

Bölüm 3

KADMIYUMUN BİTKİLER ÜZERİNE ETKİLERİ

Ayşegül DALDAL¹, Hanife MUT²

1 Yüksek Lisans Öğrencisi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü,
Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, BİLECİK. ORCID: 0009-0008-7523-019X

2 Prof. Dr. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Tarla Bitkileri Bölümü, BİLECİK. ORCID: 0000-0002-5814-5275

GİRİŞ

Sanayileşmenin artması ve teknolojiadaki ilerlemeler, yaşamı kolaylaştırmakla birlikte çevresel kirlilik sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Bu kirliliğe neden olan birçok unsur bulunmakla birlikte, ağır metaller bu unsurlar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Günümüzde toprak, su ve hava gibi doğal ortamlarda giderek birikim gösteren ağır metaller, canlıların yaşamı üzerinde tehdit oluşturan ciddi çevresel problemlerden biri haline gelmiştir. Endüstriyel faaliyetler, motorlu taşıtların egzoz gazları, madencilik faaliyetleri, volkanik olaylar, tarımda kullanılan kimyasallar ve şehir atıkları gibi birçok kaynak, bu metallerin çevreye yayılmasına yol açmaktadır (Stresty ve Madhava Rao, 1999; Öktüren Asri ve Sönmez, 2006). Ağır metaller, atom numarası 20'den büyük olan, yoğunluğu 5 g/cm³'den fazla olan ve düşük yoğunluklarda bile toksik etki gösterebilen elementler olarak tanımlanır. Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), krom (Cr), demir (Fe), kobalt (Co), bakır (Cu), nikel (Ni), cıva (Hg) ve çinko (Zn) elementleri bu grupta yer alır (Özkan, 2009). İnsan eliyle üretilemeyen ve yok edilemeyen bu elementler; toprak, su ve hava gibi doğal kaynaklarda birikmeye eğilimlidir. Atmosfere farklı yollarla salınan bu metaller, yağışlar ve toz taşınımı yoluyla toprağa ve suya ulaşarak ekosistem üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Ağır metallerin tümünün biyolojik olarak parçalanamadığı bilinmektedir. Bazıları bulunduğu ortamda hareketsiz kalarak çevresel olarak uzaklaştırılmaz iken, bazıları hareketli yapıları sayesinde bitki kökleri tarafından taşınabilir. Bu metaller, bitkiler açısından gerekli olup olmamalarına göre sınıflandırılabilir. Örneğin bakır, çinko, kobalt, mangan ve nikel enzim sistemleri için gerekli olup düşük yoğunluk düzeylerinde faydalı olabilirken; alüminyum, arsenik, kadmiyum, krom ve kurşun gibi elementler düşük yoğunluklarda dahi bitkiler için zararlıdır. Kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) ve cıva (Hg) toksik etkileri en yüksek olan ağır metaller arasında yer almaktadır. Bitkilerin gelişim sürecinde ister gerekli ister gereksiz olsun bu metallerin dokularda birikmesi hem vejetatif hem de generatif gelişim üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Gür ve ark., 2004). Her metalin bitkide etkili olduğu bölge farklı olabileceğinden, gösterdikleri toksik etki de metale bağlı olarak değişkenlik gösterir. Toksisite derecesi; metalin yoğunluğu, kimyasal formu (iyon, kompleks vs.), maruz kalan bitki türü, uygulama süresi ve maruz kalınan çevresel koşullara göre farklılık gösterir. Bitkiler genellikle bu metaller nedeniyle geçici veya uzun süreli stres altında kalabilir. Bu stresin etkileri; bitki boyunda, çimlenme oranında, kök ve gövde uzunluğunda ya da biyokütle miktarında azalma olarak gözlemlenir (Phalsson, 1989). Bu nedenle, her bitki türü için ağır metale karşı tolerans sınırlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Bu derleme çalışmada, ağır metallerden biri olan kadmiyumun bitkiler üzerindeki etkilerine değinilecektir.

