

Maydanozda Ağır Metal Stresinin *in vitro* Çimlenme ve Fide Gelişimi Üzerine Etkileri

Ecem KARA ^{1*} 

¹ Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas

*Sorumlu Yazar (Corresponding author): ecemkara33@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, açık alanda yetiştirilen ve ağır metal kirliliğine maruz kalma riski yüksek olan *Petroselinum crispum* (maydanoz)'da farklı ağır metallerin (nikel [Ni], bakır [Cu], kadmiyum [Cd] ve kurşun [Pb]) bitkilerin erken gelişimi üzerindeki etkilerinin *in vitro* koşullarda değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ağır metal stresi, Murashige-Skoog (MS) besin ortamına her metal için 100, 300 ve 500 µM'lik üç farklı konsantrasyon olacak şekilde oluşturulmuştur. Çalışmada çimlenme oranı, gövde ve kök uzunluğu, yaş ve kuru biyokütle değerleri, fide gelişim indeksleri (I ve II), kuru ağırlık kök: gövde oranı, tolerans indeksleri ve göreceli çimlenme gibi çok yönlü parametreler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, genel olarak doz artışına bağlı bir şekilde bitki gelişiminde baskılanma olduğunu ortaya koymuştur. Çimlenme oranı kontrol ve Ni-100 uygulamalarında sırasıyla % 89.50 ve % 90.00 olarak belirlenirken, Pb-500 ve Cd-500 uygulamalarında sırasıyla % 28.67 ve % 32.00'ye düşmüştür. Ayrıca kök uzunluğu tolerans indeksi Cd-500'de % 13.62, Pb-500'de ise % 16.62 olarak saptanmıştır. Özellikle Cd ve Pb, yüksek dozlarda çimlenmeyi ve kök gelişimini en fazla baskılayan metaller olmuştur. Cu ve Ni ise daha düşük dozlarda nispeten daha tolere edilebilir etki göstermiştir. Sonuç olarak, *in vitro* stres koşulları altında yapılan bu çalışmada, maydanoz bitkilerinin ağır metal toksisitesine karşı duyarlılık düzeyleri karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi

Geliş Tarihi	:28.01.2026
Revize Tarihi	:21.03.2026
Kabul Tarihi	:26.03.2026

Anahtar Kelimeler

Petroselinum crispum
ağır metal
çimlenme
fide gelişimi
in vitro

Effects of Heavy Metal Stress on *in vitro* Germination and Seedling Growth of Parsley

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of different heavy metals (nickel [Ni], copper [Cu], cadmium [Cd], and lead [Pb]) on the early development of *Petroselinum crispum* (parsley), which is grown in open fields and has a high risk of exposure to heavy metal pollution under *in vitro* conditions. Heavy metal stress was induced in Murashige-Skoog (MS) nutrient medium at three different concentrations of 100, 300, and 500 µM for each metal. Multidimensional parameters such as germination rate, shoot and root length, fresh and dry biomass values, seedling growth indices (I and II), dry weight root:shoot ratio, tolerance indices, and relative germination were evaluated. Overall, the findings demonstrated a dose-dependent suppression of plant growth with increasing concentrations. Germination rates were 89.50 % and 90.00 % in the control and Ni-100 treatments, respectively, whereas they decreased to 28.67 % and 32.00 % in the Pb-500 and Cd-500 treatments, respectively. In addition, the root length tolerance index was determined as 13.62 % in Cd-500 and 16.62 % in Pb-500. Cd and Pb were the metals that most strongly suppressed germination and root development at high doses. Cu and Ni, however, showed relatively more tolerable effects at lower doses. In conclusion, this study, conducted under *in vitro* stress conditions, comparatively revealed the sensitivity levels of parsley plants to heavy metal toxicity.

Research Article

Article History

Received	:28.01.2026
Revised	:21.03.2026
Accepted	:26.03.2026

Keywords

Petroselinum crispum
heavy metal
germination
seedling growth
in vitro

Atıf: Kara, E., 2026. Maydanozda Ağır Metal Stresinin *in vitro* Çimlenme ve Fide Gelişimi Üzerine Etkileri. *ISPEC Tarım Bilimleri Dergisi*, 10(2): 631-642. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20568509>

Citation: Kara, E., 2026. Effects of Heavy Metal Stress on *in vitro* Germination and Seedling Growth of Parsley. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 10(2): 631-642. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20568509>

© Bu çalışma *ISPEC Tarım Bilimleri Dergisi* tarafından Creative Commons Lisansı (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) kapsamında yayınlanmıştır.

1. Giriş

Maydanoz (*Petroselinum crispum* Mill.), Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bölgelerde yaygın olarak yetiştirilen ve Türkiye, İspanya, İtalya, Yunanistan, Fas, Cezayir ve Tunus gibi ülkelerde yabancı formları bulunan önemli bir tıbbi ve aromatik bitkidir (Al, 2019). Maydanoz, diğer Akdeniz ülkelerinde olduğu gibi Türkiye'de de yıl boyunca açık alanlarda yetiştirilerek, salatalarda ve mezelerde taze olarak tüketilmektedir (Yılmaz ve ark., 2024). Çok zengin içeriğe sahip olan maydanoz, antioksidan, antidiyabetik ve antienflamatuar etkileriyle dikkat çekmektedir. Vitaminler (A, C, K) ve mineraller ile flavonoidler, karotenoidler, monoterenler ve askorbik asit gibi çeşitli fitokimyasalları içermesinin yanı sıra, uçucu yağlar açısından da zengindir (Farah ve ark., 2015; Maodaa ve ark., 2016; Ertaş ve ark., 2021; Dursun, 2023; Gutarowska ve ark., 2023; Yılmaz ve ark., 2024; Ahmed ve ark., 2025). Tüm bu özellikleri nedeniyle, maydanoz insan beslenmesinde hem fonksiyonel gıda hem de doğal takviye olarak önemli bir yer tutmaktadır (Dursun, 2023; Ahmed ve ark., 2025). Söz konusu besinsel ve ekonomik önemine karşın maydanoz, genellikle kirlenici unsurlara açık olan tarla koşullarında yetiştirilmektedir. Özellikle, üretimde kullanılan sulama suyu ve organik gübrelerin ağır metal kontaminasyonuna kaynaklık ettiği literatürde sıklıkla rapor edilmiştir (Gutarowska ve ark., 2023). Toprakta ağır metal kirliliği, dünya çapında tarım için giderek artan bir endişe kaynağıdır. Toksik metaller (örneğin Ni, Cu, Cd, Pb), madencilik, eritme, gübre ve pestisit kullanımı ile kentsel/endüstriyel kirlilikten kaynaklanmaktadır. Bu metaller topraklarda birikme eğilimi göstermektedir (Meharg ve Meharg, 2021; Vega ve ark., 2022; Hou ve ark., 2025). Son zamanlarda yapılan araştırmalara göre, tarım arazilerinin yaklaşık %15'i bir veya daha fazla ağır metal için güvenlik eşiklerini aşmaktadır (Hou ve ark., 2025). Bu tür kirlilik, tarımsal verimi önemli ölçüde azaltarak gıda güvenliğinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bitkisel ürünlerde kurşun, kadmiyum ve nikel gibi maddelerin yoğunluğu, bölgeye ve bitki türüne göre

