

Demir Oksit Nanopartikül (FeO-NP) Uygulamasının Topraksız Kültürde Yetiştirilen Fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) Bitkisinin Büyümesi Üzerine Etkileri

Melek BİÇER BAYRAK^{1*}, Hatice DAĞHAN²

¹T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Sakarya İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, Sakarya

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Eskişehir

*Sorumlu Yazar (Corresponding author): bicermelek91@gmail.com

Özet

Demir eksikliği görülen topraklarda yetiştirilen bitkilerin Fe içeriğini artırmak, insan ve hayvanlarda görülen Fe eksikliğine bağlı sağlık problemlerini azaltmak için gerekli etkin, ucuz ve çevre dostu gübre üretim ve uygulamalarına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, yeşil sentez yöntemi ile sentezlenmiş olan demir oksit nanopartiküller (FeO-NP'ler) karakterize edildikten sonra fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) bitkisinin yetiştirildiği Hoagland besin çözeltisine artan dozlarda (0, 2, 4, 6, 8 ve 10 mg L⁻¹) uygulanmıştır. Deneme 3 tekerrürlü olarak ve kontrollü koşullara (16/8 saat aydınlık/karanlık, 25/20 °C sıcaklık ve % 60 nem, ışık şiddeti 10 kilo lüks (klx)) sahip iklim odasında 30 gün boyunca yürütülmüştür. Perlit ortamında yetiştirilen fasulye bitkisinde deneme boyunca oluşan morfolojik değişimler gözlenmiş, hasat edilmeden önce yaprakların klorofil içerikleri ölçülmüş ve daha sonra kök ve yeşil aksamın kuru ağırlık ve Fe, azot (N), fosfor (P), potasyum (K), kalsiyum (Ca), bakır (Cu), mangan (Mn) ve çinko (Zn) konsantrasyonları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, FeO-NP uygulaması hem yeşil aksam hem de kök sistemindeki Fe konsantrasyonu üzerinde önemli bir etki göstermiştir (sırasıyla % 5 ve % 1 düzeyinde). Yeşil aksamda en yüksek Fe konsantrasyonu (92.11 mg kg⁻¹) 10 mg L⁻¹ uygulama dozunda belirlenmiştir. Demir oksit NP uygulaması ile yeşil aksam kuru ağırlıkları ve N, Mg ve Cu konsantrasyonları kontrole kıyasla azalırken, P, K, Ca, Zn ve Mn konsantrasyonları ise uygulama dozuna göre değişiklik göstermiştir. Çalışma, azot hariç, bitki dokularındaki makro ve mikro besin maddesi konsantrasyonlarının yeterli olduğunu ortaya koymuştur.

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi

Geliş Tarihi :05.07.2023

Kabul Tarihi :15.08.2023

Anahtar Kelimeler

Demir nanopartikül nanogübre *Phaseolus vulgaris* L. noksanlık topraksız tarım

The Effects of Iron Oxide Nanoparticle (FeO-NP) Application on the Growth of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Grown in Soilless Culture

Abstract

In order to increase the Fe content of plants grown on iron-deficient soils and to reduce the health problems associated with Fe deficiency in humans and animals, there is a need for effective, cheap and environmentally friendly fertilizer production and fertilizer applications. In this study, iron oxide nanoparticles (FeO-NPs) synthesized by green synthesis method were characterized and applied in increasing doses (0, 2, 4, 6, 8 and 10 mg L⁻¹) to Hoagland nutrient solution in which beans (*Phaseolus vulgaris* L.) were grown. The experiment was carried out in three replicates for 30 days in a climate chamber with controlled conditions (16/8 hours' light/dark, 25/20 °C temperature and 60 % humidity, 10 Klux light intensity). Throughout the experiment, we observed morphological changes in bean plants grown in perlite culture, measured chlorophyll content in leaves before harvest, and determined dry weight of shoots and roots and concentrations of Fe, N, P, K, Ca, Cu, Mn, and Zn in shoots parts. The application of FeO-NP has exhibited a significant impact on the concentration of Fe in both the shoots and roots according to the results obtained (5 % and 1 %, respectively). The highest Fe concentration (92.11 mg kg⁻¹) in the shoots was determined from the 10 mg L⁻¹ application dose. With FeO-NP application, the dry weight of shoots as well as the concentrations of N, Mg, and Cu decreased in comparison to the control, while the concentrations of P, K, Ca, Zn, and Mn varied depending on the dosage of the application. Except for nitrogen, the study established that the macro and micronutrient concentrations in plant tissues were sufficient.

Research Article

Article History

Received :05.07.2023

Accepted :15.08.2023

Keywords

Iron nanoparticle nano fertilizer *Phaseolus vulgaris* L. deficiency soilless culture

1. Giriş

Demir (Fe), bitki büyümesi ve gelişmesi için gerekli olan önemli mikro besin elementlerinden biridir (Gülser ve Çelim, 2020) ve fotosentezden solunuma kadar çok çeşitli biyokimyasal süreçlerde önemli rol oynar. Kloroplastların işlevini sürdürmesi için gerekli olan Fe, klorofilin biyosentezine ve elektron taşıma sistemlerine katılarak, fotosentez hızını etkiler. Bu nedenle bitkilerde Fe eksikliğine bağlı olarak fotosentez hızının düştüğü bildirilmektedir (Santos ve ark., 2015; Bastani ve ark., 2018; Abdelhameed ve ark., 2019; Mohasselli ve ark., 2020). Bitkilerin Fe gereksinimleri diğer tüm mikro besin elementlerinden fazladır ve Fe'nin aerobik ortamlarda oksitlenmiş ferrik (Fe^{+2}) formunun çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle bitki büyümesini en çok sınırlayan üçüncü besin elementidir (Abdelhameed ve ark., 2019; Bastani ve ark., 2018). Bitkilerde Fe eksikliği oluşmasının çeşitli nedenleri vardır. Bunlar; toprağın az havalandırılmasıyla oluşan oksijen yetersizliği, yüksek $CaCO_3$, yüksek pH, karbondioksit fazlalığı ve ağır metallerdir (Bergmann, 1988). Ayrıca, yarı kurak bölgelerin alkali topraklarında ve organik madde oranı düşük topraklarda Fe noksanlığı tarımsal üretim için önemli ekonomik etkileri olan bir verim sınırlayıcı faktör haline gelir (Santos ve ark., 2015; Rana ve ark., 2019).

Bitkilerde büyüme, gelişme ve verim düşüklüğüne neden olan Fe noksanlığı, insan ve hayvanlarda da kansızlık (anemi) başta olmak üzere birçok anomaliye ve beslenme bozukluklarına neden olur (Abdelhameed ve ark., 2019). Dünya çapında 2.2 milyara yakın insan anemi ile mücadele etmektedir ve vakaların yaklaşık yarısı Fe eksikliğinden kaynaklanmaktadır (Knijnenburg ve ark., 2018). Gıdalarda Fe eksikliğinin önlenmesi için tarımsal üretimde verimli, toksik olmayan ve ekonomik gübrelerin geliştirilmesi

önemlidir (Rana ve ark., 2019). Sürdürülebilir tarım perspektifinden bakıldığında, nanoteknoloji, artan dünya nüfusunu beslemek ve küresel gıda üretimini artırmak için nanogübreler gibi yenilikçi gübre türleri geliştirme potansiyeline sahiptir (Diatta ve ark., 2020). Nanogübreler; bitkinin gelişimi için gerekli olan mikro (Fe, Cu, Zn) veya makro besin (N, P, K, Ca) maddelerini sağlayan ve nano malzemelerle kaplanmış tek bir besin maddesi veya kombinasyon halinde kullanılabilen 1-100 nm boyutlu substratlar kullanılarak geliştirilen gübreler olarak tanımlanır (Mandal, 2021). Yapılan araştırmalarda (Feregrino-Perez ve ark., 2018; Diatta ve ark., 2020; Seleiman ve ark., 2020) nanogübrelerin; küçük parçacık boyutları (<100 nm) nedeniyle bitkiye kolay nüfuz edebildiği, yüksek yüzey alanları ile maksimum reaktivite sağlayabildiği belirtilmektedir. Ayrıca, sentetik gübrelere kıyasla daha az miktarda gübre uygulaması ile verim artırılabilen ve besin kayıplarının en aza indirilmesine olanak sağlamaktadır (Predoi ve ark., 2020).

Nanopartiküller; yeşil sentez, sprey piroliz, mikrodalga destekli teknikler, yumuşak kimyasal yöntem, sol-jel işlemi ve homojen çökeltme gibi çeşitli yöntemlerle sentezlenebilmektedir (Seleiman ve ark., 2021). Yeşil sentez yönteminde metal ve metal oksit (FeO , ZnO , CuO , vd.) nanopartiküller, bitki özleri, bitki dokuları, mantarlar, mayalar, bakteriler, aktinobakteriler ve algler gibi doğal kaynaklar kullanılarak biyolojik olarak sentezlenirler. Bu yöntem basit, ucuz, toksik olmayan, çevre dostu ve verimli olması gibi avantajlarından dolayı en çok tercih edilen yöntemdir (Eren, 2020; Yaseen ve ark., 2020).

Son yıllarda tarımsal üretimde bitki büyümesini en çok sınırlayan elementlerden biri olan Fe noksanlığını gidermek ve gıdalarda Fe eksikliğini önleyebilmek için

boyutları <100 nm FeO-NP gübreleri geliştirilmiştir (Salata, 2004). Araştırmacıların farklı bitkiler [buğday (Ghafari ve Razmjoo (2015), mısır (Jalali ve ark. (2017), tütün Cai ve ark. (2020), domates Ardali ve ark. (2022), mısır (Wang ve ark. (2021)] üzerine FeONP'lerin etkileri konusunda yaptıkları çalışmalar, FeONP'lerin bitki büyümesi ve metabolizması üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Ancak bu etkilerin, metal nanoparçacıkların boyutuna, konsantrasyonuna, kimyasal bileşimine, zeta potansiyeline, kararlılığına ve şekline bağlı olarak değiştiği rapor edilmiştir (Tripathi ve ark., 2017). Bununla birlikte Rui ve ark. (2016) yer fıstığında, Sheykhbaglou ve ark. (2010) soya fasulyesinde, Afshar ve ark. (2012) börülcede FeO-NP uygulamasının bitkilerin Fe konsantrasyonları açısından bir farklılık oluşturmadığını bildirmişlerdir.