KADMIYUMUN TANIMI

Kadmiyum (Cd), yumuşak yapılı, gümüş renginde, toksik ve kanserojen bir ağır metal olup genellikle elektrikli cihazlarda, seramik üretiminde, pillerde ve akülerde kullanılmaktadır. Alman bilim insanı Stromeyer tarafından 1817 yılında keşfedilen bu element, periyodik cetvelin II-B grubunda ve 48. sırada yer almaktadır. Doğada tek başına bulunmayan kadmiyuma, çoğunlukla çinko bileşikleriyle birlikte kadmiyum sülfür (CdS) formunda rastlanır. Endüstride ise çinko, kurşun ve bakır üretiminin yan ürünü olarak elde edilmektedir. Yer kabuğundaki varlığı oldukça sınırlıdır ve genellikle 1 mg/kg düzeyindedir (Özkan, 2009). Kadmiyumun çevre için tehlikeli olmasının başlıca nedeni, çok düşük miktarlarda bile zehirleyici etki göstermesi ve biyolojik sistemlerde uzun süre kalabilmesidir. Toprakta 3 mg/kg ve bitkilerin kuru maddelerinde 1 mg/kg düzeyini aşan miktarlarda toksisite göstermektedir (Özbek ve ark., 1995). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından en toksik 20 metal arasında 7. sırada, ayrıca birinci kategori kanserojenler arasında sınıflandırılmaktadır. Diğer ağır metallere kıyasla 2 ila 20 kat daha fazla toksik etkiye sahiptir. Kadmiyum çevreye hem doğal yollarla hem de insan faaliyetleriyle yayılmaktadır. Bitki ve topraklara kadmiyumun en yaygın ulaşım yolu atmosferde bulunan kadmiyum parçacıklarının çökerek toprağa girmesidir. Fosfatlı gübreler, kanalizasyon atıkları ve hava yoluyla taşınan kadmiyum, tarım topraklarının başlıca kirlenme kaynaklarını oluşturmaktadır (Haktanır, 1987). Topraktaki kadmiyumun %90'ı bitkiler tarafından kök yoluyla alınırken, kalan %10'luk kısım atmosferden emilmektedir. Özellikle sanayi tesislerinin ya da yoğun trafiğin bulunduğu bölgelerde yetişen bitkilerde, havadan alınan kadmiyum oranı %40'ı aşabilmektedir. Kadmiyum toprak-bitki sistemindeki yüksek mobilitesi nedeniyle kolaylıkla besin zincirine dâhil olabilmekte böylece bitki, hayvan ve insan sağlığı açısından tehlikeli olabilmektedir (Ötüken Asri ve ark., 2007).

KADMIYUMUN BİTKİLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Kadmiyum, çözünürlüğü yüksek olan bir metal olduğu için çevrede kolayca yayılır. Bu özelliği sayesinde Cd^{2+} iyonları şeklinde bitki kökleri ve deniz organizmaları tarafından kolayca emilir ve bünyede birikir. Ayrıca, gübre ve pestisitlerin içerisinde bulunması nedeniyle topraklara geçişi oldukça kolaydır. Bitki dokularında kadmiyum birikimi, azot ve karbonhidrat metabolizmasında önemli değişikliklere yol açarak fizyolojik süreçleri olumsuz etkiler. Bu ağır metal, protein yapılarında yer alan -SH gruplarına bağlanarak enzimlerin işlevini engeller, bu da bitkilerde fotosentez, su dengesi ve büyüme gibi temel süreçlerin bozulmasına neden olur (Sheoran ve ark., 1990). Kadmiyum ayrıca stomaların kapanmasına yol açar, bu durum da terleme yoluyla su kaybını azaltır ve gaz alışverişini

ni sınırlar. Aynı zamanda klorofil sentezini de baskılayarak yapraklarda sararma (kloroz) gibi görsel belirtiler oluşturur.

Yüksek kadmiyum düzeyine sahip topraklarda yetişen bitkilerde kök gelişimi belirgin şekilde yavaşlar; bu da su ve besin elementlerinin alınmasını sınırlar. Bitkilerde kök ve gövde büyümesi duraklar, yaprak gelişimi azalır ve ileri düzeyde stres durumlarında solgunluk ya da ölüm görülebilir (Sanita di Toppi ve Gabbrielli, 1999; Guo ve ark., 2008). Kadmiyum bitkilerin demir (Fe) alımını da engelleyerek demir eksikliğine sebep olur, bu da klorofil üretiminin azalmasına ve fotosentezin aksamasına yol açar (Alcantara ve ark., 1994). Ayrıca, bu toksik etki nitrat asimilasyon sürecini de etkiler; nitrat redüktaz, nitrit redüktaz gibi enzimlerin aktiviteleri kadmiyum varlığında düşer ve bu durum azot metabolizmasının verimliliğini azaltır (Gouia ve ark., 2000). Kadmiyum stresi altında kalan bitkilerde, kök gelişiminin engellenmesi iyon ve su alımını doğrudan etkiler. Aynı zamanda stomaların kapanması hem su kaybını azaltmakta hem de kadmiyumun bitki içinde taşınmasını sınırlamaktadır (Salt ve ark., 1995). Bu etkiler nedeniyle kadmiyum bitkilerde büyüme ve verim kaybına neden olan en tehlikeli ağır metallerden biri olarak kabul edilir.

