

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YORGUN VE YORGUN OLMAYAN TOPRAKTA YETİŞTİRİLEN MISIR
BİTKİSİNİN FOSFOR ETKİNLİĞİNE NANO SİLİSYUMUN ETKİSİ

Okan KARABOYA

TOPRAK BİLİMİ VE BESLEME ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YORGUN VE YORGUN OLMAYAN TOPRAKTA YETİŞTİRİLEN MISIR BİTKİSİNİN FOSFOR ETKİNLİĞİNE NANO SİLİSYUMUN ETKİSİ

Okan KARABOYA

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aydın GÜNEŞ

Bu çalışmada çeltik kavuzundan elde edilen nano silisyum (Nano-Si)'nin mısır (*Zea Mays* L. Cv. pioneer) bitkisinin fosfor (P) kullanım etkinliği (PKE) üzerine etkisi araştırılmıştır. Denemede uzun yıllar yetiştiricilik yapılmayan bir araziden (yorgun olmayan toprak) ve son iki yetiştirme döneminde yonca tarımı yapılan araziden olmak (yorgun toprak) üzere iki farklı toprak kullanılmıştır. Fosfor uygulamaları 0, 20 ve 80 mg P kg⁻¹ olacak şekilde TSP (%44 P₂O₅) gübresinden, silisyum (Si) uygulamaları ise 0 ve 250 mg Si kg⁻¹ olacak şekilde Nano-Si ve sodyum silikat kaynaklarından uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Nano-Si'nin mısır bitkisindeki fosfor kullanım etkinliğini artırdığını göstermektedir. Silisyum uygulamalarının, bitkinin gelişimini ve P, Si element içeriklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, P ve Si uygulamalarının etkileşimi bitki verim parametreleri üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, Nano-Si' nin mısır yetiştiriciliğinde fosfor kullanım etkinliğini artırabileceğini ve uygun besleme stratejileriyle bitki gelişim performansını iyileştirebileceğini göstermektedir.

Eylül 2023, 58 sayfa

Anahtar Kelimeler: Nano silisyum, fosfor kullanım etkinliği, mısır, çeltik kavuzu

ABSTRACT

Ms.C. Thesis

THE EFFECT OF NANO-SILICON ON PHOSPHORUS EFFICIENCY OF MAIZE PLANT GROWN IN EXHOUSTED AND NON-EXHOUSTED SOIL

Okan KARABOYA

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Soil Science and Plant Nutrition

Supervisor: Prof. Dr. Aydın GÜNEŞ

This study investigated the effect of nano silicon (Nano-Si) derived from rice husk on the phosphorus use efficiency (PKE) of maize (*Zea Mays* L. Cv. pioneer) plants. Two types of soil were used in the experiment: non-cultivated soil from an area where farming has not been practiced for many years (non-exhausted soil), and soil previously used for alfalfa cultivation in the last two growing seasons (exhausted soil). Phosphorus applications were made at rates of 0, 20, and 80 mg P kg⁻¹ using TSP fertilizer (%44 P₂O₅), while silicon (Si) applications were made at rates of 0 and 250 mg Si kg⁻¹ using Nano-Si and sodium silicate sources. The results showed that Nano-Si enhanced phosphorus use efficiency in maize plants. Silicon applications were found to positively influence plant growth and mineral element contents. Furthermore, the interaction between P and Si applications had a more pronounced positive effect on plant yield parameters. These findings suggest that nano silicon can enhance phosphorus use efficiency in maize cultivation and improve plant growth performance with appropriate nutrient management strategies.

September 2023, 58 pages

Keywords: Nano silicon, phosphorus use efficiency, maize, rice husk

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarım süresince çalışmalarımı olgunlaştıran, yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Aydın GÜNEŞ'e (Ankara Üniversitesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Başkanı) sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sera denemelerinin kurulmasında ve yürütülmesinde büyük yardımlarını gördüğüm, analizlerin yapılmasında ve tezimin yazım esnasında her zaman yanımda olan bilgi, öneri ve tecrübelerini benimle paylaşan, değerli hocalarım Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Burak TAŞKIN'a (Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü) ve Arş. Gör. Dr. Hanife AKÇA'ya (Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü) teşekkürlerimi sunarım. Tezimin yürütülmesinde, analizlerin yapılmasında destekleriyle yanımda olan değerli arkadaşlarım Yüksek Ziraat Mühendisi Burak KABAL, Yüksek Ziraat Mühendisi Göksu GÖNÇ ve Yüksek Ziraat Mühendisi Şevval ÖZTÜRK'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca bölüm öğretim görevlilerine, bölüm çalışanlarına, stajyer öğrenci arkadaşlarıma yardımlarından dolayı içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte maddi ve manevi yanımda olan değerli aileme teşekkürler ederim.

Okan KARABOYA
Ankara, Eylül 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	12
3.1 Materyal	12
3.1.1 Nano silisyumun elde edilmesi	12
3.1.2 Toprak örneklerinin alınması ve analize hazırlanması	13
3.2 Yöntem	13
3.2.1 Toprak örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal analizlerinde kullanılan yöntemler	13
3.2.1.1 Tekstür	13
3.2.1.2 Toprak reaksiyonu (pH)	14
3.2.1.3 Elektriksel iletkenlik (EC).....	14
3.2.1.4 Organik madde.....	14
3.2.1.5 Kireç	14
3.2.1.6 Toplam azot	14
3.2.1.7 Toprakta yarayırlı fosfor	14
3.2.1.8 Toprakta bitkiye yarayırlı silisyum	15
3.2.2 Denemede kullanılan toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	15
3.3 Sera Denemesi.....	16
3.3.1 Bitkilerin örnekleme, hasadı, analize hazırlanması ve yapılan analizler	17
3.3.1.1 Toplam fosfor konsantrasyonunun belirlenmesi	18
3.3.1.2 Toplam çinko ve demir konsantrasyonunun belirlenmesi	18
3.3.1.3 Toplam silisyum konsantrasyonunun belirlenmesi	18

3.3.1.4 Bitkide fosfor kullanım etkinliği (PKE)	19
3.3.1.5 Toplam klorofil konsantrasyonu	19
3.3.1.6 İstatistiksel analizler	19
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	20
4.1 Nano Silisyumun Karakteristik Özellikleri	20
4.2 Bulgular.....	22
4.2.1 Uygulamaların bitki yaş ve kuru ağırlığına etkileri.....	22
4.2.2 Uygulamaların bitki toplam fosfor konsantrasyonuna etkileri	27
4.2.3 Uygulamaların bitkinin toplam silisyum konsantrasyonuna etkileri.....	30
4.2.4 Uygulamaların bitkinin toplam çinko konsantrasyonuna etkileri	32
4.2.5 Uygulamaların bitkinin toplam demir konsantrasyonuna etkileri	34
4.2.6 Uygulamaların bitkinin klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil konsantrasyonuna etkileri	36
4.2.7 Uygulamalarının bitki fosfor kullanım etkinliğine (PKE) etkisi	39
4.2.8 Bitki hasadı sonrası saksı toprağında yarayışlı silisyum konsantrasyonu.....	40
4.2.9 Bitki hasadı sonrası saksı toprağında yarayışlı fosfor konsantrasyonu.....	42
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	44
KAYNAKLAR	50

SİMGELER DİZİNİ

°C	Santigrat derece
Al	Alüminyum
B	Bor
C ₄ H ₆ O ₆	Tartarik Asit
Ca	Kalsiyum
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
CaSiO ₃	Wollastonit
CaSiO ₄	Kalsiyum Silikat
Ca ₃ (PO ₄) ₂	Kalsiyum Sülfat
Cd	Kadmiyum
cm	Santimetre
Cl	Klor
Cu	Bakır
Fe	Demir
g	Gram
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
H ₃ SiO ₄	Trihidrojen Ortosilikat
ha	Hektar
HCl	Hidroklorik Asit
HF	Hidrojen Florür
HPO ₄ ⁻²	Hidrojen Fosfat
K ₂ O	Potasyum Oksit
kg	Kilogram
L	Litre
m	Metre
mM	Milimol
KH ₂ PO ₄	Potasyum Fosfat
M	Molarite
mg	Miligram
mm	Milimetre
Mn	Mangan
N	Azot
Na	Sodyum
NaHCO ₃	Sodyum Bikarbonat
NaSiO ₃	Sodyum Silikat
nm	Nanometre
P	Fosfor
P ₂ O ₅	Fosfor Pentaoksit
Pb	Kurşun
Si	Silisyum
Si(OH) ₄	Silisik Asit
SiO ₂	Silisyum Dioksit
TSP	Triple Süperfosfat
Zn	Çinko

μS	Mikrosiemens
pH	Hidrojen İyonu Konsantrasyonu
%	Yüzde

Kısaltmalar

AA	Antioksidan Aktivitesi
ADP	Adenozin Difosfat
AP	Askorbat Peroksit
ATP	Adenozin Trifosfat
KAT	Katalaz
ICP-OES	İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi
MDA	Malondialdehit
NAD	Nikotinamid Adenin Dinükleotit
NADH	Nikotinamid Adenin Dinükleotit + Hidrojen
Nano-Si	Nano Silisyum
OM	Organik Madde
PKE	Fosfor Kullanım Etkinliği
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SOD	Süperoksit Dismutaz
XRD	X-Işını kırınım cihazı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Çeltik kavuzu ve çeltik kavuzundan elde edilmiş Nano-Si.....	12
Şekil 3.2 Uygulanacak gübreler ve materyallerin tartımı ve sınıflandırılması (a), Materyallerin toprağa homojen şekilde karıştırılmasının sağlanması (b)	16
Şekil 4.1 Nano silisyumun SEM görüntüsü	20
Şekil 4.2 Nano silisyumun EDX görüntüsü ve içerdiği element konsantrasyonları (%) .	21
Şekil 4.3 Nano silisyumun XRD diyagramı	21
Şekil 4.4 Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol ve Nano-Si karşılaştırması	23
Şekil 4.5 Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol ve Na-Silikat karşılaştırması	24
Şekil 4.6 Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi Si kaynaklarının etkisinin karşılaştırılması.....	24
Şekil 4.7 Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol ve Nano-Si karşılaştırması	26
Şekil 4.8 Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol ve Na-Silikat karşılaştırması	26
Şekil 4.9 Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin Si kaynaklarının etkisinin karşılaştırılması	27

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Denemede kullanılan toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait analiz sonuçları.....	15
Çizelge 3.2 Deneme Planı	17
Çizelge 4.1 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin yaş ve kuru ağırlıklarına etkisi.....	22
Çizelge 4.2 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin yaş ve kuru ağırlıklarına etkisi	25
Çizelge 4.3 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam P konsantrasyonuna etkisi.....	28
Çizelge 4.4 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam P konsantrasyonuna etkisi	29
Çizelge 4.5 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Si konsantrasyonuna etkisi	30
Çizelge 4.6 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Si konsantrasyonuna etkisi.....	31
Çizelge 4.7 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Zn konsantrasyonuna etkisi	32
Çizelge 4.8 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Zn konsantrasyonuna etkisi.....	33
Çizelge 4.9 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Fe konsantrasyonuna etkisi.....	34
Çizelge 4.10 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Fe konsantrasyonuna etkisi.....	35
Çizelge 4.11 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin klorofil a ve klorofil b konsantrasyonu üzerine etkisi	37
Çizelge 4.12 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin klorofil a, klorofil b, toplam klorofil içeriklerine etkisi	38
Çizelge 4.13 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan ve yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin fosfor kullanım etkinliğine etkisi.....	39

Çizelge 4.14 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağındaki yarayışlı Si konsantrasyonuna etkisi	40
Çizelge 4.15 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağındaki yarayışlı Si konsantrasyonuna etkisi	41
Çizelge 4.16 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağındaki yarayışlı P konsantrasyonuna etkisi	42
Çizelge 4.17 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağındaki yarayışlı P konsantrasyonuna etkisi.....	43



1. GİRİŞ

Bugünkü dünya nüfusunun yaklaşık olarak 7.96 milyar olduğu, bu sayının 2050 yılında 9.9 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Anonymous 2022). Nüfustaki bu artış beslenme, üretim ve enerjiye olan talep artışını da beraberinde getirecektir. Bu talepleri karşılayabilmek için tarımsal üretimin artırılması gerekmektedir. Bu amaçla tarımsal üretimin en önemli kaynağı olan toprak; işleme, gübreleme, sulama ve toprak kökenli hastalıkları önleyici uygulamalar gibi tedbirlerle verimli hale getirilmeye çalışılmaktadır. Bitkiler tarafından kaldırılan besin elementlerinin toprağa ilavesi, bitkisel üretim ve ürün kalitesinin arttırılabilmesi için ise, gübreleme yapmak zorunlu hale gelmiştir.

Yirminci yüzyılda başlayan tarımda kimyasal gübre kullanımı günümüze kadar giderek artış göstermiştir. Ancak, toprak analizi yapılmadan ihtiyaçtan fazla uygulanan kimyasal gübreler toprakta tuzlulaşma, ağır metal birikmesi, besin elementleri arasındaki dengenin bozulması, mikroorganizma popülasyonu ve aktivitesinin zarar görmesi, sularda nitrat birikmesi ve ötrofikasyon oluşumu gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır (Sönmez vd. 2008).

Yanlış kimyasal gübre uygulanması ile toprakların pH dengesi bozulmakta ve asitlik oranı artmakta, fosfor (P), kalsiyum (Ca) gibi bazı besin elementlerinin bitkiler tarafından alınması engellenmekte, bitkilerde noksanlık ve gelişmede gerileme görülmektedir (Bellitürk 2011). Diğer yandan, asit reaksiyonlu topraklarda pH'yı yükseltmek için uygulanan fazla miktarda kireç ve kireçli gübreler topraktaki besin elementi dengesini bozmakta; P, bor (B), demir (Fe), çinko (Zn) ve bakır (Cu) gibi elementlerin absorbe edilmesine neden olmaktadır. Bu olay bir yandan topraktaki besin elementi dengesinin bozulmasına sebep olurken, bir yandan da fikse edilen elementlerin noksanlığını gidermek üzere ilave gübreleme yapılmasına neden olmaktadır. Özellikle, fazla miktarda uygulanan P'li gübreler, toprakta mevcut olan Ca ile birlikte Zn ve Fe'nin bitkiler tarafından alınımını engelleyerek besin elementi dengesini bozmaktadırlar (Bilen ve Sezen 1993, Gunes vd. 2007).

Fosfor bitkilerde optimum büyüme ve gelişme için mutlak gerekli olan makro besin elementlerinden ikincisi olup, bitki kuru ağırlığının yaklaşık %0.2'sini oluşturmakta ve bitkide cereyan eden fizyolojik ve biyokimyasal reaksiyonda (ATP üretimi, nükleik asit sentezi, fotosentez) görev almaktadır (Theodorou ve Plaxton, 1993). Bitkiler P'yi temelde fosfat anyonu şeklinde alırlar. Fosfat iyonları bitkilerce pH 6'dan düşük asit karakterli topraklarda primer ortofosfat ($H_2PO_4^-$), pH 7'den yüksek alkalın topraklarda ise sekonder ortofosfat (HPO_4^{2-}) anyonları formunda alırlar (Marschner vd. 1990, Mengel ve Kirkby 2001).

Fosfor bitki bünyesindeki proteinler, enzimler, koenzimler, nükleik asitler ve fosfolipitlerin önemli yapısal bileşenidir. Fotosentez ve solunumda gerekli olan NAD, NADH, ADP ve ATP gibi P içeren enerjice zengin bileşiklerin sentezinde mutlak bir elementtir ve enerjice zengin köprüler (pirifosfat bağları) sayesinde protein sentezi de dahil enerji gerektiren sayısız fizyolojik olayda rol alır. Bitkiler nükleik asit olmaksızın tohum ve meyve bağlayamaz ve yeniden üreyemezler. Fotosentezde şeker ve nişasta üretimi ve solunumda şeker ve nişastanın oksidasyonu ile enerji üretimi sağlar. Fosfor bitkilerde çiçeklenme, tohum bağlama, erken büyüme ve kök oluşumunu teşvik eder, olgunlaşmayı hızlandırır ve tohum/meyve üretimini artırır (Marschner vd. 1990, Mengel ve Kirkby 2001).

Bitki gelişimi açısından bu denli önemli bir besin elementi olan P'ye olan gereksinim geliştirilen hibrit çeşitler nedeniyle gün geçtikçe artmaktadır. Dünyada P'li gübre talebi (P_2O_5 cinsinden) 2022 yılı için 49.096.000 ton olarak belirlenmiştir (Anonymous 2022). Türkiye'de ise P'li gübre tüketiminin 2022 yılı için 3.550.343 ton olduğu belirlenmiştir (Anonim 2022, Anonim 2023).

Yukarıdaki verilerde görüldüğü gibi P'li gübre tüketimi artmakta fakat tüketilen P'nin %80-85'i topraklarda adsorbsiyon, çökeltme veya organik bileşikler oluşturarak bitkilerin alamayacağı forma dönüşmektedir (İbrikci vd. 2005, Korkmaz vd. 2010, Kılıç ve Korkmaz 2012). Bu nedenle P yarıyışlılığını artırabilecek uygulamalara gereksinim duyulmaktadır. Silisyum uygulaması ile P yarıyışlılığının arttığı bildirilmiştir (Jianfeng ve Takahashi 1991).

Silisyum yerkabuğunda %27.7 oranında bulunmakta ve miktar bakımından oksijenden sonra ikinci sırada yer almaktadır (Kim vd. 2002). Toprakta bol olmasına rağmen, Si hiçbir zaman elementel olarak tek başına bitki formunda bulunmaz ve her zaman diğer elementlerle birleşerek, genellikle oksitler veya silikatlar oluşturur. Silisyum bitkiler tarafından silisik asit $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ şeklinde absorbe edilir ve amorf silika olarak bitkiye yararlı olmayan şekilde çökelir (Ranganathan vd. 2006).