Baklagiller (*Fabaceae*) familyasının *Phaseolus* cinsinden meyvesi yaş ve kuru olarak tüketilebilen fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) bitkisi (Abdelhameed ve ark., 2019; İdikut ve ark., 2021) Fe noksanlığına oldukça duyarlı bir bitkidir (Zuo ve Zhang, 2011). Demir noksanlığı durumunda bitkinin protein içeriği, verim ve kalitesi olumsuz etkilenmektedir (Zuo ve Zhang, 2011).

Bu çalışmada; yeşil sentez yöntemiyle üretilen ve besin çözeltisine artan dozlarda (0, 2, 4, 6, 8 ve 10 mg L⁻¹) uygulanan FeO-NP'lerin fasulye bitkisinin büyümesi, gelişmesi, Fe ve diğer besin elementleri alımı üzerine etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Denemede tohum materyali olarak T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Eskişehir Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (GKTAEM)'den temin edilen fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) bitkisinin Sazova 1949 çeşidinin tohumları

kullanılmıştır. Bitkiler ticari olarak satın alınan perlit ortamında yetiştirilmiştir.

2.2. Yeşil sentez yöntemi ile demiroksit nanopartiküllerin sentezi ve karakterizasyonu

Denemede kullanılan demir oksit nanopartiküller (FeO-NP'ler) fıstık (Siirt fıstığı) bitkisinin yeşil yaprakları kullanılarak, Eren ve Baran, (2019) tarafından modifiye edilen yeşil sentez yöntemine göre Doç. Dr. Mehmet Fırat BARAN tarafından sentezlenmiş ve karakterizasyonları aşağıdaki yöntemlere göre yapılarak sonuçları yorumlanmıştır.

Fıstık yapraklarından yeşil sentez yöntemi ile sentezlenen FeO-NP'lerin şekli, morfolojisi ve yüzey analizi taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscopy (SEM)) cihazıyla (Quanta FEG 250, ABD) belirlenmiştir. Demir oksit-NP'lerin element içeriği ve bu elementlerin kimyasal konsantrasyonları SEM cihazına takılan Enerji Dağılımı X-Işını (EDX) detektörü (Quanta FEG 250, ABD) ile tespit edilmiştir. X-ışını kırılma (XRD) cihazı (BRUKER, D8 Discover XRD) ile FeO-NP'lerin kristal yapıları, tane boyutları saptanmıştır. Sulu çözelti içindeki nanopartiküllerin yüzey yükü ve boyut dağılımları ise Zeta-Sizer (Malvern, Zetasizer Nano ZSP) cihazıyla belirlenmiştir. Sentezlenen FeO-NP'lerin kimyasal kompozisyon analizi Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) spektroskopisi (Perkin-Elmer, ABD) cihazı kullanılarak karakterize edilmiştir (Eren ve Baran, 2019).

2.3. Su kültürü denemeleri

Fasulye tohumları perlit içeren (150 g) katı ortam kültürüne uygun 2 L'lik saksılara 5 adet ekilmiştir. Perlit ortamındaki bitkiler içeriği Tablo 1'de verilen ve pH: 5.5 (KOH ile ayarlanmış) olan Hoagland besin çözeltisi (Abdelhameed ve ark., 2019) ile desteklenmiştir. Deneme faktöriyel deneme

deseninde 3 yinelemeli olarak kurulmuştur. Tohumlar ekildikten sonra saksılara artan dozlarda (0, 2, 4, 6, 8 ve 10 mg L⁻¹) FeO-NP

içeren Hoagland besin çözeltisi uygulanmıştır.

Tablo 1. Hoagland besin çözeltisi içerisinde bulunan makro ve mikro besin elementleri ve derişimleri

Makro Elementler	Konsantrasyon	Mikro Elementler	Konsantrasyon
K ₂ SO ₄	0.75 mM	MnSO ₄ H ₂ O	1.00 µM
KH ₂ PO ₄	0.25 mM	ZnSO ₄ H ₂ O	1.00 µM
MgSO ₄ 7H ₂ O	0.65 mM	CuSO ₄ H ₂ O	0.10 µM
Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O	2.00 mM	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0.05 µM
KCl	0.01 mM	H ₃ BO ₃	10 µM

Hoagland besin çözeltisinde bitkiler için gerekli Fe miktarı 5 mg L⁻¹ (Hoagland ve Arnon, 1950) olduğu dikkate alınarak FeO-NP dozları belirlenmiştir. Ekimden 1 hafta sonra bitkiler çimlenmiş ve bitkiler kontrollü koşullarda (16/8 saat ışık/karanlıkta, 25/20 °C sıcaklık ve % 60 nem, ışık yoğunluğu 10 klx) 30 gün süre ile yetiştirilmiştir.

Demir oksit NP uygulamalarının etkisiyle yapraklarda değişen klorofil içerikleri gelişimini tamamlamış en genç (üstten itibaren 3. ve 4. yapraklar) yapraklardan Konica-Minolta marka SPAD-502 model klorofil ölçüm cihazı ile SPAD birimi olarak ölçülmüş ve sonra bitkiler hasat edilerek analizleri yapılmıştır.

2.4. Bitki hasatı ve örneklerin analize hazırlanması

Denemede yetiştirilen bitkiler yeşil aksam ve kök olarak hasat edilip saf suyla yıkandıktan sonra kurutma dolabında (65 °C'de sabit ağırlığa gelinceye kadar) kurutulmuştur. Daha sonra bitkilerin kuru ağırlıkları alınarak bitki analizleri için bitki öğütme değirmeninde (Retsch MM301, Almanya) öğütülmüştür. Öğütülmüş bitki materyalleri nitrik asit (HNO₃) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) ile yaş yakma yöntemine göre yakılmıştır (Müftüoğlu ve ark., 2012). Elde edilen süzükten Fe, Zn, Cu, Mn, Ca ve Mg konsantrasyonları Analytik Jena marka NovAA 350 model Atomik Absorpsiyon Spektrofotometre (AAS) cihazında, K

konsantrasyonu ise Flame fotometre cihazında (BWB, XP2011) belirlenmiştir. Bitki yaprak örneklerinde N analizi modifiye Kjeldahl yöntemine (Kacar, 1972) göre ve P analizi ise sarı renk yöntemine göre yapılmış ve konsantrasyonlar spektrofotometre (Thermo, AQA200E) cihazında ölçülmüştür (Kacar, 1995).

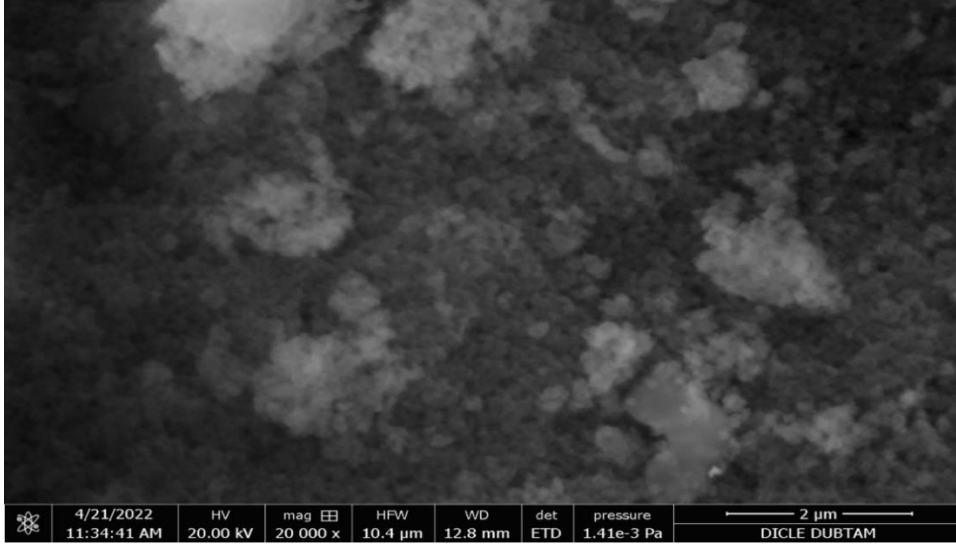
2.5. İstatistiksel analiz

Araştırmadan elde edilen sonuçların varyans (ANOVA) analizi SPSS istatistik paket programı kullanılarak ortalamalar arasındaki farkların önem dereceleri ve çoklu karşılaştırma yöntemi Walker-Duncan testi uygulanarak gruplandırılmıştır. ANOVA testinde en uygun FeO-NP konsantrasyonunun belirlenmesinde uygulanan FeO-NP dozları bağımsız bir değişken olarak dikkate alınmıştır. Bu değişkenin bitkideki etkileri (klorofil içerikleri, yeşil aksam ve kök biyokütle değişimleri, makro ve mikro element konsantrasyonları) ise bağımlı değişkenler olarak ele alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Demir oksit nanopartiküllerin karakterizasyonu

