gelişimi üzerine yararlı etkilerinin olduğu bildirilmiştir. Ancak, silisyumun kuraklıktaki tohum çimlenmesi üzerindeki etkileri hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada eksojen silikon (0.5 mM) 'un domatesin (*Solanum lycopersicum* L.) dört çeşidinde ('Jinpengchaoguan', 'Zhongza No.9', 'Houpi L402' ve 'Oubao318') tohum çimlenmesi üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda; tohum çimlenme yüzdesinin, kuraklık stresi altındaki dört çeşitte önemli ölçüde azaldığını ve ilave edilen silikon ile önemli ölçüde iyileştiği rapor edilmiştir. Silikon olmayan uygulama ile karşılaştırıldığında, silikon ilavesinin SOD ve CAT aktivitelerini artırdığı ve sürgünlerin köklerinde süperoksit anyonu (O_2^-) ile hidrojen peroksit (H_2O_2) üretimini azalttığı rapor edilmiştir. Ayrıca, in vivo ve in vitro deneylerde gözlemlendiği gibi silikon eklenmesi kuraklık stresi altındaki kökler içindeki toplam fenol konsantrasyonlarını azalttığı, POD aktivitesinin azalmasına katkıda bulunabileceği ve dolayısıyla POD aktivitesinde medana gelen azalmanın kuraklık stresi altında daha az hidroksil radikali (HO^*), birikmesine katkıda bulunabileceği bildirilmiştir. Silikon uygulamasının ayrıca, stres altındaki köklerde MDA konsantrasyonlarını azaltarak lipid peroksidasyonunu azalttığı ve bu sonuçların, eksojen silikonun tohum çimlenmesini artırabileceğini ve antioksidan savunmayı güçlendirerek domates bitkilerinde oksidatif stresi azaltabileceğini bildirmişlerdir (Shi vd. 2014).

Triticum aestivum L. fidelerine 50, 100, 200, 400 ve 800 mg/L konsantrasyonlarda SiO_2NP uygulaması yapılan bir çalışmada, SiO_2NP 'lerinin 200 mg/L konsantrasyonlarda buğday fideleri üzerinde olumsuz etkileri olduğu gösterilmiştir. Bu konsantrasyonlarda, SiO_2NP 'leri kök ve gövde yaş ağırlığını, kök ve gövde kuru ağırlığını, yapraklarda klo-a, klo-b'nin ve karotenoid miktarının azaldığı, yapraklarda prolin miktarı, lipid peroksidasyonu ve CAT aktivitesinde de artışların olduğu rapor edilmiştir. Bu sonuçlarının, daha düşük konsantrasyonlarda (50 ve 100 mg/L) SiO_2NP 'lerinin buğday fideleri üzerinde olumsuz etkilerinin olmadığını, hatta bazı olumlu etkilerinin olabileceğini ve CAT aktivitesinde, SiO_2NP 'lerinin sadece 200 mg/L'den daha yüksek konsantrasyonlarda oksidatif strese yol açabileceğini ifade etmişlerdir (Karimi ve Mohsenzadeh, 2016). Karimi ve Mohsenzadeh (2016)'in SiO_2NP uygulamasının buğday bitkisinde CAT aktivitesinde artış gösterdiği bulgusu, bizim bulgularımızla paralellik göstermektedir.

Çalışmamızda, değişik boyut ve konsantrasyonda SiO₂NP'nin ayçiçeği bitkisinde APX enzim aktivitesindeki değişimi incelendiğinde (Çizelge 4.5 ve Şekil 4.15) ; kök ve yaprak dokularında kontrol grubuna göre, 1. gün kök dokusu 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubu hariç, tüm uygulama gruplarında artış göstermiştir. En yüksek APX aktivitesi hem kök hem de yaprak dokusunda kontrol ve diğer uygulama gruplarına göre, 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda saptanmıştır.

Enzimatik antioksidanlar yoluyla homeostasiyi korumak için kompleks bir antioksidan sistem geliştirilmiştir bu da ROT'un neden olduğu hasarı hafifletmek ve onarmak için bitkilerin stratejilerinden biridir. Si'nin bitki antioksidan savunma sistemlerini modüle ederek, bitkilerde tuzluluk ve kuraklık stresi altında oksidatif hasarı da hafiflettiği bildirilmiştir (Kim vd. 2017). Tuz ve kuraklık stresi altındaki bitkilere Si uygulamasının SOD, POD, CAT, APX ve GR enzimlerinin yanı sıra GSH konsantrasyonunda da bir artış gösterdiği rapor edilmiştir. Bitkilerde antioksidan savunmasını düzenleyerek Si'nin MDA oluşumundan kaynaklanan membran hasarını önlediği bildirilmiştir (Zhu ve Gong, 2014). Örneğin, Si'nin ayrıca lipit peroksidasyonunun son ürününü olan MDA konsantrasyonunu, tuz stresine maruz kalmış arpa (Liang vd. 2003), mısır (Moussa, 2006) ve asma (Soylemezoğlu, 2009). bitkilerinde azalttığı ve böylece Si'nin membran bütünlüğünü korumada ve membran geçirgenliğini azaltma da yardımcı olacağı bildirilmiştir (Liang vd. 2015). Genel olarak, yukarıdaki çalışmalara ve mevcut bulgulara dayanarak, Si'nin bitkilerde oksidatif hasarı azaltabileceği ve antioksidan savunma sistemlerini (hem enzimatik bileşenleri hem de enzimatik olmayanları) modüle ettiği sonucuna varılabilir.

Tarımda Si kullanımı, gelecekte biyotik ve abiyotik streslerin hafifletilmesi için sürdürülebilir bir strateji olacağı, ayrıca Si'nin kullanımının bitki sağlığının korunması ile sonuçlanabileceği ve düşük maliyetli sürdürülebilir tarımda hem gıda hem de gıda dışı tahıl ürünleri için önemli bir rol oynayabileceği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, abiyotik stres ve ilgili mekanizmaların düzenlenmesinde Si-NP potansiyeli henüz araştırılmadığı için daha ileri çalışmalara ihtiyaç olduğu; bitkilerin abiyotik ve biyotik stres koşulları altında olduğu durumlarda, özellikle tahıl bitkilerinde optimum Si konsantrasyonunun ve Si uygulamasının uygun zaman ve yöntemlerini bilmek için uygulamalı araştırmalara ihtiyaç olduğu bildirilmiştir.

Si'nin ayrı ayrı ve kısa vadede stres koşulları altındaki bitkilere uygulandığını ancak doğada bitkiler aynı anda birden fazla strese maruz kaldığı bildirilmiştir. Bu nedenle; tuzluluk, kuraklık, ağır metal toksisitesi, vb. gibi çevresel streslerin çoğu, aynı zamanda tarım alanlarında da mevcut olduğundan, çeşitli streslere karşı direncin artırılmasına yönelik Si'nin etkisinin çalışılması aynı anda önerilmektedir. Genel olarak, bitki dokuları ve Si arasındaki etkileşimler hakkında daha ayrıntılı bilgiler geliştirilmesi, abiyotik ve biyotik streslerin hafifletilmesinin daha iyi anlaşılmasını sağlar ve belki de bitkinin strese tepkisi ile ilgili daha iyi tahminlerin yapılmasına olanak tanır. Yakın gelecekte Si aracılı stres tolerans mekanizmalarını incelemek için giderek artan bir ilgi olacağını ve birlikte ele alındığında, iyi tasarlanmış, büyük ölçekli ve uzun süreli saha denemeleri, Si uygulamasının abiyotik ve biyotik stresleri hafifletmedeki etkisini değerlendirmek için gerekli olduğu farklı Si kaynaklarının ekonomik fizibilitesinin de ayrıca araştırılmasının gerekliliği rapor edilmiştir (Etesamia ve Jeongb, 2018).

Çalışmamızda değişik boyut ve konsantrasyonda SiO₂NP uygulamasının ayçiçeği bitkisinde MDA düzeylerindeki değişim incelendiğinde (Çizelge 4.6 ve Şekil 4.16), kontrol grubuna göre, kök ve yaprak dokularında 1. gün 50-20 ve 50-50 nm-mg/L uygulama gruplarında, 4.gün kök dokusunda 50-20 nm-mg/L uygulama grubunda yaprak dokusunda ise 50-20, 50-50, 100-20 (nm-mg/L) uygulama gruplarında MDA düzeylerinde azalma saptanmıştır. 8. gün de ise, kök dokusunda 50-20 ve 50-50 (nm-mg/L) uygulama gruplarında, yaprak dokusunda ise, 50-20, 50-50, 100-20 (nm-mg/L) uygulama gruplarında MDA düzeylerinde azalma saptanmıştır. Tüm uygulama grupları incelendiğinde, kök dokusunda MDA düzeylerindeki en fazla artışın 100-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda 8. günde 6.06±0.47 µmol/g.TA, yaprak dokusunda ise, aynı uygulama grubunun 4. gününde 5.63±0.04 µmol/g.TA olarak bulunmuştur. En düşük MDA düzeyleri, kontrol dahil tüm uygulama gruplarına göre 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda görülmektedir. Çalışmamızda, 50-20 (nm-mg/L) uygulama grubunda ki en düşük MDA düzeyleri, bu konsantrasyon ve çaptaki SiO₂NP'nin membran hasarını azaltmada etkili olabileceğini söyleyebiliriz.

Çoklu doymamış yağ asitlerinin bozulma ürünü olan MDA, lipid peroksidasyonunun bir sonucu olarak doğal olarak üretilir ve genellikle hücrel

seviyede oksidatif hasarın bir göstergesi olarak kullanılır. Bu çalışmada, 100-20 (nm-mg/L) SiO₂NP uygulaması hem kök hem de yaprak dokularında kontrol bitkilerine kıyasla MDA içeriğinde bir artışa neden olmuştur. Çekiç vd. (2017)'nin tüm AgNP konsantrasyonlarının domates bitkilerinde kontrol bitkilerine kıyasla, MDA içeriğinde önemli bir artışa neden olduğu ve en düşük MDA miktarlarının kontrol bitkisinde olduğu fikri bizim çalışmamızla uygunluk göstermemektedir.

Mohammed vd. (2017)'nin yaptıkları çalışmada, AgNP'nin düşük konsantrasyonları (2 ve 5 mM) yapraklardaki MDA miktarını artırmadığı, 10 mM gibi daha yüksek konsantrasyonun MDA miktarını artırdığını ifade etmişlerdir. Bu sonuçlara dayanarak, çalışmamızda ayçiçeği bitki hücrelerinin membranlarının özellikle 100-20 (nm-mg/L) ve 100-50 (nm-mg/L) uygulamalarından olumsuz etkilendiğini, bu anlamda membran bütünlüğünün bozulduğu ifade edilebilir. Bu bozulmanın NP dozuna bağlı olduğu söylenebilir. Çalışmamızda en yüksek boyut ve konsantrasyonda (100-50 nm-mg/L) SiO₂NP'nin uygulandığı grupta ayçiçeği bitkilerinde MDA düzeylerinin kontrol ve diğer uygulama gruplarına göre yüksek düzeyde olduğu bu uygulama grubunun membran bütünlüğünü bozduğunu akla getirmektedir.