Transpirasyon sonucu yapraklarda taşınan $\text{Si}(\text{OH})_4$, pektin ve Ca^{++} iyonlarıyla birleşerek silisyum-selüloz membran tabakası oluşturur. Bu membran tabakası, amorf silika jel olarak bilinen opal yapısında ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{nH}_2\text{O}$) polimerize olur ve bitki epidermal dokularında depolanır (Savant vd.1997, Ma 2003).

Bitkilerde Si içeriğinin, %0.1 ile %10 arasında değiştiği ve bunun farklı Si alım mekanizmalarına bağlı olduğu ifade edilmektedir. Bitkilerde çözünmüş Si'nin mono silik asit şeklinde absorbe edildiği ve bazı metallerle birikme kapasitesine sahip bitkilerde, farklı Si taşıyıcı genlerin Si'nin taşınmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir (Rao ve Susmitha 2017).

Silisyum bazı bitkilerde yüksek konsantrasyonda bulunmasına karşı aktif absorpsiyonla alındığı gibi pasif absorpsiyonla da alınabilmektedir (Hodson ve Evans 1995, Savant vd. 1997). Çeltik gibi Si ihtiyacı fazla olan bitki köklerinde toprak çözeltisinde bulunan Si'den ($0.1\text{-}1.6 \text{ kg Si ha}^{-1}$) daha fazla Si bulunması, bu bitkilerin Si'ye özel taşıyıcı proteinlere sahip olduklarını ve Si'nin aktif olarak alındığını göstermektedir (Takahashi 1995). Silisyum ihtiyacı düşük olan bitkilerin ise Si'yi pasif absorpsiyonla aldıkları kabul edilmektedir (Epstein 1994). Pasif absorpsiyonla alınan mono silisik asit formundaki Si, kök hücre membranlarını geçerek yaprak ve sürgünlere transpirasyon akımı ile taşınmaktadır.

Yüksek sıcaklık, kuraklık gibi abiyotik stres şartlarında kök, yaprak veya kavuzda biriken Si, silis asidi şeklinde polimerize olarak transpirasyonu azaltıp su stresini önlemektedir. Toprak çözeltisinde Si; Al, Fe, Mn, Cd, Pb kompleksleri oluşturarak olası ağır metal toksisitesini azaltmaktadır. Bu nedenle, bitkilerde Si birikiminin artırılması,

çevresel stres koşullarına karşı daha iyi bir dayanıklılık sağlayabilir ve toksinlere karşı daha fazla koruma sunabilir. Bor toksisitesi ve tuzluluk durumunda Si uygulaması ile domates ve ıspanak bitkilerinin sürgünlerinde B, Na ve Cl birikiminin önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir (Gunes vd. 2007b). Son yıllarda bitkilerin gelişim ve fonksiyonları üzerine Si elementinin direkt veya indirekt olumlu etkilerinden dolayı dünyada Si'ye artan bir ilgi oluşmuştur. Silisyumun özellikle uygun olmayan iklim şartlarında aşırı sıcaklık ve kuraklık stresi, mineral toksisitesi, yıpranmaya karşı dayanıklılık gibi abiyotik; bitki hastalıkları ve böcek zararlıları gibi biyotik streslere karşı bitkiyi koruyan ve gelişimini artıran potansiyel etkilere sahip olduğu bildirilmiştir (Sistani vd. 1997, Ma 2004). Bununla birlikte Si kaynaklarının hem pahalı olması hem de çözünürlüklerinin zayıf olması P etkinliğini artıracak yeni stratejileri zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla kullanılabilecek yeni nesil stratejilerden birisi nano teknolojili gübrelerdir.

Ülkemizde gübre kullanımını sınırlandıran en önemli faktörlerin başında su kıtlığı gelmektedir ve bu nedenle işlenen tarım arazilerimizin %82'sinde kuru tarım yapılmaktadır. Gübreler (besin maddeleri) bitki kök bölgesine su ile taşınıp alındığından, yetersiz su varlığında bitkilerce besin elementi alımı ve tarımsal üretim düşer. Bu nedenle sulanabilen alanlarda su ve gübre tüketimi daha yüksek olan bitkiler yetiştirilir. Doğada oksijenden sonra en fazla bulunan element olan Si mutlak gerekli bir element olmadığından ve doğada da bol olduğu düşüncesiyle bitkilerin Si ile gübrenmesi göz ardı edilmektedir.

Ürün verimini artırmak, çevre sorunlarını azaltmak, sürdürülebilir tarım ve çevre için yeni teknolojilerden yararlanarak yenilikçi, etkili gübrelerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Nanoteknoloji birçok alanda yenilikçi fırsatlar sunarken, özellikle gıda ve tarımda nano materyallerin kullanımı artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak, birim alandan en az girdi ile en fazla ve en kaliteli ürün elde etmek açısından son derece önemlidir. Çünkü ekilebilir tarım arazilerinin ve su kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle tarım sektörünün gelişmesi, modern teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılarak eldeki kaynakların en az zararla kullanım etkinliğinin artırılması ile mümkündür. Modern teknolojiler arasında yer alan nanoteknoloji; tarım sistemleri,

biyomedikal, çevre mühendisliği, enerji dönüşümü ve diğer birçok alanda devrim potansiyeline sahiptir (Naderi ve Danesh-Shahraki 2013, Singh vd. 2017).

Nanoteknolojinin tarım sektöründe kullanımının önemine değinirken, aynı zamanda kimyasal gübrelerin ve pestisitlerin kullanımının da birçok olumsuz etkiye yol açtığına dikkat çekilmiştir. Bu nedenle, nanoteknoloji gibi modern teknolojik gelişmeler, tarımsal üretimde verimliliği artırmak ve aynı zamanda çevreyi korumak için bir çözüm olarak görülmektedir. Bu sayede, tarımsal üretim daha sürdürülebilir bir hale gelebilir ve insan sağlığına zarar vermeden daha fazla verim elde edilebilir. Yenilikçi bir bilim dalı olan nanoteknolojinin, gelecekte tarımsal üretim alanında önemli bir role sahip olacağı düşünülmektedir. Çünkü bu teknoloji ile üretilen nano gübrelerin kullanımı büyük bir hızla olmasa da her geçen gün artmaktadır.

Boyutları nedeniyle nanoteknolojiyle üretilen gübrelerde bulunan besin maddelerinin kök hücreleri ile yaprak kütikulasından girişi ve bitkide kısa ve uzun mesafe taşınimleri kolay olmaktadır. Geleneksel boyutlu gübrelerde olduğu gibi nanoteknolojik gübrelerdeki iyonların bitkiye girişine de hücre duvarı engel oluşturmaktadır. Hücre duvarlarındaki boşluk çaplarının 5-20 nm arasında değiştiği belirlenmiştir (Fleischer vd. 1999). Bu durumda bu çaptan küçük olan maddeler kolaylıkla ve hiçbir zorlukla karşılaşmadan hücre duvarından geçerek plazma membranına ulaşabilmektedir. Nanoteknolojinin tarıma uygulanması bunu sağlamaya olanak vermek suretiyle gübrelerin daha etkin, ekonomik ve az kullanımını sağlayacak bir teknolojidir. Nano boyutlu P kaynağı olan nano-hidroksiapatitin kullanımı ile geleneksel P'li gübrelere göre marul bitkisinde verimde artışlar sağlanabileceği bildirilmiştir (Taskin vd. 2018).

Nano-Si, modern tarımda geniş avantajlarıyla bilinmektedir (Torney vd. 2007). Nano-Si'nin geleneksel Si'li gübrelere göre bitki büyüme ve gelişimi dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda daha yüksek verimlilik sağladığı belirtilmiştir (Rastogi vd. 2019). Nano-Si'nin büyük yüzey alanı, biyoyumlu, kimyasal stabilite gibi benzersiz ve ayarlanabilir fizikokimyasal özellikleri nedeniyle, abiyotik ve biyotik streslere karşı bitkinin korunmasını sağladığı ve bitki verimini artırdığı kanıtlanmıştır (Chen vd. 2013, Rasouli vd. 2014, Dinker ve Kulkarni 2015).

Küresel parçacıklardan oluşan ve gözeneksiz olan Nano-Si (Plumere vd. 2012), bitki hücre duvarı dayanıklılığını artırması, besin alımını dengede tutması, fitohormon ve enzim sentezini uyarması, patojen savunmasıyla ilgili genlerin aktive edilmesi ve bitki direncini, büyümesini artırdığı bildirilmiştir (Elsharkawy ve Mousa 2015, Alsaeedi vd. 2017, Alsaeedi vd. 2019, El-Shetehy vd. 2021, Cui vd. 2020). Öte yandan, nano ölçekli gözeneklere sahip olan nanoporöz Nano-Si, bitkilere aktif bileşenlerin kontrollü bir şekilde taşınması için mükemmel taşıyıcılar olarak kabul edilir ve bu sayede minimum ürün kaybı ve toprak hasarı ile daha spesifik bir etki sağlar (Wanyika vd. 2012, Cao vd. 2016). Nano-Si, bambu, çeltik kavuzu, şeker pancarı posası, mısır sapı gibi çeşitli atık kaynaklardan sentezlenebilir (Snehal vd. 2018, Mor vd. 2017, Adebisi vd. 2020, Adebisi vd. 2021).

Yukarıdaki bilgilerde görüldüğü üzere dünya gübre tüketimi yıllar geçtikçe artmaktadır. Bu durum zamanla gübre kaynaklarının tükenmesine ve tarımsal üretimin azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle kaynakları tükenmeyle yüz yüze kalan fosforlu gübrelerin etkin kullanımı sağlanmalıdır.

Bu tez çalışmasında öncelikle bertarafı zor bir atık olan çeltik kavuzundan elde edilmiş olan Nano-Si'nin mısır yetiştiriciliğinde konvansiyonel Si'li gübrelere alternatif olabilme potansiyeli araştırılmıştır. Diğer taraftan elde edilen bu materyalin uzun yıllar boyunca kuru ve sulı tarım yapılmış alanlardan alınan topraklarda yetiştirilecek mısır bitkisine uygulanmasıyla Si uygulamalarının gerekliliği ve P kullanım etkinliği üzerine etkisi de sera koşullarında test edilmiş ve bitki verimi üzerine olumlu etki yaptığı belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Fosfor N'nin ardından bitki büyümesi ve gelişimi için en önemli ikinci makro besin elementidir (Pereira ve Castro 2014). Ancak, bu elementin büyük bir kısmı, alkalın topraklarda Ca ile asidik topraklarda ise Al, Fe ve Mn ile bağlanarak bitki tarafından alınamaz hale gelmektedir. (Lavakush Yadava vd. 2014, Pereira ve Castro 2014). Bu nedenle tarımda çiftçiler yoğun kimyasal girdi tüketimine yönelmektedir. Bu gübrelerin tarımsal topraklarda kullanımının artması, çevresel tehlikelere yol açmaktadır (Bakhshandeh vd. 2015).

Fosfor, toprak minerallerine bağlandığında, yüksek silisyum içeren kil mineralleriyle olan etkileşimi diğer elementlere (kalsiyum (Ca), demir (Fe), alüminyum (Al), mangam (Mn)) göre daha düşüktür. (Brady ve Weil 1999, Rajan 1975). Topraklardaki Si fraksiyonları; toprak çözeltisinde çözünmüş Si (toprak çözeltisinde serbest veya Fe veya Al oksitlerine/hidroksitlere adsorbe edilmiş), amorf formlar (biyojenik fitolitler veya minerojenik silika nodülleri), düşük kristalli formlar (ikincil kuvars) ve kristalli formlardan (mika, feldspat veya kuvars gibi birincil silikatlar ve ikincil silikatlar olarak kil mineralleri) oluşur (Sauer vd. 2006).

Kimyasal fosfor gübrelerinin Ca, Al, Fe elementleriyle etkileşime girerek bitkiler tarafından yararlanılamaz forma dönüşmesi probleminde kullanılacak çözümler içerisinde özellikle nano-silisyum gibi etkili Si'li gübre kaynaklarının uygulanması yer almaktadır. Silisyum, oksijenden sonra yer kabuğundaki en yaygın ikinci elementtir (Sommer vd. 2006). Silisyum, bitkiler için temel bir besin madde olarak kabul edilmediğinden uzun süre araştırmacılar tarafından ihmal edilmiştir. Ancak, son yıllarda yapılan araştırmalar, çeltik, buğday ve arpa gibi önemli tarım ürünleri de dahil olmak üzere birçok bitkinin büyümesi için faydalı olduğunu göstermiştir (Sommer vd. 2006). Silisyum, Al, Fe, Ca, Mn ile birleşerek P'nin bitki tarafından yararlanılamaz bileşiklere dönüşmesini önlerken, bitkinin P alımını artırıp, bitkinin biyotik ve abiyotik streslere karşı savunmasını artırmaktadır (Reynolds vd. 2016).

Dobermann ve Fairhurst (2000) tarafından yapılan çalışmada; silisyumun asidik topraklarda Fe ve Al'a bağlanarak toprağın Fe ve Al aktivitesinin azalmasına yol açtığı, fosfatların Fe ve Al fosfatlar şeklinde çözünemez forma dönüşmesini önlemesiyle de toprakların yararışlı P konsantrasyonunu artırdığını bildirilmiştir.

Gao vd. (2005) mısır bitkisine 0 mmol Si L⁻¹ ve 2 mmol Si L⁻¹ uygulamışlardır. Uygulama sonucunda mısır bitkisinin yaş ve kuru ağırlığında Si uygulamasının istatistiksel olarak bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Owino-Gerroh ve Gascho (2005) 1.5 kg'lık saksılarda Mısır (*Zea mays* L. cv. Golden Acres 7885) bitkisine 4 farklı dozda (0, 1.96, 3.92, 5.88 mg) Si'yi wollastonit (CaSiO₃) kaynağından ve 3 farklı dozda P (0, 0.1, 0.2, ve 0.3 g) KH₂PO₄ kaynağından uygulanmışlardır. Sonuçta, silisyumlu uygulamalar sonucu bitki sürgün ve kök kuru ağırlıklarında artış belirtilmiştir. En fazla artış 3.92 mg Si saksı⁻¹ dozunda olduğunu, Si ve P arasında pozitif bir ilişkinin olduğunu ortaya koymuşlardır.

Gunes vd. (2007c) tarafından Si'nin kuraklık stresi altında yetiştirilen nohut çeşitlerinde etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, Si uygulanmamış bitkilere göre Si uygulanmış bitkilerde gelişimin daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Toprağa 100 mg kg⁻¹ dozunda uygulanan Si'nin nohut çeşitlerinde Si konsantrasyonunu artırdığı ve 10 nohut çeşidinden beşinde kuraklık zararını azalttığı belirlenmiştir. Test edilen çeşitlerin çoğunda stres durumlarında artan parametrelerden bazıları (H₂O₂, prolin ve MDA içerikleri) Si uygulaması ile düşerken, çeşitlerin enzimatik olmayan antioksidan aktivitesinin arttığı belirlenmiştir.

Eraslan vd. (2008) kuraklık stresi altında yetiştirilen 12 ayçiçeği çeşidine uygulanan Si'nin etkisinin fizyolojik parametrelerden SOD (süperoksit dismutaz), KAT (katalaz), AP (askorbat peroksit), AA (antioksidan aktivitesi), stoma direnci, toplam klorofil, antosiyanin içeriği, membran geçirgenliği, lipid peroksidasyonu, prolin konsantrasyonu ve Si, B, Na ve Cl elementlerinin içeriği üzerine etkileri de incelenmiştir. Çalışma sonucunda araştırmacılar; Si' nin kontrole göre kuraklığın bitkilerde yarattığı oksidatif zararları hafiflettiğini, membran hasarını da azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca

bitkideki B, Cl, Na içeriğinin Si uygulamasıyla azaltılabileceği ve toksik etkilerin elimine edilebileceği belirtilmiştir.

Bocharnikova vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli Si gübrelerinin fosfor etkinliğine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, mono silisik asit çözeltisi, sıvı silisyum-humik gübre karışımı Si kaynağı olarak kullanılmıştır. Histosol toprakta yetiştirilen çeltik (*Oryza sativa* L.) bitkisine 150 mg mono silisik asit L⁻¹ uygulanmış, 1, 2 ve 2.5 ay sonra üç kez daha 150 mg mono silisik asit L⁻¹ uygulanmıştır. Çernezyom toprakta yetiştirilen buğday (*Triticum aestivum* L.) bitkisine mono silisik asit konsantrasyonu 200 mg mono silisik asit L⁻¹ ve humatlar %2 karışımından 500 L ha⁻¹ uygulanmıştır. Sonuçlar Si uygulamalarının toprakta Fe, Al ve Ca ile bileşik oluşturmuş olan P'nin yararışlı forma dönüşmesine olanak sağlayabileceğini ve Si uygulamasının geleneksel P'li gübrelerin etkinlik oranını %30-50 civarında artırabileceğini bildirmişlerdir.

Siddiqui ve Al-Whaibi (2014) tarafından yapılan bir çalışmada; çeşitli dozlarda sırasıyla 0, 2, 4, 6, 8,10, 12, 14 g L⁻¹ nano SiO₂ uygulamasının domates (*L. Esculentum* Mill. cv. Super Strain B) bitkisinin çimlenmesini artırdığı, ortalama çimlenme süresini hızlandırdığı, tohum çimlenme indeksi, tohum canlılık indeksi, fide yaş ağırlığı ve kuru ağırlık parametrelerini artırarak verim ve büyümeyi sağladığını ve en yüksek artışın 8 g L⁻¹ uygulamasında olduğunu 10, 12 ve 14 g L⁻¹ uygulamalarında artışın aksine kök uzunluklarında kısaltmaların olduğunu bildirmişlerdir.