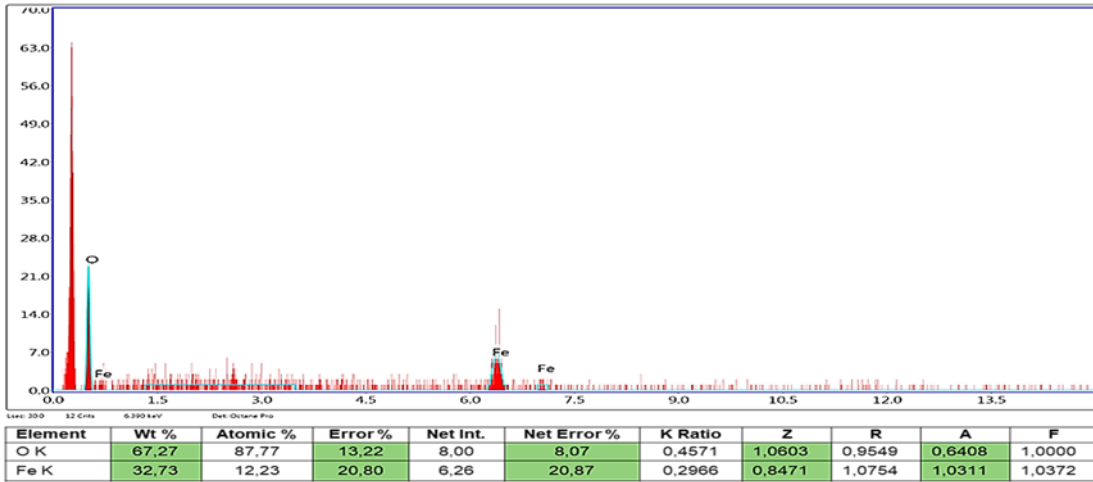
Demir oksit nanopartiküllerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünde (Şekil 1) küresel yapıda olduğu görülmektedir. Bu sonuç da sentezlenen FeO-NP'lerin biyolojik uygulamalardaki kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 1. Demiroksit nanopartiküllerin SEM görüntüsü

Enerji dağılım X-ışını spektrometre (EDX) analizi ile FeO-NP materyalinin kimyasal kompozisyonu hakkında, hangi elementleri içerdiği ve bu elementlerin

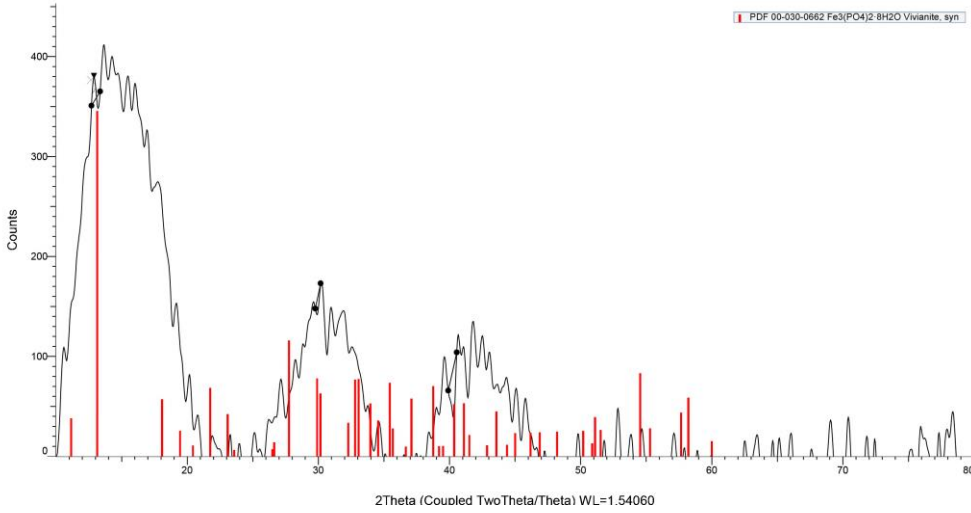
dağılımı ve yoğunluğu hakkında bilgiler elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Demir oksit nanopartiküllerin enerji dağılım X-ışını spektrometre grafiği

Fıstık yapraklarından sentezlenen FeO-NP'lerin EDX analiz sonucuna göre partiküllerin % 32.73'ü demire (Fe) ve % 67.27'sinin oksijene (O) ait olduğunu göstermektedir (Şekil 2). Bu sonuç biyosentezi yapılan FeO-NP'lerin çözeltideki etkinliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Denemede kullanılan FeO-NP'lerin element içeriği X-ışını kırınım

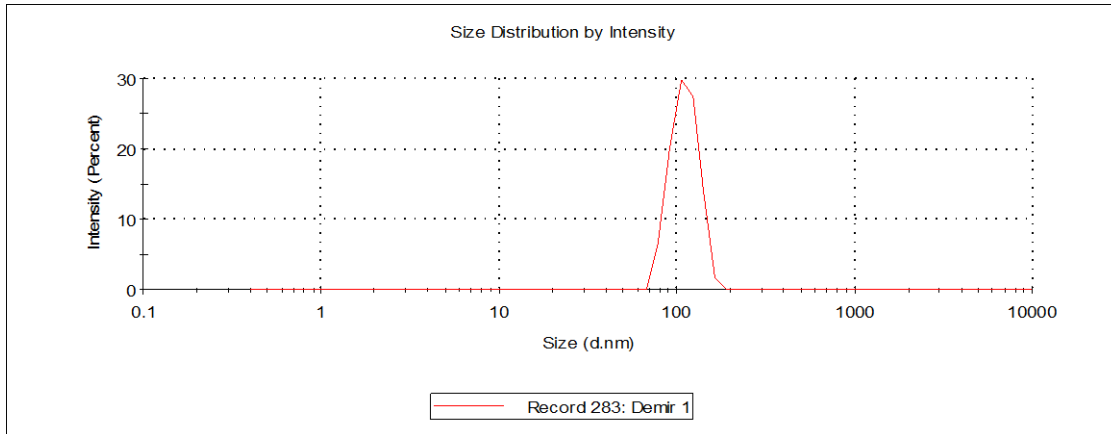
(XRD) cihazı (BRUKER, D8 Discover) ile belirlenmiştir (Eren ve Baran, 2019). Demir nanopartiküllerin Debye Sherer denkleminde 31.43 nm boyutunda olduğu hesaplanmıştır (Şekil 3). Sonuçlar oldukça küçük boyutta sentezlenen Fe nanopartiküllerin başarılı bir şekilde bitki özüyle sentezlendiği göstermektedir.



Şekil 3. Demir oksit nanopartiküllerin X-ışını kırınım (XRD) grafiği

Biyosentezi yapılan toz halindeki FeO-NP'ler sulu hale getirildikten sonra analiz edilmiş ve boyutlarının ortalama olarak 50-

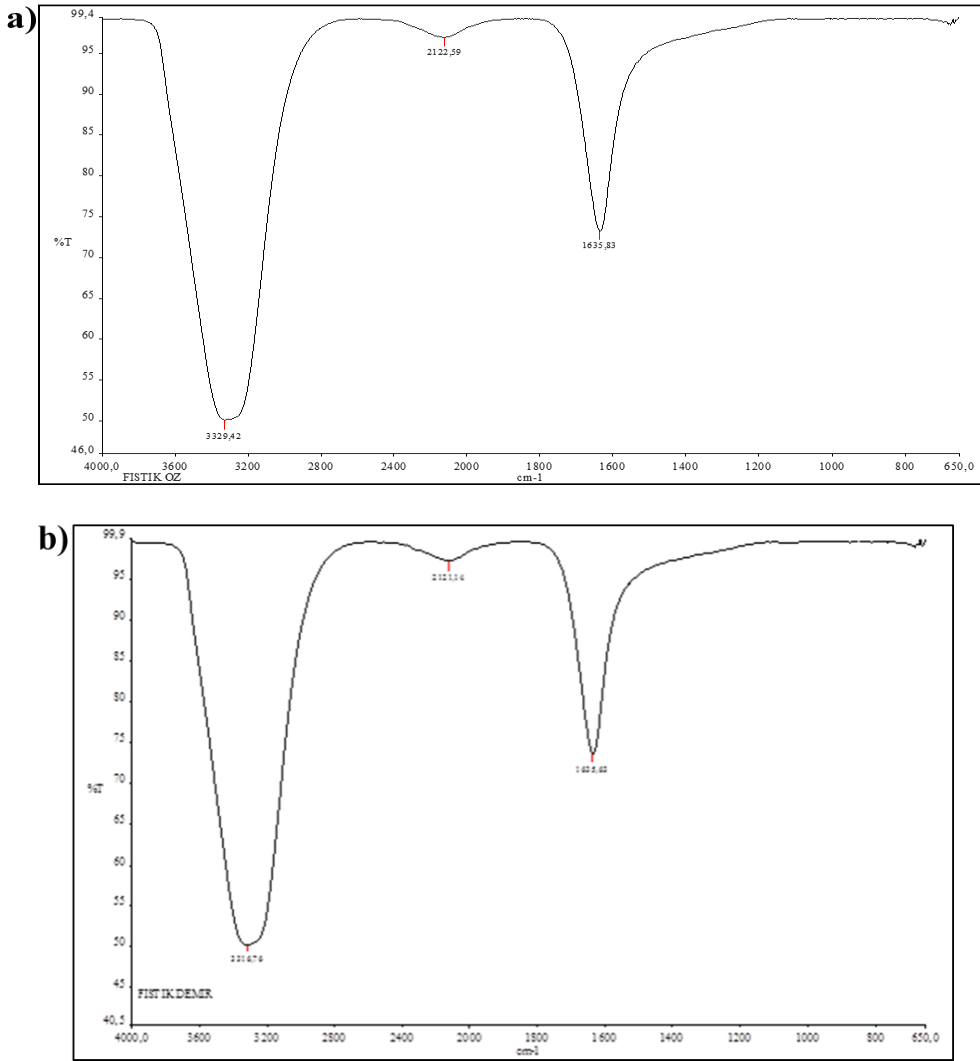
130 nm aralığında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Demir oksit nanopartiküllerin zeta boyut grafiği

Kurutulmuş yaprak ekstraktından sentezlenen FeO-NP'lerin kimyasal kompozisyon analizi Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) spektroskopisi cihazında (Perkin-Elmer, ABD marka model), 650–4000 cm^{-1} FTIR spektrum aralığında karakterize edilmiştir (Eren ve Baran, 2019). Örneklerin FTIR analizinden elde edilen sonuçlara (Şekil 5) göre belirli

fonksiyonel gruplar üzerinden reaksiyonun gerçekleştiği tespit edilmiştir. Çalışmada önce özüt (Şekil 5a) daha sonra özüt ve demir tuzu (Şekil 5b) reaksiyon ortamına konulduktan sonra tekrar analiz edilerek fonksiyonel gruplar arasındaki değişim reaksiyonun olduğu saptanmıştır.