farklılık göstererek ciddi kanserojen riskler barındırabilmektedir. Ayrıca, baharat ve otlar üzerinde yapılan sistematik incelemeler, bitkilerde yaygın ağır metal alımını ortaya çıkarmış ve gıda güvenliği endişelerini artırmıştır (Alawadhi ve ark., 2024). Maydanoz bitkisi de yetiştiricilik yapılan toprağın veya sulama suyunun ağır metal içeriklerinin yüksek olması nedeniyle ağır metallere maruz kalabilir. Maydanoz genellikle taze olarak tüketildiğinden, dokularındaki ağır metaller sağlık riskleri oluşturabilir ve bitki üzerindeki ağır metal stresi de bitki gelişimi üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Dghaim ve ark., 2015; Alawadhi ve ark., 2024). Kontrollü koşullar altında *in vitro* teknikler (mikro çoğaltma, hücre kültürleri vb.) kullanılarak farklı abiyotik stres etkenlerinin etkisi altında bitkilerin yetiştirilmesi, bitki büyümesi üzerindeki olumsuz etkilerin değerlendirilmesinin temelini oluşturmaktadır. Laboratuvar ortamında yetiştirilen bitkiler, kontrollü ortam, hızlı çoğaltma, seçme, ıslah, genetik manipülasyon ve hastalık kontrolü gibi avantajlar sağlar (Sakthivelu ve ark., 2008; Kara, 2025). Bu avantajlar, ağır metal stresi altında olan bitkilerin laboratuvar ortamında çoğaltılması ve araştırılmasını önemli kılmaktadır. *In vitro* koşullar altında ağır metallerin optimum ve toksik miktarlarının belirlenmesi, su ve toprakla ilgili sorunlara da yol gösterecektir. Bu teknikler, bitkilerin stres koşullarına uyum sağlama kapasitesini daha iyi anlamak ve geliştirmek için faydalı bir araç sunmaktadır. Bu şekilde, bitki türleri ve çeşitlerinin elverişsiz toprak koşullarına karşı değerlendirilmesi, ağır metal kirliliği sorunuyla başa çıkılmasına imkân sağlayacaktır (Gündeş ve Sönmez, 2021; Kuru ve Orcan, 2025). Bu çerçevede, saha koşullarında gübreleme gibi yönetim faktörlerinin ağır metal alımı ve toksisite şiddetini değiştirebildiği dikkate alındığında, *in vitro* MS ortamı gibi kontrollü sistemler metallerin doğrudan erken fide gelişimi üzerindeki etkisini ayırtmak ve genotip/uygulama duyarlılığını karşılaştırmak açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Aydemir ve ark., 2025). Bu kapsamda mevcut

çalışmada, dört ağır metalin [nikel (Ni), bakır (Cu), kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb)] *in vitro* koşullar altında maydanoz bitkileri üzerine etkileri araştırılmıştır. Denemede, Murashige ve Skoog (MS) (1962) besin ortamına her bir metal için üç farklı konsantrasyon (100, 300 ve 500 µM) uygulanarak kontrollü ağır metal stres koşulları oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı, bu metal türlerine ait farklı dozların erken gelişim evresindeki fideler üzerindeki etkilerini ortaya koymak ve çimlenmeden itibaren gövde ve kök gelişimi ile biyokütle parametrelerinde meydana gelen değişimleri karşılaştırmalı olarak değerlendirerek, artan metal maruziyetinin maydanoz bitkisi gelişimini ne ölçüde baskıladığını ortaya koymaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışma Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi'ne ait bitki doku kültürü laboratuvarında yürütülmüştür. Çalışma kapsamında bitkisel materyal olarak Toros maydanoz çeşidi kullanılmıştır. Tohumlar yüzey sterilizasyonu amacıyla %20'lik sodyum hipokloritte 20 dakika bekletilmiş ve steril saf su ile üç kez durulanarak steril hâle getirilmiştir. Ağır metal stresi oluşturmak amacıyla dört farklı ağır metalin (Ni, Cu, Cd ve Pb) üç farklı konsantrasyonu (kontrol (0), 100, 300 ve 500 µM) MS (Murashige ve Skoog, 1962) besin ortamına eklenmiştir. Her bir litre ortam için ağır metallerin yanında 4.4 g MS, karbon kaynağı olarak 30 g sakkaroz ve katılaştırmak için 7 g agar ilave edilmiştir. Çalışmada kullanılan 100, 300 ve 500 µM konsantrasyonları; ağır metal stresinin düşük,

orta ve yüksek düzeyde etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymak, doz-yanıt ilişkisini belirlemek ve daha önce *in vitro* ağır metal stresi çalışmalarında kullanılan konsantrasyon aralıklarıyla karşılaştırma yapabilmek amacıyla seçilmiştir. Kontrol grubu için ağır metal içermeyen MS ortamı kullanılmıştır. Hazırlanan ortamların pH değeri 5.8'e ayarlanmış ve otoklavda (121 °C, 1.2 atm basınçta 15 dk) steril edilmiştir. Steril petri kaplarına her petriye 5 tohum olacak şekilde tohum ekimi yapılmıştır. Tohum ekimi yapılan petriler 25 ± 2 °C sıcaklıkta, 16 saat aydınlık / 8 saat karanlık fotoperiyotta inkübasyona bırakılmıştır.

2.1. Çalışma kapsamında incelenen parametreler ve hesaplamalar

Çalışmada maydanoz fidelerinde ağır metal stresinin erken dönem etkilerini ortaya koymak amacıyla çimlenme ve fide gelişimine ilişkin morfolojik ölçümler yapılmış, ayrıca bazı türetilmiş indeksler hesaplanmıştır. Çimlenme gözlemleri ekimden itibaren günlük olarak yapılmış ve radikulanın belirgin şekilde çıkış göstermesi çimlenme kriteri olarak kabul edilmiştir. Maydanoz tohumlarında çimlenmenin yavaş ve düzensiz gerçekleşebilmesi dikkate alınarak çimlenme takibi 21 gün boyunca sürdürülmüştür. Kök uzunluğu, gövde uzunluğu, yaş ağırlık ve kuru ağırlık ölçümleri kültür başlangıcından sonraki 21. gün sonunda gerçekleştirilmiştir. Kuru ağırlık değerleri, örneklerin etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulmasının ardından belirlenmiştir. Çimlenme sürecinde çimlenme oranı (ÇO), her gün çimlenen tohum sayısı dikkate alınarak hesaplanmıştır (Equation 1).

$$\text{Çimlenme Oranı} = (\text{Çimlenen tohum sayısı} / \text{Ekilen tohum sayısı}) \times 100 \quad (1)$$