Yapılan bir çalışmada; mısır (*Zea mays*), turp (*Raphanus sativus*), buğday (*Triticum aestivum* L.), fasulye (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Contender), çeri domates (*Solanum lycopersicum* L. cv. cerasiforme), marul (*Lactuca sativa* L.), bezelye (*Pisum sativum* L.), hıyar (*Cucumis sativus* L.) ve pancar (*Beta vulgaris* L.) bitkilerine 20, 225, 450 ve 900 mg/kg Zn-toprak, Zn ve ZnONP uygulaması yapılmıştır. Farklı fizikokimyasal özelliklere sahip, kireçli bir toprak ve asidik bir toprak olan iki toprak kullanılmıştır. Bu çalışmada, ZnONP'leri çoğu bitki türünde oksidatif stres ile ilgili çeşitli parametreleri değiştirmiş, ancak değişikliklerin bitki türüne ve toprak pH'sına büyük ölçüde bağımlı olduğu bildirilmiştir. Eklenen ZnONP'lerin fotosentetik pigmentler üzerindeki etkilerinin az olduğu, kireçli toprakta, Klo-a, Klo-b ve karotenoid konsantrasyonlarının etkilenmediği rapor edilmiştir. ZnONP'lerin 225 mg/kg Zn-toprağa eşit veya daha yüksek konsantrasyonlarda Klo-a, Klo-b ve karotenoid artışlarını sırasıyla % 38, % 34 ve % 33 artırdığı (pancar bitkisi hariç) bildirilmiştir. Asidik toprakta, bu etkiler sadece mısır, buğday, fasulye ve bezelyede gözlenmiştir. Bezelye 20 mg/kg Zn'den daha

yüksek konsantrasyonlara ve fasulye 450 ve 900 mg/kg Zn-toprağa maruz bırakıldığında hem klorofil hem de karotenoid konsantrasyonlarında bir düşüş gösterdiği de rapor edilmiştir. Lipit peroksidasyonu üzerindeki etkilerin beklenen sonuçlara zıt olduğu, çünkü MDA seviyelerinde 450 ve 900 mg/kg Zn-toprak uygulama grubunda % 29'a yakın bir düşüş bulunmuştur. Mısırdaki Zn ilavesi, araştırılan tüm konsantrasyonlarda ROT seviyelerini % 51'e yakın inhibisyon değerlerine düşürmüştür ve en düşük Zn uygulamasının mısırdaki MDA miktarını artırdığı bu bitki türlerinde, ZnONP uygulamasından sonra APX aktivitesi ve çözünür protein içeriğinin arttığı rapor edilmiştir (García-Gómez vd. 2018). Bu çalışmada, en yüksek 450 ve 900 mg/kg Zn-toprak uygulama grubunda MDA içeriğinde bir düşüşün olduğu bulgusu, bizim çalışmamızla benzerlik göstermemektedir.

Yapılan bir çalışmada; *Swertia chirata*'nın yaprak ekstraktından hazırlanan biyojenik AgNP, nesli tükenmekte olan tıbbi bitkinin bitki doku kültürü ile korunmasına ilişkin problemleri ele almak için kullanılmıştır. Çalışmada, 20 µM BAP (6-Benzylaminopurin) içeren MS ortamına farklı uygulamalar yapılmıştır. Çalışmada, AgNP (20 nm), gümüş nitrat (5, 10 ve 25 µM), ve gümüş tiosülfat (25, 50 ve 100 µM) gibi farklı gümüş formları kullanılmıştır. AgNP uygulaması altında yetiştirilen sürgünlerde kontrole göre H₂O₂ ve MDA içeriğinde azalmanın anlamlı olduğu bildirilmiştir. AgNP'nin artan konsantrasyonu ile (1-4 mg/L), ROT'un içeriğini önemli ölçüde artırmadığı ve gümüş nitrat uygulanan kültürlerde MDA içeriğinin AgNP uygulanan kültüre kıyasla arttığı, 1-Aminosiklopropan-1-carboksilik asit (ACC) uygulanan sürgünlerde, yüksek oranda MDA içeriğinin saptandığı da bildirilmiştir. Bu çalışmada, sürgün organojenezisi sürecinde kontrol örneklerinin SOD aktivitesinde önemli değişiklikler gözlenmemiştir. AgNP ile muamele edilen örneklerde, inkübasyon süresi ile aktivite artmıştır ve 1 mg/L AgNP konsantrasyonunda maksimum aktivite (4.25 U mg protein⁻¹) gözlenmiştir. Ancak AgNP'nin enzim konsantrasyonundaki artışla aktivitenin azaldığı gümüş nitrat ile muamele edilen örneklerde ise tam tersi bir eğilimin olduğu bildirilmiştir. CAT aktivitesi ortama AgNP'nin ilavesi ile kontrole göre artış göstermiş ve 4 mg/L AgNP konsantrasyonunda aktivite maksimum değere (4.07 U mg protein⁻¹) ulaştığı bildirilmiştir. APX aktivitesinin, farklı uygulamalarda önemli ölçüde değişmediği ve sürgün rejenerasyonu sırasında APX aktivitesindeki değişiminin de farklı uygulama

solüsyonlarının varlığında önemli ölçüde etkilenmediği rapor edilmiştir. (Saha ve Gupta, 2018).

Çalışmamızda değişik boyut ve konsantrasyonda SiO₂NP uygulamasının ayçiçeği bitkisinde zamana bağlı olarak toplam klorofil miktarlarındaki değişim incelendiğinde (Çizelge 4.7 ve Şekil 4.17) yaprak dokularında kontrol grubuna göre, tüm uygulama gruplarında toplam klorofil miktarlarında artış görülmektedir. En yüksek toplam klorofil miktarları kontrol ve diğer uygulama gruplarına göre, 50-50 (nm-mg/L) uygulama grubunda bulunmuştur.

ZnONP ve kadmiyumun (Cd) buğdayda (*Triticum aestivum*) büyüme, verim, antioksidan enzimler, Cd ve Zn konsantrasyonları üzerindeki etkileşimlerini araştırmak için yapılan bir çalışmada, buğday bitkileri ZnONP'nin farklı uygulamaları (0, 25, 50, 75 ve 100 mg/kg) ile muamele edilmiş ve 15 gün boyunca NP uygulamasından sonra saksılara buğday tohumları ekilmiştir. Tween-20 kullanılarak farklı zaman aralıklarında NP'ler (0, 25, 50, 75 ve 100 mg/L) yapraklara püskürtülmüştür. Damıtılmış su içinde farklı NP hazırlanmış ve 15 gün ekimden sonra bitkiler her bir saksıda 5 fide olacak şekilde hazırlanmış ve ilk yapraklara püskürtülmüş, ikinci, üçüncü ve dördüncü yaprak spreyleri ise 4. 6. ve 8. haftalarda yapılmıştır. Uygulama başına toplam 2.0 L hacim kullanılmıştır. Buğday bitkileri ekimden itibaren 125 gün büyütüldükten sonra hasat edilmiştir. Farklı ZnONP'lerin yaprak veya toprak uygulamasında klorofil ve karotenoid konsantrasyonları, kontrol grubuna karşı önemli ölçüde artmıştır. En yüksek klorofil ve karotenoid konsantrasyonları, kullanılan en yüksek NP seviyesinde bulunurken, bu parametrelerin en düşük değerleri kontrol grubunda gözlenmiştir. Klorofil konsantrasyonu, sırasıyla, hem yaprak hem de toprak uygulamalarında NP'lerin en yüksek uygulamasında kontrole göre, % 60 ve % 53 artış gösterdiği ve klo-b ve karotenoid konsantrasyonlarının ise, en yüksek NP yaprağa püskürtüldüğü uygulamada % 139.119 oranında artmış ve NP'lerin toprağa uygulamasında ise sırasıyla % 138 ve % 111 artış gösterdiği saptanmıştır. Ayrıca araştırmacılar, ZnONP'lerin bitkilerde oksidatif stresi azalttığını ve bu sonuçlarının, ZnONP'lerin uygun seviyelerde Cd toksisitesini ve buğday tarafından alımını azaltabileceğini ve buğday tanelerini Zn ile takviye edebileceğini gösterdiklerini ancak, ZnONP'lerin

metalle kirlenmiş topraklarda pratik olarak uygulanması için daha kapsamlı saha çalışmaları gerektirdiğini de rapor etmişlerdir (Hussain vd. 2018).

Hussain vd. (2018)'nin farklı ZnONP'lerin yaprak veya toprak uygulamasında klorofil miktarlarının, kontrol grubuna karşı önemli ölçüde artış gösterdiği bulgusu, bizim yapmış olduğumuz çalışmada da tüm farklı boyut ve konsantrasyonlarda kontrol grubuna göre, klorofil miktarlarında artışın olduğu bulgusu ile benzerlik göstermektedir.

Çalışmamızda değişik boyut ve konsantrasyonda SiO₂NP'nin ayçiçeği bitkisine uygulamasına bağlı olarak Si miktar değişimi incelendiğinde (Çizelge 4.8 ve Şekil 4.18), kök ve yaprak dokularında kontrol grubuna göre, tüm uygulama gruplarında (50-20 nm-mg/L uygulama grubunda 1. ve 4. gün yaprak dokusu hariç) Si düzeylerinde artış görülmektedir. En yüksek Si miktarları her iki dokuda da 100-50 nm-mg/L uygulama grubunda bulunmuştur.

Silikon köklerden silisik asit şeklinde alınıp, kütikül ve hücreler arası boşluklarda birikinceye kadar ksilem ile taşınır. Silikon konsantrasyonu bitkide arttığında, monosilik asit, enzimatik olmayan bir reaksiyonla silika jel içine polimerize olur ve silikon monosilik asit olarak bitki tarafından emilir. Emilen su terleme yoluyla kaybolur ve silikon bitki dokusunda kalır. Polimerize silikonun kimyasal yapısı Silika jel olarak tanımlanmıştır. Bitkinin içindeki polimerize silikanın % 87-89'u, gövdeler, yaprak ve yaprak kınında çok az çözünür bir form olarak bulunur. Bu dokularda, silika, bir kütikül-silisyum çift tabakasını oluşturan ince kütikula tabakasının hemen altındaki alanda 2.5 µm kalınlığında bir tabaka halinde biriktirme eğilimindedir. Bu kütikula Si çift tabakasının konumu ve mekanik gücü, turgorlu yaprakların korunmasına, transpirasyonun en aza indirilmesine ve pirinç bitkisinin mantar hastalıklarından ve böcek zararlılarından korunmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir. Amorf silika bitkilerde silikonun hemen hemen tek formudur. Bitki hücrelerinde tortulaşan amorf silika parçacıkları fitolit veya bitki opali olarak adlandırılır. Fitolitler, konsantrasyonu 2 mM'ı aştığında silisik asit polimerizasyonu ile herhangi bir enerji olmadan birleştirilebilir. Fitolitlerin oranı ve lokasyonları türlere göre değişir, aynı zamanda bitkinin yaşı ile de değişir. Yapraklarda, silikon tercihen ilk olarak abaksial epidermiste biriktirilir ve daha sonra yaprak büyüdükçe her epidermiste bulunur (Rao ve Susmitha, 2017).