Suriyaprabha vd. (2014) yaptıkları bir çalışmada; mısır (*Zea mays* L. TIP TOP) bitkisine nano ve geleneksel formda (15 g L⁻¹) hazırlanmış gübre solüsyonu ile yapraktan Si uygulaması yapmışlar ve uygulama sonucunda geleneksel kaynağa göre Nano-Si'li uygulamanın; klorofil a ve b içeriğini artırdığı, kök gelişimini pozitif yönde etkilediği bildirmişlerdir

Disfani vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada; Fe ve SiO₂ nano gübrelerinin arpa ve mısır bitkisinde tohum çimlenmesine etkisi incelenmiştir. 15 mg kg⁻¹ düzeyinde

uygulanan Fe ve SiO₂ nano gübreleri çimlenme üzerine olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir.

Kostic vd. (2017) tarafından yapılan bir tarla denemesinde 400 mg Si kg⁻¹ oranını sağlayacak şekilde NaSiO₃ kaynağından tarla koşullarında 600 kg Si ha⁻¹ ve 70 mg P kg⁻¹ oranını sağlayacak şekilde KH₂PO₄'tan tarla koşullarında 100 kg P ha⁻¹ uygulanmıştır. Bu uygulamanın buğday bitkisi üzerinde P içeriğini ve bitki biyokütlesini artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Si uygulaması ile toprakta yarayışlı P konsantrasyonunun arttığı ve bitkiler tarafından kullanılabilecek P olanağının da arttığını bildirmişlerdir.

Prakash vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada; alkalın topraklarda Si'nin Ca tarafından adsorbe edilmesiyle CaSiO₄ oluştuğu, bu durumun topraktaki P'nin Ca₃(PO₄)₂ şeklinde çökmesini önleyerek topraktaki yarayışlı P konsantrasyonunu artırdığını belirtmişlerdir.

Schaller vd. (2019) yaptıkları çalışmada; arktik bölgede tarım yapılmayan alanda homojen özelliklerde 143 toprak örneği alınmış, Si uygulamalarının bu topraklarda P'nin, Fe ve Ca ile çökelek oluşturmalarını engellediğini, bu şekilde toprakta P'nin bitkiye yarayışlı formda kaldığını bildirmişlerdir.

Zhang vd. (2019) hidroponik ortamda (Japon Yamazaki besin çözeltisi) domates (*Solanum lycopersicum* cv. Zhong Za "No. 9") bitkisine 0.44 mM (düşük P), 0.66 mM (normal P) ve 0.44 mM P + 1.5 mM Si uygulamışlardır. Silisyum kaynağı olarak K₂SiO₃ (potasyum silikat), P kaynağı olarak NaH₂PO₄ (monosodyum fosfat) kullanmışlardır. Silisyumlu P (0.44 mM P + 1.5 mM Si) uygulaması ile P etkinliğinin arttığı, bu artışa bağlı bitkinin kök alanının, kök yüzeyinin, kök ağırlığının, kök uzunluğunun, kök hacmi ve sürgün ağırlığının da arttığını belirtmişlerdir.

Taskin vd. (2022), buğday (*Triticum aestivum* L. cv. Bezostaja) ve marul (*Lactuca sativa* L. cv. Maritima) bitkilerinde farklı Si konsantrasyonuna sahip asitle modifiye

edilmiş çeltik kavuzu (MHR) ve çeltik kavuzundan elde edilmiş Nano-Si'nin P kullanım etkinliğini belirlemişlerdir. Bu çalışma için araştırmacılar buğday bitkisine; T1(Kontrol)- P0 (0 mg Si kg⁻¹ ve 0 mg P kg⁻¹), T2- P100 (100 mg P kg⁻¹), T3- MRH + P100 (200 mg Si kg⁻¹ + MRH +100 mg P kg⁻¹), T4- Nano Si + P100 (200 mg Si kg⁻¹ + Nano Si + 100 mg P kg⁻¹) bu uygulamaları yapmışlardır. Marul bitkisine ise; T1(Kontrol)- P0 (0 mg Si kg⁻¹ ve 0 mg P kg⁻¹), T2- P200 (200 mg P kg⁻¹), T3- MRH + P200 (200 mg Si kg⁻¹ + MRH +200 mg P kg⁻¹), T4- Nano Si + P200 (200 mg Si kg⁻¹ + Nano Si + 200 mg P kg⁻¹) uygulamalarını yapmışlardır. Çalışmacılar uygulamalar sonucunda bitkilerin kuru ağırlık, Si ve P konsantrasyonu ve P kullanım etkinliğini belirlemişlerdir. Analiz sonuçlarında buğday bitkisinin gelişimi üzerine Nano-Si'nin etkisi önemli bulunmuşken, marul bitkisinin gelişiminde istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Buğday bitkisinin kuru ağırlığı incelendiğinde en düşük değer kontrol uygulamasında belirlenmiş en yüksek değer T4 uygulamasında tespit edilmiştir. Aynı şekilde buğday bitkisinin P içeriği en yüksek T4 uygulamasında elde edilmiştir. Buğday bitkisinin Si konsantrasyonu ise en yüksek kontrol uygulamasında olup, Si içeren T3 ve T4 uygulamalarında en düşük değerde belirlenmiştir. Fosfor kullanım etkinliği incelendiğinde istatistiksel olarak Nano-Si uygulaması (T4) önemli bulunmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Nano silisyumun elde edilmesi

Kuru çeltik kavuzundan 50 gram tartılmış ve önce çeşme suyu daha sonra saf su ile yıkanmıştır. Yıkanan çeltik kavuzunun üzerine 500 ml 1 N HCl çözeltisi ilave edilerek 100° C’de 2 saat kaynatılmıştır. Kaynatılan çeltik kavuzu saf su ile yıkayıp etüvde 65° C’de tamamen kuruyana kadar bekletildikten sonra öğütülmüştür. Ardından öğütülen çeltik kavuzu kül fırınında 700 °C’de 2 saat boyunca yakılmıştır (Şekil 3.1) (Dung vd. 2016). Elde edilen Nano-Si’nin (Şekil 3.1) yüzey morfolojisi (molekül çapı ve kimyasal bileşimi) SEM (taramalı elektron mikroskobu, Zeiss Evo40), yapısal özellikleri ise XRD (EQUINOX) cihazları ile belirlenerek materyalin karakterizasyonu yapılmıştır.



Şekil 3.1 Çeltik kavuzu ve çeltik kavuzundan elde edilmiş Nano-Si

3.1.2 Toprak örneklerinin alınması ve analize hazırlanması

Denemede toprakları Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliğinde uzun yıllardır yetiştiricilik yapılmayan bir arazi ile (yorgun olmayan toprak), son iki yetiştirme döneminde yonca yetiştirilen (yorgun toprak) bir araziden Jackson (1958) tarafından belirtildiği gibi 2023 Nisan ayında 0-20 cm derinlikten alınmış, 4 mm elekten elenen örnekler bölüm serasında hava kuru hale getirilmiştir. Bu topraklar 2 mm'lik elekten geçirildikten sonra analize hazır hale getirilmiştir. Bitki hasadı sonrasında köklerden ayrıştırılarak bitkiye yarayışlı fosfor ve bitkiye yarayışlı silisyum analizleri için her saksıdan örnekleme yapılmıştır.

3.2 Yöntem

3.2.1 Toprak örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal analizlerinde kullanılan yöntemler

Deneme toprağı aşağıda belirtilen analizler yapılmak üzere laboratuvar koşulunda hava kuru duruma getirilip 2 mm'lik elekten elenmiş ve kuru bir ortamda herhangi bir bulaşma yaşanmayacak şekilde muhafaza edilmiştir (Anonymous 1951).

3.2.1.1 Tekstür

Toprak taneciklerinin büyüklüklerine göre kum, silt ve kil olarak toprak içerisindeki yüzde içerikleri (toprak tekstürü), Bouyoucos hidrometre yöntemi ile ölçülüp (Bouyoucos, 1951), taneciklerin süspansiyonda çökme hızından büyüklükleri hesaplanmış ve toprakların tekstürlerine göre; Soil Survey Staff (1951) tarafından belirtilen tekstür üçgeni esas alınarak tekstür sınıfları belirlenmiştir.

3.2.1.2 Toprak reaksiyonu (pH)

Toprak:su oranı 1:2.5 oranında çalkalama makinesinde 30 dakika çalkalanmasından sonra, cam elektrotlu pH metre (Mettler Toledo Seven Multi) yardımıyla ölçülmüştür (Richards 1954).

3.2.1.3 Elektriksel iletkenlik (EC)

Elektriksel iletkenlik değeri 1:2.5 oranında saf su ile sulandırılmış toprak örneklerinde EC metre (WTW-Cond 720) ile belirlenmiştir (Richards 1954).

3.2.1.4 Organik madde

Walkley-Black yaş yakma yöntemiyle toprakta bulunan karbonun saptanması ve buradan organik madde içeriğinin hesaplanması Nelson ve Sommers (1982) tarafından belirtildiği şekilde yapılmıştır.

3.2.1.5 Kireç

Hızalan ve Ünal (1966) tarafından açıklandığı şekilde Scheibler kalsimetresiyle belirlenmiştir.

3.2.1.6 Toplam azot

Bremner (1965) tarafından bildirildiği şekilde Kjeldahl yöntemine göre belirlenmiştir.

3.2.1.7 Toprakta yararışlı fosfor

Toprak örneklerinde P, Olsen vd. (1954) tarafından bildirildiği şekilde, 0.5 M NaHCO₃ (pH: 8.5) ile ekstrakte edilerek çözeltiye geçen P, molibdofosforik mavi renk yöntemine göre Shimadzu model UV 1201 spektrofotometresinde belirlenmiştir.

3.2.1.8 Toprakta bitkiye yarayışlı silisyum

10 ml 0.5 M asetik asit ilave edilen 1 g toprak 1 saat çalkalandıktan sonra 30 dakika bekletilmiş ardından Whatman filtre kağıdı (No:42) ile falkon tüplerine süzölmüştür. Bir gece dinlendikten sonra 50 ml'ye ultra saf su ile tamamlanmıştır. Bu ekstraktan 10 ml çekilerek ayrı bir tüpte üzerine 1 ml %7.5 sülfomolibdik çözelti, (7.5 g amonyum molibdat + 10 mL sülfürik asit 9 M ile karıştırılmasıyla elde edilmiştir, 100 mL oranlarıdır.) 10 dakika sonra 2 ml %20 tartarik asit çözeltisi ve 5 dakika sonra 10 ml %0.3 askorbik asit çözeltisi ilave edilip bir saat sonra 660 nm dalga boyunda spektrofotometrede (Shimadzu UV1201) belirlenmiştir. Bu analizde Si içeriğinden dolayı cam malzeme kullanılmamasına dikkat edilmiştir.

3.2.2 Denemede kullanılan toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Çizelge 3.1'de deneme topraklarının bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait analiz sonuçları verilmiştir. Topraklar killi tekstüre sahip olup, hafif alkalın, hafif tuzlu ve fazla kireçli olduğu belirlenmiştir. Toprakların toplam N içeriği yeterli, bitkiye yarayışlı P içeriklerinin ise yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.1 Denemede kullanılan toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait analiz sonuçları

Özellik	Yorgun olmayan toprak	Yorgun toprak
	Killi	Killi
Tekstür	%41.3 Kil %20.2 Silt %38.5 Kum	%45.7 Kil %20.3 Silt %34.0 Kum
pH (1:2.5 toprak:su)	7.95	8.07
EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$) (1:2.5 su)	240	295
Organik madde (%)	5.10	3.57
Kireç (CaCO_3) %	20.24	21.27
Toplam N, g kg^{-1}	2.1	1.7
Yarayışlı fosfor (P) mg kg^{-1}	6.1	4.7
Yarayışlı Silisyum (Si) mg kg^{-1}	57.6	65.3

3.3 Sera Denemesi

Deneme, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü serasında yürütülmüştür. Deneme tesadüf parselleri deneme desenine göre 2 faktörlü Si ve P uygulamaları ve 3 tekerrürlü olarak kurulmuştur. Plastik saksılarda polietilen torba içerisine 2 kg hava kuru toprak doldurulmuştur. Temel gübre olarak 29.04.2022’de tüm saksılara 100 mg N kg⁻¹ (amonyum nitrat, %33 N) ile 100 mg K kg⁻¹ (potasyum sülfat, %50 K₂O) çözelti formda uygulanmıştır. Aynı gün 0, 20 ve 80 mg P kg⁻¹ olacak şekilde TSP (%44 P₂O₅) gübresinden çözelti halinde P içerikli saksılara uygulanmıştır. Ayrıca Si içeren saksılara 250 mg Si kg⁻¹ olacak şekilde katı Nano-Si ve çözelti halinde Na-Silikat uygulaması yapılmıştır. Uygulama 3.2.a şeklinde görüldüğü üzere Nano-Si kağıt külahlar içine tartılmış, sonrasında Şekil 3.2.b’de görüldüğü gibi tüm materyallerin homojen şekilde toprağa karışması sağlanmış ardından saksılara 5 adet mısır (*Zea mays* L. pioneer) tohumu ekilerek çimlenmeden 2 hafta sonrasında 13.05.2022’te 3 adet olacak şekilde seyreltme yapılmıştır. Ekimden 6 hafta sonra (10.06.2022) üst gübre olarak 100 mg N kg⁻¹ (amonyum nitrat, %33 N) çözelti halde uygulanmıştır. Denemede saksıların yerleri 2-3 gün aralıklarla değiştirilmiştir.



Şekil 3.2 Uygulanacak gübreler ve materyallerin tartımı ve sınıflandırılması (a), Materyallerin toprağa homojen şekilde karıştırılmasının sağlanması (b)

Deneme planı Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Deneme Planı

Yorgun olmayan toprak				
		P dozları (mg kg ⁻¹)		
Si kaynakları	Si dozları (mg kg ⁻¹)	0	20	80
--	0	1-2-3	4-5-6	7-8-9
Nano Silisyum	250	10-11-12	13-14-15	16-17-18
Na-Silikat	250	19-20-21	22-23-24	25-26-27
Yorgun toprak				
		P dozları (mg kg ⁻¹)		
Si kaynakları	Si dozları (mg kg ⁻¹)	0	20	80
--	0	28-29-30	31-32-33	34-35-36
Nano Silisyum	250	37-38-39	40-41-42	43-44-45
Na-Silikat	250	46-47-48	49-50-51	52-53-54

3.3.1 Bitkilerin örnekleme, hasadı, analize hazırlanması ve yapılan analizler

Bitki gelişiminin 8 haftasında tepe noktasından 3.üncü genç yapraktan 0.25 g bitkide klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil analizleri için örnekleme yapıldı. Yaklaşık 12 haftalık gelişme periyodu sonrasında (22.07.2022) bitkiler toprak üstü aksamından kesilerek hasat edilmiş ve hassas terazi yardımı ile yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Yaş ağırlıkları belirlenen bitki örnekleri önce çeşme suyu sonrasında saf su ile yıkanıp daha sonra 65 °C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Kurutulan bitki örnekleri çelik aksamli öğütücü ile öğütülmüş ve toplam P, Zn, Fe ve Si konsantrasyonları belirlenmiştir.

3.3.1.1 Toplam fosfor konsantrasyonunun belirlenmesi

Bitki örneklerinin kuru yakma yöntemine göre yakılmasıyla elde edilen çözeltideki toplam P konsantrasyonu, vanadomolibdofosforik sarı renk yöntemine göre Shimadzu model UV 1201 spektrofotometresinde belirlenmiştir (Jones Jr ve Benton 2001). Kuru yakma işlemi; öğütülmüş ve kurutulmuş bitki örneğinden 0.5 g krozelere tartılmıştır. Ardından kül fırınında 500-550 °C'de yakılmıştır. Elde edilen kül 10 N 2 ml HNO₃ ile kaynatılmıştır. Ardından Whatman filtre kağıdı (No:42) kullanılarak süzükler hazırlanmıştır (Jones Jr ve Benton 2001).

3.3.1.2 Toplam çinko ve demir konsantrasyonunun belirlenmesi

Yaş yakma yöntemiyle elde edilen çözeltide toplam Zn ve Fe ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry, Perkin Elmer Model DV 2100) cihazı ile belirlenmiştir (Jones Jr ve Benton 2001, Boss ve Fredeen 2004). Yaş yakma işlemi; öğütülmüş ve kurutulmuş bitki örneğinden 0.5 g tartılmış ve 125 ml'lik erlenmayer içerisine konulmuştur. Bitki örnekleri üzerine 4:1 oranında HNO₃ ve HClO₄ ile yaş yakılmıştır. Ardından Whatman filtre kağıdı (No:42) kullanılarak 50 ml'lik balon jojeler içerisine aktarılmıştır.

3.3.1.3 Toplam silisyum konsantrasyonunun belirlenmesi

Toplam Si Van der Vorm (1987) tarafından bildirildiği şekilde belirlenmiştir. Kurutulmuş 300 mg bitki örneği bir porselen potaya yerleştirilip ve 3 saat 550 °C'de yakılmıştır. Kül, 100 ml polikarbon test tüplerine konulmuş ve üzerine 50 ml 0.08 M H₂SO₄ ve 2 ml %40'lık HF çözeltileri eklenmiştir. Çözeltiye 1.5 ml 0.08 M H₂SO₄ ve amonyum molibdat (20 g L⁻¹), ardından 1.5 ml 0.25 M tartarik asit (C₄H₆O₆) ve son olarak 1.5 ml 0.2 M askorbik asit ilave edilerek renk oluşumu sağlanmıştır. Tüpler karıştırıldıktan sonra 811 nm'de absorbans ölçülerek Si konsantrasyonu (g kg⁻¹) kuru ağırlık olarak ifade edilmiştir.