Fide gelişimini değerlendirmek için çimlenme oranı (%) (Kumar ve ark., 2012), gövde uzunluğu (mm), kök uzunluğu (mm) (Kalsa ve Abebie, 2012), gövde yaş ağırlığı (g), kök yaş ağırlığı (g), gövde kuru ağırlığı (g) ve kök kuru ağırlığı (g) (Bekiş ve ark., 2025)

ölçülmüştür. Çimlenme performansı ile fide büyümesini birlikte yansıtan fide canlılık indeksleri (Kalsa ve Abebie, 2012; Kumar ve ark., 2012) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Equation 2, 3):

$$\text{Fide Canlılık İndeksi-I} = \text{Çimlenme yüzdesi} \times [(\text{Gövde uzunluğu} + \text{Kök uzunluğu}) / 1000] \quad (2)$$

$$\text{Fide canlılık İndeksi -II} = \text{Çimlenme yüzdesi} (\%) \times (\text{Gövde kuru ağırlığı (g)} + \text{Kök kuru ağırlığı (g)}) \quad (3)$$

Biyokütlenin kök ve gövde arasında dağılımını göstermek amacıyla kök:gövde

kuru ağırlık oranı (Wu ve ark. (2023)'na göre hesaplanmıştır (Equation 4):

$$\text{Kök: Gövde kuru ağırlık oranı} = (\text{Kök kuru ağırlığı} / \text{Gövde kuru ağırlığı}) \quad (4)$$

Uygulamaların kontrole göre göreceli toleransını ifade etmek için kök uzunluğu tolerans indeksi ve toplam kuru ağırlık tolerans

indeksi aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (Equation 5, 6):

$$\text{Kök uzunluğu tolerans indeksi} = (\text{Uygulama kök uzunluğu} / \text{Kontrol kök uzunluğu}) \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Toplam kuru ağırlık tolerans indeksi} = (\text{Uygulama toplam kuru ağırlığı} / \text{Kontrol toplam kuru ağırlığı}) \times 100. \quad (6)$$

Son olarak, ağır metal uygulamalarının çimlenmeyi baskılama düzeyini göstermek amacıyla göreceli çimlenme (GÇ, %) Kumar

ve ark. (2012)'na göre hesaplanmıştır (Equation 7):

$$\text{Göreceli Çimlenme} = (\text{Uygulama çimlenme yüzdesi} / \text{Kontrol çimlenme yüzdesi}) \times 100 \quad (7)$$

Çalışma kapsamında elde edilen veriler SAS temelli JMP 8.1 istatistik yazılımı kullanılarak Tesadüf Parselleri deneme desenine göre analiz edilmiştir. Çalışma her uygulama için üç tekerrür ve her tekerrürde 20 petri olacak şekilde kültürler hazırlanmıştır. Ayrıca, uygulamalar ile fide canlılığı ve tolerans parametreleri arasındaki ilişkileri görsel olarak değerlendirmek amacıyla temel bileşen analizi (PCA) yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Varyans analizi sonuçları, *in vitro* koşullarda ağır metal uygulamalarının maydanozun çimlenme başarısı ve fide gelişimi üzerinde belirgin ve istatistiksel olarak güçlü etkiler oluşturduğunu göstermektedir (Tablo 1,2,3). Çimlenme oranı kontrol grubunda %89.50 ile en yüksek düzeydeyken, düşük doz Ni (100) çimlenmeyi belirgin biçimde baskılamamış (%90.00) ve kontrolle istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır (Tablo 1). Buna karşılık Cu ve Pb uygulamaları daha erken aşamada çimlenmeyi düşürmüştü; özellikle doz yükseldikçe gerileme hızlanmıştır. En düşük çimlenme değerleri yüksek dozlarda Pb-500 (%28.67) ve Cd-500 (%32.00) uygulamalarında saptanmış, bu durum Pb ve Cd'nin çimlenme fizyolojisi üzerinde daha fazla etkili olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde yapılan farklı

çalışmalarda arpa (*Hordeum vulgare*), *E. argyi*, Kordon otu (*Sporobolus alterniflora*), *P. alepensis*, pirinç (*O. sativa*) ve mısır (*Zea mays*) türlerinin hepsinde kurşunun tohum çimlenmesini baskıladığı bildirilmiştir (Singh ve Pandey, 2025). Nispeten düşük konsantrasyonlarda kurşun, tohum çimlenmesini ciddi şekilde engellemektedir. Daha yüksek konsantrasyonlarının, *E. argyi*'de kök uzunluğu ve hipokotil üzerinde zararlı etkiler gösterdiği bildirilmiştir (Islam ve ark., 2008). Zhao ve ark. (2016), ayçiçeği tohumlarında yürütülen çimlenme testlerinde ağır metal konsantrasyonu arttıkça çimlenme oranının belirgin biçimde azaldığını ve belirli eşik konsantrasyonların üzerinde fide büyümesinin baskılandığını ortaya koymuştur. Söz konusu çalışmada, kritik konsantrasyonların (ör. 50 mg Cd/L, 50 mg Ni/L, 100 mg Zn/L ve 1000 mg Pb/L) üzerinde fide gelişiminin engellendiği bildirilmiş; ayçiçeği tohumlarında ağır metallerin fitotoksikite sırası Cd>Ni>Zn>Pb olarak rapor edilmiştir. Benzer şekilde, ağır metal dozu yükseldikçe çimlenme yüzdesindeki azalmanın farklı türlerde de gözlemlendiği; Cd, Pb ve Hg'nin sulu çözeltilerde *Albizia lebeck* üzerinde çimlenmeyi baskıladığı belirtilmiştir. Fide büyüme parametreleri değerlendirildiğinde, sürgün uzunluğunun ve özellikle kök uzunluğunun ağır metal stresine

oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir. Literatürde de ağır metal konsantrasyonu arttıkça fide gelişiminde belirgin bir baskılanma meydana geldiği ve kök büyümesinin çoğu durumda sürgünden daha erken ve daha şiddetli etkilendiği bildirilmektedir (Zhao ve ark., 2016; Kara ve Baktemur, 2022; Wu ve ark., 2023; Singh ve Pandey, 2025). Mevcut çalışmada da kontrolde sürgün 42.33 mm ve kök 130.09 mm iken, tüm metallerde doz artışıyla birlikte uzunluk değerleri kademeli biçimde azalmıştır. Yüksek dozlarda baskılanma daha keskin hâle gelmiştir. Sürgün gelişimi açısından Cu-500 (8.53 mm) ve Pb-500 (9.04 mm) uygulamaları en düşük değerleri vermiştir. Kök uzaması bakımından ise en şiddetli düşüş Cd-500 (17.72 mm) ve Pb-500 (21.63 mm) gruplarında gözlenmiştir. Pb ve Cd'nin toprak içerisinde ilk temas ettiği dokuya daha fazla zarar verdiği bilinmektedir (Singh ve Pandey, 2025). Farklı bitkilerde yapılan çalışmalar da benzer sonuçlar bildirmiştir: yabancı bir buğday olan *Aegilops tauschii* fidelerinde 300 mg kg⁻¹ Pb uygulamasının bitki boyunu %65, kök uzunluğunu ise %76 azaltması ve sarımsakta Pb'nin kök üzerinde sürgünden daha güçlü bir