Wu ve ark. (2011) süs bitkisi olan *Osmanthus fragrans* var. *thunbergii* üzerine farklı dozlarda (0, 25, 50, 100, 200 mg Cd kg⁻¹) kadmiyum uygulayarak yürüttükleri bir tarla çalışmasında; uygulanan kadmiyum miktarı arttıkça bitki biyokütlesinde düşüş gözlemlendiğini belirlemişlerdir. Artan kadmiyum seviyelerine bağlı olarak bitki bünyesindeki Cd ve Pb miktarlarında artış yaşanırken, Zn ve Cu elementlerinin konsantrasyonlarında azalma tespit edilmiştir. En fazla kadmiyum birikimi 25 mg kg⁻¹ dozunda gerçekleşmiştir. Bitki bu süreçte yüksek oranda Cd ve Pb taşıırken, Zn ve Cu transferi sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar, *Osmanthus* türünün kirli alanlarda kullanıma uygun olabileceğini göstermektedir.

Goswami ve Das (2015), kadmiyumun *Brassica juncea* (Hint hardalı) üzerindeki etkilerini inceleyerek, bitkinin bu metalin topraktan uzaklaştırılmasında kullanılabilirliğini değerlendirmiştir. Çalışmada 25'ten 400 mg kg⁻¹'e kadar kadmiyum klorür uygulanmıştır. Bitkiler yüksek doza kadar kadmiyuma tolerans gösterse de kök ve gövde uzunluğunda, biyokütlede ve pigment miktarlarında düşüş meydana gelmiştir. Bitkiler en yüksek toleransı 25 mg/kg dozda göstermiş, daha yüksek dozlarda tolerans seviyesi azalmıştır. Kök ve sürgünlerde 200 mg/kg seviyesinde en yüksek kadmiyum birikimi, 100 mg/kg'da ise yapraklarda maksimum birikim kaydedilmiştir. Bu bulgular, Hint hardalının fitoremediasyon için uygun bir tür olduğunu desteklemektedir.

Chitra ve arkadaşları (2011), sera koşullarında mısır, buğday ve tütün bitkilerine farklı kadmiyum dozları (10, 30 ve 50 mg/kg) uygulamışlardır. Bulgular, uygulanan doz arttıkça köklerde kadmiyum birikiminin daha fazla olduğunu göstermiştir. Özellikle tütün bitkisinin gövdesi dışındaki tüm örneklerde, kök dokularındaki kadmiyum düzeyi, sürgünlere kıyasla daha yüksek bulunmuştur.

Ayçiçek ve arkadaşları (2008), pamuk bitkisine farklı kadmiyum konsantrasyonlarında sulama suyu uygulayarak, kadmiyumun çimlenme, fide gelişimi ve metal birikimi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. İlk iki hafta boyunca kök kuru ağırlığında düşüş görülmüş, ancak ilerleyen haftalarda artan kadmiyum dozları köklerde ağırlık artışına neden olmuştur.

Abusalih (2019) tarafından yürütülen çalışmada, kadmiyum ile kirlenmiş topraklarda yetiştirilen Cubana Kordes gül çeşidine farklı oranlarda leonardit uygulanarak, leonarditin bitki gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, leonarditin Cd toksisitesini azaltma potansiyeli ve bitkinin Cd'yi absorbe etme düzeyi değerlendirilmiştir. Denemede, Cubana Kordes gülü kullanılarak, toprağa üç farklı dozda (%0, %3, %6) leonardit ve beş farklı dozda (0, 25, 50, 100, 200 mg Cd kg⁻¹) Cd (Cd-SO₄·8H₂O formunda) eklenmiştir. Uygulama sonrası 30 gün boyunca Cd ile kirlenilen ortamda bekletilen topraklara gül fidanları dikilmiş ve dört ay süresince bitki gelişimleri takip edilmiştir. Yaprak, çiçek, gövde ve kök dokularındaki Cd birikimi, uygulanan Cd miktarı arttıkça artış göstermiştir. Ancak çiçeklerde 50 mg Cd kg⁻¹ seviyesinin üzerindeki dozlarda, Cd alımı belirgin şekilde azalmıştır. Yapraklar 0.09–3.00 µg kg⁻¹, gövdeler 1.42–255.76 µg kg⁻¹ ve çiçekler 12.34 µg kg⁻¹ kadar Cd absorbe etmiştir. Kök dokularındaki Cd birikimi ise 7.15–2593.49 µg kg⁻¹ arasında değişmiştir. Sonuç olarak, 200 mg Cd kg⁻¹ düzeyine kadar Cd uygulamasına rağmen bitkilerde belirgin toksik etki görülmemiştir. Görsel olarak herhangi bir bozulma ya da stres belirtisi tespit edilmemiştir. Bu durum, Cubana Kordes gülünün fitoremediasyon çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Ayhan ve arkadaşlarının 2007 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, mısır bitkisinin (*Zea mays* L.) farklı genetik çeşitleri (DK626, DK743, Doge, Luce, Vero, 31G98, 3223 ve 32D99), sekiz gün süreyle çeşitli kadmiyum (Cd: 0, 0.1, 0.2, 0.3 ve 0.4 mM) ve kurşun (Pb: 0, 1, 2, 4 ve 6 mM) konsantrasyonlarına maruz bırakılmıştır. Araştırma sonuçları, uygulanan ağır metal streslerine rağmen çimlenme oranlarında kayda değer bir azalma olmadığını göstermiştir. Ancak, koleoptil ve kök uzunluklarında belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Özellikle Pb konsantrasyonu arttıkça tüm çeşitlerde köklerin nispi büyüme hızında azalma tespit edilmiştir.