3.3.1.4 Bitkide fosfor kullanım etkinliği (PKE)

Fosfor kullanım etkinliği Johnston ve Syers (2009) tarafından bildirildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\%PKE = (\text{Bitki tarafından alınan P} / \text{Uygulanan P}) * 100$$

3.3.1.5 Toplam klorofil konsantrasyonu

0.25 g yaş bitki örneği %80'lik aseton ile ekstrakt edildikten sonra toplam klorofil spektrofotometrik olarak Arnon (1949) ve Withan (1971) tarafından bildirildiği şekilde belirlenmiştir.

$$\text{Klorofil a (mg g}^{-1}\text{)} = 12.7 \times (D_{663} - 2.69) \times (D_{645}) \times V / 1000 \times W$$

$$\text{Klorofil b (mg g}^{-1}\text{)} = 22.91 \times (D_{645} - 4.68) \times (D_{663}) \times V / 1000 \times W$$

$$\text{Toplam klorofil (mg g}^{-1}\text{)} = \text{klorofil a} + \text{klorofil b}$$

V = Ekstrakt hacmi (ml)

W = Ekstrakte edilen bitki ağırlığı (g)

D = Belirtilen dalga boyunda elde edilen okuma değer

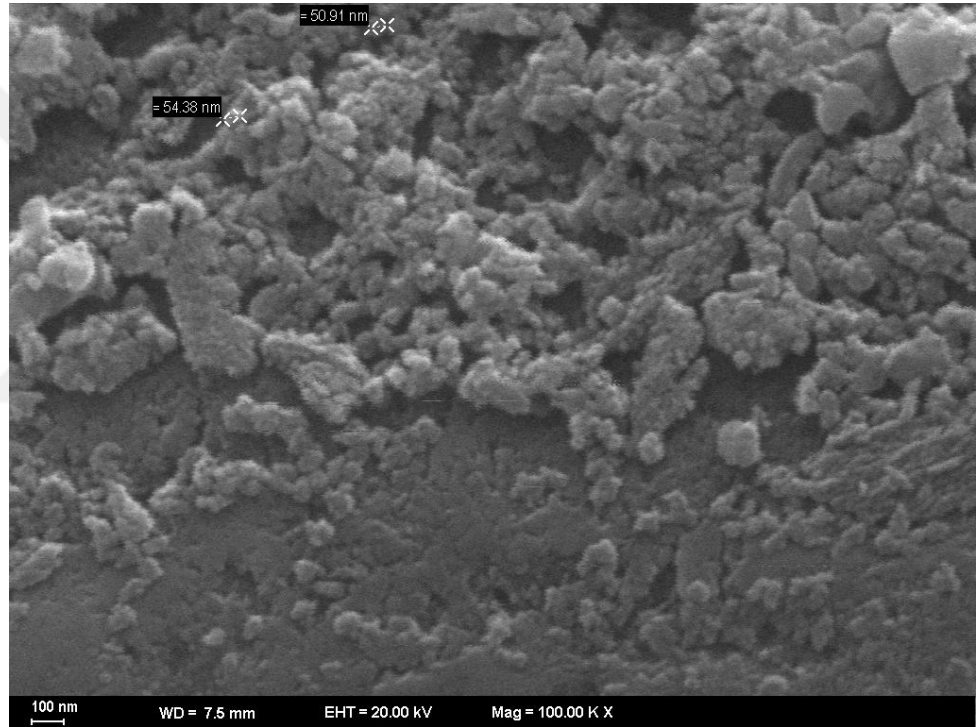
3.3.1.6 İstatistiksel analizler

Uygulama sonuçlarının önemliliği varyans analizi ile Minitab paket programı kullanılarak, uygulamalar arasındaki farklılıklar ise tanıtıcı istatistik (SE) ve MSTAT paket programı kullanılarak Duncan testi ile belirlenmiştir (Düzgüneş 1963).

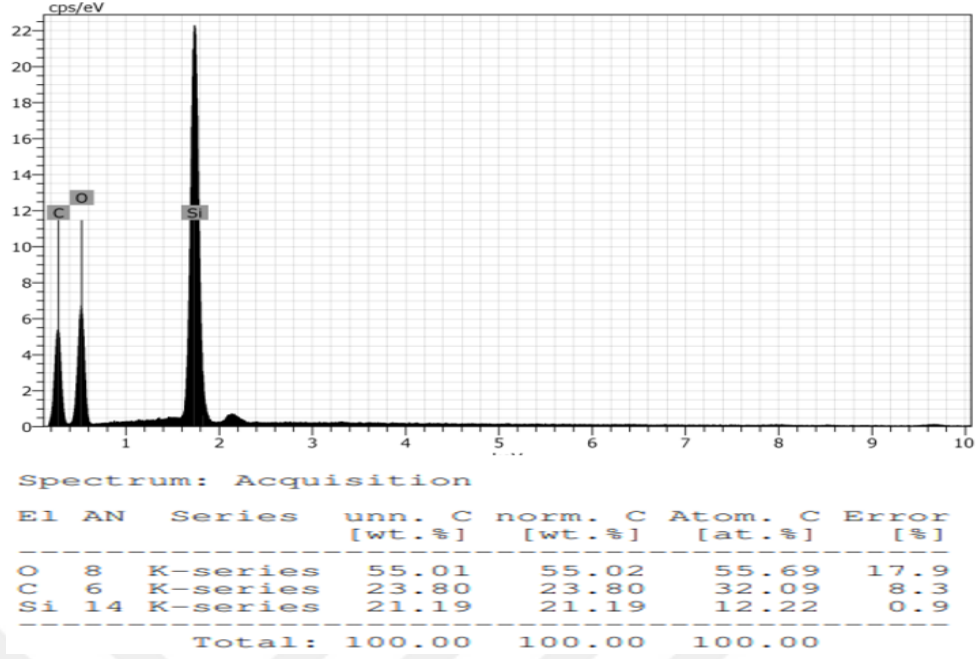
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Nano Silisyumun Karakteristik Özellikleri

Nano silisyumun morfolojisi ve tane boyutu SEM cihazı ile belirlenmiştir. Yapılan SEM ölçümlerine göre tane boyutunun 100 nm'den küçük olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.1). Materyalin EDX analizi sonuçlarına göre ise Si konsantrasyonunun %12.22 olduğu, O ve C konsantrasyonlarının ise sırasıyla %55.69 ve %32.09 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.2).

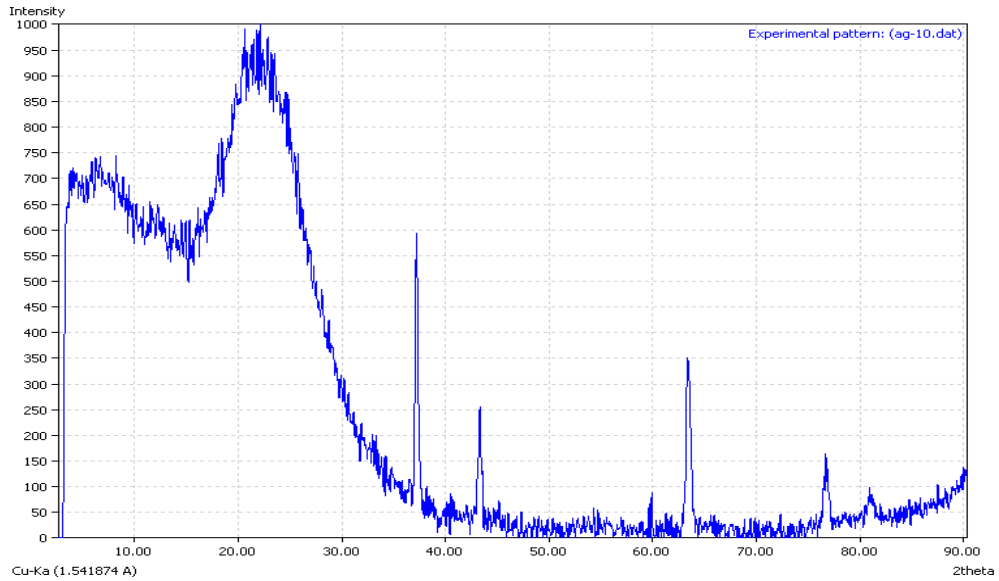


Şekil 4.1 Nano silisyumun SEM görüntüsü



Şekil 4.2 Nano silisyumun EDX görüntüsü ve içerdiği element konsantrasyonları (%)

Nano silisyumun yapısal özellikleri XRD ile belirlenmiştir. XRD analizi sonucuna göre, 2theta 18-30° aralığında keskin olamayan yumuşak bir pik elde edilmiş ve tepe noktasının 2theta=25.5°'de olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Nano silisyumun XRD diyagramı

4.2 Bulgular

Deneme sonucunda elde edilen bitki yaş ve kuru ağırlığı, toprakta yayayışlı Si ve P, bitkide toplam P, Zn, Fe, Si, klorofil a, klorofil b, toplam klorofil konsantrasyonlarına, bitki P kullanım etkinliğine (PKE) ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Uygulamaların bitki yaş ve kuru ağırlığına etkileri

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin yaş ve kuru ağırlığına P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bitki yaş ve kuru ağırlığı üzerine sadece P uygulamalarının ve P x Si interaksyonun etkisi istatistiksel olarak önemli olmuştur. En yüksek yaş ağırlık ($179.67 \text{ g saksı}^{-1}$) ve kuru ağırlık ($28.9 \text{ g saksı}^{-1}$) 80 mg P kg^{-1} ile birlikte Na-Silikat kaynağından sağlanan $250 \text{ mg Si kg}^{-1}$ uygulanması ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar, P uygulamalarının bitkinin büyüme ve gelişimini olumlu yönde etkilediğini Na-Silikat kaynağının P ile birlikte kullanılmasının bitki yaş ve kuru ağırlığı üzerinde artışa neden olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6’da yorgun olmayan toprakta yetişen mısır bitkisinin hasat öncesi resimleri verilmiştir.

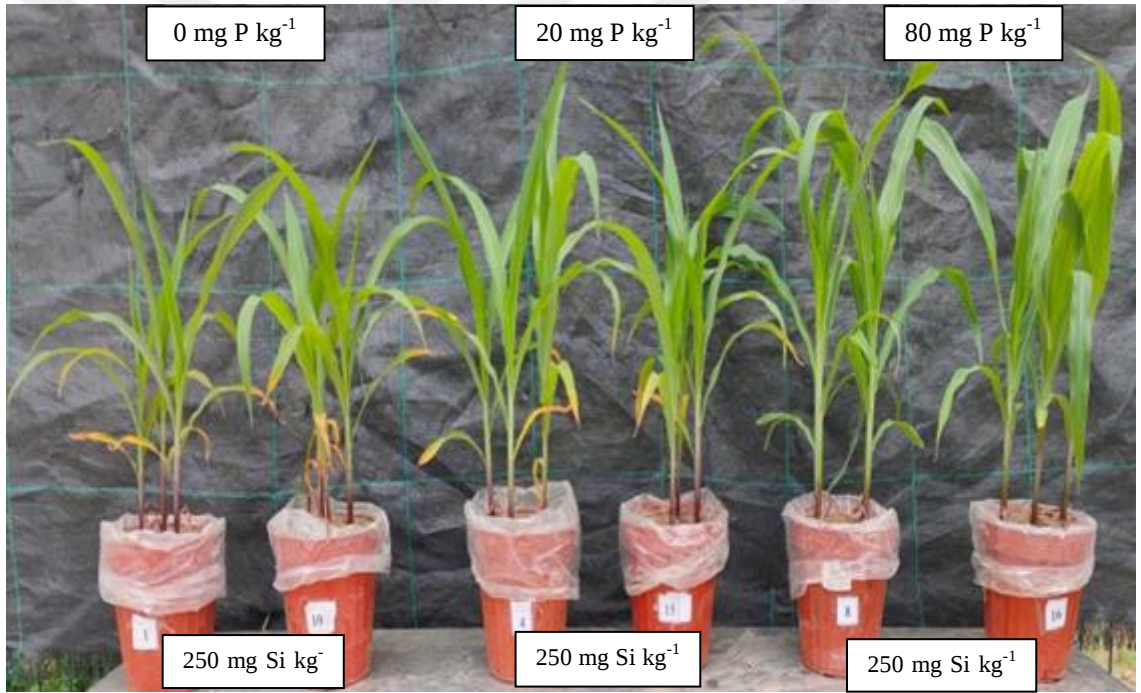
Çizelge 4.1 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin yaş ve kuru ağırlıklarına etkisi

Yaş Ağırlık (g saksı ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		85.3±2.61 a	119.5±0.25 a	153.1±4.53 b	119.3±9.91
Nano-Si 250		84.9±3.36 a	122.1±1.50 a	166.7±6.23 ab	124.6±12
Na-Silikat 250		78.5±5.45 a	109.6±6.92 a	179.6±5.79 a	122.6±15.3
Ortalama		82.92±2.28	117.12±2.79	166.52±4.74	
F	P	249.7 ^{**}			
	Si	1.01 ^{öd}			
	P x Si	5.02 ^{**}			
LSD		13.7			
Kuru Ağırlık (g saksı ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			

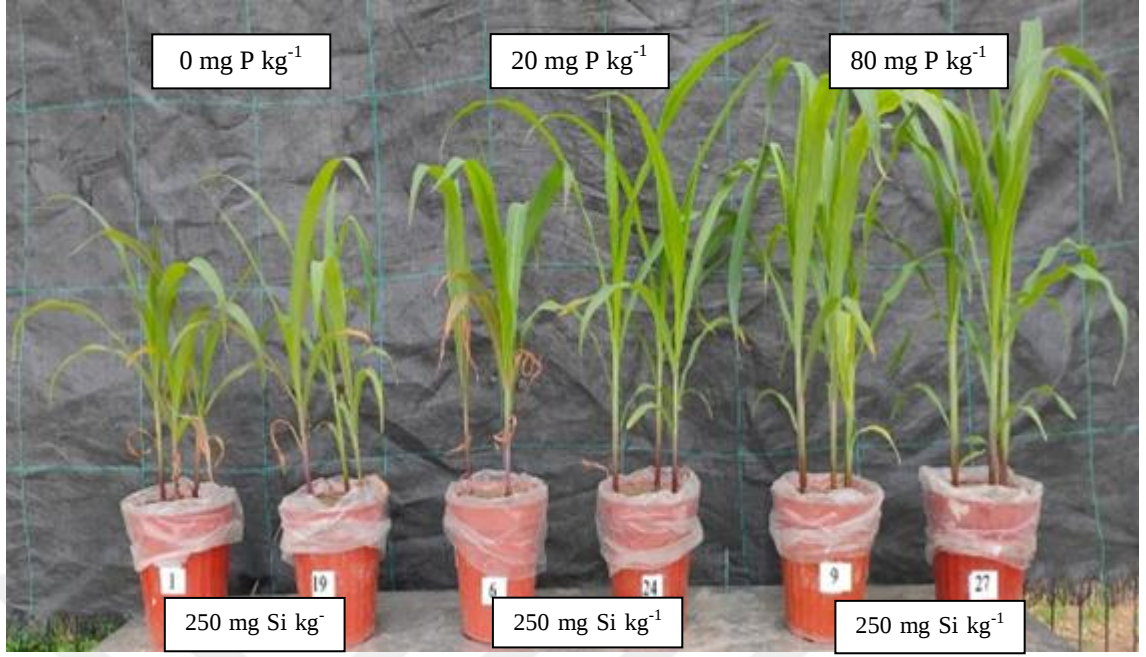
Çizelge 4.1 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin yaş ve kuru ağırlıklarına etkisi (devam)

Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		13.3±0.62 a	18.8±0.29 a	24.2±1.06 b	18.8±1.61
Nano-Si 250		12.6±0.66 a	19.5±0.45 a	26±1.70 b	19.4±2.00
Na-Silikat 250		11.3±0.90 a	17.4±1.02 a	28.9±1.02 a	19.2±2.62
Ortalama		12.4±0.47	18.6±0.46	26.4±0.94	
F	P	164.7**			
	Si	0.34 ^{öd}			
	P x Si	4.20*			
LSD		2.80			