inhibisyon yaratması mevcut çalışmanın sonuçlarını destekler niteliktedir (Baktemur, 2022; Wang ve ark., 2024). Mancak ve Baktemur (2023)'ün kabak (*Cucurbita pepo* L.) bitkisinde yürüttükleri çalışmada, Al, Cd, Co, Pb ve Ni'nin farklı dozlarında ağır metal konsantrasyonu arttıkça bitki gelişiminin gerilediğini; özellikle kök sayısı ve kök uzunluğunun yüksek dozlarda azaldığını bildirmiştir. Benzer şekilde mevcut çalışmada da ağır metal dozundaki artış, maydanozda çimlenmeyi olumsuz etkilemiştir. Bu durum, ağır metallerin fitotoksik etkilerinin türe ve metal tipine bağlı olarak değişmekle birlikte, yüksek dozlarda erken gelişim dönemini baskıladığını göstermektedir. Çalışma kapsamında Ni uygulamalarında çimlenme görece korunmuş olsa bile erken gelişim evrelerinde büyüme parametrelerini sınırlandırdığı gözlemlenmiştir. Diğer çalışmalarda da Cu ve Ni'nin düşük dozlarda tolere edilebildiği, ancak yüksek dozlarda klorofil sentezini ve fotosentezi olumsuz etkileyerek fidelerin boy ve biyokütle birikimini azalttığı bildirilmiştir (El-Sappah ve ark., 2024).

Tablo 1. Ağır metal dozlarının maydanozda *in vitro* çimlenme ve fide gelişimi üzerine etkileri

Table 1. Effects of heavy metal doses on *in vitro* germination and seedling growth of parsley

Doz	Çimlenme yüzdesi (%)	Gövde uzunluğu (mm)	Kök uzunluğu (mm)
Kontrol	89.50a	42.33a	130.09a
Ni-100	90.00a	28.45b	104.64b
Ni-300	70.67b	24.51bc	96.39bc
Ni-500	59.33cd	16.72def	61.19d
Cu-100	60.33c	19.86cde	91.23c
Cu-300	54.67de	12.14fg	61.83d
Cu-500	48.00f	8.53g	46.86e
Cd-100	70.65b	21.05cd	59.03d
Cd-300	48.67f	16.24def	29.53f
Cd-500	32.00gh	13.90fg	17.72g
Pb-100	50.33ef	20.59cd	46.79e
Pb-300	35.33g	14.54ef	46.13e
Pb-500	28.67h	9.04g	21.63fg
LSD	5.38***	5.46***	9.92***

Değerler ortalama olup, farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir; ***p<0.001

Biyokütle parametrelerinde (gövde/kök yaş ağırlığı), kontrol grubunun her bir metal dozuna kıyasla daha avantajlı olduğu açıkça görülmektedir. Gövde yaş ağırlığı kontrolde

0.0829 g iken, doz arttıkça tüm metallerde anlamlı azalışlar meydana gelmiş; en düşük değerler Cd-500 (0.0069 g) ve Pb-500 (0.0067 g) uygulamalarında belirlenmiştir (Tablo 2).

Benzer şekilde kök yaş ağırlığı da özellikle Pb ve Cd’de daha hızlı düşmüş; Pb-500 (0.0012 g) en düşük gruptan biri olmuştur. Kuru ağırlık da genel olarak yaş ağırlığa paralel şekilde azalma eğilimi göstermiş ve yüksek dozlarda (özellikle Cd-500 ve Pb-500) gövde kuru ağırlığı en düşük düzeye inmiştir. Bununla birlikte kök kuru ağırlığı Cd-300 grubunda (0.0059 g) diğer tüm uygulamalardan daha yüksek bulunmuştur. Daha yüksek Cd dozunda (Cd-500) ise kök kuru ağırlığının yeniden çok düşük düzeye indiği belirlenmiştir. Kavvadias ve ark. (2012), maydanozda Cd ve Pb birikiminin incelendiği sera çalışmasında, toprağa artan Cd ve Pb dozlarının uygulanmasıyla DTPA ile ekstrakte edilebilir metal miktarlarının ve bitki dokularındaki Cd/Pb birikiminin arttığı bildirilmiştir. Cd uygulamalarında düşük dozların yaş biyokütle artırdığı, ancak daha yüksek dozlarda Cd’nin gövde lerde 26.5 mg kg⁻¹ düzeyine ulaşmasına rağmen taze ağırlıkta azalma eğilimi oluşturduğu belirtilmiştir. Bibi ve ark., (2014) hidroponik koşullarda yaptığı çalışmada, maydanozda Cr birikiminin özellikle yapraklarda yoğunlaştığını ve yüksek Cr düzeylerinde toksisite nedeniyle birikimin azaldığını bildirmiştir. Hussain ve ark. (2015), Pb ile

kirletilmiş topraklarda yürütülen bir çalışmada, artan Pb dozlarının maydanozda çimlenmeyi geciktirdiği; bitki boyu, kök uzunluğu ile yaş ve kuru ağırlığı azalttığı bildirilmiştir. Aynı çalışmada Pb birikiminin topraktaki Pb konsantrasyonuna bağlı olarak kök, sürgün ve tohumlarda doğrusal biçimde arttığı; en yüksek Pb uygulamasında kök ve yapraklarda sırasıyla 641 ve 439.5 mg kg⁻¹ KA Pb birikimi saptandığı belirtilmiştir. Bu bulgular, mevcut çalışmada yüksek Pb dozlarında gözlenen çimlenme, kök gelişimi ve biyokütle kayıplarının Pb toksisitesi ve bitki dokularında metal birikimiyle ilişkili olabileceğini desteklemektedir. Wu ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, Cd uygulamasının sürgün gelişimini olumsuz etkilediği ve sürgün kuru ağırlığında kontrole göre yaklaşık %63’e (bazı genotiplerde %67’ye) varan azalmalar meydana geldiği bildirilmiştir. Genel bir karşılaştırma yapıldığında, doz yükseldikçe toksik etkinin kuvvetlendiği net biçimde görülmektedir. Etkinin şiddeti parametreye göre değişmekle birlikte, çimlenme üzerinde Pb ve Cd, kök uzaması üzerinde özellikle Cd, gövde uzaması üzerinde Cu daha baskın bir sınırlayıcı etki sergilemiştir.