Yapılan bir çalışmada, pirinç bitkisi tarafından alınan sıvı Si kaynaklarından çözünür silikat (115.2 g/L ve 60.5 g/L) ve nano-silika (<200 nm)'nin etkileri çalışılmıştır. Tohumlara 0, 605, 1210 ve 2420 g ha⁻¹ Si dozlarında nano-silika ve çözünür silikat uygulaması yapılmıştır. Bitki alımı ve uygulama etkileri C ve lignin içerikleri, Si, N ve P birikimi, fizyolojik özellikleri ve pirinç dane verimi araştırılmıştır. Sıvı Si uygulaması, kullanılan Si kaynaklarına bakılmaksızın, pirinçte Si birikimini kontrole (0 g ha⁻¹ Si) göre % 47.3 oranında artırmıştır. Nano-silika uygulaması yaprak lignin içeriğini kontrole göre % 112.7 artırmıştır. Araştırmacılar, silikon'un, net C asimilasyonunu (% 1.83 oranında artmıştır) ve transpirasyon oranlarını (% 48.3 oranında artmıştır) kısmen etkilediği; bununla birlikte Si'nin, ne bitki büyümesini ne de pirinç dane verimini etkilemediğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, pirinç bitkilerinin NP'leri biriktirdiğini, bununla birlikte diğer bitki türlerinde NP'lerin kullanımını araştırmak için daha fazla çalışma yapılması gerektiği de bildirilmiştir (Félix Alvarez vd. 2018).

Si uygulamasının tahıl ve pirinç bitkisi kabuklarında Si konsantrasyonunu artırdığı, ve Si ile birlikte Zn uygulamasının pirinç bitkisi dokularında daha yüksek Si konsantrasyonuna yol açtığı bildirilmiştir (Kheyri vd. 2018).

Farklı konsantrasyonlarda SiO₂NP'lerin süspansiyonlarının etkisini incelemek için, *Medicago sativa* L. nothosubsp. varia (Martyn) Arcang, Sarga çeşidi ile yapılan bir çalışmada, partikülün ortalama büyüklüğü 7nm ve kütle konsantrasyonu 30 mg/L olan SiO₂ kullanılmıştır. Araştırmacılar, *M. sativa*'nın morfometrik parametrelerinin analizi, 0.3 ve 1.5 mg/L konsantrasyonlarda SiO₂NP süspansiyonları ile tohumlara ön işlemin yapıldığı bitkilerin boyları üzerinde uyarıcı bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. 1.5 mg/L konsantrasyonunda SiO₂NP'lerin uygulanması *M. sativa* sürgünlerinde pozitif etkiye sahip olduğu da bildirilmiştir. Tüm deneysel varyantlarda *M. sativa* yapraklarının sayısı artmış ve 0.3 mg/L nano-SiO₂ konsantrasyonda belirgin bir artış gözlenmiştir. Çalışmada 3 ve 0.3 mg/L SiO₂NP'lerin süspansiyonları uygulanan *M. sativa* bitkisinin tüm organlarında Si birikme kapasitesinin artırdığı bildirilmiştir. Bitki organlarındaki Si içeriği 3 mg/L konsantrasyonunda % 3-11.4 ve 0.3 mg/L konsantrasyonunda % 7-20 oranında artmıştır. SiO₂NP'lerin 1.5 mg/L süspansiyonu ile muamele, yapraklardaki ve gövdedeki Si miktarını (% 6.2-34.5) azalttığı ve kök sisteminde Si miktarının (3.7)

hafifçe arttığı rapor edilmiştir. Klorofil verilerinin analizi, *M. Sativa*'nın 3, 1.5 ve 0.3 mg/L'lik SiO₂ süspansiyonları ile ön uygulama yapılan tohumlarda fotosentetik pigmentlerin içeriğini artırdığını göstermiştir (Zmeeva vd. 2017).

Schaller vd. (2013), *P. Australis*'in rizomlarını, Almanya'nın Dresden kentinin 10 km kuzeydoğusunda bulunan Großteich Gölü'nün sürekli batık bir kıyı şeridinde Mart 2009 başında toplamışlardır. *Phragmites australis* rizomları, aynı morfolojiye sahip yaklaşık 15 cm uzunluğundaki parçaları seçilerek çıkarılmış ve yıkanmıştır. Kuru ağırlığa göre % 10 Si ile 1 kg turba içeren saksıların her birine 10 cm derinlikte üç adet rizom ekilmiştir. Si alımını deneyi, filtrelenmiş ortam havası ve ortam sıcaklığı koşulları kullanılarak, Dresden yakınlarındaki bir alan istasyonunda dört açık üst bölmede kurulmuştur. Her saksıya 100 g sentetik silika (46.6 g Si) verilmiştir. Araştırmacılar, deney sonunda farklı dokular arasındaki Si içeriğinde belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuşlardır. Kök sistemine silika alımının hem spesifik olmadığı hem de genetik kontrole sahip özel akuaporinlerin aracılık ettiğini bildirmişlerdir. Si bir kez alındığında, bitki içinde taşınır, başlıca yüksek fotosentetik aktivite ve transpirasyonla ilişkili dokularda çöktürülür. Araştırmacılar, farklı dokular arasında Si içeriğinde önemli farklılıklar olduğunu, rizosferde nano-Si'nin çözünmesi ve köklerde düşük miktarlarda bulunması ve farklı bitki dokularında düşük konsantrasyonlarda taşınması nedeniyle bitki türleri arasında farklılık gösterebileceğini bildirmişlerdir.

Silikon (2.5 mM), sodyum klorür (NaCl) (100 mM) ve Si (2.5 mM) + NaCl (97.5 mM) uygulamasının domates (*Lycopersicon esculentum* Mill cv.) bitkisi yapraklarında 10 gün ve 27 günlük dönemlerde klorofil içeriği, klorofil floresansı, MDA konsantrasyonu, H₂O₂ seviyesi, SOD, APX, CAT, guaiacol peroksidaz enzimleri ve protein içeriği incelenmiştir. Araştırmacılar sonuçlarının, Si'nin NaCl stresinin negatif etkilerini kısmen dengelediğini SOD ve CAT aktivitelerini, klorofil içeriğini ve PSII'nin fotokimyasal verimliliğini artırarak NaCl tuz stresi toleransını artırdığını bildirmişlerdir. Tuz stresi, SOD ve CAT aktivitelerini ve yapraklardaki çözünür protein içeriğini azalttığı bununla birlikte, besin çözeltisine silikon eklenmesinin, SOD ve CAT aktivitelerini ve domates yapraklarındaki protein içeriğini tuz stresi altında artırdığı ifade edilmiştir. Buna karşılık, tuz stresinin APX aktivitesini hafifçe artırdığı ve Si uygulamasının H₂O₂ seviyesini ve MDA

konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığı da bildirilmiştir. Araştırmacılar, Si ilavesi ile SOD ve CAT'ın güçlendirilmiş aktiviteleri bitki dokularını tuzun neden olduğu oksidatif hasara karşı koruyabildiği, böylece tuz toksisitesini azalttığı ve domates bitkilerinin büyümesini artırdığı ve bu sonuçların, süpürme sisteminin, tahıl bitkilerinde stres altında oksidatif hasarı korumak için birincil savunma hattını oluşturduğunu rapor etmişlerdir (Al-aghabary vd. 2007).

Silisyum, bitkilerde çok sayıda çevresel sınırlamaya tepki olarak anahtar işlevler üstlenir. Stres direncine katkıda bulunan iki ana süreç yaygın olarak kabul edilir; (i) SiO₂ birikimlerinin sağladığı fiziksel ve mekanik koruma ve (ii) metabolik değişiklikleri tetikleyen biyokimyasal bir yanıt.

Liang vd. (2013), Si'nin pirinçte gövde tabanını güçlendirerek bulunduğu ortamda kalma direncini artırdığını bildirmişlerdir. Aynı zamanda, yaprak epidermisi üzerinde Si'nin birikmesi, koruyucu etkisinden dolayı veya UVB kaynaklı membran hasarlarını azaltarak UV toleransını da artırdığı bildirilmektedir. Silikon, kuraklıkla uyarılan bitkilerde su ilişkilerini etkiler: yaprak epidermisi altında, kutikular transpirasyon yoluyla su kayıplarını azaltan bir silikalı kütikül çift tabakasının oluşumunu indüklediği, silisyum, ayrıca Si birikimi ve hücre duvarı özelliklerinden kaynaklanan bekçi hücrelerin turgor kaybına bağlı olarak stomatal iletkenliği azalttığı bildirilmiştir. Kuraklık direncinin iyileştirilmesi, Si ile ilgili kök uzaması ve akuaporin genlerinin yukarı regülasyonunun teşvik edilmesi sonucunda toprağın sudan çekilmesi için güçlü yeteneklere de bağlanabilir. Silikonun, Na⁺ ve Cl⁻ alımının inhibisyonu yoluyla tuz stresinin azaltılmasına katkıda bulunduğu, kökten gövdeye toksik iyonların translokasyonu da Si varlığı ile azaldığı bildirilmiştir. Pirinçte, Si'nin, ekzodermis ve endodermiste SiO₂ olarak çökmesi yoluyla transpirasyon akışını bloke ederek NaCl toksisitesini hafiflettiği bildirilmiştir (Luyckx vd. 2017).

Tripathi vd. (2016) tarafından abiyotik stresin silisyum ile hafifletilebildiğine dair birçok çalışmanın olduğu ancak, silikon nanopartiküller (Si-NP) ile abiyotik stresin azaltılmasının pek bilinmediği rapor edilmiştir. Bu nedenle, Si-NP'lerin mısır çeşidinde arsenat (As^V; 25 ve 50 µM) toksisitesinin azaltılmasında Si'den daha etkili olup olmadıklarını ve As^V toleransında farklılık gösteren hibritleri araştırmak için yaptıkları çalışmada, As^V stresi altında, büyümedeki azalmaya, As birikimi ve

oksidatif stres artışının eşlik ettiği bildirilmiştir. Bununla birlikte, Si ve Si-NP ilavesi, mısırdaki As^V toksisitesini iyileştirdiği Si ve Si-NP'nin, hem As birikimini hem de oksidatif stresin azalması ve askorbat-glutasyon döngüsünün (AsA -GSH döngüsü) artırılmış bileşenleri ile ilişkili olabilecek mısır çeşidi ve melezde As^V toksisitesini azalttığı bildirilmiştir.

SiO_2 veya silika, oksijen ve silisyum içeren kimyasal bir bileşiktir. Gıdadan kozmetiğe, ilaçlardan otomotiv sanayisine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda biyomedikal ve biyoteknolojik alanlarda yapılan çalışmalarda da SiO_2 kullanımını artırmıştır. Bu NP'ler çok yüksek yüzey aktivitesine, gözenekli bir yapıya sahip olmaları ve yüksek absorpsiyon yeteneklerinden dolayı antibakteriyel materyallerin geliştirilmesinde önemli yer tutarlar. Bu kadar yaygın kullanılmalarına karşılık nano silisyumlarla yapılan çalışmalar diğer NP'lere nazaran daha azdır (Koç vd. 2014).