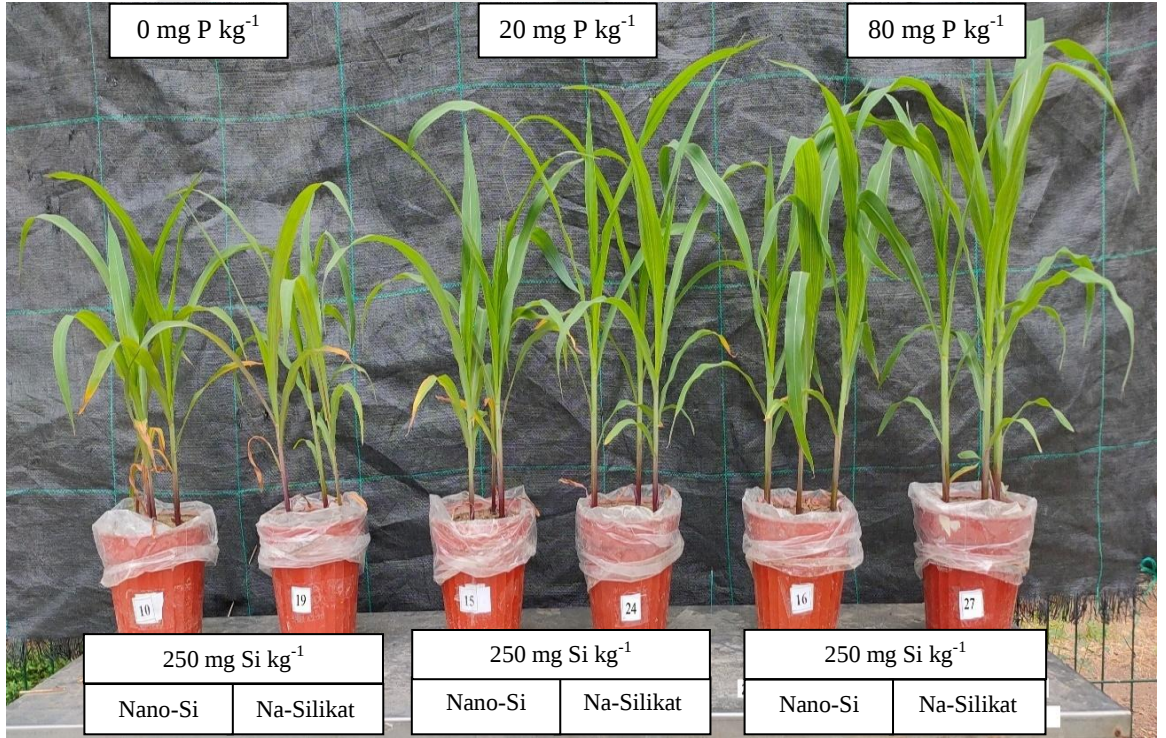
^{öd}: önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01



Şekil 4.4 Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol ve Nano-Si karşılaştırması



Şekil 4.5 Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol Na-Silikat karşılaştırması



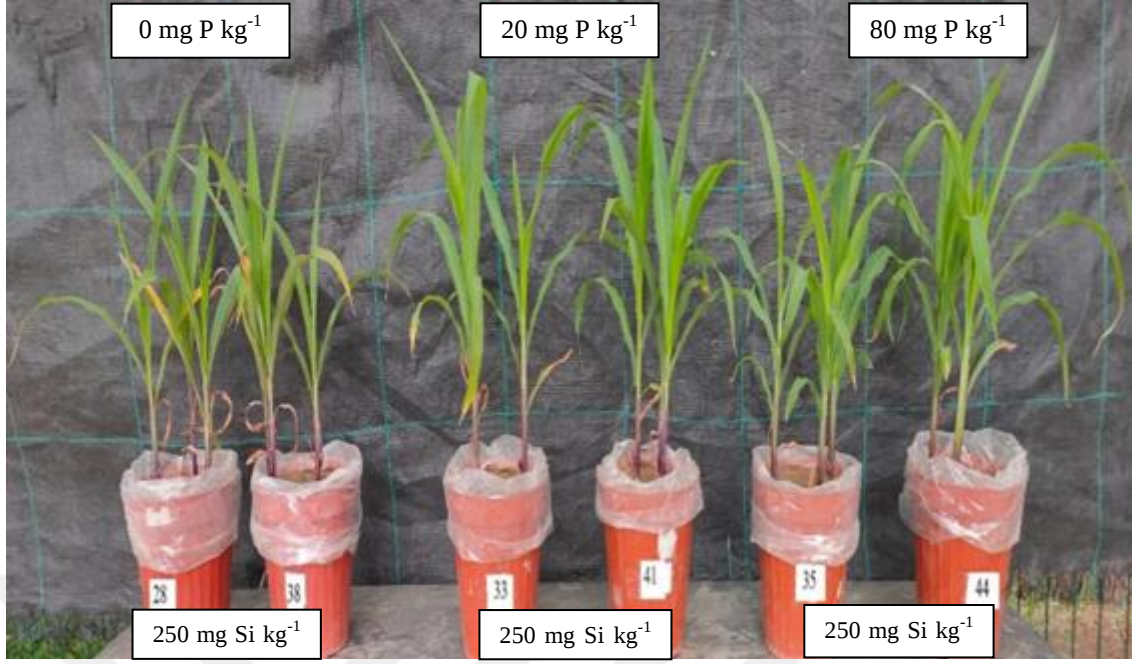
Şekil 4.6 Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi Si kaynaklarının etkisinin karşılaştırılması

Yorgun toprakta yetiştirilen bitkisinin yaş ve kuru ağırlığına P ve Si uygulamalarının etkisi Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bitki yaş ve kuru ağırlığı üzerine sadece P uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli olmuş, Si uygulaması ve P x Si interaksyonunun etkileri önemsiz bulunmuştur. Artan P uygulamaları sonucunda bitki yaş ve kuru ağırlıkları artmış, bu artış en fazla 80 mg P kg⁻¹ uygulaması ile belirlenmiştir. Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9’da yorgun olan toprakta yetişen mısır bitkisinin hasat öncesi resimleri verilmiştir.

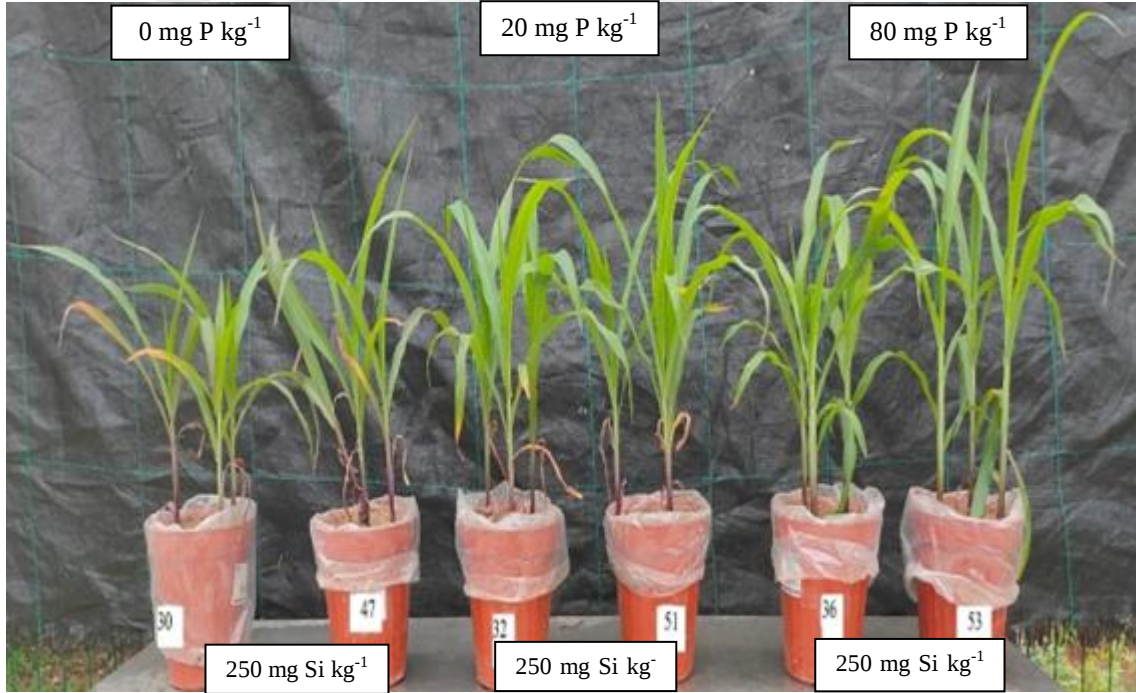
Çizelge 4.2 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin yaş ve kuru ağırlıklarına etkisi

Yaş Ağırlık (g saksı ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		53.3±0.14	115.9±6.82	155.8±1.46	108.4±15.1
Nano-Si 250		53.9±8.13	125.0±2.27	157.3±5.80	112.1±15.6
Na-Silikat 250		65.9±5.31	106.3±0.65	152.3±6.94	108.2±12.7
Ortalama		57.7±3.48 c	115.8±3.41 b	155.1±2.75 a	
F	P	281.4 ^{**}			
	Si	0.56 ^{öd}			
	P x Si	2.55 ^{öd}			
LSD		8.68			
Kuru Ağırlık (g saksı ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		7.55±0.08	17.4±0.91	19.5±1.00	14.8±1.89
Nano-Si 250		7.94±1.13	19.1±0,4	19.2±0.78	15.4±1.91
Na-Silikat 250		9.58±0.71	19.7±1.14	19.7±1.14	15.3±1.55
Ortalama		8.35±0.49 c	17.66±4.97 b	19.47±0.50 a	
F	P	162.10 ^{**}			
	Si	0.41 ^{öd}			
	P x Si	2.04 ^{öd}			
LSD		1.39			

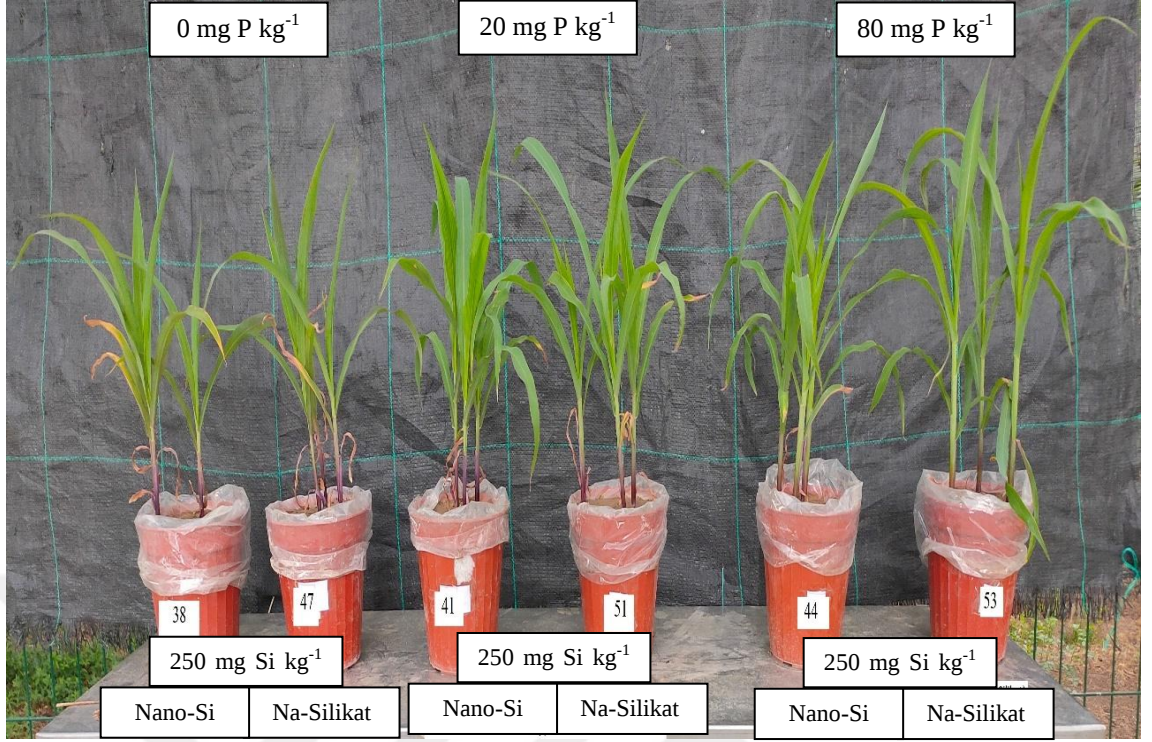
^{öd}:önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01



Şekil 4.7 Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol ve Nano-Si karşılaştırması



Şekil 4.8 Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin hasat öncesi kontrol ve Na-Silikat karşılaştırması



Şekil 4.9 Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinin Si kaynaklarının etkisinin karşılaştırılması

4.2.2 Uygulamaların bitki toplam fosfor konsantrasyonuna etkileri

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam P konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bitkinin toplam P konsantrasyonu uygulanan P dozlarına bağlı olarak artış göstermiştir. En yüksek P konsantrasyonu 80 mg P kg⁻¹ uygulaması ile 3.22 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bitkinin toplam P konsantrasyonu Nano-Si ve Na-Silikat uygulamalarıyla (250 mg Si kg⁻¹) kontrole (0 mg Si kg⁻¹) göre daha yüksek bulunmuştur. En yüksek P konsantrasyonu Nano-Si uygulamasında 3.57 g kg⁻¹ olurken, Na-Silikat uygulamasında 3.82 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Si uygulamalarına bağlı olarak toplam P konsantrasyonlarında anlamlı bir farklılık olduğu görülmektedir. Si uygulanmış bitkilerde daha yüksek toplam P konsantrasyonu gözlenirken, Si uygulanmamış bitkilerde daha düşük toplam P konsantrasyonu elde edilmiştir. Faktörler arasındaki interaksiyon incelendiğinde, istatistiksel olarak önemli bir ilişkinin olmadığı

görülmektedir. Sonuç olarak, Nano-Si ve Na-Silikat uygulamalarının toplam P konsantrasyonunu artırdığı ve yorgun olmayan toprakta bitkinin P alımını artırdığı görülmektedir.

Çizelge 4.3 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam P konsantrasyonuna etkisi

Toplam P Konsantrasyonu (g kg ⁻¹)				
	P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)	0	20	80	Ortalama
0	2.77±0.21	2.97±0.15	3.22±0.18	2.99±0.11 b
Nano-Si 250	3.07±0.09	3.32±0.25	3.57±0.08	3.32±0.11 a
Na-Silikat 250	3.22±0.05	3.42±0.08	3.82±0.22	3.49±0.11 a
Ortalama	3.02±0.10 b	3.24±0.11 b	3.53±0.12 a	
P	7.29 ^{**}			
F Si	7.54 ^{**}			
P x Si	0.59 ^{öd}			
LSD	0.27			

^{öd}:önemli değil *; p<0.05; **: p<0.01

Yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam P konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bitkinin toplam P konsantrasyonu kontrole (0 mg P kg⁻¹) göre P dozlarına bağlı olarak artış göstermiştir. Bitkinin en yüksek P konsantrasyonu 80 mg P kg⁻¹ uygulaması ile 3.82 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Nano-Si ve Na-Silikat ile 250 mg Si kg⁻¹ uygulamalarıyla, toplam P konsantrasyonu kontrole göre daha yüksek bulunmuştur. Nano-Si uygulamasında en yüksek toplam P konsantrasyonu 4.21 g kg⁻¹ olarak belirlenirken Na-Silikat uygulamasında 4.71 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Ayrıca, Si dozlarına bağlı olarak toplam P konsantrasyonlarında istatistiki olarak önemli bir fark olmadığı belirlenmiştir. Yüksek Si dozları daha yüksek toplam P konsantrasyonu ile ilişkilendirilirken, kontrolde (0 mg kg⁻¹ Si) daha düşük toplam P konsantrasyonu belirlenmiştir. Faktörler arasındaki etkileşim incelendiğinde önemli bir etkileşim olmadığı görülmektedir. Sonuç olarak, Nano-Si ve Na-Silikat uygulamalarının yorgun olan bir toprakta yetiştirilen bitkinin toplam P konsantrasyonunun artırdığı ve bitkinin P alımını iyileştirdiği görülmektedir.

Çizelge 4.4 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam P konsantrasyonuna etkisi

Toplam P Konsantrasyonu (g kg ⁻¹)				
Si dozları (mg kg ⁻¹)	P dozları (mg kg ⁻¹)			Ortalama
	0	20	80	
0	1.98±0.09	2.18±0.09	3.82±0.43	2.66±0.32 b
Nano-Si 250	2.42±0.05	2.67±0.08	4.21±0.18	3.10±0.29 a
Na-Silikat 250	2.62±0.18	2.87±0.22	4.71±0.10	3.40±0.34 a
Ortalama	2.34±0.11 b	2.58±0.13 b	4.25±0.19 a	
P	84.49 ^{**}			
F Si	0.20 ^{**}			
P x Si	2.30 ^{öd}			
LSD	0.33			

^{öd}:önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01

4.2.3 Uygulamaların bitkinin toplam silisyum konsantrasyonuna etkileri

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Si konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bitkinin toplam Si konsantrasyonuna sadece Si uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunurken sadece P uygulaması ve P x Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur. Bitkinin toplam Si konsantrasyonunu Si uygulaması ile artmış, en yüksek Na-Silikat kaynağından 250 mg Si kg⁻¹ uygulaması ile 3.59 g Si kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.5 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Si konsantrasyonuna etkisi

Toplam Si Konsantrasyonu (g kg ⁻¹)				
		P dozları (mg kg ⁻¹)		
Si dozları (mg kg ⁻¹)	0	20	80	Ortalama
0	0.71±0.48	0.73±0.35	0.80±0.26	0.75±0.13 b
Nano-Si 250	1.69±0.60	1.62±0.48	1.66±0.99	1.66±0.36 b
Na-Silikat 250	3.49±1.78	3.98±0.25	3.30±1.32	3.59±0.65 a
Ortalama	1.96±0.68	2.11±0.52	1.92±0.60	
P	0.04 ^{öd}			
F Si	8.45 ^{**}			
P x Si	0.06 ^{öd}			
LSD	1.68			

^{öd}:önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01

Yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Si konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Bitkinin toplam Si konsantrasyonunu üzerine sadece Si uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli olurken sadece P uygulaması ve P x Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur. Si uygulamaları ile bitki toplam Si konsantrasyonunu artmış, bu artış en fazla Nano-Si kaynağından 250 mg Si kg⁻¹ uygulaması ile 2.60 g Si kg⁻¹ seviyesinde belirlenmiştir.