Tablo 2. Ağır metal dozlarının maydanozda in vitro biyokütle birikimi üzerine etkileri

Table 2. Effects of heavy metal doses on in vitro biomass accumulation of parsley

Doz	Gövde yaş ağırlığı (g)	Kök yaş ağırlığı (g)	Gövde kuru ağırlığı (g)	Kök kuru ağırlığı (g)
Kontrol	0.0829a	0.0136a	0.007a	0.0029b
Ni-100	0.0609b	0.0061b	0.0054b	0.0020bc
Ni-300	0.0460c	0.0052bc	0.0042c	0.0013bc
Ni-500	0.0350de	0.0032c-f	0.0027fg	0.0009bc
Cu-100	0.0399cd	0.0046bcd	0.0035d	0.0010bc
Cu-300	0.0323e	0.0039b-e	0.0033de	0.0007c
Cu-500	0.0211gh	0.0028c-f	0.0019hı	0.0003c
Cd-100	0.0290ef	0.0034c-f	0.0031def	0.0004c
Cd-300	0.0165hı	0.0030c-f	0.0023gh	0.0059a
Cd-500	0.0069j	0.0015ef	0.0014ij	0.0001c
Pb-100	0.0245fg	0.0023def	0.0027efg	0.0007c
Pb-300	0.0138ı	0.0020ef	0.0016ı	0.0002c
Pb-500	0.0067j	0.0012f	0.0010j	0.0001c
LSD	0.0064***	0.0026***	0.0006***	0.0021***

Değerler ortalama olup, farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir; ***p<0.001.

Bu sonuçlar, *in vitro* koşullarda ağır metallerin yalnızca çimlenmeyi değil, daha da önemlisi fide dönemindeki büyüme ve

biyokütle birikimini güçlü biçimde zayıflatarak erken gelişim performansını düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Farklı

bitkilerde yürütülen çalışmalar da ağır metallerin toplam ağırlık üzerinde benzer etkiler gösterdiği belirtilmektedir. Tespihbuğdayı (*Aegilops tauschii*) bitkilerinde Pb ve Ni stresinin kuru ağırlığı %48-65 oranında düşürdüğü (Wang ve ark., 2024), Cd ve Zn stresindeki maydanoz bitkilerinde MDA ve H₂O₂ artarken taze ve kuru ağırlıkların azaldığı (Nawaz ve ark., 2024) ve Cd stresinde SOD, CAT ve APX gibi enzimlerin aktivitesinin değiştiği bildirilmiştir (Ulus ve ark., 2017). Tohumun ağır metal stresine verdiği yanıtı yalnızca çimlenme oranı ile kök ve sürgün uzamasındaki inhibisyon üzerinden tanımlamak belirli ölçüde sınırlı kalabilir. Çünkü çimlenme süreci; çevre koşulları, tohum olgunluğu ve tohumun fizyolojik yaşı gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Smýkal ve ark., 2014). Bu nedenle, farklı uygulamalar arasında göreceli fitotoksisiteyi daha bütüncül biçimde karşılaştırabilmek için çimlenme performansını fide büyümesiyle birlikte değerlendiren fide canlılık indekslerinin kullanılması önerilmektedir. Bu yaklaşım, erken gelişim evresinde ağır metal stresinin gerçek etkisini yalnızca “çimlenme oldu/olmadı” düzeyinde değil, aynı zamanda oluşan fidenin büyüme kapasitesi üzerinden de ortaya koymaya olanak sağlamaktadır (Zhao ve ark., 2016). Mevcut çalışma kapsamında fide canlılık indeksi I ve II değerleri, doz artışıyla birlikte belirgin bir düşüş sergilemiştir (Tablo 3). Kontrolde en yüksek düzeyde olan fide canlılık indeksi I (15.428) ve fide canlılık indeksi II (0.868), özellikle Cu, Cd ve Pb uygulamalarında daha düşük dozlardan itibaren hızlı şekilde gerilemiştir. Fide canlılık indeksi I açısından en zayıf performans Pb-500 (0.883) ve Cd-500 (1.010) gruplarında görülmüştür. Bu durum bu iki metalin yüksek dozlarda fide canlılığı ve büyüme kapasitesini ciddi ölçüde sınırladığını ortaya koymuştur. Ni uygulamalarında düşüş daha kademeli olmakla birlikte, Ni-500’de fide canlılık indeksinin 4.641’e inmesi, yüksek doz Ni’nin de gelişim dinamikleri üzerinde baskı kurduğunu göstermiştir. Kök uzunluğu tolerans indeksi (%) kök uzamasına dayalı toleransın çok net bir göstergesini sunmaktadır. Kontrole göre kök toleransı, Ni-100’de %80.44 ile görece

yüksek kalırken, Cu-500’de %36.02’ye, Cd-500’de %13.62’ye ve Pb-500’de %16.62’ye kadar gerilemiştir. Bu desen, kökün ağır metal stresine en duyarlı bileşenlerden biri olduğunu ve özellikle Cd ile Pb’nin kök uzamasını belirgin biçimde baskıladığını destekler niteliktedir. Cd-300’de toleransın %22.70’e düşmesi, orta dozda bile kök gelişiminin güçlü biçimde sınırlandığını düşündürmektedir. Toplam biyokütleyi yansıtan toplam kuru ağırlık tolerans indeksi (%) değerleri de genel olarak doz yükseldikçe azalmış; en düşük tolerans Pb-500 (%11.34) ve Cd-500 (%16.15) gruplarında belirlenmiştir. Buna karşılık Cd-300 grubunda toplam kuru ağırlık toleransının %84.19 düzeyinde kalması dikkat çekmiştir. Kök kuru ağırlığında görülen artışla birlikte incelendiğinde, bu dozda bitkinin büyümeden çok kuru madde oranını artıran bir stres yanıtı geliştirmiş olabileceğini düşündürmektedir. Ancak aynı grupta kök uzunluğu toleransının oldukça düşük olması (%22.70), bu “kuru madde korunumu/artışı” durumunun fizyolojik bir adaptasyon kadar, su içeriği azalması ve doku yoğunluğunun artması gibi bir değişim ile de ilişkili olabilmektedir. Kök/gövde kuru ağırlık oranı açısından gruplar arasında belirgin farklılıklar mevcuttur. Çoğu uygulamada oran kontrolle benzer düzeylerde seyrederken, Cd-300 grubunda değerin 2.570 ile tek başına “a” grubuna yükselmesi, kuru madde dağılımının kök lehine kaydığını göstermektedir. Bu sonuç, Cd’nin belirli bir doz aralığında gövde büyümesini daha fazla baskılayıp kökte görece birikimi artırabilmesi veya gövde dokusunda daha kuvvetli kuruma/azalma oluşturması ile açıklanmaktadır. Cd-300 uygulamasında kök kuru ağırlığı ve buna bağlı olarak kök/gövde kuru ağırlık oranı diğer uygulamalardan farklı bir eğilim göstermektedir. Bu durum biyolojik bir adaptasyon yanıtı olabileceği düşünülmektedir. Yapılan bir çalışmada, Cd’nin yüksek dozlarda güçlü fitotoksisite oluşturduğu, toprakta birikimi arttıkça bitkilerce kolay alındığı ve fotosentezden kök/sürgün gelişimine kadar birçok süreci olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Pereira ve ark., 2002). Cd ve Cu’nun kabakta büyümeyi anlamlı biçimde baskıladığı, Cd artışıyla hıyar