Biyomoleküllerin silikon nanopartikül-aracılı hedeflenmesi, çeşitli biyotik ve abiyotik faktörlere dirençli yeni çeşitler geliştirmek için faydalı olacağı ve bu NP'lerin, doğaya zarar vermeden çeşitli kimyasal gübrelere yeşil ve çevre dostu alternatifler sağlayabileceği bildirilmiştir. Bu nedenle, Si-NP'lerin yabancı otlarla ilgili problemler, patojenite, kuraklık, mahsul verimi ve verimlilik gibi tarıma somut çözümler sağlayabileceği rapor edilmiştir (Rastogi vd. 2019).

Hiç şüphe yok ki, nanoteknoloji evrimsel bir bilimdir ve elektronik, enerji, tıp ve yaşam bilimleri alanında birçok yeni uygulama getirmiştir. Bununla birlikte benzersiz özelliklerinden dolayı, bitkiler üzerine toksikolojik etkileri üzerine birçok araştırma yapılmıştır, ancak NP'lerin bitki üzerindeki olumlu etkilerinin gerçekleştirilmesine odaklanan araştırmalar eksik kalmıştır. Literatür taramalarından bitkilerin NP'lere tepkisi; NP'lerin büyüklüğü, şekli, uygulama yöntemi, kimyasal özellikleri ve fiziksel özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. NP'ler üzerine yapılan araştırmaların bitkiler için vazgeçilmez bir unsur olduğunu, NP'lerin bitkilerdeki fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler mekanizmalarını anlamak için daha çok çalışmalara ihtiyaç olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca NP'lerin hareket tarzı, biyomoleküllerle etkileşimlerini ve bitkilerde gen ifadelerinin düzenlenmesine etkilerini araştırmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu kanaatindeyiz.

Enzim aktivitelerindeki gözlenen değişikliklerin, NP'lerle enzim etkileşimlerinden kaynaklandığından kesin olarak emin olunamayacağı ve hangi NP'lerin hangi enzimleri etkilediğinin anlaşılmasının zorlaştıracağını söyleyebiliriz. Daha önce yapılan çalışmalarda NP'lerin türü, konsantrasyonu, özellikleri ve maruz kalma ortamının, oksidatif stres ve bitkilerde antioksidan savunma sistemi dahil olmak üzere toksisite tepkilerini etkileyen önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Ayrıca, NP'lere maruz kalan bitkilerde enzim aktivitelerindeki değişikliklerin ROT konsantrasyonundaki modülasyonlara tepkileri olduğu genel olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, NP'lerin kimyasal özelliklerinin bitkilerde antioksidan savunma sisteminin modülasyonu üzerindeki rolünün açık olmadığını ve araştırılması gereken bir konu olduğunu da söyleyebiliriz.

Mevcut bilgiler, NP'lerin bitkilerin aktif savunma sistemiyle abiyotik stres kaynaklı hasarı hafiflettiğini ortaya koymaktadır. NP'ler küçük boyutları sayesinde kolayca bitkiye girer ve tohum çimlenmesine ve bitkilerin büyümesine yardımcı olan su kanallarını düzenler. Ayrıca, genişletilmiş yüzey alanı maddelerin daha fazla absorpsiyonu ve hedeflenmiş dağıtımını kolaylaştırır. Aksine, NP'lerin ROT oluşumunu tetiklediği ve bitkiler üzerine birtakım toksik etkilerinin de olduğu bildirilmiştir. NP'lerin artırdığı ROT seviyesinin, bitkilerin savunma sistemini daha verimli bir şekilde harekete geçirebilecek stres sinyalinin artırmasıyla ilişkilendirilebilir. NP'lerin bitkilerdeki rolünün hücre içi ve moleküler seviyede daha fazla araştırılması gerektiği ve ayrıca NP'lerin stres inhibitörleri ve/veya stres indükleyicileri olarak hareket edip etmediği için daha ileri çalışmalara ihtiyaç olduğunu da ifade edebiliriz.

Çok yönlü özelliği olan Si'nin önceden bilinen ve anlaşılan öneminden çok hem biyotik hem de abiyotik streslerle mücadelede rolünün daha yararlı olduğu bildirilmiştir. Si'nin özellikle tahıl ve monokotillerin çoğu gibi yüksek akümülatör türler için düzenli bir gübre olarak kabul edilebileceği de ifade edilmiştir. Aynı zamanda, Si'nin bazı dikotil bitki türlerinde faydalı etkileri olduğu da bildirilmiştir. Bununla birlikte, uygulanabilirliği arttırmak ve Si'den elde edilecek faydalı bilgilerin uygulanabileceği bitki türlerinin kapsamını genişletmek için, temel moleküler mekanizmaların daha iyi anlaşılması önemlidir. Si'nin, stresli koşullar altında bitkilere nasıl daha fazla koruma sağladığını açıklamak için çeşitli modeller ve

mekanizmalar önerilmiştir. Ancak önerilen mekanizmaların hiçbiri, Si'nin kilit rol oynadığı yolları veya biyokimyasal reaksiyonları tanımlamamıştır. Bu nedenle, bu yolları çözmek için omikler gibi gelişmiş yaklaşımlardan yararlanmaya ihtiyaç vardır. Tüm bu cevaplanmamış sorulara rağmen, bu çalışma ile Si'nin sağladığı faydaları araştırmamız için bize daha iyi Si alınımı olan yeni çeşitlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilecektir. Dikotil türlerde kök özelliklerinin genetik modifikasyonu Si'nin daha iyi alınımlı ve daha yüksek birikime sahip bitkilerin geliştirilmesinde faydalı olabilir. Bitkilerde Si türevli yararlı geliştirmeler, gelecekte sürdürülebilir ürün veriminde önemli olacaktır.



KAYNAKÇA

- Abriz, S.F., Torabian, S. (2018). Effect of biochar on growth and ion contents of bean plant under saline condition. *Environ Sci. Pollut. R.* **25**, 11556–11564.
- Almutairi, Z.M. (2016). Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under salt stress. *Plant OMICS.* **9**, 106–114.
- Al-aghaby, K., Zhu, Z. ve Shi, Q. (2007). Influence of Silicon Supply on Chlorophyll Content, Chlorophyll Fluorescence, and Antioxidative Enzyme Activities in Tomato Plants Under Salt Stres. *J. Plant Nutr.* **27**, 2101–2115.
- Anonim. (2006). <https://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>.
- Arruda, S.C.C., Silva, A.L.D., Galazzi, R.M., Azevedo, R.A., Arruda, M.A.Z. (2015). Nanoparticles applied to plant science: a review. *Talanta.* **131**, 693–705.
- Ashfaque, F., Inam, A., Iqbal, S., Sahay, S. (2017). Response of silicon on metal accumulation, photosynthetic inhibition and oxidative stress in chromium-induced mustard (*Brassica juncea* L.) *S. Afr. J. Bot.* **111**, 153–160.
- Asgari, F., Majd, A., Jonoubi, P., Najafi, F. (2018). Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant Physiol. Biochem.* **127**, 152–160.
- Ashkavand, P., Tabari, M., Zarafshar, M., Tomášková, I., Struve, D. (2015). “Effect of SiO₂ nanoparticles on drought resistance in hawthorn seedlings” *Leśne Prace Badawcze / Forest Res. Papers.* **76(4)**, 350–359.
- Azlina, H.N., Hasnidawani, J.N., Norita, H. ve Surip, S.N. (2016). Synthesis of SiO₂ Nanostructures Using Sol-Gel Method. *Acta. Phys. Pol. A.* **129**, 842–844.
- Bao-shan, L., Chun-hui, L., Li-jun, F., Shu-chun, Q., Min, Y. (2004). Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. *J. For. Res.* **15**, 138–140.

- Barrena, R., Casals, E., Colón, J., Font, X., Sánchez, A., Puentes, V. (2009). Evaluation of the ecotoxicity of model nanoparticles. *Chemosphere*. **75(7)**, 850–857.
- Behboudi, F., Sarvestani, Z.T., Kassae, M.Z., Sanavi, S.A.M.M. and Sorooshzadeh, A. (2018). Improving Growth and Yield of Wheat under Drought Stress via Application of SiO₂ Nanoparticles. *J. Agr. Sci. Tech.* **20**, 1479–1492.
- Benoit, A.V. (2015). Gene expression changes in plants and microorganisms exposed to nanomaterials. *Curr. Opin. Biotech.* **33**, 206–219.
- Beyer, W.F., Fridowich, I. (1987). Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of minor changes in conditions. *Anal. Biochem.* **161**, 559–566.
- Bhatia, S. (2016). “Nanoparticles Types, Classification, Characterization, Fabrication Methods and Drug Delivery Applications”. *Nat. Polym. Drug. Delivery Systems*. 33–93.
- Bokor, B., Vaculík, M., Slovakova, L., Masarovic, D., Lux, A. (2014). Silicon does not always mitigate zinc toxicity in maize. *Acta. Physiol. Plant.* **36**, 733–743.
- Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantization of micro-gram quantities of protein utilizing the principle of the protein-dye binding. *Anal. Biochem.* **72**, 248–254.
- Brar, K.S., Verma, M., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y. (2010). Engineered Nanoparticles in Wastewater and Wastewater Sludge – Evidence and Impacts”. *Waste Manage.* **30**, 504–520.
- Buzea, C., Blandino, I.I.P., Robbie, K. (2007). Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*. **2(4)**, 18–65.
- Cao, B.L., Ma, Q., Zhao, Q., Xu, L.W.K. (2015). Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. *Scientia Hortic.* **194**, 53–62.
- Carpita, N., Sabularse, D., Montezinos, D., Delmer, D.P. (1979). Determination of the pore size of cell walls of living plant cells. *Science*. **205 (4411)**, 1144–1147.