Çizelge 4.6 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Si konsantrasyonuna etkisi

Toplam Si Konsantrasyonu (g kg ⁻¹)				
		P dozları (mg kg ⁻¹)		
Si dozları (mg kg ⁻¹)	0	20	80	Ortalama
0	1.14±0.16	1.05±0.2	1.04±0.14	1.07±0.08 b
Nano-Si 250	1.46±0.28	3.15±0.09	3.20±0.66	2.60±0.35 a
Na-Silikat 250	2.03±1.05	1.28±0.96	1.66±0.50	1.65±0.45 ab
Ortalama	1.54±0.34	1.83±0.44	1.97±0.40	
P	0.43 ^{öd}			
F Si	5.55*			
P x Si	1.53 ^{öd}			
LSD	0.97			

^{öd}:önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01

4.2.4 Uygulamaların bitkinin toplam çinko konsantrasyonuna etkileri

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Zn konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkisi Çizelge 4.7’de verilmiştir. Bitkinin toplam Zn konsantrasyonuna sadece P uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli olmuş sadece Si uygulamaları ve P x Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur. Artan P uygulamaları ile bitki toplam Zn konsantrasyonunu azalmıştır.

Çizelge 4.7 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Zn konsantrasyonuna etkisi

Toplam Zn Konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)				
	P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)	0	20	80	Ortalama
0	38.1±4.83	18.6±1.07	14.3±2.23	23.7±3.98
Nano-Si 250	33.6±2.32	18.4±0.98	11.0±0.26	21±3.40
Na-Silikat 250	36.5±2.84	19.6±1.83	8.76±0.40	21.6±4.15
Ortalama	36.1±1.87 a	18.9±0.70 b	11.3±1.04 c	
F	P	91.2 ^{**}		
	Si	1.13 ^{öd}		
	P x Si	0.71 ^{öd}		
LSD	3.94			

^{öd}: önemli değil *: p<0.05; **: p<0.01

Yorgun olan toprakta yetiştirilen toplam Zn konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkisi Çizelge 4.8’de verilmiştir. Yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Zn konsantrasyonuna sadece P uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli olmuş ancak sadece Si uygulaması ve P x Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur. Artan P uygulamaları ile bitkisi toplam Zn konsantrasyonunu azalmıştır.

Çizelge 4.8 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Zn konsantrasyonuna etkisi

Toplam Zn Konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		45.8±5.63	22.2±3.82	17.4±1.74	28.4±4.84
Nano-Si 250		30.6±4.10	17.1±0.81	17.3±1.94	21.7±2.60
Na-Silikat 250		39.2±5.40	22.8±1.90	20.2±0.98	27.4±3.42
Ortalama		38.6±3.36 a	20.7±1.54 b	18.3±0.93 b	
F	P	31.8 ^{**}			
	Si	3.44 ^{öd}			
	P x Si	1.32 ^{öd}			
LSD		5.84			

^{öd}:önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01

4.2.5 Uygulamaların bitkinin toplam demir konsantrasyonuna etkileri

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Fe konsantrasyonunu, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.9’da verilmiştir. Bitkinin toplam Fe konsantrasyonu sadece P uygulamaları ve P x Si interaksiyonun etkisi istatistiksel olarak önemli olmuştur. Bitkide en yüksek Fe konsantrasyonunu (82.70 mg kg^{-1}) P ve Si uygulamalarının yapılmadığı uygulamada belirlenmiş ancak $250 \text{ mg Si kg}^{-1}$ Nano-Si uygulaması haricindeki diğer bütün uygulamalar arasında fark belirlenmemiştir.

Çizelge 4.9 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Fe konsantrasyonuna etkisi

Toplam Fe Konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		82.7±15.4 a	54.8±3.10 a	43.5±4.00 a	60.3±7.48
Nano-Si 250		40.9±1.5 b	52.5±5.90 a	48.1±3.84 a	47.1±2.68
Na-Silikat 250		62.8±3.26 a	47.4±8.41 a	46.1±3.73 a	52.1±3.89
Ortalama		62.1±7.58 a	51.5±3.28 ab	45.9±2.04 b	
F	P	4.46 [*]			
	Si	2.91 ^{öd}			
	P x Si	3.54 [*]			
LSD		20.09			

^{öd}: önemli değil * : $p<0.05$; ** : $p<0.01$

Yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Fe konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bitkinin toplam Fe konsantrasyonu üzerine sadece Si, sadece P ve P x Si interaksiyonun etkileri istatistiksel olarak önemli olmuştur. Bitkide en yüksek (65.9 mg kg^{-1}) Fe konsantrasyonu Si uygulanmamış ancak 20 mg P kg^{-1} uygulamasında uygu belirlenmiştir. En düşük Fe konsantrasyonu ise P uygulaması yapılmamış Nano-Si 250 uygulamasında (42.87 mg kg^{-1}) belirlenmiştir.

Çizelge 4.10 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam Fe konsantrasyonuna etkisi

Toplam Fe Konsantrasyonu (mg kg^{-1})				
		P dozları (mg kg^{-1})		
Si dozları (mg kg^{-1})	0	20	80	Ortalama
0	64.7±2.51 a	65.9±1.84 a	46.5±2.15 a	59.0±3.32 a
Nano-Si 250	42.9±1.80 b	50.8±3.50 b	43.5±2.57 a	45.7±1.86 b
Na-Silikat 250	50.3±5.89 b	42.9±2.48 b	49.3±0.33 a	47.5±2.18 b
Ortalama	52.6±3.73 a	53.2±3.62 a	46.4±1.29 b	
P	4.91*			
F Si	18.1**			
P x Si	6.48**			
LSD	8.71			

öd.önemli değil * : $p<0.05$; ** : $p<0.01$

4.2.6 Uygulamaların bitkinin klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil konsantrasyonuna etkileri

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil konsantrasyonları üzerine etkileri Çizelge 4.11’de verilmiştir. Bitkinin klorofil a konsantrasyonu üzerinde sadece P uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunurken, sadece Si uygulaması ve P x Si interaksyonun etkileri önemsiz bulunmuştur. Bitkinin en yüksek klorofil a konsantrasyonu (0.19 mg g^{-1}) 20 mg P kg^{-1} uygulamasında belirlenmiştir.

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin klorofil b konsantrasyonu sadece P uygulamaları ve P x Si interaksyonun etkisi istatistiksel olarak önemli olmuştur. Mısır bitkisinde en yüksek klorofil b konsantrasyonu (0.12 mg g^{-1}) 20 mg P kg^{-1} ile birlikte Na-Silikat 250 uygulanmasında belirlenmiştir.

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin toplam klorofil konsantrasyonu üzerine sadece P uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli olmuş sadece Si uygulaması ve P x Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur. Bitkide en yüksek toplam klorofil konsantrasyonu (0.30 mg g^{-1}) 20 mg P kg^{-1} uygulaması ile belirlenmiştir.

Çizelge 4.11 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin klorofil a ve klorofil b konsantrasyonu üzerine etkisi

Klorofil a Konsantrasyonu (mg g ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		0.15±0.01	0.18±0.01	0.14±0.00	0.16±0.00
Nano-Si 250		0.14±0.01	0.18±0.01	0.10±0.03	0.14±0.01
Na-Silikat 250		0.13±0.02	0.23±0.00	0.14±0.00	0.17±0.01
Ortalama		0.14±0.00 b	0.19±0.01 a	0.12±0.01 b	
P		13.1 ^{**}			
F	Si	1.73 ^{öd}			
	P x Si	1.70 ^{öd}			
LSD		0.03			
Klorofil b Konsantrasyonu (mg g ⁻¹)					
0		0.06±0.00 a	0.08±0.01 b	0.07±0.00 a	0.07±0.01
Nano-Si 250		0.07±0.01 a	0.08±0.00 b	0.04±0.01 a	0.06±0.01
Na-Silikat 250		0.05±0.01 a	0.12±0.00 a	0.06±0.00 a	0.07±0.01
Ortalama		0.06±0.00 a	0.09±0.01 a	0.05±0.01 a	
P		14 ^{**}			
F	Si	0.86 ^{öd}			
	P x Si	3.29 [*]			
LSD		0.03			
Toplam Klorofil Konsantrasyonu (mg g ⁻¹)					
0		0.22±0.02	0.26±0.03	0.21±0.01	0.23±0.01
Nano-Si 250		0.21±0.03	0.26±0.02	0.14±0.04	0.21±0.2
Na-Silikat 250		0.18±0.04	0.35±0.01	0.20±0.01	0.24±0.03
Ortalama		0.21±0.01 b	0.3±0.02 a	0.19±0.02 b	
P		14.96 ^{**}			
F	Si	1.53 ^{öd}			
	P x Si	2.46 ^{öd}			
LSD		0.04			

^{öd}:önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01

Yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil konsantrasyonu üzerine P, Si ve P x Si interaksyonunun etkisi istatistiki olarak etkileri önemsiz olmuştur (Çizelge 4.12). Bu durum uygulamaların klorofil pigmentlerinin sentezini veya içeriklerini belirgin şekilde etkilemediğini göstermektedir.

Çizelge 4.12 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin klorofil a, klorofil b, toplam klorofil içeriklerine etkisi

Klorofil a Konsantrasyonu (mg g⁻¹)				
		P dozları (mg kg⁻¹)		
Si dozları (mg kg⁻¹)		0	20	80
0		0.21±0.03	0.30±0.10	0.21±0.04
Nano-Si 250		0.14±0.02	0.20±0.08	0.15±0.01
Na-Silikat 250		0.14±0.03	0.20±0.06	0.10±0.02
Ortalama		0.16±0.02	0.23±0.04	0.15±0.02
F	P	1.86 ^{öd}		
	Si	2.73 ^{öd}		
	P x Si	0.08 ^{öd}		
LSD				
-				
Klorofil b Konsantrasyonu (mg g⁻¹)				
0		0.11±0.01	0.03±0.05	0.09±0.02
Nano-Si 250		0.06±0.01	0.07±0.03	0.06±0.00
Na-Silikat 250		0.05±0.01	0.08±0.02	0.05±0.01
Ortalama		0.07±0.01	0.06±0.02	0.06±0.01
F	P	0.25 ^{öd}		
	Si	0.35 ^{öd}		
	P x Si	1.82 ^{öd}		
LSD				
-				
Toplam Klorofil İçeriği (mg g⁻¹)				
0		0.32±0.02	0.33±0.07	0.31±0.06
Nano-Si 250		0.20±0.03	0.27±0.11	0.20±0.01
Na-Silikat 250		0.19±0.04	0.28±0.09	0.15±0.03
Ortalama		0.24±0.02	0.29±0.04	0.22±0.03
F	P	1.17 ^{öd}		
	Si	2.80 ^{öd}		
	P x Si	0.22 ^{öd}		
LSD				
-				

^{öd}.önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01

4.2.7 Uygulamalarının bitki fosfor kullanım etkinliğine (PKE) etkisi

Yorgun olmayan ve yorgun toprakta yetiştirilen bitkinin fosfor kullanım etkinliği üzerine P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.13'te verilmiştir. Mısır bitkisinin fosfor kullanım etkinliği (PKE), P₂₀ uygulamasında farklı kaynaktan silisyum uygulaması ile P₈₀ uygulamasına göre daha yüksek bulunmuştur. PKE en yüksek (%32.38) yorgun olmayan toprakta P₂₀ (20 mg P kg⁻¹) uygulamasında Nano-Si'nin uygulanması ile elde edilmiştir. Yorgun olmayan toprakta yetişen bitkinin PKE, P₈₀ (80 mg P kg⁻¹) uygulamasında istatistiki bakımdan önemli bulunmuş olup, Si uygulaması ile artış göstermiştir. Yorgun toprakta yetişen bitkinin PKE, P₂₀ uygulamasında istatistiki bakımdan önemli bulunmuş olup, Si uygulaması ile artış göstermiştir.

Çizelge 4.13 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan ve yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin fosfor kullanım etkinliğine etkisi

Uygulamalar		PKE, %	
		Yorgun olmayan toprak	Yorgun toprak
P ₂₀	Si ₀	27.98	19.0 b
	Nano-Si	32.38	25.58 a
	Na-Silikat	29.72	23.63 ab
F		2.01 ^{öd}	5.85*
LSD			4.84
P ₈₀	Si ₀	9.73 b	9.49
	Nano-Si	11.59 ab	10.07
	Na-Silikat	13.84 a	11.6
F		6.99*	1.50 ^{öd}
LSD		2.70	

^{öd}: önemli değil * : p<0.05; ** : p<0.01

4.2.8 Bitki hasadı sonrası saksı toprağında yarayışlı silisyum konsantrasyonu

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitki hasadı sonrası saksıdaki toprakta yarayışlı Si konsantrasyonlarına, P ve Si uygulamalarının etkisi Çizelge 4.14'te verilmiştir. Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağında yarayışlı Si konsantrasyonu üzerine sadece Si uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli olmuş, ancak sadece P uygulamalarının ve P x Si interaksiyonun etkileri önemli bulunmamıştır. Hasat sonrası toprağın yarayışlı Si konsantrasyonu Si uygulaması ile artmış, bu artış en fazla (64.10 mg kg^{-1}) $250 \text{ mg Si kg}^{-1}$ Na-Silikat uygulamasına bağlı olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, Si uygulamalarının bitki büyümesi sonrasında toprakta yarayışlı Si birikimini artırdığını göstermektedir.

Çizelge 4.14 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağındaki yarayışlı Si konsantrasyonuna etkisi

Hasat Sonrası Saksı Toprağında Yarayışlı Si Konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
		P dozları (mg kg ⁻¹)			
Si dozları (mg kg ⁻¹)		0	20	80	Ortalama
0		57.6±0.59	58±0.35	58.2±1.20	58±0.41 b
Nano-Si 250		63.1±0.48	62.9±0.67	64.3±0.36	63.4±0.34 a
Na-Silikat 250		64.1±0.16	63.0±0.83	65.1±1.41	64.1±0.45 a
Ortalama		61.6±1.04	61.3±0.88	62.5±1.18	
F	P	2.56 ^{öd}			
	Si	75.03 ^{**}			
	P x Si	0.63 ^{öd}			
LSD		1.16			

^{öd}: önemli değil * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$

Yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksıdaki toprakta yarayırlı Si konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkisi Çizelge 4.15’de verilmiştir. Hasat sonrası saksı toprağında yarayırlı Si konsantrasyonu üzerine etkisi sadece Si ve P uygulamalarına bağılı olarak istatistiksel olarak önemli olmuş, ancak P x Si interaksyonu önemli bulunmamıştır. Hasat sonrası toprağın yarayırlı Si konsantrasyonu Si uygulaması ile artmış, en fazla Si konsantrasyonu (65.73 mg kg^{-1}) $250 \text{ mg Si kg}^{-1}$ ’un Nano-Si kaynağından uygulaması ile elde edilmiştir. Hasat sonrası toprağın yarayırlı Si konsantrasyonu en fazla (65.91 mg kg^{-1}) 80 mg P kg^{-1} uygulamasında belirlenmiştir.

Çizelge 4.15 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağındaki yarayırlı Si konsantrasyonuna etkisi

Hasat Sonrası Saksı Toprağında Yarayırlı Si Konsantrasyonu (mg kg^{-1})				
	P dozları (mg kg^{-1})			
Si dozları (mg kg^{-1})	0	20	80	Ortalama
0	61 ± 0.33	62.7 ± 1.12	63.3 ± 0.49	62.3 ± 0.50 b
Nano-Si 250	65.3 ± 1.53	64.7 ± 0.81	67.2 ± 0.31	65.7 ± 0.63 a
Na-Silikat 250	65.2 ± 0.24	63.6 ± 1.54	67.3 ± 0.64	65.4 ± 0.72 a
Ortalama	63.8 ± 0.84 b	63.7 ± 0.67 b	65.9 ± 0.71 a	
P	5.57*			
F Si	12.7**			
P x Si	1.03 ^{öd}			
LSD	1.57			

^{öd}:önemli değıl * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$

4.2.9 Bitki hasadı sonrası saksı toprağında yarayışı fosfor konsantrasyonu

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksıdaki toprakta yarayışı P konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 16'da verilmiştir. Bitki hasadı sonrası saksılardan alınan toprak örneklerinin yarayışı P konsantrasyonu üzerine Si ve P uygulamaları ile ve P x Si interaksiyonun etkisi istatistiksel olarak önemli olmuştur. Hasat sonrası toprakta yarayışı P konsantrasyonu en yüksek (57.30 mg kg^{-1}) Si uygulanmayan fakat (0 mg Si kg^{-1}) 80 mg kg^{-1} P uygulanan koşulda belirlenmiştir.

Çizelge 4.16 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olmayan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağındaki yarayışı P konsantrasyonuna etkisi

Hasat Sonrası Saksı Toprağında Yarayışı P Konsantrasyonu (mg kg^{-1})				
P (mg kg^{-1})				
Si (mg kg^{-1})	0	20	80	Ortalama
0	14.9±0.23 a	29±1.13 a	57.3±1.41 a	33.7±6.25 a
Nano-Si 250	7.2±0.36 b	10.8±0.12 b	28.2±1.10 b	15.4±3.26 b
Na-Silikat 250	7.4±0.20 b	10±0.29 b	28±0.45 b	15.1±3.23 b
Ortalama	9.87±1.28 a	16.6±3.11 b	37.8±4.90 c	
P	1144**			
F Si	610.4**			
P x Si	69.7**			
LSD	2.22			

öd.önemli değil * : $p<0.05$; ** : $p<0.01$

Yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksıdaki toprakta yarayışlı P konsantrasyonuna, P ve Si uygulamalarının etkileri Çizelge 4.17’de verilmiştir. Hasat sonrası saksı toprağından alınan örnekte yapılan analiz sonucunda yarayışlı P konsantrasyonu üzerine sadece P uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli olmuştur. Toprağıın toprakta yarayışlı P konsantrasyonu en yüksek (20.24 mg kg^{-1}) 80 mg kg^{-1} P uygulamasında belirlenirken en düşük P konsantrasyonu (7.56 mg kg^{-1}) P uygulaması yapılmamış koşulda belirlenmiştir.