ve biberde kök gelişiminin gerilediği rapor edilmiştir (Acıla ve ark., 2022; Baran ve ark. 2022; Kara ve Baktemur 2022). Pb ise bitkide solunum ve besin alımını bozarak toksik belirtilere yol açabilmekte; bazı türlerde Pb dozu arttıkça kök uzunluğu ve/veya çimlenme azalırken, bazı çalışmalarda etkinin tür/çeşide bağlı değişebildiği vurgulanmaktadır (Baktemur, 2022; Kara ve Baktemur, 2022). Nasircılar ve ark. (2024) roka, tere ve maydanozda ağır metal ve tuz stresinin etkilerini karşılaştırmış; Zn, Cu, Ni, Pb, Cd ve Cr uygulamalarının bitki gelişimini olumsuz etkilediğini bildirmiştir. Araştırmada, maydanozda tuz stresinin daha çok toprak üstü organları etkilediği, ağır metal stresinin ise kökler üzerinde daha güçlü baskı oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca Pb alımı bakımından bitkilerin hiperakümülatif özellik gösterdiği ve metal alımının tere > maydanoz > roka şeklinde sıralandığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, mevcut çalışmada Pb uygulamalarında kök

uzunluğu, fide canlılık indeksi ve biyokütlede gözlenen belirgin azalmaları desteklemektedir. Maydanozda As, Cd ve Pb stresinin incelendiği bu çalışma, ağır metal uygulamalarının büyüme ve fotosentetik pigmentleri azalttığını, yapraklarda metal birikimini ve antioksidan yanıtları artırdığını bildirerek, mevcut çalışmada Cd ve Pb uygulamalarında gözlenen büyüme kayıplarını desteklemektedir. Çimlenme üzerindeki etkiyi özetleyen göreceli çimlenme (%) değerleri de metal türüne göre ayrılmaktadır. Ni-100'de GÇ'nin 100.56 ile kontrole çok yakın kalması, düşük doz Ni'nin çimlenmeyi belirgin biçimde engellemediğini göstermektedir. Buna karşın Cu ve Pb uygulamalarında GÇ değerleri daha düşük seviyelere inerken, en belirgin gerileme Pb-500 (32.03) ve Cd-500 (35.75) gruplarında ortaya çıkmıştır. Bu sonuç, yüksek doz Pb ve Cd'nin çimlenme fizyolojisini güçlü biçimde bozduğunu ve fide dönemine geçişi ciddi ölçüde sınırladığını desteklemektedir.

Tablo 3. Ağır metal dozlarının maydanozda *in vitro* fide canlılığı ve tolerans parametreleri üzerine etkileri

Table 3. Effects of heavy metal doses on *in vitro* seedling vigor and tolerance parameters of parsley

Doz	Fide Canlılık İndeksi I	Fide Canlılık İndeksi II	Kök/Gövde kuru ağırlık oranı	Kök Uzunluğu Tolerans İndeksi (%)	Toplam Kuru Ağırlık Tolerans İndeksi (%)	Göreceli Çimlenme (%)
Kontrol	15.428a	0.868a	0.417b	100.00a	100.00a	100.00a
Ni-100	11.976b	0.663b	0.363b	80.44b	75.95bc	100.56a
Ni-300	8.536c	0.390cd	0.307b	74.09bc	57.05cd	78.96b
Ni-500	4.641f	0.2104ef	0.340b	47.04d	36.43def	66.30cd
Cu-100	6.703d	0.272e	0.270b	70.13c	46.39d	67.41c
Cu-300	4.065fg	0.219ef	0.210b	47.53d	41.24de	61.08de
Cu-500	2.657hı	0.105fgh	0.130b	36.02e	22.51efg	53.63f
Cd-100	5.655e	0.247e	0.130b	45.38d	36.08def	78.94b
Cd-300	2.230ı	0.415c	2.570a	22.70f	84.19ab	54.38f
Cd-500	1.010j	0.050gh	0.090b	13.62g	16.15fg	35.75dh
Pb-100	3.393gh	0.171efg	0.237b	35.96e	34.88d-g	56.24ef
Pb-300	2.143ı	0.0648gh	0.127b	35.46e	18.90efg	39.48g
Pb-500	0.883j	0.031h	0.137b	16.62fg	11.34g	32.03h
LSD	1.002***	0.139***	0.914***	7.63***	23.75***	6.01***

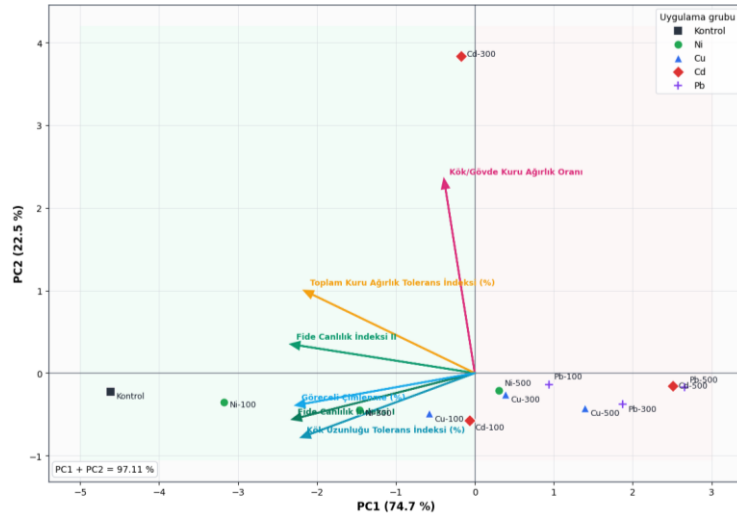
Değerler ortalama olup, farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir; ***p<0.001

Genel olarak bu indeksler birlikte değerlendirildiğinde, yüksek dozlarda Cd ve Pb'nin en baskın toksik etkiyi gösterdiği, Cu'nun özellikle fide canlılığı üzerinde belirgin düşüşlere yol açtığı, Ni'nin ise düşük dozda çimlenmeyi koruyabilmesine rağmen doz yükseldikçe büyüme ve kuru madde

toleransını azaltabildiği anlaşılmaktadır. *In vitro* koşullarda ağır metal stresinin maydanozda tolerans bileşenlerini çok yönlü biçimde zayıflattığı; bunun da erken dönemde vigor kaybı, kök uzamasında düşüş ve toplam kuru madde birikiminde azalma ile somutlaştığı görülmektedir. Tüm bu sonuçlar,

metal türü ve konsantrasyonuna bağlı olarak çimlenme ve fide gelişiminde belirgin azalmalar olduğunu ortaya koymaktadır. Elde ettiğimiz bulgular, literatürde raporlanan ağır metal sıralamalarıyla da tutarlıdır. PCA biplot grafiği, ağır metal uygulamalarının maydanoz fidelerinde fide canlılığı ve tolerans parametreleri bakımından belirgin bir ayrışma oluşturduğunu göstermiştir. İlk iki ana bileşen toplam varyasyonun %97.11'ini açıklamış olup, PC1 tek başına %74.7, PC2 ise %22.5 oranında katkı sağlamıştır. Kontrol ve Ni-100 uygulaması, göreceli çimlenme değerlerinin yüksek olmasıyla ilişkili bulunmuş; özellikle Ni-100 uygulamasında göreceli çimlenme %100.56 ile kontrol düzeyine yakın