- Caverzan, A., Passaia, G., Rosa, S.B., Ribeiro, C.W., Lazzarotto, F., and Margis-Pinheiro, M. (2012). Plant responses to stresses: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. *Genet. Mol. Biol.* **35**, 1011–1019.
- Caverzan, A., Casassola, A. ve Brammer, S.P. (2016). Reactive Oxygen Species and Antioxidant Enzymes Involved in Plant Tolerance to Stress. DOI: 10.5772/61368.
- Chandlee, J.M., Scandalios, J.G. (1984). Analysis of variants affecting the catalase development program in maize scutellum. *Theo. Appl. Genet.* **69**, 71–77.
- Colman, B.P., Arnaout, C.L., Anciaux, S., Gunsch, C.K., Hochella, M.F.Jr., Kim, B., Lowry, G.V., McGill, B.M., Reinsch, B.C., Richardson, C.J., Unrine, J.M., Wright, J.P., Yin, L., Bernhardt, E.S. (2013). Low concentrations of silver nanoparticles in biosoils cause adverse. Ecosystem Responses under Realistic Field Scenario. *Plos One* **8(2)**, e57189.
- Cumplido-Nájera, C.F., González-Morales, S., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonadod, A. (2019). The application of copper nanoparticles and potassium silicate stimulate the tolerance to *Clavibacter michiganensis* in tomato plants. *Scientia Hortic.* **245**, 82–89.
- Conley, D.J. (2002). Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle. *Global Biogeochem. cycles.* **16(4)**, 1–8.
- Cornelis, G., Kirby, J.K., Beak, D., Chittleborough, D., and McLaughlin, M.J. (2010). A method for determining the partitioning of manufactured silver and cerium oxide nanoparticles in soil. *Environ Chem.* **7(3)**, 298–308.
- Corredor, E., Testillano, P.S., Coronado, M.J., González-Melendi, P., Fernández-Pacheco, R., Marquina, C., Ibarra, M.R., de la Fuente, J.M., Rubiales, D., Pérez-de-Luque, A., Risueño, M.C. (2009). Nanoparticle penetration and transport in living pumpkin plants: in situ subcellular identification. *BMC Plant. Biol.* **9(45)**, 1–11.
- Cox, A., Venkatachalam, P., Sahi, S., Sharma, N., (2016). Silver and titanium dioxide nanoparticle toxicity in plants: a review of current research. *Plant Physiol. Biochem.* **107**, 147–163.

- Cifuentes, Z., Custardoy, L., de la Fuente J.M., Marquina, C., Ibarra, M.R., Rubiales, D., Pérez-de-Luque, A., (2010). Absorption and translocation to the aerial part of magnetic carbon-coated nanoparticles through the root of different crop Plants. *J. Nanobiotechnol.* **8**, 1–8.
- Chen, G., Roy, I., Yang, C., and Prasad, P.N. (2016). Nanochemistry and Nanomedicine for Nanoparticle-based Diagnostics and Therapy. *Chem. Rev.* **116(5)**, 2826–2885.
- Çekiç, F.Ö., Ekinçi, S., İnal, M.S., Ünal, D. (2017). Silver nanoparticles induced genotoxicity and oxidative stress in tomato plants. *Turk J. Biol.* **41**, 700–707.
- Demirbilek, M.E., Gıda ve Yem Bilimi (2015). Teknolojisi Dergisi / *Journal of Food and Feed Science – Technology.* **15**, 46–53 Tarımda ve Gıdada Nanoteknoloji.
- Dev, A., Srivastava, A.K., Karmakar, S. (2018). Nanomaterial toxicity for plants. *Environ Chem. Lett.* **16**, 85–100.
- Dimkpa, C.O., McLean, J.E., Martineau, N., Britt, D.W., Haverkamp, R., Anderson, A.J. (2013). Silver nanoparticles disrupt wheat (*Triticum aestivum* L.) growth in a and matrix. *Environ Sci Technol.* **47(2)**, 1082–1090.
- Driouich, A., Follet-Gueye, M.L., Vire-Gibouin, M., Hawes, M. (2013). Root border cells and secretions as critical elements in plant host defense. *Curr. Opin. Plant Biol.* **16(4)**, 489–495.
- Elias, S. H., Mohamed, M., Nor-Anuar, A., Muda, K., Hassan, M.A.H.M., Othman, M.N., Chelliapan, S. (2014). Ceramic Industry Wastewater Treatment By Rhizofiltration System–Application of Water Hyacinth Bioremediation. *IIOABJ.* **5(1)**, 6–14.
- Eichert, T., Goldbach, H.E. (2008). Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake routes in stomatous and astomatous leaf surfaces–further evidence for a stomatal pathway. *Physiol. Plant.* **132(4)**, 491–502.
- El-Temsah, Y.S., Joner, E.J. (2012). Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil. *Environ. Toxicol.* **27**, 42–49.

- Etesamia, H., Jeong, B.R., (2018). Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotox. Environ.* **147**, 881–896.
- Faisal, M., Saquib, Q., Alatar, A.A., Al-Khedhairy, A.A., Hegazy, A.K., Musarrat, J. (2013). “Phytotoxic hazards of NiO-nanoparticles in tomato: a study on mechanism of cell death”. *J. Hazard. Mater.* **250**, 318–332.
- Faiyue, B., Al-Azzawi, M.J., Flowers, T.J. (2010). The role of lateral roots in bypass flow in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant. Cell Environ.* **33(5)**, 702–716.
- Farhangi-Abriz, S., ve Torabian, S. (2018). Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. *Protoplasma.* **255**, 953–962.
- Farrant, J.M. (2000). A comparison of mechanisms of desiccation tolerance among three angiosperm resurrection plant species. *Plant Eco.* **151**, 29–39.
- Félix Alvarez, R.C., Prado, R.M., Felisberto, G., Fernandes Deus, A.C., Lima de Oliveira, R.L. (2018). Effects of Soluble Silicate and Nanosilica Application on Rice Nutrition in an Oxisol. *Pedosphere.* **28(4)**, 597–606.
- Fernandez-Martinez, J., Kim, S.J., Shi, Y., Upla, P., Pellarin, R., Gagnon, M., Chemmama, I.E., Wang, J., Nudelman, I., Zhang, W. (2016). Structure and Function of the Nuclear Pore Complex Cytoplasmic mRNA Export Platform. *Cell.* **167**, 1215–1228.
- Gao, F.Q., Hong, F.S., Liu, C., Zheng, L., Su, M.Y. (2006). Mechanism of nano-anatase TiO₂ on promoting photosynthetic carbon reaction of spinach: inducing complex of Rubisco–Rubisco activase. *Biol. Trace Elem Res.* **111**, 286–301.
- Garcia-Gomez, C., Garcia, S., Obrador, A., Gonzalez, D., Babin, M., Fernandez, M.D. (2018). Effects of aged ZnONPs and soil type on Zn availability, accumulation and toxicity to pea and beet in a greenhouse experiment. *Ecotoxicol. Environ.* **160**, 222–230.
- Genga, A., Wang, X., Wu, L., Wang, F., Wu, Z., Yang, H., Chen, Y., Wen, D., Liu, X. (2018). Silicon improves growth and alleviates oxidative stress in rice seedlings

- (*Oryza sativa* L.) by strengthening antioxidant defense and enhancing protein metabolism under arsenic acid exposure. *Ecotoxicol Environ.* **158**, 266–273.
- Gérard, F., Mayer, K.U., Hodson, M.J., Ranger, J. (2008). Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: application to a temperate forest ecosystem. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **72**,741–758.
- Giraldo, J.P., Landry, M.P., Faltermeier S.M., McNicholas, T.P., Iverson, N.M., Boghossian, A.A., Reuel, N.F., Hilmer, A.J., Sen, F., Brew, J.A., Strano, M.S. (2014). Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing. *Nat. Mater.* **13**, 400–408.
- González-Melendi, P., Fernández-pacheco, R., Coronado, M.J., Corredor, E., Testillano, P.S., Risueno, M.C., Marquina, C., Ibarra, M.R., Rubiales, D., Pérez-de-luque, A. (2008). Nanoparticles as smart treatment-delivery systems in plants: assessment of different techniques of microscopy for the visualization in plant tissues. *Ann. Bot.* **101**, 187–195.
- Goodarzi, G.R., Noor, V.P., Ahmadloo, F. (2017). Effects of nanoparticle treatments on propagation of *Prunus mahaleb* L. by seed. *J. Forest Sci.* **63(9)**, 408–416.
- Guntzer, F., Keller, C. ve Meunier, J.D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review *Agron. Sustain. Dev.* **32**, 201–213.
- Gupta, D.K., Palma, J.M., Corpas, F.J. (2018). Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants. DOI: 10.1007/978-3-319-75088-0.
- Gupta, R. and Xie, H. (2018). Nanoparticles in Daily Life: Applications, Toxicity and Regulations. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* **37(3)**, 209–230.
- Habibi, G. ve Hajiboland, F. (2013). Alleviation of drought stress by silicon supplementation in pistachio (*Pistacia vera* L.) plants. *Folia Hort.* **25(1)**, 21–29.
- Haghighi, M., Afifipour, Z., Mozafarian, M. (2012). The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. *J. Biol. Environ. Sci.* **6**, 87–90.

- Haghighi, M., Pessaraki, M. (2013). Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Sci. Hort.* **161**, 111–117.
- Hasanuzzaman, M., Hakeem, K.R., Nahar, K.F., Alharby, H. (2019). Plant Abiotic Stress Tolerance. *Springer Nature Switzerland AG* 2019 333 https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_14.
- Heckman, J. (2013). Silicon: A Beneficial Substance. *Better Crops*. **97(4)**, 14–16.
- Hischemoller, A., Nordmann, J., Ptacek, P., Mummenhoff, K., Haase, M. (2009). In-vivo imaging of the uptake of upconversion nanoparticles by plant roots. *J. Biomed. Nanotechnol.* **5(3)**, 278–284.
- Hoagland, D.R., Arnon, D.I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Calif. Agric. Exp. Stat. Cir.* **347**, 1–32.
- Hossain, Z., Mustafa, G., Sakata, K., Komatsu, S. (2016). Insights into the proteomic response of soybean towards Al₂O₃, ZnO, and Ag nanoparticles stress. *J. Hazard. Mater.* **304**, 291–305.
- Hussain, A., Ali, S., Rizwan, M., Rehman, Z.M., Javed, R.M., Imran, M., Chatha, S.A.S., Nazir, R. (2018). “Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants”. *Environ. Pollut.* **242**, 1518–1526.
- Hussain, H.I., Yi, Z., Rookes, J.E., Kong, L.X., Cahill, D.M. (2013). Mesoporous silica nanoparticles as a biomolecule delivery vehicle in plants. *J. Nanopart. Res.* **15**, 1–15.
- Hussain, M., Raja, N.I., Iqbal, M., Ejaz, M. (2018). Seed germination and biochemical profile of *Citrus reticulata* (Kinnow) exposed to green synthesised silver nanoparticles. *IET. Nanobiotechnol.* **12(5)**, 688–693.
- Hu, X., Liu, S., Zhou, G., Huang, Y., Xie, Z., Jing, X. (2014). Electrospinning of polymeric nanofibers for drug delivery applications. *J. Control. Release.* **185**, 12–21.