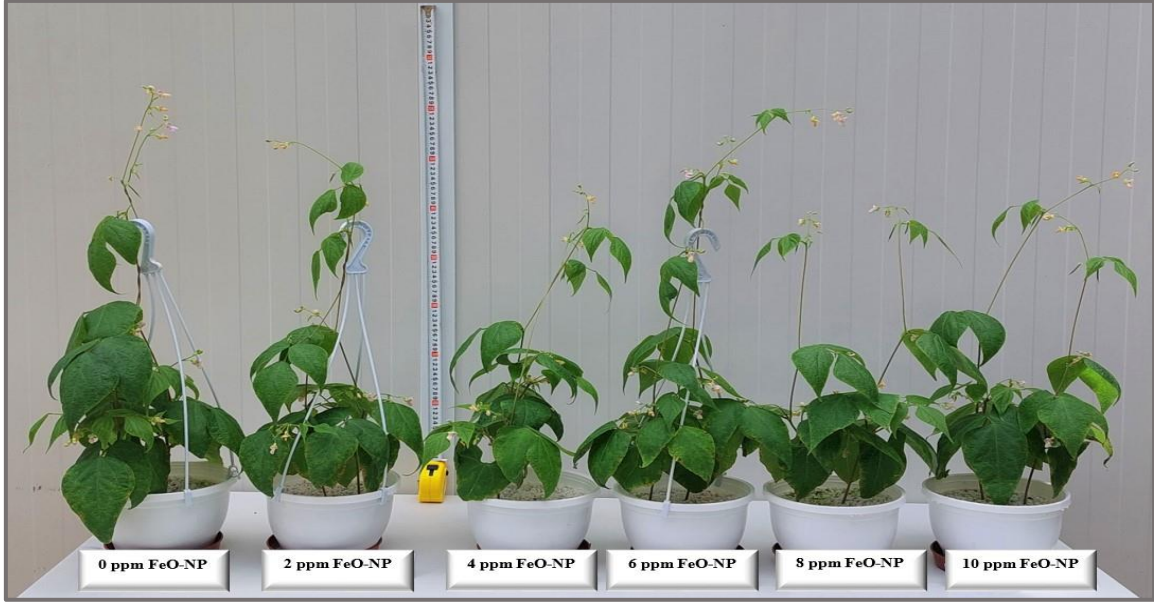
Şekil 5. Örneklere ait FTIR analiz grafikleri: a) Fıstık bitki özütünün FTIR analiz grafiği, b) FeO-NP'lerin FTIR analiz grafiği

3.2. Fasulye katı ortam kültürü denemesi

3.2.1. Morfolojik gözlemler

Demir elementinin bitkilerdeki kritik noksanlık seviyesi 50-150 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Kacar ve Katkat, 2009). Bitkiler yeteri kadar Fe alamadıklarında (<50 mg kg⁻¹) Fe noksanlığı ile karşılaşmakta ve bitki içinde Fe hareketsiz olduğu için belirtiler ilk olarak genç yapraklarda damarlar arası sararma ve damarların yeşil kalması şeklinde görülmektedir (Güneş ve ark., 2013; Rana ve ark., 2019). Noksanlık şiddetlendikçe yeni oluşan genç yapraklarda hiç klorofil

bulunmadığı için yaprak beyaz renge dönüşmektedir (Kacar ve Katkat, 2009; Rana ve ark., 2019). Bu çalışmada, artan dozlarda (0, 2, 4, 6, 8 ve 10 mg kg⁻¹) FeO-NP uygulamalarının fasulye bitkisinin gelişimine etkileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Uygulamalar sonucunda FeO-NP'in bitki yapraklarında toksisite ile oluşan nekroz ve Fe noksanlığı sebebiyle meydana gelen kloroz gözlemlenmemiştir. Artan dozlarda FeO-NP uygulaması ile bitki vejetatif aksamında ve bitkinin genel gelişimde belirgin değişiklikler oluşmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. Demir oksit nanopartikül uygulamalarının fasulye bitkisi gelişimine etkisi

Denemede bitkilerin büyüme periyodunun kısa tutulması ve olası noksanlık belirtisi başlamadan hasat yapılması, tohum Fe konsantrasyonunun ($46.92 \pm 2.09 \text{ mg Fe kg}^{-1}$) 30 günlük büyüme için yeterli olması ya da seçilen çeşidin Fe noksanlığına dayanıklı bir çeşit olması gibi nedenlerle bitkilerde belirgin belirtiler gözlenmemiştir.

3.2.2. Klorofil içeriği (SPAD değeri)

Demir oksit NP uygulamalarının fasulye bitkisinin, yaprak klorofil içeriği üzerine etkisi varyans analiz sonuçlarına göre

istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 1). Hasat öncesinde yapılan klorofil ölçümlerinde en yüksek klorofil içeriği ($37.13 \text{ SPAD birimi}$) FeO-NP uygulanmayan bitkilerinin yapraklarında ölçülmüştür. Diğer yandan en düşük klorofil değeri ($35.13 \text{ SPAD birimi}$) ise, 10 mg L^{-1} FeO-NP uygulama dozunda elde edilmiştir. Kontrole kıyasla tüm dozlarda bitkilerin yaprak klorofil içeriğine artan dozlarda uygulanan FeO-NP'lerin bir etkisi olmadığı saptanmıştır. Morfolojik gözlemler de bu sonucu desteklemektedir.

Tablo 2. FeO-NP uygulamalarının fasulye bitkisi yaprak klorofil içerikleri ve bitki kuru ağırlıkları üzerine etkisi

Dozlar (FeO-NP)	Klorofil (SPAD Birimi)	Yeşil Aksam Kuru Ağırlığı (g yeşil aksam ⁻¹)	Kök Kuru Ağırlığı (g kök ⁻¹)
0 mg L ⁻¹	37.13	3.29 a	0.62
2 mg L ⁻¹	35.40	2.76 b	0.64
4 mg L ⁻¹	35.50	2.46 bc	0.56
6 mg L ⁻¹	35.80	2.68 b	0.54
8 mg L ⁻¹	35.37	2.25 c	0.60
10 mg L ⁻¹	35.13	2.67 b	0.63
F	2.00 ^{Ö.D.}	13.25**	1.81 ^{Ö.D.}

(**) $P \leq 0.01$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı, (*) $P \leq 0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı, (Ö.D.) İstatiksel olarak önemli değil

Benzer şekilde Gui ve ark. (2015) yürüttükleri su kültürü denemesinde pirinç bitkisine (*Oryza sativa*) kontrollü

koşullarda 0, 2, 20 ve 200 mg L⁻¹ konsantrasyonlarında FeO-NP uygulamalarının yaprak klorofil içeriğinde

önemli bir değişiklik göstermediğini bildirmiştir. Ayrıca, Moosavi ve Ronaghi (2010) fasulyede ve Sohrabi ve ark. (2012) soya fasulyesinde farklı Fe içerikli gübrelerin kullanılmasıyla Fe konsantrasyonuna bağlı olarak klorofil içeriklerinde meydana gelen değişimlerin önemli olmadığını tespit etmişlerdir. Ancak, bu sonuçların aksine Yang ve ark. (2020) yapraktan püskürtme ve toprağa artan dozlarda FeO-NP uygulamalarının soya fasulyesinde klorofil içeriğini artırdığını tespit etmişlerdir. Benzer şekilde Ramadan ve ark. (2020) soya fasulyesine yapraktan FeO-NP uygulamalarından 30 mg kg⁻¹ dozunda fotosentetik pigmentlerin kontrole göre arttığını bildirmişlerdir.

3.2.3. Kuru ağırlıklar

Demir oksit NP uygulamalarının yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları üzerine etkisinin ortalamaları ve çoklu karşılaştırma yöntemi Walker-Duncan testine göre oluşan gruplar Tablo 1’de verilmiştir. Fasulye bitkisinin yeşil aksam kuru ağırlığına FeO-NP’nin etkisi istatistiksel olarak $P \leq 0.01$ düzeyinde önemli iken, kök kuru ağırlığı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Fasulye bitkisinin yeşil aksamında en yüksek kuru ağırlık FeO-NP uygulanmamış kontrol grubu saksılarında elde edilmiştir. En düşük kuru ağırlık 2.25 g yeşil aksam⁻¹ olarak 8 mg L⁻¹ FeO-NP uygulanan saksılarda belirlenmiştir. Artan dozlarda (2, 4, 6, 8 ve 10 mg L⁻¹) FeO-NP uygulamalarında kontrole göre yeşil

aksamda daha az kuru ağırlık elde edilmiştir.