Çizelge 4.17 Fosfor ve Si uygulamalarının yorgun olan toprakta yetiştirilen bitkinin hasadı sonrası saksı toprağıındaki yarayışlı P konsantrasyonuna etkisi

Hasat Sonrası Saksı Toprağıında Yarayışlı P Konsantrasyonu (mg kg^{-1})				
P (mg kg^{-1})				
Si (mg kg^{-1})	0	20	80	Ortalama
0	7.35±0.18	9.46±0.20	19.88±0.20	12.23±1.94
Nano-Si 250	7.62±0.39	9.01±0.64	21.59±0.25	12.74±2.23
Na-Silikat 250	7.71±0.93	8.52±0.58	19.25±0.81	11.83±1.90
Ortalama	7.56±0.30 c	9±0.29 b	20.24±0.43 a	
P	502.19**			
F Si	0.142 ^{öd}			
P x Si	0.156 ^{öd}			
LSD	0.92			

^{öd}:önemli değil * : $p<0.05$; ** : $p<0.01$

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin yaş ve kuru ağırlığı üzerine sadece P uygulamaları ve P x Si interaksiyonun anlamlı etkileri olduğu belirlenmiştir. Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin yaş ve kuru ağırlığına sadece P uygulamalarının önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Yapılan bir çalışmada, çeşitli sulama seviyelerinde uygulanan Si'nin mısır bitkisinin yaş veya kuru ağırlığı üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir (Gao vd. 2005). Taskin vd (2022), tarafından yapılan başka çalışmada, buğday ve marul bitkisi üzerinde Nano-Si ve modifiye edilmiş çeltik kavuzu Si kaynağı olarak uygulanmış, bitkilerin kuru ağırlığı kontrole göre uygulanan Si ile artış göstermiştir. Buğday bitkisinde en yüksek artış Nano-Si kaynağından sağlanan Si ile birlikte P uygulamasıyla gözlemlenmiştir (Taskin vd. 2022). İki farklı toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin Si ve P uygulamalarıyla yaş ve kuru ağırlık miktarlarının kontrol grubuna göre sırasıyla %24.2 ve %22.7 oranında artış olduğunu bildirmişlerdir. (Meena vd. 2016). Ma vd. (1991) tarafından yapılan çalışmada toprağa 467 mg Si kg⁻¹ ve 12 mM P uygulanmış, bu uygulama sonucu toprakta P mevcudiyeti artarak topraktaki P adsorpsiyonunu azalttığını böylece çeltik (*Oryza sativa* L. cv. Akebono) bitkisinin büyümesini geliştirdiğini ve kuru ağırlık miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Owino ve Gascho (2005) yaptıkları çalışmada P konsantrasyonunun sınırlı olduğu topraklarda farklı dozlarda P uygulamalarının mısır bitkisinin kuru ağırlığını artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu araştırma sonuçları ile bu tezde elde edilen veriler uyumaktadır.

Her iki toprakta da yetiştirilen mısır bitkisinde toplam P konsantrasyonu üzerinde P ve Si uygulamalarının etkisi önemli bulunmuştur. Fosfor uygulamaları ile mısır bitkisindeki toplam P konsantrasyonu da artmıştır. Ayrıca Si uygulamaları ile bitkinin toplam P konsantrasyonunun arttırıldığı gözlenmiştir. Bu bulgular, bitki besleme stratejilerinde P ve Si uygulamalarının önemini vurgulamakta ve mısır bitkisinin P alımının artırılması için P ve Si uygulamalarının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Owino ve Gascho'nun (2005) mısır bitkisinde yaptıkları çalışmada, farklı dozlarda Si ve P uygulaması yapılmış bu uygulamalar sonucu Si konsantrasyonunun toprak çözeltisindeki artışının, mısır gelişimini ve P alımını artırdığı

gösterilmiştir. Silisyumun toprak partiküllerinin yüzeyinde adsorbe olan P moleküllerinin tutunma kuvvetini azaltması, bitki köklerinin daha fazla P'yi çözerek almasına bağlı olarak bitkilerin P alımını artırdığı belirlenmiştir. Yapılan bu araştırma sonucu ile elde edilen tez bulguları uyum göstermektedir.

Yorgun olmayan ve yorgun olan topraklarda yetiştirilen mısır bitkisinde toplam Si konsantrasyonu üzerinde sadece Si uygulamalarının etkisi önemli olarak bulunmuştur. Bu bulgular, Si elementinin bitkinin toplam Si konsantrasyonunu artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca bitki besleme stratejilerinde Si gübrelemesinin bitkinin toplam Si alımını artırarak bitki büyümesini ve dayanıklılığını artırabileceğini göstermektedir. Yapılan bir çalışmada, Si ve P gübrelemesinin çeltik bitkilerinin biyokütlesi ve fitolit (bitkilerin hücrelerinde biriken silika tabakaları) stoğu üzerindeki etkisini incelenmiştir. Bulgular, Si ve P kombinasyonunun bitki biyokütlesinde anlamlı bir artış sağladığını, Si ve P birlikte uygulandığında bitkilerin fitolit (bitkilerin hücresel yapılarında bulunan mineral kalıntılar) stoğunun arttığını göstermiştir. Bu sonuçlar, Si ve P gübrelemesinin bitki büyümesi ve silika döngüsü üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabileceğini ortaya koyduğunu rapor etmişlerdir (Li vd. 2020). Yapılan bu çalışmada Si ve P interaksyonu önemli çıkmışken, tez çalışmamızda bitkinin toplam Si içeriğine sadece Si uygulamasının etkisi önemli çıkmıştır.

Yorgun olmayan ve yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinde toplam Zn konsantrasyonu üzerinde sadece P uygulamalarının etkisinin önemli olduğu bulunmuştur. P uygulamalarının artmasıyla birlikte mısır bitkisinde toplam Zn konsantrasyonu azalmıştır. Bu sonuçlar, P uygulamalarının bitki tarafından toplam Zn alımını azalttığını göstermektedir. Bu bulgular, bitki besleme stratejilerinde Zn alımını optimize etmek için P uygulamalarının dikkate alınması gerektiğinin önemini vurgulamaktadır. Zhang vd. (2021) yaptıkları çalışmada, P uygulaması ile buğday, mısır ve çeltik bitkilerinin kök ve üst aksam Zn konsantrasyonunda genel olarak azalma olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bu araştırma ile tez bulgularımız uyum göstermiştir.

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin toplam Fe konsantrasyonu üzerinde sadece P uygulamalarının ve P x Si interaksyonun istatistiksel olarak önemli

olduğu bulunmuştur. Bu bulgular, P uygulamalarının ve P x Si etkileşiminin mısır bitkisinin toplam Fe alımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. P uygulamalarının artmasıyla birlikte toplam Fe konsantrasyonu azalmıştır. Ayrıca, Si uygulamalarının toplam Fe konsantrasyonunu artırmada etkili olduğu ve P uygulamalarıyla birlikte yapıldığında daha da etkili olduğu görülmüştür. Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin toplam Fe konsantrasyonu üzerine Si, P uygulamaları ve P x Si etkileşiminin önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, P ve Si uygulamalarının olmadığı koşullarda bitkinin en fazla Fe konsantrasyonunu alabildiğini göstermektedir. Yukarıdaki sonuçlara göre bitki besleme stratejilerinde P ve Si uygulamalarının, bitkinin Fe alımını etkileyebileceğini ve toprakta verimli bir Fe kullanımını teşvik edebileceğini göstermektedir. Toprak özelliklerine göre gübreleme stratejilerinin gerekliliği bariz şekilde görülmektedir. Bakır (2015) tarafından yapılan tez çalışmasında Si uygulaması ile birlikte yapılan P gübrelemesi, yulaf bitkisi tarafından kaldırılan demir konsantrasyonunu artırdığını rapor edilmiştir. Ma ve Takahashi (1991) tarafından yürütülen çalışma, Si uygulamasının bitkilerde Fe ve Mn konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Silisyumun bitki köklerinin oksidasyon gücünü artırarak veya bitkinin sap ve yaprak kısımlarında birikerek, bazı ağır metallerin bitkiye taşınımını azalttığı ve bu sayede bitki toksisitesini azalttığı belirlenmiştir. Yapılan iki çalışma ile tezimizdeki bulgular uyum göstermemiştir.

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinde klorofil a konsantrasyonu üzerinde sadece P uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Bu sonuç, P uygulamalarının bitki klorofil a konsantrasyonunu artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Klorofil b konsantrasyonu üzerinde sadece P uygulamalarının ve P x Si etkileşimi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Bu bulgu, P uygulamalarının klorofil b konsantrasyonunu artırmada etkili olduğunu ve Si uygulamalarının bu etkiyi daha da güçlendirdiğini göstermektedir. Toplam klorofil konsantrasyonu üzerinde ise P uygulamalarının tek başına etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Bu sonuçlar, P uygulamalarının mısır bitkisinin klorofil pigmentlerini artırma potansiyeline sahip olduğunu ve uygun besleme stratejileriyle bitki büyümesi ve fotosentez verimliliğinin artırılabilirliğini göstermektedir. Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin

klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil konsantrasyonları üzerine P ve Si uygulamalarının önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Hosseini vd. (2019) tarafından yürütülen çalışmada, P eksikliği durumunda Si'nin klorofil sentezi üzerindeki etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Silisyumun, bitkilerin P alımını artırarak klorofil sentezine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, Si'un mısır bitkilerinde klorofil üretimini düzenleyici bir rol oynayabileceğini ve P eksikliği durumunda silisyumun klorofil sentezini destekleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu araştırma sonuçları tez bulguları ile uyum göstermektedir.

Yorgun olmayan toprakta PKE, 80 mg P kg⁻¹ uygulamasında önemli bulunmuştur. Özellikle Na-Silikat uygulaması Si uygulanmamış kontrole göre daha yüksek PKE oranına sahip olduğunu belirlenmiştir. Yorgun olan toprakta ise 20 mg P kg⁻¹ uygulamasında iki silisyum kaynağının da kontrole göre PKE'yi artırdığı belirlenmiştir. Bu sonuç tarımsal üretimde Si'nin önemi ortaya çıkmış ve tarımda P kullanımının optimize edilmesinde Si'nin etkili bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Taskin vd. (2022) tarafından yürütülen çalışmada, çeltik kavuzundan elde edilen asidik modifiye edilmiş çeltik kavuzu ve Nano-Si'nin buğday ve marul bitkilerindeki P kullanım etkinliği üzerindeki karşılaştırmalı etkilerini değerlendirmiştir. Diğer uygulamalara göre fosfor kullanım etkinliği Nano-Si uygulaması yapılmış buğday bitkisinde oldukça yüksek görülmüştür, ancak marul bitkisinde fosfor kullanım etkinliği açısından önemli bir farklılık bulunmamıştır. Buğday bitkisinde yapılan çalışma sonuçları tez bulgularımızla uyum göstermiştir.

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin hasadı sonrası saksı toprağında yarayışlı Si konsantrasyonu üzerinde sadece Si uygulamaları etkisi anlamlı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinin hasadı sonrası saksı toprağında yarayışlı Si konsantrasyonu üzerine Si ve P uygulamalarının tek başına önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular iki toprakta da Si uygulamalarının bitkinin hasat sonrası saksı toprağındaki yarayışlı Si konsantrasyonunu artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Si uygulamasının mısır bitkisinin besin alımını etkilediği

görülmektedir. Si konsantrasyonu ve P konsantrasyonu arasındaki etkileşim, P uygulamasının toprak çözeltisindeki yarıyışlı Si konsantrasyonunu artırarak Si alımını artırdığını göstermektedir (Meena vd. 2016). Barman vd. (1998), toprağa 5 mM g⁻¹ Si ilave edilmesinin P mevcudiyetini artırmayacağını, ancak P gübrelemesi nedeniyle Si mevcudiyetinin artma olasılığının olduğunu göstermiştir. Mısırın Si alımı üzerindeki Si x P etkileşim etkisi önemli bulunmuş, bu da P'nin toprak çözeltisindeki mevcut Si konsantrasyonunu artırarak Si alımını artırdığını göstermektedir. Owino ve Gascho (2004) tarafından yapılan çalışmada, uygulanan silikat iyonunun silisik asit (H₃SiO₄) haline dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Düşük pH'ye sahip topraklarda çözünebilir Si' un (H₃SiO₄) negatif yükü, negatif yüklü fosfat anyonundan daha azdır, bu nedenle P tercihen toprak partikülüne adsorbe olduğu ve Si' un toprakta yarıyışlı konsantrasyonunun arttığını belirtmişlerdir. Yapılan bu araştırmalar tez bulgularımız ile uyum göstermiştir.

Yorgun olmayan toprakta yetiştirilen mısır bitkisinde Si, P uygulamalarının tek başına ve P x Si etkileşiminin toprakta yarıyışlı P konsantrasyonu üzerinde istatistiksel olarak önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, P uygulamasının tek başına yarıyışlı P konsantrasyonunu artırdığını ve Si uygulamasının bu etkiyi azalttığını göstermektedir. Bu bulgular, Si uygulamalarının bitki tarafından daha fazla P alımını teşvik ettiğini göstermektedir. Si, bitkinin kök gelişimini ve besin alımını artırarak, toprakta yarıyışlı P konsantrasyonunu etkilemektedir. Bu durum, Si uygulamalarının bitki beslenmesinde önemli bir strateji olabileceğini ve bitkinin P alımını artırabileceğini göstermektedir. Yorgun olan toprakta yetiştirilen mısır bitkilerinde ise P uygulamalarının tek başına topraktaki yararlı P konsantrasyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. P uygulamalarının artmasıyla birlikte, topraktaki yarıyışlı P konsantrasyonu da artmıştır. İki toprak içinde bulgular tarımsal uygulamalarda P gübrelemesinin topraktaki yararlı P konsantrasyonunu artırarak bitki beslenmesini ve verimliliğini iyileştirebileceğini göstermektedir. Silisyum uygulamasının, topraktaki P' nin çözünürlüğünü ve mobilitesini artırarak bitki kökleri tarafından daha kolay erişilebilir hale getirdiği gözlenmiştir. Kostic vd. (2017) Si'nin toprak ortamında kimyasal reaksiyonlara girerek çözünmeyen fosfor bileşiklerini çözünebilir forma dönüştürebildiğini bu şekilde bitkilerin kök sistemleri aracılığıyla daha fazla P' yi

absorbe etmelerini sağladığını gözlemlemiştir. (Ma ve Yamaji 2006)' nin yaptığı çalışmada Si' nin bitkilerin P alımını nasıl etkilediği de ele alınmıştır. Silisyumun toprakta çeşitli kimyasal reaksiyonlara girerek çözünmeyen P bileşiklerini çözünebilir forma dönüştürebildiği ve bu şekilde bitkilerin P' yi daha iyi kullanabildiği belirtilmiştir. Silisyumun varlığı, bitkilerin köklerinin yüzey alanını artırarak P'nin toprakla temasını ve alımını kolaylaştırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Si' nin bitkilerin kök gelişimini teşvik ettiği ve köklerin P' ye daha fazla erişebildiği vurgulanmıştır. Tallberg vd. (2008) tarafından yürütülen çalışmada, Brest Körfezi'ndeki sedimentlerde, potansiyel olarak hareketli fosfor ve silisyum depoları incelenmiştir. Bulgular, sedimentlerde önemli derecede Si konsantrasyonu tespit edildiğini ve fosfor ile etkileşimde bulunduğunu göstermektedir. Silisyumun, P' nin biyolojik olarak daha kullanılabilir hale gelmesine katkıda bulunabileceği ve fosfor döngüsü üzerinde önemli bir rol oynayabileceği düşünülmektedir. Bu bulgular, silisyumun ekosistemlerdeki fosfor döngüsü üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına ve potansiyel olarak fosforun çevresel etkilerinin yönetilmesine yardımcı olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmalar ile tez bulgularımızın uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Bu tez çalışması ile bir atık olan çeltik kavuzunun Nano-Si forma dönüştürülerek kullanımı değerlendirilip hem çevresel kirliliğin önlenmesi hem de günden güne azalan P kaynaklarının verimli şekilde kullanılarak tükenmesinin önüne geçilebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca gereğinden fazla gübre kullanımının ülke ekonomisine verdiği zarar ortadadır. Bu çalışmada bariz şekilde Si uygulamalarıyla P kullanımının arttığı gözlenmiştir. Bu çalışmanın tarla koşullarında benzer çalışmalar yapılarak sonuçların pekiştirilerek sürdürülebilir tarım hedefinde önemli yol katedilebilir.