- Iqbal, M., Raja, N.I., Mashwani, Z.U.R., Hussain, M., Ejaz, M., Yasmeen F. (2017). Effect of Silver Nanoparticles on Growth of Wheat Under Heat Stress. *Iran J. S. Technol.* **43(2)**, 387–395.
- Ivani, R., Nejad, S.H.S., Ghahraman, B., Astaraei, A.R., Feizi, H. (2018). Role of bulk and Nanosized SiO₂ to overcome salt stress during Fenugreek germination (*Trigonella foenum-graceum* L.) *Plant Signaling & Behavior.* **13(7)**, 1–6.
- Johansson, M., and Boholm, A. (2017). Scientists Understandings of Risk of Nanomaterials: Disciplinary Culture Through the Ethnographic Lens. *Nanoethics.* **11**, 229–242.
- Joseph, T. and Morrison, M. (2006). Nanotechnology in agriculture and food. Nanoforum Report, Institute of Nanotechnology. 1–13.
- Karim, J., and Mohsenzadeh, M. (2016). Effects of Silicon Oxide Nanoparticles on Growth and Physiology of Wheat Seedlings. *Russ J. Plant Physiol.* **63(1)**, 119–123.
- Krishnara, C., Jagan, E.G., Ramachandran, R., Abirami, S.M., Mohan, N., Kalaichelvan, P.T. (2012). Effect of biologically synthesized silver nanoparticles on *Bacopa monnieri* (Linn.) Wettst. Plant growth metabolism. *Process Biochem.* **47(4)**, 651–658.
- Kim, Y.H., Khan, A.L., Waqas, M., and Lee, I.J. (2017). Silicon Regulates Antioxidant Activities of Crop Plants under Abiotic-Induced Oxidative Stress: A Review. *Front. Plant Sci.* **8**, 510.
- Kirschbaum, M.U.F. (2011). Does Enhanced Photosynthesis Enhance Growth? Lessons Learned From CO₂ Enrichment Studies. *Plant Physiol.* **155**, 117–124.
- Koce, J.D., Drobne, D., Klančnik, K., Makovec, D., Novak, S., and Hocevar, M. (2014). *Environ. Toxicol. Chem.* **33(4)**, 858–867.
- Koçak, A., Karasu, B. (2018). General Evaluations of Nanoparticles. *J.Sci Eng.* **5(1)**, 191–236.
- Kheyri, N., Ajam Norouzi, H., Mobasser, H.R., Torabi, B. (2018). Effect of different resources and methods of silicon and zinc application on agronomic traits, nutrient

- uptake and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) *Appl. Ecol. Environ. Res.* **16(5)**, 5781–5798.
- Konate, A., Wang, Y., He, X., Adeel, M., Zhang, P., Ma, Y., Ding, Y., Zhang, J., Yang, J., Kizitoa, S., Rui, Y., Zhang, Z. (2018). “Comparative effects of nano and bulk-Fe₃O₄ on the growth of cucumber (*Cucumis sativus*)”. *Ecotoxicol. Environ. Safety.* **165**, 547–554.
- Koyro, H.W., Ahmad, P., Geissler, N. (2012). Abiotic stress responses in plants: an overview. In *Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change Springer.* 29–56.
- Krishnaraj, C., Jagan, E.G., Ramachandran, R., Abirami, S.M., Mohan, N., Kalaichelvan, P.T. (2012). “Effect of biologically synthesized silver nanoparticles on *Bacopa monnieri* (Linn.) Wettst. plant growth metabolism”. *Process Biochem.* **47**, 651–658.
- Lahiani, M.H., Chen, J., Irin, F., Puretzky, A.A., Green, M.J., Khodakovskaya, M.V. (2015). Interaction of carbon nanohorns with plants: Uptake and biological effects. *Carbon.* **81**, 607–619.
- Larue, C., Laurette, J., Herlin-Boime, N., Khodja, H., Fayard, B., Flank, A.M., Brisset, F., Carriere, M. (2012). Accumulation, translocation and impact of TiO₂ nanoparticles in wheat (*Triticum aestivum* spp.) influence of diameter and crystal phase. *Sci. Total Environ.* **431**, 197–208.
- Larue, C., Castillo-Miche, H., Sobanska, S., Trcera, N., Sorieul, S., Cecillon, L., Ouerdane, L., Legros, S., Sarret, G. (2014). Fate of pristine TiO₂ nanoparticles and aged paint-containing TiO₂ nanoparticles in lettuce crop after foliar exposure. *J. Hazard Mater.* **273**, 17–26.
- Lazcano-Ferrat, I. ve Lovatt, C.J. (1999). Relationship between Relative Water Content, Nitrogen Pools and Growth of *Phaseolus vulgaris* L. and *P. acutifolius* A. Gray during Water Deficit. *Crop. Sci.* **39(2)**, 467–475.

- Le, V.N., Rui, Y., Gui, X., Li, X., Liu, S., Han, Y. (2014) Uptake, transport, distribution and Bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bt-transgenic cotton. *J. Nanobiotechnol.* **12(50)**, 1–15.
- Lee, W.M., An, Y.J., Yoon, H., Kweon, H.S. (2008). Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environ. Toxicol. Chem.* **27(9)**, 1915–1921.
- Lee, C.W., Mahendra, S., Zodrow, K., Li, D., Tsai, Y.C., Braam, J. Alvarez, P.J.J. (2010). Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana*. *Environ. Toxicol. Chem.* **29(3)**, 669–675.
- Liang, Y., Chen, Q.I.N., Liu, Q., Zhang, W., Ding, R. (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. Plant Physiol.* **160(10)**, 1157–1164.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., (2015). Silicon in Agriculture. Amsterdam, The Netherlands. *Springer.* **8**, 393.
- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology.* **148**, 350–382.
- Lin, D., Xing, B. (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environ Sci. Technol.* **42**, 5580–5585.
- Lin, D., Xing, B. (2007). Phytotoxicity of Nanoparticles: Inhibition of Seed Germination and Root Growth. *Environ Pollut.* **150**, 243–250.
- Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., Zhang, S. (2014). Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *J. Exp. Bot.* **65**, 4747–4756.
- Lobato, A.K.S., Guedes, E.M.S., Marques, D.J. ve Neto, C.F.O. (2013). Silicon: A Benefic Element to Improve Tolerance in Plants Exposed to Water Deficiency. 96–110.

- Lovering, T.S., Engel, C. (1959). Significance of accumulator plants in rock weathering. *Geol. SOC. Am. Bull.* **70**, 781-800.
- Lux, A., Luxová, M., Abe, J., Tanimoto, E., Hattori, T., Inanaga, S. (2003). The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. *New Phytol.* **158**, 437–441.
- López-Luna, J., Camacho-Martínez, M.M., Solís-Domínguez, F.A., González-Chávez, M.C., Carrillo-González, R., Martínez-Vargas, S., Mijangos-Ricardez, O.F., Cuevas-Díaz M.C. (2018). “Toxicity assessment of cobalt ferrite nanoparticles on wheat plants.” *J. Toxicol. Environ. Health. A.* **81(14)**, 604–619.
- Lopez-Moreno, M.L., de la Rosa, G., Hernandez-Viezcas, J.A., Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey, J.L. (2010). XAS Corroboration of the Uptake and Storage of CeO₂ Nanoparticles and Assessment of their Differential Toxicity in Four Edible Plant. *J. Agric. Food Chem.* **58(6)**, 3689–3693.
- Lovering, T.S., Engel, C. (1959). Significance of accumulator plants in rock weathering. *Bulletin of the Geological Society of America.* **70**, 781–800.
- Lukacova', Z., Svubova', R., Kohanova, J., Lux, A. (2013). Silicon mitigates the Cd toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplasmic barrier development. *Plant Growth Regul.* **70**, 89–103.
- Lu, C.M., Zhang, C.Y., Wen, J.Q., Wu, G.R., Tao, M.X. (2002). Research on the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of Glycine max and its mechanism. *Soybean Sci.* **21**, 68–172.
- Luyckx, M., Hausman, J.F., Lutts, S., Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Front Plant Sci.* **8**, 1–8.
- Xiang, L., Zhao, H.M., Li, Y.W., Huang, X.P., Wu, X.L., Zhai, T., Yuan, Y., Cai, Q.Y., Mo, C.H. (2015). Effects of the size and morphology of zinc oxide nanoparticles on the germination of *Chinese cabbage* seeds. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **22(14)**, 10452–62.
- Lv, J., Zhang, S., Luo, L., Zhang, J., Yang, K., Christie, P. (2015). Accumulation, speciation and uptake pathway of ZnO nanoparticles in maize. *Environ. Sci. Nano.* **2**, 68–77.

- Ma, J.F., Miyake, Y., Takahashi, E. (2001). Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. *Studies in Plant Science*. **8**, 17–39.
- Ma, C., Liu, H., Guo, H., Musante, C., Coskun, S.H., Nelson, B.C., White, J.C., Xing, B., Dhankher, O.P. (2016). Defense mechanisms and nutrient displacement in *Arabidopsis thaliana* upon exposure to CeO₂ and In₂O₃ nanoparticles. *Environ. Sci.* **3**, 1369–1379.
- Madhavo Rao, K.V., Sresty T.V.S. (2000). Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. *Plant Sci.* **157**, 113–128.
- Mateos-Naranjo, E., Gallé, A., Florez-Sarasa, I., Perdomo, J.A., Galmés, J., Ribas-Carbó, M., Flexas, J. (2015). Assessment of the role of silicon in the Cu-tolerance of the C4 grass *Spartina densiflora*. *J. Plant Physiol.* **178**, 74–83.
- Majumdar, S., Peralta-Videa, J.R., Bandyopadhyay, S., Castillo-Michel, H., Hernandez-Viezcas, J.A., Sahi, S., Gardea-Torresdey, J.L. (2014). Exposure of cerium oxide nanoparticles to kidney bean shows disturbance in the plant defense mechanisms. *J. Hazard. Mater.* **278**, 279–287.
- Martínez-Fernández, D., Barroso, D., Komárek, M. (2016). Root water transport of *Helianthus annuus* L. under iron oxide nanoparticle exposure. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **23**, 1732–1741.
- Matichenkov, V.V., Bocharnikova, E.A. (2001). The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: L.E. Datnoff, G.H. Snyder, H. Korndorfer, eds. *Silicon in Agriculture*. Amsterdam: Elsevier, 209–219.
- Ma, J.F., Yamaji, N.A. (2015). Cooperative system of silicon transport in plants. *Trends Plant Sci.* **20(7)**, 435–442.
- Ma, J.F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr.* **50(1)**, 11–18.

- Mehmood, A., Murtaza, G. (2017). Impact of biosynthesized silver nanoparticles on protein and carbohydrate contents in seeds of *Pisum sativum* L. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* **17**, 334–340.
- Miri, A.H., Shakib, E.S., Ebrahimi, O. and Sharifi-Rad, J. (2017). Impacts of Nickel Nanoparticles on Grow Characteristics, Photosynthetic Pigment Content And Antioxidant Activity of *Coriandrum Sativum* L. *Orient J Chem.* **33(3)**, 1297–1303.
- Milewska-Hendel, A., Gawecki, R., Zubko, M., Stróż, D., Kurczyńska, E. (2016). Diverse influence of nanoparticles on plant growth with a particular emphasis on crop plants. *Acta Agrobot.* **69(4)**, 1694.
- Miyake, C., Asada, K. (1992). Thylakoid bound ascorbate peroxidase in Spinach chloroplasts and photoregeneration of its primary oxidation product monodehydroascorbate radicals in thylakoids. *Plant Cell Physiol.* **33**, 541–553.
- Moon, Y.S., Park, E.S., Kim, T.O., Lee, H.S., Lee, S.E. (2014). SELDI-TOF MS-based discovery of a biomarker in *Cucumis sativus* seeds exposed to CuO nanoparticles. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* **38**, 922–931.
- Mourato, M., Reis, R., and Martins, L.L. (2012). Characterization of Plant Antioxidative System in Response to Abiotic Stresses: A Focus on Heavy Metal Toxicity, *Advances in Selected Plant Physiology Aspects*, Montanaro, G. (Ed.), InTech, Vienna, Austria 2, 23–44.
- Moussa, H.R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). *Int. J. Agric. Biol.* **2**, 293–297.
- Mozafariyan, M., Kamelmanesh, M.M., Hawrylak-Nowak, B. (2016). Ameliorative effect of selenium on tomato plants grown under salinity stress. *Arch. Agron. Soil Sci.* **62(10)**, 1368–1380.
- Mbonyiryivuze, A., Zongo, S., Diallo, A., Bertrand, S., Minani, E., Yadav, L.L. Mwakikunga, B., Dhlamini, S.M., Maaza, M. (2015). Titanium Dioxide Nanoparticles Biosynthesis for Dye Sensitized Solar Cells application: Review. *Physics and Mater Chem.* **3(1)**, 12–17.