gerçekleşmiştir. Buna karşılık Cd-500 ve Pb-500 uygulamaları, fide canlılık indeksi I, fide canlılık indeksi II, kök uzunluğu tolerans indeksi ve toplam kuru ağırlık tolerans indeksi bakımından en düşük değerlere sahip gruplar olarak ayrılmıştır. Nitekim Cd-500'de fide canlılık indeksi I 1.010, kök uzunluğu tolerans indeksi %13.62 ve toplam kuru ağırlık tolerans indeksi %16.15 olarak belirlenirken, Pb-500'de bu değerler sırasıyla 0.883, %16.62 ve %11.34 olmuştur. Bu durum, özellikle yüksek doz Cd ve Pb uygulamalarının maydanozda fide gelişimi ve tolerans kapasitesi üzerinde daha belirgin baskılayıcı etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Ağır metal dozlarının maydanozda fide canlılığı ve tolerans parametreleri üzerine etkisini gösteren PCA biplot grafiği

Figure 1. PCA biplot showing the effects of heavy metal doses on seedling vigor and tolerance parameters of parsley

4. Sonuç

Bu çalışma, dört farklı ağır metalin (Ni, Cu, Cd ve Pb) *in vitro* koşullarda maydanoz bitkilerinin erken gelişimi üzerindeki etkilerini çok yönlü parametrelerle ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, tüm metallerin artan dozlarla birlikte çimlenme ve fide gelişimini anlamlı düzeyde baskıladığını göstermiştir. Çimlenme oranı ve vigor indekslerinin, özellikle yüksek Cd ve Pb dozlarında belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Kök ve gövde uzunluğu ile yaş ve kuru biyokütle parametrelerinde doza bağlı düşüşler olduğu belirlenmiştir. Kök gelişimi, gövdeye kıyasla

daha hassas tepki vermiş; bu durum tolerans indeksleri ve kök:gövde kuru ağırlık oranlarındaki değişimlerle desteklenmiştir. Göreceli çimlenme değerleri incelendiğinde, Pb-500 ve Cd-500 gruplarında çimlenmenin en fazla baskılandığı belirlenmiştir. Genel olarak, en belirgin toksik etkinin Cd ve Pb uygulamalarında ortaya çıktığı belirlenmiştir. Düşük doz Ni uygulamalarının çimlenmeyi görece daha az etkilediği, ancak fide gelişimini baskıladığı görülmüştür. Cu ise orta düzeyde toksisite sergilemiştir. Sonuç olarak, maydanoz fideleri, erken gelişim döneminde ağır metal stresine duyarlılık göstermekte; bu

stresin türüne ve dozuna bağlı olarak gelişimsel parametrelerde anlamlı gerilemeler yaşanmaktadır. Çalışma, *in vitro* tarama yöntemlerinin ağır metal tolerans araştırmalarında güvenilir bir ön test aracı olarak kullanılabileceğini ve elde edilen bulguların saha çalışmalarıyla desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Finansman

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışma insan veya hayvan denekleri içermediğinden etik kurul onayı gerekmemektedir.

Kaynaklar

- Acila, S., Derouiche, S., Alliou, N., 2024. Embryo growth alteration and oxidative stress responses in germinating *Cucurbita pepo* seeds exposed to cadmium and copper toxicity. *Scientific Reports*, 14(1): 8608.
- Ahmed, W.E., Almutairi, A.A., Almujaaydil, M.S., Algonaiman, R., Mousa, H.M., Alhomaidd, R.M., 2025. Nutraceutical potential of parsley (*Petroselinum crispum* Mill.): Comprehensive overview. *Italian Journal of Food Science*, 37(1):194-209.
- Al, G.E., 2019. A study on the yield of parsley crops (*Petroselinum crispum* Mill.) grown in different environments during the harvest times and on the changes in the yield criteria. MSc thesis, Tokat Gaziosmanpaşa University, Institute of Natural and Applied Sciences, Tokat.
- Alawadhi, N., Abass, K., Khaled, R., Osaili, T.M., Semerjian, L., 2024. Heavy metals in spices and herbs from worldwide markets: A systematic review and health risk assessment. *Environmental Pollution*, 362: 124999.
- Aydemir, Ö.E., Kocaman, A., Korkmaz, K., Özkutlu, F., 2025. The effect of soil and foliar nitrogen applications on Cd toxicity of durum wheat (*Triticum turgidum* L.) grown in low and high cadmium contaminated soils. *Journal of Crop Health*, 77(1): 7.
- Baktemur, G., 2022. *In vitro* koşullar altında farklı konsantrasyonlarda hazırlanan kurşun (Pb) ağır metalinin roka (*Eruca sativa* L.) bitkisinin gelişimi üzerine etkilerinin saptanması. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 6(4): 828-834.
- Baran, O., Kara, E., Karaköy, T., Baktemur, G., 2022. Determination of the effects of some heavy metals applied *in vitro* conditions on the development of cucumber (*Cucumis sativus* L.). In *8th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference*, Conference Proceedings Book, June 4-6, Mardin, s. 1296-1314.
- Bekiş, P., Ergül, B., Kara, E., Baktemur, G., 2025. Evaluation of the effects of cobalt concentrations on the growth of bean (*Phaseolus vulgaris*) varieties under *in vitro* conditions. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 9(4): 999-1008.
- Bibi, A., Farooq, U., Mirza, N., Khan, A., Sarwar, R., Alam, A., Mahmood, Q., 2014. Excessive chromium may cause dietary toxicity in parsley (*Petroselinum crispum*). *Toxicological & Environmental Chemistry*, 96(2): 287-295.
- Dursun, E. 2023. Metotreksat ile oluşturulan beyin ve bağırsak hasarı üzerine maydanoz (*Petroselinum crispum*) ekstrelerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dghaim, R., Al Khatib, S., Rasool, H., Ali Khan, M., 2015. Determination of heavy metals concentration in traditional herbs commonly consumed in the United Arab Emirates. *Journal of environmental and public health*, (1): 973878.
- El-Sappah, A.H., Zhu, Y., Huang, Q., Chen, B., Soaud, S.A., Abd Elhamid, M.A., Yan, K., Li, J., El-Tarabily, K.A. 2024. Plants' molecular behavior to heavy metals: from criticality to toxicity. *Frontiers in Plant Science*, 15: 1423625.