Ghasemi-Fasaei ve Ronaghi (2008), buğdaya çeşitli Fe içerikli gübreleri (Fe-EDDHA ve FeSO₄.7H₂O) yapraktan ve topraktan uyguladıkları çalışmalarında Fe uygulamasına bağlı olarak bitkide kuru maddenin artmadığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar bu durumu Fe ile toprak çözeltisindeki diğer katyonlar arasındaki dengenin bozulması ve toprak çözeltisindeki miktarlarının azalmasıyla ilişkilendirmişlerdir. Elde edilen sonuçların aksine, Ramadan ve ark. (2020), yapraktan 30 mg kg⁻¹ FeO-NP uygulamasının soya fasulyesinin yeşil aksam ve kök kuru ağırlıklarını kontrole göre ($P < 0.05$) artırdığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde, De Souza ve ark. (2021), fasulye bitkisine 2000 mg kg⁻¹ FeO-NP uygulanmasının kontrole göre kök kuru ağırlığını (% 10.1), gövde kuru ağırlığını (% 9.8) ve yaprak kuru ağırlığını (% 8) artırdığını rapor etmişlerdir. Bu çalışmada uygulanan en yüksek doz (10 mg FeO-NP L⁻¹), Ramadan vd. (2020) ve De Souza ve ark. (2021)’in bildirdiği dozlardan düşük olması nedeniyle FeO-NP uygulamalarının etkisi bariz bir şekilde görülemez olabilir.

3.2.4. Yeşil aksam ve kök demir konsantrasyonları

Artan dozlarda FeO-NP uygulamalarının fasulye bitkisinin yeşil aksam ve kök Fe konsantrasyonlarına etkisi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 3. Demiroksit nanopartikül uygulamalarının fasulye bitkisinin yeşil aksam ve kök Fe konsantrasyonu üzerine etkisi

Dozlar (FeO-NP)	Yeşil Aksam (mg kg ⁻¹)	Kök Aksam (mg kg ⁻¹)
0 mg L ⁻¹	78.33 b	47.5 d
2 mg L ⁻¹	77.46 b	62.5 c
4 mg L ⁻¹	83.35 ab	68.5 c
6 mg L ⁻¹	88.59 a	64.6 c
8 mg L ⁻¹	85.55 ab	153 a
10 mg L ⁻¹	92.11 a	96.7 b
F	3.921*	208.8**

(**) $P \leq 0.01$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı, (*) $P \leq 0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı

Fasulye bitkisine artan dozlarda uygulanan FeO-NP ile en yüksek yeşil aksam Fe konsantrasyonu (92.11 mg kg^{-1}) 10 mg L^{-1} uygulama dozundan, en düşük yeşil aksam Fe konsantrasyonu (77.46 mg kg^{-1}) ise 2 mg L^{-1} dozundan elde edilmiştir (Tablo 2). Demir oksit NP uygulamalarından 2 mg L^{-1} dozu haricinde tüm uygulamalarda bitkilerin, kontrol grubu bitkilerine (78.33 mg kg^{-1}) göre % 6.4 ile % 17.6 arasında bir artışla daha yüksek Fe konsantrasyonuna sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu artış istatistiki olarak $P \leq 0.05$ düzeyinde önemli bulunmuştur. Morfolojik gözlemlerde bitkinin gelişiminde büyük farklılıkların oluşmayışı da verileri destekler niteliktedir. Bu durumun nedeni olarak çalışmada kullanılan Sazova fasulye tohumlarının Fe ($46.92 \pm 2.09 \text{ mg kg}^{-1}$) içermesi ve bitkinin gelişme periyodu içerisinde Fe ihtiyacını tohumda mevcut olan Fe'den kullanmış olabileceği düşünülmektedir. Diğer yandan genel olarak bitkilerde Fe konsantrasyonu $50\text{-}250 \text{ mg kg}^{-1}$ arasında yeterli olduğu rapor edilmiştir (Kacar ve Katkat, 2009). Ayrıca, Jones ve ark. (1991)'da fasulyesi bitkisi genç yapraklarında $50 - 300 \text{ mg kg}^{-1}$ Fe miktarının bitki büyümesi için yeterli olduğunu bildirilmişlerdir. Rapor edilen bu bilgilere göre deneme bitkilerinin Fe konsantrasyonlarının $77.46 - 92.11 \text{ mg kg}^{-1}$ arasında değiştiği ve tüm uygulama dozlarında bitkilerin yeşil aksam Fe içeriğinin yeterli olduğu saptanmıştır. Bu sonuç bitkilerde Fe noksanlığı belirtilerinin gözlemlenmemesini açıklamaktadır.

Demir oksit NP uygulamasının bitki kök

aksamının Fe konsantrasyonuna etkisi $P \leq 0.01$ düzeyinde istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Tablo 2). Bitki kök aksamında en yüksek Fe konsantrasyonu (153 mg kg^{-1}) 8 mg L^{-1} FeO-NP uygulama dozunda, en düşük Fe konsantrasyonu (47.5 mg kg^{-1}) ise kontrol grubu (0 mg L^{-1} FeO-NP) bitkilerde belirlenmiştir. Köklerin Fe konsantrasyonu kontrole kıyasla artan dozlarda FeO-NP uygulamaları ile % 31,6 ile 222 arasında artış göstermiştir. Benzer sonuçlar De Souza ve ark. (2021) tarafından da rapor edilmiştir. Araştırmacılar, bitkiye kontrollü koşullarda topraktan 2000 ppm FeO-NP uygulanmasının Fe konsantrasyonunu kontrole kıyasla kök (% 58,6) ve gövdede (% 48,6) artırdığını bildirmişlerdir. Wang ve ark. (2021) mısır bitkisine sırasıyla 50 ve 500 mg kg^{-1} FeO-NP uygulamışlar ve kök aksamında en yüksek Fe konsantrasyonunu 500 mg kg^{-1} FeO-NP uygulamasında tespit etmişlerdir. Diğer yandan Rui ve ark. (2016) yer fıstığında, Sheykhbaglou ve ark. (2010) soya fasulyesinde, Afshar ve ark. (2012) bürülcede FeO-NP uygulamasının bitkilerin Fe konsantrasyonları açısından bir farklılık oluşturmadığını bildirmişlerdir.

3.2.5. Mineral besin elementi konsantrasyonları

Fasulye bitkisinde, FeO-NP uygulamalarının yeşil aksam makro (N, P, K, Ca ve Mg) ve mikro (Zn, Cu ve Mn) besin elementlerinin konsantrasyonları üzerine etkisinin ortalamaları ve çoklu karşılaştırma yöntemi Walker-Duncan testine göre oluşan gruplar Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 4. Demiroksit nanopartikül uygulamalarının bitki yeşil aksamının bazı besin elementi konsantrasyonlarına etkileri

Dozlar (FeO-NP)	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Cu	Mn
0 mg L ⁻¹	2.27 a	0.46 a	2.89 a	2.21 bc	0.54 a	52.63 bc	9.92 a	154 a
2 mg L ⁻¹	2.01 b	0.41 b	2.57 b	2.13 c	0.44 b	53.17 bc	8.46 b	118 b
4 mg L ⁻¹	2.08 b	0.45 a	2.70 ab	2.30 a-c	0.45 b	56.80 a	8.34 b	143 a
6 mg L ⁻¹	2.12 b	0.40 b	2.90 a	2.47 ab	0.44 b	50.80 c	7.63 b	116 b
8 mg L ⁻¹	2.10 b	0.45 a	2.89 a	2.56 a	0.43 b	56.93a	8.62 b	97.3 c
10 mg L ⁻¹	2.08 b	0.39 b	2.62 ab	2.32 a-c	0.43 b	53.60 b	8.63 b	113 bc
F	16.69 ^{ö.d.}	12.96**	3.340*	3.514*	3.416*	10.20**	6.23**	16.05**

(**) $P \leq 0.01$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı, (*) $P \leq 0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı, (Ö.D.) İstatiksel olarak önemli değil

Azot bitkilerde çok sayıda önemli işlevi olan bir besin elementidir. Amino asitlerin yapısına katılmasının yanında nükleik asitler ve klorofilin de bileşimine katılan N bitkilerde vejetatif gelişmeyi teşvik eder (Kacar ve Katkat, 2009). Denemede en yüksek N konsantrasyonu (% 2.27) kontrol grubu bitkilerinde belirlenmiştir. Elde edilen veriler FeO-NP uygulamalarının fasulye bitkisinin N konsantrasyonlarına etkisinin istatistiki olarak önemli olmadığını göstermiştir. Jones ve ark. (1991)'e göre fasulye bitkisi genç yapraklarında % N düzeyinin 5.00 - 6.00 olmasının bitkiler için yeterli olduğu bildirilmiştir. Denemede bitkilerin N konsantrasyonları % 2.01 - 2.27 arasında değişmekle birlikte bu değerler bitkilerde N noksanlığı olduğunu göstermektedir. Bitki dokularındaki N noksanlığı klorofil içeriği ve kuru ağırlıkta da azalmaya neden olmuştur. Benzer şekilde, Heitholt ve ark. (2003), soya fasulyesinde farklı Fe'li gübre uygulamaları sonucunda çiçeklenme dönemi öncesinde Fe uygulamalarının bitkide N konsantrasyonu üzerinde önemli bir etki oluşturmadığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, Yetim (2008), soya fasulyesinde Fe uygulamalarına bağlı olarak N konsantrasyonlarına önemli bir değişimin olmadığı bildirilmiştir.