KAYNAKLAR

- Adebisi J.A., Agunsoye J.O., Ahmed II, Bello S.A., Haris M., Ramakokovhu M.M. and S.B. Hassan. Production of silicon nanoparticles from selected agricultural wastes. *Mater Today Proc* 2021; 38:669-74. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.658>.
- Adebisi J.A., Agunsoye J.O., Bello S.A., Haris M., Ramakokovhu M.M., Daramola M.O., and S.B. Hassan. Green production of silica nanoparticles from maize stalk. *Part Sci Technol* 2020; 38:667-75. <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1578845>.
- Alsaeeedi A., El-Ramady H., Alshaal T., El-Garawani M., Elhawat N., Al-Otaibi A. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiol Biochem* 2019; 139:1-10. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.008>.
- Alsaeeedi A.H., El-Ramady H., Alshaal T., El-Garawani M., Elhawat N., Almohsen M.. Engineered silica nanoparticles alleviate the detrimental effects of Na stress on germination and growth of common bean *Phaseolus vulgaris*. *Environ Sci Pollut Res* 2017; 24:21917-28. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9847-y>.
- Anonim 2022. Türkiye İstatistik Kurumu 2022. Türkiye Tarımsal Gübre İstatistikleri, Kimyasal Gübre Kullanımı Erişim Linki: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/DownloadIstatistikselTablo?p=5wX5HeP9i9yzldUw2tACaz2B6E7FY7ID6hkUbh2dpjSVy7kaPWTyV/1RZUGzZFHM> Erişim Tarihi: 18.07.2023
- Anonim. 2023. Yıllar Bazında Kimyevi Gübre Tüketim ve Üretim İstatistikleri. Tarım ve Orman Bakanlığı, Web Sitesi: <https://www.tarimorman.gov.tr/Konular/Bitkisel-Uretim/Bitki-Besleme-ve-Tarimsal-Teknolojiler/Bitki-Besleme-Istatistikleri> Erişim Tarihi: 18.07.2023
- Anonymous, 2022. World fertilizer trends and outlook to 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 28, Rome. Erişim Linki: <https://www.fao.org/3/ca6746en/CA6746EN.pdf>
- Anonymous 2022. World Population Data Sheet <http://www.prb.org/2022-world-population-data-sheet> Erişim tarihi: 17.05.2023.
- Arnon D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in beta vulgaris. *Plant physiology*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Bakhshandeh, E., Rahimian, H. H. H. Pirdashti, and G. Nematzadeh. 2015. Evaluation of phosphate-solubilizing bacteria on the growth and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) cropped in northern Iran. *Journal of Applied Microbiology* 119 (5):1371–82.

- Barman K.K., Tomar K.P. and Biswas A.K. 1998. Sorption interaction of phosphate and silicate in a red soil as affected by pH. *Journal of Indian Society of Soil Science* 46: 299-301.
- Barton, C. J. 1948. Photometric analysis of phosphate rock. *Analytical Chemistry*, 20, 1068-1073.
- Bellitürk, K. 2011. Edirne ili Uzunköprü ilçesi tarım topraklarının beslenme durumlarının belirlenmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 8(3), 8-15.
- Bilen, S. and Sezen, Y. (1993). Toprak Reaksiyonunun Bitki Besin Elementleri Elverişliliği Üzerine Etkisi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 24(2).
- Bocharnikova, E.A., Loginov, S.V., Matychenkov, V.V. and P.A. Storozhenko 2010. Silicon fertilizer efficiency. *Russ. Agricult. Sci.* 36, 446–448.
- Boss, C.B. ve Fredeen, K.J. 2004. Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. *PerkinElmer Life and Analytical Sciences*, 710 Bridgeport, Avenue Shelton, CT 06484-4794 USA.
- Brady, N. and Weil, R. The nature and properties of soil 12th ed. 1999. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen, In: *Methods of Soil Analysis*. Black, C.A. American Society of Agronomy, 1149-1178, Wisconsin.
- Cao L., Zhang H., Cao C, Zhang J., Li F., Huang Q. Quaternized chitosan-capped mesoporous silica nanoparticles as nanocarriers for controlled pesticide release. *Nanomaterials* 2016; 6:126. <https://doi.org/10.3390/nano6070126>.
- Chen Z., Li Z., Lin Y., Yin M., Ren J., Qu X. Bioresponsive hyaluronic acid-capped mesoporous silica nanoparticles for targeted drug delivery. *Chem Eur J* 2013; 19:1778-83. <https://doi.org/10.1002/chem.201202038>.
- Cui J., Li Y., Jin Q., Li F. Silica nanoparticles inhibit arsenic uptake into rice suspension cells: via improving pectin synthesis and the mechanical force of the cell wall. *Environ Sci Nano* 2020; 7:162-71. <https://doi.org/10.1039/c9en01035a>.
- Dinker M.K., Kulkarni P.S. Recent advances in silica-based materials for the removal of hexavalent chromium: a review. *J Chem Eng Data* 2015; 60:2521-40. Available from: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00292>.
- Disfani, M.N.; Mikhak, A.; Kassaei, M.Z.; Maghari, A. Effects of nano Fe/SiO₂ fertilizers on germination and growth of barley and maize. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2017, 63, 817–826.

- Dobermann, A., Fairhurst, T.H. 2000. Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management. International Rice Research Institute, First edition, ISBN 981-04-2742-5, 95-98 pp.
- Düzgüneş, O. 1963. Bilimsel Araştırmalarda İstatistik Prensipleri ve Metotları. E.Ü. Matbaası, 375, İzmir.
- Elsharkawy M.M., Mousa K.M. Induction of systemic resistance against Papaya ring spot virus and its vector *Myzus persicae* by *Penicillium simplicissimum* GP17-2 and silica nanopowder. *Int J Pest Manag* 2015; 61:353-8. Available from: <https://doi.org/10.1080/09670874.2015.1070930>.
- El-Shetehy M., Moradi A., Maceroni M., Reinhardt D., Petri-Fink A., Rothen-Rutishauser B., Mauch F. and Schwab F. 2021. Silica nanoparticles enhance disease resistance in Arabidopsis plants. *Nat Nanotechnol* 2021; 16:344-53. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-00812-0>.
- Epstein, E. 1994. The Anomaly of Silicon in Plant Biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 91:11-17, USA.
- Eraslan, F., Inal, A., Pilbeam, D.J. and Gunes, A. 2008. Interactive effects of salicylic acid and silicon on oxidative damage and antioxidant activity in spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Matador) grown under boron toxicity and salinity. *Plant Growth Regul* 55, 207. <https://doi.org/10.1007/s10725-008-9277-4>
- Fleischer, M.A. O'Neill, R. Ehwald, K. 1999. The pore size of non-graminaceous plant cell wall is rapidly decreased by borate ester cross-linking of the pectic polysaccharide rhamnogalacturon II, *Plant Physiology*, 121, 829-838.
- Gunes, A., Inal, A., Cicek, N., and Eraslan, F. 2007a. Role of phosphatases, iron reducing, and solubilizing activity on the nutrient acquisition in mixed cropped peanut and barley. *Journal of Plant Nutrition*, 30(10), 1555-1568.
- Gunes, A., Inal, A., Bagci, E.G. and David J. Pilbeam 2007b. Silicon-mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-B toxic soil. *Plant Soil* 290, 103-114.
- Gunes, A., Pilbeam, D.J., Inal, A., Bagci E.G. and Coban, S. 2007c. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 2(2); 105-113.
- Hızalan, E. ve Ünal, H. 1966. Topraklarda Önemli Kimyasal Analizler. A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları, 278, Ankara
- Hodson, M.J., Evans, D.E., 1995. Aluminium/silicon interactions in higher plants. *J. Exp. Bot*, 46: 161–171.

- Hosseini, S. A., Rad, S. N., Ali, N., and Yvin, J.C. 2019. The Ameliorative Effect of Silicon on Maize Plants Grown in Mg-Deficient Conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(4), 969. doi:10.3390/ijms20040969
- Ibrikci, H., Ryan, J., Ulger, A. C., Buyuk, G., Cakir, B., Korkmaz, K., .and Konuskan, O. 2005. Maintenance of phosphorus fertilizer and residual phosphorus effect on corn production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72(3), 279-286.
- Jianfeng, M. A., and Takahashi, E. 1991. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. *Plant and Soil*, 133, 151-155
- Johnston, A. E. and J.K., Syers 2009. A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better crops with plant food* 93: 14-16.
- Jones Jr., J. Benton. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC.
- Kacar, B., and İnal, A. 2010. Bitki analizleri. Nobel Yayın Dağıtım.
- Kılıç, R. ve Korkmaz, K. 2012. Kimyasal Gübrelerin Tarım Topraklarında Artık Etkileri. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, 5(2): 87-90.
- Kim, S.G., Kim, K.W., Park, E.W., Choi, D. 2002. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathology*, 92: 1095-1103.
- Korkmaz, K., Ibrikci, H., Karnez, E., Buyuk, G., Ryan, J., Oguz, H., and Ulger, A. C. 2010. Responses of wheat genotypes to phosphorus fertilization under rainfed conditions in the Mediterranean region of Turkey. *Scientific Research and Essays*, 5(16), 2304-2311.
- Kostic, L., Nikolic, N., Bosnic, D., Samardzic, J., Nikolic, M. 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. *Plant Soil*, 419, 447-455.
- Lavakush Yadava, J., J. P. Verma, D. K. Jaiswal, and A. Kumar. 2014. Evaluation of PGPR and different concentration of phosphorus level on plant growth, yield and nutrient content of rice (*Oryza sativa* L.). *Ecological Engineering* 62:123–8.
- Li, Z., Guo, F., Cornelis, J.T., Song, Z., Wang, X., and Delvaux, B. 2020. Combined Silicon-Phosphorus Fertilization Affects the Biomass and Phytolith Stock of Rice Plants. *Frontiers in Plant Science*, 11. doi:10.3389/fpls.2020.00067
- Ma, J.F., Takahashi, E., 1991. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. *Plant soil*, 133:151-155.
- Ma, J.F. 2003. Function of silicon in higher plants. *Progress in Molecular and Subcellular Biology*, 33:127-147.

- Ma, J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses, *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1): 11-18.
- Marschner, H., H, Oberle., Cakmar, I., and V, Romheld. 1990. Plant nutrition physiology and application. Kluwer Academic Dordrecht (M.L. Van Benschoten, ed.), pp: 241-249.
- Meena, Omprakash and Patel, K and Malav, Jugal. 2016. Influence of Silicon and Phosphorus on Growth, Yield and Nutrient Uptake by Maize (*Zea Mays* L.) in Typic Ustochrepts Soils. *Indian Journal of Ecology*. 43. 89-92.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 2001. Principles of plant nutrition, 5th edition. Kluwer Publishers, 849 pp.
- Mor S, Manchanda CK, Kansal SK, Ravindra K. 2016. Nanosilica extraction from processed agricultural residue using green technology. *J Cleaner Prod* 2017; 143:1284-90. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.11.142>.
- Naderi, M. R., and Danesh-Shahraki, A. 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19), 2229-2232.
- Nelson, D. W., Sommers, L. E., 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In 'Methods of Analysis. Chemical and Microbiological Properties, s:539-580.
- Olsen, S.R., Cole, C.V. 1954. Watanabe, F.S. and Dean, N.C., Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. U. S. Dept. of Agr. Cir. 939, Washington. D. C.
- Owino-Gerroh, C., Gascho, G. J. 2005. Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35, 2369-2378. Doi: 10.1081/lcss-200030686
- Pereira, S. I., and P. M. Castro. 2014. Phosphate-solubilizing rhizobacteria enhance (*Zea mays*) growth in agricultural P-deficient soils. *Ecological Engineering* 73:526–35.
- Plumere N, Ruff A, Speiser B, Feldmann V, Mayer HA. 2012. Silica particles as basis for redox modifications: particle shape, size, poly-dispersity, and porosity. *J Colloid Interface Sci* 2012; 368:208-19. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.10.070>.
- Prakash, N.B., Anitha, M.S. and Sandhya, K. 2019. Behaviour of Different Levels and Grades of Diatomite as Silicon Source in Acidic and Alkaline Soils. *Silicon* 11, 2393–2401
- Rajan, S. Phosphate adsorption and the displacement of structural silicon in an allophane clay. 1975. *Eur. J. Soil Sci.* 26, 250–256.

- Ranganathan, S., Suvarchala, V., Rajesh, Y., Prasad, M., Padmakumari, A.P., Voleti, S. 2006. Effects of silicon sources on its deposition, chlorophyll content, and disease and pest resistance in rice. *Biologia Plantarum*. 50, 713-716, San Diego, CA, USA.
- Rao, G.B., Susmitha, P. 2017. Silicon uptake, transportation and accumulation in Rice. *J. Pharmacogn. Phytochem.* 6(6), 290–293.
- Rasouli S, Davaran S, Rasouli F, Mahkam M, Salehi R. 2014. Positively charged functionalized silica nanoparticles as nontoxic carriers for triggered anticancer drug release. *Des Monomers Polym* 2014; 17:227-37. Available from: <https://doi.org/10.1080/15685551.2013.840475>.
- Rastogi A., Tripathi D.K., Yadav S., Chauhan D.K., Zivcak M., Ghorbanpour M., El-Sheery N.I. and M. Brestic. 2019. Application of silicon nanoparticles in agriculture. 3 *Biotech* 2019; 9:1-11. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>.
- Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. U.S. Dept. of Agr. Handbook No. 60.
- Sauer, D., Saccone, L., Conley, D. J., Herrmann, L. and Sommer, M. 2006. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. *Biogeochemistry* 80, 89–108.
- Savant, N.K., Snyder, G.H., Datnoff, L.E. 1997. Silicon Management and Sustainable Rice Production. *Advances in Agronomy*, 58:151-199.
- Schaller, J., Faucherre, S., Joss, H., Obst, M., Goeckede, M., Planer-Friedrich, B. 2019. Silicon increases the phosphorus availability of Arctic soils. *Scientific Reports*, 9, 449. doi: 10.1038/s41598-018-37104-6
- Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H. 2014. Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* seeds Mill.) *Saudi J Biol Sci* 21(1):13–17
- Singh, M.D., Chirag, G., Prakash, P.O., Mohan, M.H., Prakasha, G., Vishwajith, 2017. Nano fertilizers is a new way to increase nutrients use efficiency in crop production. *International Journal of Agriculture Sciences*, 9(7): 3831-3833.
- Sistani K.R., Savant N.K., Reddy K.C. 1997. Effect of rice hull ash silicon on rice seedling growth. *Journal of Plant Nutrition* 20(1): 195 –201.
- Snehal, S., and Lohani, P. 2018. Silica nanoparticles: Its green synthesis and importance in agriculture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 3383-3393.
- Snyder, G.H. 2001, Chapter 11 Methods for silicon analysis in plants, soils, and fertilizers, Symposium on the Maintenance of Soil Fertility Publication No: 98, Lagos Nigeria.

- Sönmez, İ., Kaplan, M., Sönmez, S., 2008. Kimyasal gübrelerin çevre kirliliği üzerine etkileri ve çözüm önerileri. *Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derim Dergisi*, 25(2): 24-34
- Suriyaprabha R., Karunakaran G., Yuvakkumar R., Rajendran V. and Kannan N. 2014. Foliar Application of Silica Nanoparticles on the Phytochemical Responses of Maize (*Zea mays* L.) and Its Toxicological Behavior, Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry, 44:8, 1128-1131, DOI: 10.1080/15533174.2013.799197
- Takahashi E. 1995. Uptake mode and physiological functions of silica. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 49:357– 360.
- Tallberg, P., Treguer, P., Beucher, C., and Corvaisier, R. 2008. Potentially mobile pools of phosphorus and silicon in sediment from the Bay of Brest: Interactions and implications for phosphorus dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 85–94. doi: 10.1016/j.ecss.2007.06.003
- Taskin, M. B., Sahin, O., Taskin, H., Atakol, O., Inal, A., Gunes, A. 2018. Effect of synthetic nano-hydroxyapatite as an alternative phosphorus source on growth and phosphorus nutrition of lettuce (*Lactuca sativa* L.) plant. *Journal of Plant Nutrition*, 0190-4167.
- Taskin, M. B., Akca, H., Babar, S. K., Kadioglu, Y. K., Deniz, K., Kan, S. and Gunes, A. (2022): Evaluating the comparative effects of acid modified rice husk and nano-silicon derived from rice husk on phosphorus use efficiency in wheat and lettuce plants with differing silicon contents, *Journal of Plant Nutrition*
- Temminghoff, E. E. and Houba, V. J. 2004. *Plant analysis procedures*. Kluwer Academic Publishers, 1-178, USA.
- Theodorou, M.E., Plaxton, W.C., 1993. Metabolic adaptations of plant respiration to nutritional phosphate deprivation. *Plant Physiol*, 101:339-344.
- Torney F, Trewyn B.G., Lin V.S.Y., Wang K. 2007. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. *Nat Nanotechnol.*; 2:295-300. Available from: <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.108>.
- Van der Vorm. P.D.J. 1987. Dry ashing of plant material and dissolution of the ash in HF for the colorimetric determination of silicon, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Wiley and Sons, Inc., 18:11, 1181-1189. New York, USA.
- Wanyika H., Gatebe E., Kioni P., Tang Z., Gao Y. Mesoporous silica nanoparticles carrier for urea: potential applications in agrochemical delivery systems. *J Nanosci Nanotechnol* 2012; 12:2221-8. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.5801>.
- Withan, F.H., D.F. Blaydes and R.M. Devlin, 1971. *Experiments in Plant Physiology*, pp: 55–8. Van Nostrand Reinhold Co., New York.

- Xiaopeng Gao, Chunqin Zou, Lijun Wang and Fusuo Zhang 2005. Silicon Improves Water Use Efficiency in Maize Plants, *Journal of Plant Nutrition*, 27:8, 1457-1470, DOI: 10.1081/PLN-200025865
- Zhang, W., Zhang, W., Wang, X., Liu D., Zou C. and Chen X. 2021. Quantitative evaluation of the grain zinc in cereal crops caused by phosphorus fertilization. A meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 6. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00661-0>
- Zhang, Y., Liang, Y., Zhao, X., Jin, X., Hou, L., Shi, Y.2019. Silicon compensates phosphorus deficit-induced growth inhibition by improving photosynthetic capacity, antioxidant potential, and nutrient homeostasis in tomato. *Agronomy* 9,733. doi: 10.3390/agronomy9110733