- Ertas, B., Turan, F.B., Özbeyli, D., Yanardağ, R., Saçan, Ö., Şener, G., 2021. Protective effects of *Petroselinum crispum* (Parsley) extract against methotrexate-induced hepatotoxicity. *European Journal of Biology*, 80(2): 173-178.
- Farah, H., Elbadrawy, E., Al-Atoom, A.A., 2015. Evaluation of anti-oxidant and antimicrobial activities of ethanolic extracts of parsley (*Petroselinum erispum*) and coriander (*Coriandrum sativum*) plants grown in Saudi Arabia. *International Journal of Advanced Research*, 3(4): 1244-1255.
- Gutarowska, B., Szulc, J., Jastrzabek, K., Kręgiel, D., Śmigielski, K., Cieciora-Włoch, W., Mroczńska-Florczak, M., Liszkowska, W., Rygała, A., Berłowska, J., 2023. Effectiveness of ozonation for improving the microbiological safety of fresh-cut parsley (*Petroselinum crispum*) leaves. *Applied Sciences*, 13(15): 8946.
- Gündeş, F. A., Sönmez, İ., 2021. Effect of phosphorus on the alleviation of boron toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plant. *Journal of Elementology*, 26(4): 1053-1063.
- Hussain, J., Saeed, W., Naqvi, T.A., Shah, M.M., Ahmad, R., Hassan, A., Mahmood, Q., 2015. Dietary toxicity of lead and hyper-accumulation in *Petroselinum crispum*. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(7): 1819-1824.
- Islam, E., Liu, D., Li, T., Yang, X., Jin, X., Mahmood, Q., Tian, S., Li, J., 2008. Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3): 914-926.
- Hou, D., Jia, X., Wang, L., McGrath, S.P., Zhu, Y. G., Hu, Q., Zhao, F.J., Bank, M.S., O'Connor, D., Nriagu, J., 2025. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, 388(6744): 316-321.
- Kalsa, K.K., Abebie, B., 2012. Influence of seed priming on seed germination and vigor traits of *Vicia villosa* ssp. *dasycarpa* (Ten.). *African Journal of Agricultural Research*, 7(21): 3202-3208.
- Kara, E., Baktemur, G., 2022. Determining the effects of some heavy metal applications on white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* F. *alba*) in *in vitro* conditions. *Ege 6th International Conference on Applied Sciences*, Conference Proceedings Book, 10-11 September, İzmir, s. 254-262.
- Kara, E., 2025. Polietilen glikol (PEG) ile oluşturulan kuraklık stresine karşı farklı turp (*Raphanus sativus* L.) çeşitlerinin *in vitro* tepkileri. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15(2): 372-386.
- Kavvadias, V., Paschalidis, C., Vavoulidou, E., Petropoulos, D., Koriki, A., 2012. Effects of soil amended with cadmium and lead on growth, yield, and metal accumulation and distribution in parsley. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(1-2): 161-175.
- Kumar, B., Verma, S.K., Ram, G., Singh, H.P., 2012. Temperature relations for seed germination potential and seedling vigor in palmarosa (*Cymbopogon martinii*). *Journal of Crop Improvement*, 26(6): 791-801.
- Kuru, İ.S., Orcan, P., 2025. Biochemical responses in *Salvia limbata* CA Mey. towards mercury and lead induced *in vitro* oxidative stress. *Scientific Reports*, 15(1): 32119.
- Mancak, Z., Baktemur, G., 2023. Effects of nutrient media including heavy metals at different concentrations in *in vitro* conditions on the growth of squash (*Cucurbita pepo* L.). *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 12(1): 30-36.
- Maodaa, S.N., Allam, A.A., Ajarem, J., Abdel-Maksoud, M.A., Al-Basher, G.I., Wang, Z.Y., 2016. Effect of parsley (*Petroselinum crispum*, Apiaceae) juice against cadmium neurotoxicity in albino mice (*Mus musculus*). *Behavioral and Brain Functions*, 12(1): 6.

- Meharg, A.A., Meharg, C., 2021. The pedosphere as a sink, source, and record of anthropogenic and natural arsenic atmospheric deposition. *Environmental Science & Technology*, 55(12): 7757-7769.
- Murashige, T., Skoog, F., 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15: 473-497.
- Nasircilar, A.G., Ulukapi, K., Topcuoglu, B., Kurubas, S., Erkan, M., 2024. Salt and heavy metal stress responses and metal uptake potentials of some leafy vegetables. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7(1): e20487.
- Nawaz, I., Mehboob, A., Khan, A.H.A., Naqvi, T.A., Bangash, N., Aziz, S., Khan, W., Shahzadi, I., Barros, R., Ullah, K., Shah, M.M., 2024. Higher cadmium and zinc accumulation in parsley (*Petroselinum crispum*) roots activates its antioxidants defense system. *Biometals*, 37(1): 87-100.
- Pereira, G.J.G., Molina, S.M.G., Lea, P., Azevedo, R.A.D., 2002. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*. *Plant and Soil*, 239(1): 123-132.
- Sakthivelu, G.M.K.A., Devi, M.A., Giridhar, P., Rajasekaran, T., Ravishankar, G.A., Nedev, T., Kosturkova, G., 2008. Drought-induced alterations in growth, osmotic potential and *in vitro* regeneration of soybean cultivars. *General and Applied Plant Physiology*, 34(1-2): 103-112.
- Singh, P., Pandey, A., 2025. Indian knowledge system for sustainable mitigation of heavy metal effects in plants. *IJSAT-International Journal on Science and Technology*, 16(4).
- Smýkal, P., Vernoud, V., Blair, M.W., Soukup, A., Thompson, R.D., 2014. The role of the testa during development and in establishment of dormancy of the legume seed. *Frontiers in Plant Science*, 5(1): 351.
- Ulusu, Y., Öztürk, L. Elmastaş, M., 2017. Antioxidant capacity and cadmium accumulation in parsley seedlings exposed to cadmium stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 64: 883–888
- Vega, A.S., Arce, G., Rivera, J.I., Acevedo, S.E., Reyes-Paecke, S., Bonilla, C.A., Pastén, P., 2022. A comparative study of soil metal concentrations in chilean urban parks using four pollution indexes. *Applied Geochemistry*, 141: 105230.
- Wang, N., Chen, H., Tian, Y., 2024. Effects of nickel, lead, and copper stress on the growth and biochemical responses of *Aegilops tauschii* seedlings. *Scientific Reports*, 14: 24832.
- Wu, Y., An, T., Gao, Y., Kuang, Q., Liu, S., Liang, L., Xu, B., Zhang, S., Deng, X., Chen, Y., 2023. Genotypic variation in the tolerance to moderate cadmium toxicity among 20 maize genotypes with contrasting root systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(5): 2618-2630.
- Yılmaz, B., Çilingir Tütüncü, A., Saka, A.K., Demirkaya, S., Yılmaz, H., Ozer, H., 2024. Effects of different nutrient inputs in organic parsley cultivation. *Biological Agriculture & Horticulture*, 40(3): 161-172.
- Zhao, X., Joo, J.C., Kim, D., Lee, J., Kim, J.Y., 2016. Estimation of the seedling vigor index of sunflowers treated with various heavy metals. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 7(3): 1-6.