Fosfor fotosentez, solunum ve protein sentezi gibi bitkiler için önemli pek çok fizyolojik olayda görev alır. Ayrıca bitkide kök gelişimi ve meyve oluşumunu teşvik

eder, bitkinin hastalıklara karşı direncini artırır. Fosfor noksanlığında bitkide çiçek oluşumu gecikir, meyve ve tohum oluşumunda aksaklıklar meydana gelir (Kacar ve Katkat, 2009). Tablo 3'e göre en yüksek P konsantrasyonu (% 0.46) FeO-NP uygulanmamış kontrol bitkilerinde, en düşük P konsantrasyonu (% 0.39) ise 10 mg L⁻¹ FeO-NP uygulanmış bitki dokularında ölçülmüştür. Demir oksit NP uygulamasının bitki yeşil aksamının P konsantrasyonuna etkisi istatistiki olarak $P \leq 0.01$ düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Jones ve ark. (1991)'e göre fasulye bitkisi genç yapraklarında % 0.35 - 0.75 P konsantrasyonunun bitkiler için yeterli düzeyde olduğu bildirilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında bitki dokularının P konsantrasyonlarının yeterli olduğu saptanmıştır. Yang ve ark. (2020) soya fasulyesinde 15, 20 ve 36 mg saksı⁻¹ FeO-NP gübrenin yaprak ve topraktan uygulaması sonucunda bitkinin P konsantrasyonunun istatistiki olarak önemli oranda düştüğünü bildirilmiştir. Ayrıca farklı Fe'li gübreler kullanılarak yapılan çalışmalarda; Karaman ve ark. (1999), fasulyeye uygulanan FeSO₄'ün bitki P konsantrasyonunu önemli düzeyde etkilemediği bildirilmiştir. Heitholt ve ark. (2003), soya fasulyesinde çiçeklenme öncesi Fe'li gübre uygulamasının bitki P konsantrasyonunda önemli bir değişim oluşturmadığı tespit edilmiştir.

Potasyumun bitkilerde protein sentezi,

enzim aktivasyonu, fotosentez, anyon katyon dengelerinin sağlanması ve stomaların açılıp kapanması gibi önemli işlevleri vardır (Kacar ve Katkat, 2009). Demir oksit NP uygulamasının bitki yeşil aksamının K konsantrasyonuna etkisi istatistiki olarak $P \leq 0.05$ düzeyinde anlamlı bulunmuştur (Tablo 3). Fasulye bitkisinde K konsantrasyonları % 2.57 - 2.90 arasında değişmekte olup en yüksek K (% 2.89 - 2.90) 0, 6 ve 8 mg L⁻¹ FeO-NP uygulamalarında, en düşük K konsantrasyonu (% 2.57) 2 mg L⁻¹ FeO-NP uygulamasında belirlenmiştir. Jones ve ark. (1991)'a göre fasulye bitkisi genç yapraklarında % K 2.25 - 4.00 arasında yeterli olduğu belirtilmiş ve bu değerlere göre denemede bitkilerin K konsantrasyonlarının yeterli düzeyde olduğu saptanmıştır. Çeşitli bitkiler üzerinde yapılan çalışmalarda Fe-K arasındaki ilişkinin farklılık gösterdiği rapor edilmiştir. Hewitt ve Bolle-Jones (1953) Fe'nin K'nın translokasyonunu engellediği ve K'nın ise Fe'nin kullanımını artırdığı bildirilmiştir. Çelik ve Katkat (2005), şeftali yapraklarında Fe klorozunun şiddeti arttıkça, yapraklardaki K konsantrasyonunun arttığı bildirilmiştir.

Kalsiyum hücre duvarının yapısında yer alır, membran geçirgenliği ve anyon-katyon dengesinin sağlanmasında görev alır. Bitkisel dokuların donma-çözölmeye karşı güçlenmesini ve bitkilerin çeşitli hastalıklara karşı dirençli olmasını sağlar (Kacar ve Katkat, 2009). Tablo 3'e göre fasulye bitkisine artan dozlarda uygulanan FeO-NP ile bitkideki Ca konsantrasyonu % 2.13 - 2.56 arasında değişmektedir. En yüksek Ca konsantrasyonu (% 2.56) 8 mg L⁻¹ FeO-NP uygulamasında, en düşük Ca konsantrasyonu (% 2.13) ise 2 mg L⁻¹ FeO-NP uygulamasında belirlenmiştir ve bu doz dışında tüm uygulamalarda Ca konsantrasyonu kontrole göre artış göstermiştir. Fasulye bitkisine uygulanan FeO-NP'lerin bitki yeşil aksamının Ca konsantrasyonuna etkisi $P \leq 0.05$ düzeyinde

istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Jones ve ark. (1991)'e göre fasulye bitkisi genç yapraklarında Ca konsantrasyonu % 1.50 - 2.50 arasında yeterli düzeyde olduğu bildirilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında deneme bitkilerinde Ca konsantrasyonunun yeterli olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar bazı araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir. De Souza ve ark. (2019), fasulye bitkisine FeO-NP gübresi uygulaması sonucunda yeşil aksam Ca konsantrasyonunun % 25 - 26 arttığını rapor etmişlerdir. Farklı bir araştırmada ise, Jalali ve ark. (2017), mısır bitkisinde FeO-NP uygulamasının bitki dokularında Ca konsantrasyonunu artırdığını bildirmişlerdir.

Magnezyum bitkiye yeşil rengini veren klorofilin merkez atomudur. Fotosentez ve protein sentezinin yanında enzim aktivasyonunda rol oynar (Kacar ve Katkat, 2009). Tablo 3'de FeO-NP uygulaması ile en yüksek Mg konsantrasyonu (% 0.54) FeO-NP uygulanmamış kontrol bitkisinde, en düşük Mg konsantrasyonu (% 0.43) ise 8 ve 10 mg L⁻¹ FeO-NP uygulanmış bitkilerde tespit edilmiştir. Fasulye bitkisine artan dozlarda FeO-NP uygulamalarının bitki yeşil aksamında Mg konsantrasyonunu azalttığı saptanmıştır. Fasulye bitkisine FeO-NP uygulamalarının Mg konsantrasyonuna etkisi $P \leq 0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Jones ve ark. (1991)'e göre fasulye bitkisi genç yapraklarında Mg konsantrasyonunun % 0.30 - 1.00 arasında olduğu zaman bunun bitkiler için yeterli olduğu bildirilmiştir. Bu durumda deneme bitkilerinde Mg konsantrasyonu yeterli düzeyde olduğu saptanmıştır. Farklı bir çalışmada Feng ve ark. (2022), FeO-NP uygulanan buğday bitkilerinde Mg konsantrasyonunun önemli ölçüde değişmediği rapor edilmiştir. Ayrıca, Güneş ve ark. (1998) hidroponik ortamda yetiştirilen domateste artan Fe konsantrasyonlarına karşın Mg konsantrasyonlarında düşüş olduğu bildirilmiş ve bu durum Mg ve Fe

arasındaki antagonist ilişkiyle açıklanmıştır.

Çinko bitkilerde birçok enzimin aktive edilmesinde, membran kalitesini artırılmasında ve oksin metabolizmasında görev alan bir mikro elementtir (Kacar ve Katkat, 2009). Tablo 3'e göre en yüksek Zn konsantrasyonu (56.93 mg kg^{-1}) 8 mg L^{-1} FeO-NP uygulamasında, en düşük Zn konsantrasyonu (50.80 mg kg^{-1}) 6 mg L^{-1} FeO-NP uygulamasında tespit edilmiştir. Uygulanan FeO-NP'lerin bitki yeşil aksamının Zn konsantrasyonuna etkisi istatistiksel olarak $P \leq 0.01$ düzeyinde önemli bulunmuştur. Jones ve ark. (1991), fasulye bitkisi genç yapraklarında $20 - 200 \text{ mg kg}^{-1}$ Zn konsantrasyonunun bitki için yeterli olduğu bildirilmiştir.

Denemede bitkilerinin Zn konsantrasyonunun bu değerlere göre yeterli olduğu tespit edilmiştir. Soya fasulyesi ve sorguma FeO-NP gübre uygulamasının bitkilerin Zn konsantrasyonunu artırdığı rapor edilen bazı araştırmalar (Yang ve ark., 2020; Golshahi, 2018) sonuçlarımızı desteklemektedir. Diğer yandan bazı çalışmalarda ise Fe ile Zn arasında antagonist ilişki olduğu tespit edilmiştir. Kobraee (2016) soya fasulyesinde, Jozedaemi ve ark. (2014) fasulyede ve Güneş ve ark. (1998) domatestede çeşitli Fe'li gübreler kullanılarak gübrelemenin bitki Zn konsantrasyonunu düşürdüğünü bildirmişlerdir.

Bakır bitkilerde N ve enzim metabolizmasında ve fotosentezde elektron alışverişinde görev alır (Kacar ve Katkat, 2009). Demir oksit NP uygulamasının bitki yeşil aksamının Cu konsantrasyonuna etkisi istatistiksel olarak $P \leq 0.01$ düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Tablo 3'e göre FeO-NP uygulaması ile fasulye bitkisinin yeşil aksam Cu konsantrasyonu $7.63 - 9.92 \text{ mg kg}^{-1}$ arasında değişim göstermiş olup en yüksek Cu konsantrasyonu FeO-NP uygulanmamış kontrol grubunda, en düşük

Cu konsantrasyonu ise 6 mg L^{-1} FeO-NP uygulamasında belirlenmiştir. Bütün FeO-NP uygulamalarının kontrol bitkisine göre Cu konsantrasyonunda düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte Jones ve ark. (1991), fasulye bitkisi genç yapraklarında $7-30 \text{ mg kg}^{-1}$ arasında Cu konsantrasyonunun yeterli olduğu sonucuna göre bitkilerin Cu konsantrasyonunun yeterli olduğu saptanmıştır. Bulgularımızdan farklı olarak, Karaman ve ark. (1999), artan konsantrasyonlarda Fe uygulamalarının fasulyede yeşil aksam Cu konsantrasyonunu azalttığı ve bu durumunun Fe ve Cu arasındaki antagonist ilişkiden kaynaklandığı bildirilmiştir.