- Nadiminti, P.P., Dong, Y.D., Sayer, C., Hay, P., Rookes, J.E., Boyd, B.J., Cahill, D.M. (2013). Nanostructured liquid crystalline particles as an alternative delivery vehicle for plant agrochemicals. *ACS Appl. Mater Interfaces*. **5(5)**, 1818–1826.
- Nair, R. (2016). Effects of nanoparticles on plant growth and development. *Plant Nanotechnology*, eds. Kole, C., Kumar, D.S., Khodakovskaya, M.V., editors. (Cham: Springer). 95–118.
- Nazaralian, S., Majd, A., Irian, S., Najafi, F., Ghahremaninejad, F., Landberg, T., Greger, M. (2017). Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. *Plant Physiol. Biochem*. **115**, 25–33.
- Noji, T., Kamidaki, C., Kawakami, K., Shen, J.R., Kajino, T., Fukushima, Y., Sekitoh, T., Itoh, S. (2011). Photosynthetic oxygen evolution in mesoporous silica material: adsorption of photosystem II reaction center complex into 23 nm nanopores in SBA. *Langmuir*. **27(2)**, 705–713.
- Nowack, B., Bucheli, T.D. (2007). Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environ Pollut*. **150(1)**, 5–22.
- Parisi, C., Vigani, M., Rodríguez-Cerezo, E. (2015). Agricultural nanotechnologies: what are the current possibilities? *Nano Today*. **10(2)**, 124–127.
- Pérez-De-Luque, A., Rubiales, D. (2009). Nanotechnology for parasitic plant control. *Pest Manag Sci*. **65(5)**, 540–545.
- Patra, P., Choudhury, S.R., Mandal, S., Basu, A., Goswami, A., Gogoi, R., Srivastava, C., Kumar, R., Gopal, M. (2013). Effect of sulfur and ZnO nanoparticles on stress physiology and plant (*Vigna radiata*) nutrition. *Adv. Nanomater. Nanotechnol*. **31**, 299–307.
- Thuesombat, P., Hannongbua, S., Akasit, S., Chadchawan, S. (2014). Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L cv. KDML 105) seed germination and seedling growth. *Ecotoxicol. Environ. Saf*. **104**, 302–309.
- Qados, A.M.S.A. (2015). Mechanism of Nanosilicon-Mediated Alleviation of Salinity Stress in Faba Bean (*Vicia faba* L.) Plants. *Am. J. Exp. Agricul*. **7(2)**, 78–95.

- Raigond, P., Raigond, B., Kaundal, B., Singh, B., Joshi, A., Dutt, S. (2017). Effect of zinc nanoparticles on antioxidative system of potato plants. *J. Env. Biol.* **38(3)**, 435–439.
- Raliya, R., Tarafdar, J.C. (2013). ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Agric. Res.* **2**, 48–57.
- Ramesh, R., Tandeeep, S.C., Kelsey, H., Pratim, B. (2016). Perspective on nanoparticle technology for biomedical use. *Curr. Pharm. Design.* **22(17)**, 2481–2490.
- Ranjan, S., Dasgupta, N., Roy, A.C., Samuel, M.S., Chidambaram, R., Shanker, R., Kumar, A. (2014). Nanoscience and nanotechnologies in food industries: opportunities and research trends. *J. Nanopart. Res.* **16**, 2464.
- Rani, P.U., Yasur, J., Loke, K.S., Dutta, D. (2016). Effect of synthetic and biosynthesized silver nanoparticles on growth, physiology and oxidative stress of water hyacinth: *Eichhornia crassipes* Solms. *Acta. Physiol. Plant.* **38**, 1–9.
- Rao, S., Shekhawat, G.S., (2014). Toxicity of ZnO engineered nanoparticles and evaluation of their effect on growth, metabolism and tissue specific accumulation in *Brassica juncea*. *J. Environ. Chem. Eng.* **2**, 105–114.
- Rao, G.B., Susmitha, P. (2017). Silicon uptake, transportation and accumulation in Rice. *J. Pharmacogn. Phytochem.* **6(6)**, 290–293.
- Rastogi, A., Tripathi, D.K., Yadav, S., Chauhan, D.K., Živčák, M., Mansour Ghorbanpour, M., El-Sheery, N.Í., Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech.* **9(90)**, 2–11.
- Rastogi, A., Zivcak, M., Sytar, O., Kalaji, H.M., He, X., Mbarki, S., Brestic, M. (2017). Impact of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Plant: A Critical Review. *Front Chem.* **12(5)**, 78.
- Raskar, S.V., Laware, S.L. (2014). Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* **3**, 467–473.

- Remédios, C., Rosário, F., ve Bastos V. (2012). Environmental Nanoparticles Interactions with Plants: Morphological, Physiological, and Genotoxic Aspects. *J. of Bot.* 1–8.
- Rico, C.M., Lee, S.C., Rubenecia, R., Mukherjee, A., Hong, J., Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey, J.L. (2014). Cerium oxide nanoparticles impact yield and modify nutritional parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agric. Food Chem.* **62**, 9669–9675.
- Rico, C.M., Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey, J.L. (2015). Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. In: Nanotechnology and Plant Sciences. *Springer Inter Publish.* **1**, 1–17.
- Roghayyeh, S.M.S., Mehdi, T.S., Rauf, S.S. (2010). Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Sci. Biol.* **2**, 112–113.
- Roohizadeh, G., Arbabian, S., Tajadod, G., Majd, A. ve Salimpour, F. (2015). The study of Nano silica effects on the total protein content and the activities of Catalase, Peroxidase and Superoxid Dismutase of *Vicia faba* L. *Tropical plant res.* **2(1)**, 47–50.
- Rosa, S.B., Caverzan, A., Teixeira, F.K., Lazzarotto, F., Silveira, J.A.G., Ferreira-Silva, S.L., Abreu-Neto, J., Margis, R., Margis-Pinheiro, M. (2010). Cytosolic APx knockdown indicates an ambiguous redox responses in rice. *Phytochem.* **71(5-6)**, 548–558.
- Sabaghnia, N., Janmohammadi, M. (2015). Effects of nano-silicon particles application on salinity tolerance in early growth of some lentil genotypes. *Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska lublin-Polonia.* **2**, 40–55.
- Sabo-Attwood, T., Unrine, J.M., Stone, J.W., Murphy, C.J., Ghoshroy, S., Blom, D., Bertsch, P.M., Newman, L.A. (2012). Uptake, distribution and toxicity of gold nanoparticles in tobacco (*Nicotiana xanthi*) seedlings. *Nanotoxicol.* **6(4)**, 353-360.
- Saha, N., Gupta, S.D. (2018). Promotion of shoot regeneration of *Swertia chirata* by biosynthesized silver nanoparticles and their involvement in ethylene interceptions

- and activation of antioxidant activity. *Plant Cell Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. **134(2)**, 289–300.
- Saleh, J., Najafi, N., Oustan, S., Ghasemi-Golezani, K., Aliasghrzad, N. (2018). Silicon Affects Rice Growth, Superoxide Dismutase Activity and Concentrations of Chlorophyll and Proline under Different Levels and Sources of Soil Salinity. *Silicon* ISSN: 1876-990X, 1876–9918.
- Schaller, J., Brackhage, C., Paasch, S., Brunner, E., Bäucker, E., Dudel, E.G. (2013). Silica uptake from nanoparticles and silica condensation state in different tissues of *Phragmites australis*. *Sci. Total Environ.* **442**, 6–9.
- Schreiber, L. (2010) Transport barriers made of cutin, suberin and associated waxes. *Trends Plant Sci.* **15(10)**, 546–553.
- Sharifi-Rad, J., Sharifi-Rad, M., and Silva, J.A.T. (2016). Morphological, Physiological and Biochemical Responses of Crops (*Zea mays* L., *Phaseolus vulgaris* L.), Medicinal Plants (*Hyssopus officinalis* L., *Nigella sativa* L.), and Weeds (*Amaranthus retroflexus* L., *Taraxacum officinale* F. H. Wigg) Exposed to SiO₂ Nanoparticles. *J. Agr. Sci. Tech.* **18**, 1027–1040.
- Shane, M.W., McCully, M.E., Canny, M.J. (2000). The vascular system of maize stems revisited: implications for water transport and xylem safety. *Ann. Bot.* **86(2)**, 245–258.
- Shekari, F., Abbasi, A., Mustafavi, S.H., (2015). Effect of silicon and selenium on enzymatic changes and productivity of dill in saline condition. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* **16(4)**, 367–374.
- Shi, J.Y., Peng, C., Yang, Y.Q., Yang, J.J., Zhang, H., Yuan, X.F., Chen, Y.X., Hu, T. (2014). Phytotoxicity and accumulation of copper oxide nanoparticles to the Cu-tolerant plant *Elsholtzia splendens*. *Nanotoxicol.* **8(2)**, 179–188.
- Shi, Y., and Zhang, B. (2016). Correction: Recent advances in transition metal phosphide nanomaterials: synthesis and applications in hydrogen evolution reaction. *Chem. Soc. Rev.* **45**, 1781–1781.

- Siddiqui, M.H., Mohammad, F., Khan, M.M.A., Al-Whaibi, M.H. (2012). Cumulative effect of nitrogen and sulphur on *Brassica juncea* L. genotypes under NaCl stress. *Protoplasma*. **249**, 139–153.
- Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Faisal, M., Al Sahli, A.A. (2014). Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environ. Toxicol. Chem.* **33**, 2429–2437.
- Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H. (2014). Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.). *Saudi Biol. Sci.* **21**, 13–1.
- Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Mohammad, F. (2015). Nanotechnology and Plant Sciences: Nanoparticles and Their Impact on Plants. *Springer*. **2**, 19–35.
- Slomberg, D.L., Schoenfisch, M.H. (2012). Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. *Environ. Sci. Technol.* **46(18)**, 10247–10254.
- Soares, C., Neves, S.B., Sousa, A., Azenha, M., Cunha, A., Fidalgo, R.P.F. (2018). SiO₂ nanomaterial as a tool to improve *Hordeum vulgare* L. tolerance to nano-NiO stress. *Sci. of the Total Environ.* **622(623)**, 517–525.
- Song, G., Hou, W., Gao, Y., Wang, Y., Lin, L., Zhang, Z., Niu, Q., Ma, R., Mu, L. and Wang, H. (2016). Effects of CuO nanoparticles on *Lemna minor*. *Bot. Stud.* **5(3)**, 1–8.
- Soundararajan, P., Manivannan, A., Ko, C.H., Jeong, B.R. (2017). Silicon enhanced redox homeostasis and protein expression to mitigate the salinity stress in *Rosa hybrida* ‘Rock Fire’. *J. Plant Growth Regul.* **37**, 16–34.
- Soylomezoglu, G., Demir, K., Inal, A., Gunes, A. (2009). Effect of silicon on antioxidant and stomatal response of two grapevine (*Vitis vinifera* L.) rootstocks grown in boron toxic, saline and boron toxic-saline soil. *Sci. Hortic.* **123(2)**, 240–246.
- Strout, G., Russell, S.D., Pulsifer, D.P., Erten, S., Lakhtakia, A., Lee, D.W. (2013). Silica nanoparticles aid in structural leaf coloration in the Malaysian tropical rainforest understory herb *Mapania caudata*. *Ann. Bot.* **112(6)**, 1141–1148.