Mangan bitkilerde protein, karbonhidrat ve lipid metabolizmalarında, enzimlerin aktive edilmesi ve fotosentezde elektron aktarımı gibi önemli işlevlere sahiptir (Kacar ve Katkat, 2009). Bu çalışmada, FeO-NP uygulamasının bitki yeşil aksamının Mn konsantrasyonuna etkisi $P \leq 0.01$ düzeyinde istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Tablo 3'e göre bitki yeşil aksamında en yüksek Mn konsantrasyonu (154 mg kg^{-1}) kontrol grubunda, en düşük Mn konsantrasyonu (97.3 mg kg^{-1}) ise 8 mg L^{-1} FeO-NP uygulamasında tespit edilmiştir. Demir oksit-NP uygulamalarında kontrol grubuna göre Mn konsantrasyonu azalma göstermiştir. Jones ve ark. (1991), fasulye bitkisi genç yapraklarında $50-300 \text{ mg kg}^{-1}$ konsantrasyonu arasında Mn'in yeterli olduğu bildirilmiştir. Bu veriye göre bitki dokularında Mn konsantrasyonunun yeterli olduğu saptanmıştır. Buğday bitkisine FeO-NP gübresi uygulaması ile bitkideki Mn konsantrasyonunun azaldığı Feng ve ark. (2022) tarafından da rapor edilmiştir. Ayrıca Mortvedt (1991), Fe ve Mn arasında antagonist bir ilişki olduğu bildirilmiştir. Bu ilişkinin seyrelme etkisi veya Fe konsantrasyonunun toksik seviyede olması nedeniyle olabileceği rapor edilmiştir. Güneş ve ark. (1998) domatese ve

Ghasemi-Fasaei ve ark. (2005), nohuta çeşitli Fe içeren gübre uygulamalarının bitkinin Mn içeriğini düşürdüğü bildirmişlerdir. Araştırmacılar bu düşüşün nedeninin Fe ve Mn arasındaki rekabet olduğunu bildirmiştir.

4. Sonuçlar

Yeşil sentez yöntemi ile fıstık bitkisi yapraklarından elde edilen FeO-NP uygulamalarının yeşil aksam Fe konsantrasyonları üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. En yüksek Fe konsantrasyonu, 10 mg L⁻¹ uygulama dozunda elde edilmiştir. Ayrıca, tüm uygulamalarda bitki dokularında N dışındaki makro ve mikro besin element konsantrasyonlarının fasulye bitkisi genç yaprakları için belirlenen sınır değerlerine göre yeterli düzeyde olduğu saptanmıştır. Ancak, N noksanlığı nedeniyle bitkiler yeterince gelişmemiş ve yeşil aksam kuru ağırlıkları kontrole göre azalma göstermiştir.

Elde edilen veriler, FeO-NP'lerin bitkilerdeki Fe eksikliğini giderilmesi, tarımsal üretim ile elde edilen ürünlerin besin değerini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu araştırma, FeO-NP'lerin bitki beslenmesi için potansiyel bir çözüm sunduğunu vurgularken, bu yeni yaklaşımın Fe eksikliği ile mücadelede ve sürdürülebilir tarım uygulamalarında kullanılabilirliğini daha fazla araştırma yaparak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna da dikkat çekmektedir. Ayrıca, gelecekte yapılacak çalışmalarda, FeO-NP'lerin boyutları ve uygulama dozlarının yanı sıra bu gübrelerin canlılar ve çevre üzerindeki potansiyel riskleri de dikkate alınmalıdır.

Yazarların Katkı Beyanı

Yazarlar makaleye eşit katkıda bulduklarını, makalenin yayına hazır son halini okuduklarını ve onayladıklarını beyan ederler. Melek BİÇER BAYRAK, araştırmanın yürütülmesi, bitki

yetiştirilmesi, analizlerin yapılması, verilerin toplanması ve makalenin yazılmasında katkıda bulunmuştur. Hatice DAĞHAN, araştırmanın ana kavramsal fikirlerini geliştirilmesi, yürütülmesi, verilerin toplanması, değerlendirilmesi ve mevcut makalenin yazımında katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Tüm yazarlar, bu çalışma için herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Finansman

Bu çalışma, tez çalışması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar ve Proje Destek Birimi (ESOGÜ BAP) tarafından "FYL-2022-2264 numaralı proje" ile desteklenmiştir.

Açıklama

Bu çalışma ilk yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar, finansal destek için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırmalar Projeleri (ESOGÜ-BAP) Koordinatörlüğü'ne ve FeO-NP'lerin sentezlenmesi, karakterizasyonu ve sonuçların yorumu için Doç. Dr. Mehmet Fırat BARAN'a teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- Abdelhameed, R.M., Abdelhameed, R.E., Kamel, H.A., 2019. Iron-based metal-organic-frameworks as fertilizers for hydroponically grown *Phaseolus vulgaris*. *Materials Letters*, 237: 72-79.
- Afshar, R.M., Hadi, H., Pirzad, A., 2012. Effect of nano-iron foliar application on qualitative and quantitative characteristics of cowpea, under end season drought stress. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(8): 1709-1717.

- Akhtar, N., Ilyas, N., Meraj, T.A., Pour-Aboughadareh, A., Sayyed, R.Z., Mashwani, Z.U.R., Poczai, P., 2022. Improvement of plant responses by nanobiofertilizer: a step towards sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 12(6): 965.
- Aktaş, M., 1994. Bitki besleme ve toprak verimliliği (2. baskı). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No: 1361, Ankara.
- Anonim, 2021. 2020 Yılı Bakliyat Sektör Raporu. Toprak Mahsulleri Ofisi Genel Müdürlüğü, (<http://www.tmo.gov.tr>), (Erişim tarihi: 10.11.2021)
- Anonim, 2022. Bitkisel Üretim İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu, (<http://www.tuik.gov.tr>), (Erişim tarihi: 01.03.2022).
- Ardali, T., Ma'mani, L., Chorom, M., Moezzi, A., 2022. Improved iron use efficiency in tomato using organically coated iron oxide nanoparticles as efficient bioavailable Fe sources. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1): 1-16.
- Avila-Quezada, G.D., Ingle, A.P., Golińska, P., Rai, M., 2022. Strategic applications of nano-fertilizers for sustainable agriculture: Benefits and bottlenecks. *Nanotechnology Reviews*, 11(1): 2123-2140.
- Bastani, S., Hajiboland, R., Khatamian, M., Saket-Oskoui, M., 2018. Nano iron (Fe) complex is an effective source of Fe for tobacco plants grown under low Fe supply. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(2): 524-541.
- Bergmann, W., 1988. Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. New York: Gustav Fischer Verlag Stuttgart.
- Cai, L., Cai, L., Jia, H., Liu, C., Wang, D., Sun, X., 2020. Foliar exposure of Fe₃O₄ nanoparticles on *Nicotiana benthamiana*: Evidence for nanoparticles uptake, plant growth promoter and defense response elicitor against plant virus. *Journal of Hazardous Materials* 393: 122415.
- Chatzistathis, T., Fanourakis, D., Aliniaefard, S., Kotsiras, A., Delis, C., Tsaniklidis, G., 2021. Leaf age-dependent effects of boron toxicity in two *Cucumis melo* varieties. *Agronomy*, 11(4): 759.
- Çelik, H., Katkat, A.V., 2005. Bursa ili şeftali yetiştiriciliği yapılan tarım topraklarının potasyum durumu ve demir klorozu ile ilişkisi. *Tarımda Potasyumun Yeri ve Önemi Çalıştayı*, 3-4 Ekim, Eskişehir, s.74-84,
- Çelim, S., Gülser, F., 2020. The changes caused by different iron forms in growth of bean (*Phaseolus vulgaris* L. Var Nana) under cadmium stress. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 4(4): 1006–1023.
- De Souza, A., Govea-Alcaide, E., Masunaga, S.H., Fajardo-Rosabal, L., Effenberger, F., Rossi, L.M., Jardim, R.D.F., 2019. Impact of Fe₃O₄ nanoparticle on nutrient accumulation in common bean plants grown in soil. *SN Applied Sciences*, 1(4): 1-8.
- De Souza-Torres, A., Govea-Alcaide, E., Gómez-Padilla, E., Masunaga, S.H., Effenberger, F.B., Rossi, L.M., Jardim, R.F., 2021. Fe₃O₄ nanoparticles and *Rhizobium* inoculation enhance nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean plants grown in soil. *Rhizosphere*, 17: 100275.
- Diatta, A.A., Thomason, W.E., Abaye, O., Thompson, L.T., Battaglia, M.L., Vaughan, L.J., Lo, M., Filho, J.F.D.C.L., 2020. Assessment of nitrogen fixation by Mungbean genotypes in different soil textures using 15N natural abundance method. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20: 2230–2240.

- Eren, A., 2020. The effect of biologically synthesized silver nanoparticles on germination of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 4(2): 358–365.
- Eren, A., Baran, M.F., 2019. Green synthesis, characterization and antimicrobial activity of silver nanoparticles (AgNPs) from maize (*Zea mays* L.). *Applied Ecology And Environmental Research*, 17(2): 4097-4105.
- Feng, Y., Kreslavski, V.D., Shmarev, A.N., Ivanov, A.A., Zharmukhamedov, S.K., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S.I., Shabala, S., 2022. Effects of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*) plants. *Plants*, 11(14): 1894 (1-15).
- Feregrino-Perez, A.A., Magaña-López, E., Guzmán, C., Esquivel, K., 2018. A general overview of the benefits and possible negative effects of the nanotechnology in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 238: 126-137
- Ghafari, H., Razmjoo, J., 2015. Response of durum wheat to foliar application of varied sources and rates of iron fertilizers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17: 321-331
- Ghasemi-Fasaei, R., Ronaghi, A., 2008. Interaction of iron with copper, zinc, and manganese in wheat as affected by iron and manganese in a calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*, 31(5): 839-848.
- Ghasemi-Fasaei, R., Ronaghi, A., Maftoun, M., Karimian, N.A., Soltanpour, P.N., 2005. Iron-manganese interaction in chickpea as affected by foliar and soil application of iron in a calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(13-14): 1717-1725.
- Golshahi, S., Ahangar, A.G., Mir, N., Ghorbani, M., 2018. A comparison of the use of different sources of nanoscale iron particles on the concentration of micronutrients and plasma membrane stability in sorghum. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(1): 236-252.
- Gui, X., Deng, Y., Rui, Y., Gao, B., Luo, W., Chen, S., Xing, B., 2015. Response difference of transgenic and conventional rice (*Oryza sativa*) to nanoparticles (γ Fe₂O₃). *Environmental Science and Pollution Research*, 22(22): 17716-17723.
- Güneş, A., Alpaslan, M., Inal, A., 1998. Critical nutrient concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrients of NFT-grown young tomato plants. *Journal of plant nutrition*, 21(10): 2035-2047.
- Güneş, A., Inal, A., Söylemezoğlu, G., 2013. Bitkilerde Nano-Fe'in demir beslenmesi üzerine etkisi. Ankara Üniversitesi. Ankara.
- Heitholt, J.J., Sloan, J.J., MacKown, C.T., Cabrera, R.I., 2003. Soybean growth on calcareous soil as affected by three iron sources. *Journal of Plant Nutrition*, 26(4): 935-948.
- Hewitt, E.J., Bolle-Jones, E.W., 1953. Studies in iron deficiency of Crops: II. The Interrelationships of Iron and Potassium in the Potato Plant. *Journal of Horticultural Science*, 28(3): 185-195.
- Hoagland, D.R., Arnon, D.I., 1950. The water culture method for growing plants without soil. California Agriculture Experiment Station Circular, No: 347.