- Sun, D., Hussain, H.I., Yi, Z., Siegele, R., Cresswell, T., Kong, L., Cahill, D.M. (2014). Uptake and cellular distribution, in four plant species, of fluorescently labeled mesoporous silica nanoparticles. *Plant Cell Rep.* **33(8)**, 1389–1402.
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Kannan, N. (2014). Foliar application of silica nanoparticles on the phytochemical responses of maize (*Zea mays* L.) and its toxicological behavior. *Synth React Inorg. M.* **44(8)**, 1128–1131.
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Kannan, N. (2012). Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays* L.) seeds under hydroponic conditions. *Curr Nanosci.* **8**, 902–908.
- Syu, Y.Y., Hung, J.H., Chen, J.C., Chuang, H.W. (2014). Impacts of size and shape of silver nanoparticles on *Arabidopsis* plant growth and gene expression. *Plant Physiol. Biochem.* **83**, 57–64.
- Tarafdar, J.C., Xiang, Y., Wang, W.N., Dong, Q. and Biswas, P. (2012). Standardization of size, shape and concentration of nanoparticle for plant application. *Appl. Biol. Res.* **14**, 138–144.
- Tarrahi, R., Khataee, A., Movafeghi, A., Rezanejad, F. (2018). Toxicity of ZnSe nanoparticles to *Lemna minor*: Evaluation of biological responses. *J. Environ. Manage.* **226**, 298–307.
- Taylor, A.F., Rylott, E.L., Anderson, C.W., Bruce, N.C. (2014). Investigating the toxicity, uptake, nanoparticle formation and genetic response of plants to gold. *Plos one* **9(4)**, 1–10.
- Thorne, E.T., Young, B.M., Young, G.M., Stevenson, J.F., Labavitch, J.M., Matthews, M.A., Rost, T.L. (2006). The structure of xylem vessels in grapevine (Vitaceae) and a possible passive mechanism for the systemic spread of bacterial disease. *Am. J. Bot.* **93(4)**, 497–504.

- Thuesombat, P., Hannongbua, S., Akasit, S., Chadchawan, S. (2014). Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **104**, 302–309.
- Torabi, F., Majd, A., and Enteshari, S. (2015). The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). *Soil Sci. Plant Nut.* **61**, 788–798.
- Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K., Dubey, N.K. (2016). Effect of silicon and silicon nanoparticle (Si-NP) on seedlings of maize cultivar and hybrid differing in arsenate tolerance. *Front. Environ. Sci.* **4(46)**, 1–14.
- Tripathi, D.K., Shweta, G., Shweta, S., Swati, S., Pandey, R., Singh, V.P., Sharma, N.C., Prasad, S.M., Dubey, N.K., Chauhan, D.K. (2016). An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiol. Biochem.* **110**, 2–12.
- Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K., Dubey, N.K. (2015). Silicon nanoparticles (SiNP) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiol. Biochem.* **96**, 189–198.
- Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D. K., Dubey, N. K., and Rai, A.K. (2015). Silicon-mediated alleviation of Cr(VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll fluorescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. *Ecotoxicol. Environ.* **113**, 133–144.
- Tripathi, D.K., Mishra, R.K., Singh, S., Singh, S., Vishwakarma, K., Sharma, S., Singh, V.P., Singh, P.K., Prasad, S.M., Dubey, N.K., Pandey, A.C., Sahi, S., Chauhan, D.K. (2017). Nitric oxide ameliorates zinc oxide nanoparticles phytotoxicity in wheat seedlings: implication of the ascorbate-glutathione cycle. *Front. Plant Sci.* **8**, 1–10.
- Thiruvengadam, M., Gurunathan, S., Chung, I.M. (2015). Physiological, metabolic, and transcriptional effects of biologically-synthesized silver nanoparticles in turnip (*Brassica rapa* ssp. *rapa* L.). *Protoplasma.* **252**, 1031–1046.

- Van Aken, K.L., Pérez, C.R., Oh Y., Beidaghi, M., Jeong Y.J., Islam, M.F., Gogotsi, Y. (2015). High rate capacitive performance of single-walled carbon nanotube aerogels. *Nano Energ.* **15**, 662–669.
- Watanabe, T., Misawa, S., Hiradate, S., Osaki, M. (2008). Root mucilage enhances aluminum accumulation in *Melastoma malabathricum*, an aluminum accumulator. *Plant Signal Behav.* **3(8)**, 603–605.
- Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.J., Kopittke, P.M. (2016). Nanotechnology: A New Opportunity in Plant Sciences. **21(8)**, 699–712.
- Weiss, J., Takhistov, P., McClements, D.J. (2006). Functional materials in food nanotechnology. *J. Food Sci.* **71(9)**, 107–116.
- Wu, S.G., Huang, L., Head, J., Ball, M., Tang, Y.J., Chen, D.R. (2014). Electro spray facilitates the germination of plant seeds. *Aerosol Air Qual. Res.* **14**, 632–641.
- Venkatachalam, P., Priyanka, N., Manikandan, K., Ganeshbabu, I., Indiraarulsevi, P., Geetha, N., Muralikrishna, K., Bhattacharya, R.C., Tiwari, M., Sharma, N., Sahi, S.V. (2016). Enhanced plant growth promoting role of phycomolecules coated zinc oxide nanoparticles with P supplementation in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant Physiol. Biochem.* **110**, 118–127.
- Xie, Y., Li, B., Zhang, Q., Zhang, C. (2012). Effects of nano-silicon dioxide on photosynthetic fluorescence characteristics of *Indocalamus barbatus* McClure. *J. Nanjing Forest Uni.* (Natural Sciences Edition) **2**, 59–63.
- Yang, X., Baskin, J.M., Baskin, C.C., Huang, Z. (2012). More than just a coating: ecological importance, taxonomic occurrence and phylogenetic relationships of seed coat mucilage. *Perspect Plant Ecol. Evol. Syst.* **14(6)**, 434–442.
- Yang, J., Cao, W. ve Rui, Y. (2017). Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms. *J. Plant Inter.* **12**, 158-169.
- Yasmeen, F., Raja, N.I., Razzaq, A., Komatsu S. (2017). Proteomic and physiological analyses of wheat seeds exposed to copper and iron nanoparticles. *Biochimica et Biophysica Acta.* **1865**, 28–42.

- Yinghan, L., Wang, S., Wang, Z., Ye, N., Fang, H. ve Wang, D. (2018). TiO₂, SiO₂ and ZrO₂ Nanoparticles Synergistically Provoke Cellular Oxidative Damage in Freshwater Microalgae. *Nanomaterials*. **8(2)**, 95.
- Yuvakkumar, R., Elango, V., Rajendran, V., Kannan, N.S., Prabu, P. (2011). Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). *Int. J. Green Nanotechnol.* **3**, 180–190.
- Zanão Júnior, L.A., Alvarez Venegas, V.H., Fontes, R.L.F., Carvalho-Zanão, M.P., Dias-Pereira, J., Maranhão, L.T., Pereira, N. (2017). Leaf Anatomy and Gas Exchange of Ornamental Sunflower in Response to Silicon Application. *Biosci. J.* **33(4)**, 833–842.
- Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech.* **9**, 73.
- Zarafshar, M., Akbarinia, M., Askari, H., Hosseini, S.M., Rahaie, M. ve Struve D. (2015). Toxicity Assessment of SiO₂ Nanoparticles to Pear Seedlings *Int. J. Nanosci. Nanotechnol.* **11(1)**, 13–22.
- Zhang, Z., He, X., Zhang, H., Ma, Y., Zhang, P., Ding, Y., Zhao, Y. (2011). Uptake and distribution of ceria nanoparticles in cucumber plants. *Metallomics: Integr Biometal Sci.* **3(8)**, 816–822.
- Zhao, L., Peng, B., Hernandez-Viezcas, J.A., Sun, Y., Peralta-Videa, J.R., Tang, X., Niu, G., Jin, L., Varela-Ramirez, A., Zhang, J.Y., Gardea-Torresdey, J.L. (2012). Stress response and tolerance of *Zea mays* to CeO₂ nanoparticles: Cross talk among H₂O₂, heat shock protein and lipid peroxidation. *Am. Chem. Soc. Nano.* **6(11)**, 9615-9622.
- Zheng, L., Hong, F., Lu, S., Liu, C. (2005). Effect of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biol Trace Element Res.* **104**, 83-91.
- Zhu, H., Han, J., Xiao, J.Q., Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *J. Environ. Monit: JEM* **10(6)**, 713–717.

Zhu, Y., Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron. Sustain. Dev.* **34**, 455-472.

Zmeeva, O.N., Daibova, E.B., Proskurina, L.D., Petrova, L.V., Kolomiets, N.E., Svetlichny, V.A., Lapin, I.N. ve Karakchieva, N.I. (2017). Effects of Silicon Dioxide Nanoparticles on Biological and Physiological Characteristics of *Medicago sativa* L.nothosubsp. varia (Martyn) in Natural Agroclimatic Conditions of the Subtaiga Zone in Western Siberia. *BioNano Sci.* **7**, 672–679.

Zuverza-Mena, N., Armendariz, R., Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey, J.L. (2016). Effects of Silver Nanoparticles on Radish Sprouts: Root Growth Reduction and Modifications in the Nutritional Value. *Front. Plant Sci.* **7**, 90.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Sibel KILIÇARSLAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya,1982

Adres: Kayısı Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Aşağıbağlar mah. İsmetpaşa cad. No:163
44090 Yeşilyurt / MALATYA

E-Posta: sibelklersln@hotmail.com

Lisans: Niğde Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

1. Tarım ve Orman Bakanlığı, Gıda Kontrol Laboratuvar Müdürlüğü (2007-2009)
2. Tarım ve Orman Bakanlığı, Kayısı Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (2009-halen)

Tezden Türetilen Yayınlar/Sunumlar

Yurekli, F., Kilicaslan, S., “Investigation of Biochemical Effects of Nano-Silicon Dioxide (SiO₂) on Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Plants”, The FASEB Journal 33 (1_supplement), 486.11-486.11