- Hu, J., Guo, H., Li, J., Gan, Q., Wang, Y., Xing, B., 2017. Comparative impacts of iron oxide nanoparticles and ferric ions on the growth of *Citrus maxima*. *Environmental pollution*, 221: 199-208.
- İdikut, L., Çiftçi, S., Uskutoğlu, D., Paksoy, M., Zulkadir, G., 2021. Kahramanmaraş koşullarında birinci ürün fasulye çeşitlerinin araştırılması. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 5(4): 984-990.
- Jalali, M., Ghanati, F., Modarres-Sanavi, A.M., Khoshgoftarmanesh, A. H., 2017. Physiological effects of repeated foliar application of magnetite nanoparticles on maize plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(6): 593-602.
- Jones, Jr, J.B., Wolf, B., Mills, H.A., 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Micro-Macro Publishing, Inc.
- Jozedaemi, E., Golchin, A., Bibalani, G.H., 2014. The effect of soil and foliar fertilization with iron on yield and leaf chemical composition of four spotted bean cultivars in a calcareous soil. *Greener Journal of Biological Sciences*, 4(4): 116-127.
- Kacar, B., 1995. Bitki ve Toprağın Kimyasal Analizleri, III. Toprak Analizleri. A.Ü. Ziraat Fak. Eğitim, Araştırma ve Geliştirme Vakfı Yayınları No:3, Ankara, 704 s.
- Kacar, B., 1972. Bitki ve Toprağın Kimyasal Analizleri. 2. Bitki Analizleri. Ankara Üniversitesi Ziraat fakültesi yayınları: 453 Ank. Üniv. Basımevi Ankara.
- Kacar, B., Katkat, V., 2009. Bitki Besleme. Nobel yayınları, Ankara.
- Karaman, M.R., Brohi, A.R., Inal, A., Taban, S., 1999. Effect of iron and zinc applications on growth and on concentration of mineral nutrients of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in artificial siltation soils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23(2): 341-348.
- Knijnenburg, J.T., Hilty, F.M., Oelofse, J., Buitendag, R., Zimmermann, M.B., Cakmak, I., Grobler, A.F., 2018. Nano and pheroid technologies for development of foliar iron fertilizers and iron biofortification of soybean grown in South Africa. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 5(1): 1-10.
- Kobraee, S., 2016. Effect of zinc, iron and manganese fertilization on concentrations of these metals in the stem and leaves of soybean and on the chlorophyll content in leaves during the reproductive development stages. *Journal of Elementology*, 21(2): 395-412.
- Mandal, D., 2021. Nanofertilizer and its application in horticulture. *Journal of Applied Horticulture*, 23(1).
- Mohasseli, V., Farbood, F., Moradi, A., 2020. Antioxidant defense and metabolic responses of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) to Fe-nano-particles under reduced irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*, 149: 112338.
- Moosavi, A.A., Ronaghi, A., 2010. Growth and iron-manganese relationships in dry bean as affected by foliar and soil applications of iron and manganese in a calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*, 33(9): 1353-1365.
- Mortvedt, J.J., 1991. Correcting iron deficiencies in annual and perennial plants: Present technologies and future prospects. *Plant and Soil*, 130(1-2): 273-279.
- Müftüoğlu, M.N., Türkmen, C., Çıkılı Y., 2012. Toprak ve Bitkide Verimlilik Analizleri. Kriter Yayınevi, İstanbul.

- Predoi, D., Ghita, R.V., Iconaru, S.L., Cimpeanu, C.L., Raita, S.M., 2020. Application of nanotechnology solutions in plants fertilization. *Urban Horticulture-Necessity of the Future*, 9: 12-40
- Rai, M., Ingle, A.P., 2021. Biogenic Silver Nanoparticles: What We Know and What Do We Need to Know.
- Rai, M., Ingle, A.P., Trzcińska-Wencel, J., Wypij, M., Bonde, S., Yadav, A., Kratošová, G., Golińska, P., 2021. Biogenic silver nanoparticles: What we know and what do we need to know? *Nanomaterials*, 11: 2901.
- Ramadan, A.A., El-Bassiouny, H.M.S., Bakry, B.A., Abdallah, M.M.S., El-Enany, M.A.M., 2020. Growth, yield and biochemical changes of soybean plant in response to iron and magnesium oxide nanoparticles. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 23: 406-417.
- Rana, K., Kumari, M., Mishra, A., Pudake, R.N., 2019. Engineered Nanoparticles for Increasing Micronutrient Use Efficiency. In: R.,Pudake, N., Chauhan, C., Kole, (Ed), *Nanoscience for Sustainable Agriculture*, Springer, Cham. pp. 25-49.
- Rui, M., Ma, C., Hao, Y., Guo, J., Rui, Y., Tang, X., Zhu, S., 2016. Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*). *Frontiers in Plant Science*, 7: 815.
- Salata, O., 2004. Applications of nanoparticle in biology and medicine. *Journal of Nanobiotechnology*, 2(1): 3.
- Santos, C.S., Roriz, M., Carvalho, S.M., Vasconcelos, M.W., 2015. Iron partitioning at an early growth stage impacts iron deficiency responses in soybean plants (*Glycine max* L.). *Frontiers in Plant Science*, 6: 325.
- Seleiman, M.F., Almutairi, K.F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B.A., Battaglia, M.L., 2021. Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: Why can modern agriculture benefit from its use? *Plants*, 10(1): 2.
- Seleiman, M.F., Santanen, A., Mäkelä, P., 2020. Recycling sludge on cropland as fertilizer-Advantages and risks. *Resources, Conservation and Recycling*, 155: 104647
- Sheykhbaglou, R., Sedghi, M., Shishevan, M.T., Sharifi, R.S., 2010. Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(2): 112-113.
- Sohrabi, Y., Habibi, A., Mohammadi, K., Sohrabi, M., Heidari, G., Khalesro, S. and Khalvandi, M., 2012. Effect of nitrogen (N) fertilizer and foliar-applied iron (Fe) fertilizer at various reproductive stages on yield, yield component and chemical composition of soybean (*Glycine max* L. Merr.) seed. *African Journal of Biotechnology*, 11(40): 9599-9605.
- Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, S., Srivastava, P.K., Singh, V.P., Singh, S., Prasad, S.M., Singh, P.K., Dubey, N.K., Pandey, A.C., and Chauhan, D.K., 2017. Nitric oxide alleviates silver nanoparticles (AgNps)-induced phytotoxicity in *Pisum sativum* seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 110: 167-177.
- Varghese, R.J., Zikalala, N., Oluwafemi, O.S., 2020. Green synthesis protocol on metal oxide nanoparticles using plant extracts. In: Thomas, S., Sunny, A.T., Velayudhan, P. (Ed), *Colloidal metal oxide nanoparticles*, Elsevier, Chapter5, pp. 67-82.

- Wang, Y., Chen, S., Deng, C., Shi, X., Cota-Ruiz, K., White, J.C., Gardea-Torresdey, J.L., 2021. Metabolomic analysis reveals dose-dependent alteration of maize (*Zea mays* L.) metabolites and mineral nutrient profiles upon exposure to zerovalent iron nanoparticles. *NanoImpact*, 23: 100336.
- Yang, X., Alidoust, D., Wang, C., 2020. Effects of iron oxide nanoparticles on the mineral composition and growth of soybean (*Glycine max* L.) plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42(8): 1-11.
- Yaseen, R., Ahmed, A., Omer, A., Agha, M., Emam, T., 2020. Nano-fertilizers: Bio-fabrication, application and biosafety. *Novel Research in Microbiology Journal*, 4(4): 884-900.
- Yetim, S., 2008. GAP Bölgesi Harran Ovası koşullarında azot ve demir gübrelemesinin ikinci ürün soya verimine ve bazı kalite kriterlerine etkisi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Zuo, Y., Zhang, F., 2011. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant and Soil*, 339(1): 83-95.

Atıf Şekli	Biçer Bayrak, M., Dağhan, H., 2023. Demir Oksit Nanopartikül (FeO-NP) Uygulamasının Topraksız Kültürde Yetiştirilen Fasulye (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) Bitkisinin Büyümesi Üzerine Etkileri. <i>ISPEC Tarım Bilimleri Dergisi</i> , 7(4): 759-777. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.10208300 .
To Cite	Biçer Bayrak, M., Dağhan, H., 2023. The Effects of Iron Oxide Nanoparticle (FeO-NP) Application on the Growth of Bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) Grown in Soilless Culture. <i>ISPEC Journal of Agricultural Sciences</i> , 7(4): 759-777. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.10208300 .