Buna karşılık Cd etkisi sadece Doge çeşidinde anlamlı bulunmuştur. Cd ve Pb'un farklı düzeylerde uygulanması, genel olarak kök ve koleoptil dokularının su içeriklerinde önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Ancak 6 mM Pb uygulaması, DK626 ve Vero çeşitlerinin köklerinde; 32D99 ve Vero'nun koleoptillerinde su içeriğinde kontrol grubuna kıyasla anlamlı düşüşlere yol açmıştır. Kök uzunluklarındaki azalma oranları dikkate alınarak yapılan değerlendirmede, Cd'ye karşı en yüksek dayanıklılığı 32D99 çeşidi gösterirken, Pb stresine en dayanıklı çeşit Vero olarak belirlenmiştir. Her iki metal stresine karşı en duyarlı çeşidin ise 3223 olduğu sonucuna varılmıştır.

Çılgın (2022) tarafından yapılan çalışmada, Kırgızistan'da yaygın olarak yetiştirilen buğday (*Triticum aestivum* L. var. *intensivnaya*) ve arpa (*Hordeum vulgare* L. var. *alta*) varyeteleri kullanılarak, kadmiyumun farklı konsantrasyonlardaki uygulamalarının bitkiler üzerindeki genotoksik etkileri in vitro koşullarda araştırılmıştır. Bitkiler kontrol ve 50, 100, 200, 400 µM Cd içeren deney gruplarına ayrılmış; uygulamalar CdCl₂ içeren Hoagland çözeltisiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, artan Cd konsantrasyonlarının hem fizyolojik hem de genetik düzeyde zararlı etkilere neden olduğu belirlenmiştir.

Demirbaş ve Çoşkan (2019) tarafından yapılan bir başka çalışmada, farklı oranlarda biyokömür (BC) ve kadmiyum (Cd) uygulamalarının mısır bitkisinin verimi ve besin elementi alımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçlara göre, en yüksek kuru madde verimi (27,52 g/saksı), %2 BC ve 4 mg/kg Cd kombinasyonunda elde edilmiştir. BC kontrol uygulamasında artan Cd dozları kuru madde üretimini azaltırken, %2 BC uygulaması tüm Cd düzeylerinde verimi artırmıştır. En yüksek azot içeriği %2 BC ve 0 mg/kg Cd uygulamasında (%2,23 N), en yüksek fosfor ve potasyum içerikleri ise sırasıyla %0 BC + 2 mg/kg Cd (%0,39 P) ve %2 BC + 0 mg/kg Cd (%2,54 K) uygulamalarında saptanmıştır.

Karataş (2019) tarafından yapılan çalışmada, farklı kadmiyum dozlarının (0, 50, 100, 200, 400 mg/L) üç çeltik (*Oryza sativa* L.) çeşidinde (Osmancık-97, Halilbey ve Kızıltan), çimlenme, fide gelişimi ve Cd birikimi üzerindeki etkilerini; aynı zamanda farklı priming (ön işlem) uygulamalarının (hidropriming, salisilik asit (SA) ve potasyum nitrat (KNO₃) bu etkiler üzerindeki düzenleyici rolünü araştırmak amacıyla yürütülen çalışma sonucunda, artan Cd dozlarının tüm çeşitlerde çimlenme oranını ve fide gelişimini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Kök dokularındaki Cd birikimi, fidelerin diğer kısımlarındaki Cd birikiminden daha yüksek bulunmuştur. Salisilik asit ile yapılan priming uygulaması, kök ve sürgün dokularında Cd birikimini azaltmış ve Cd stresine karşı çeltik

bitkilerinde koruyucu bir etki göstermiştir. Bu bulgular, salisilik asidin Cd toksisitesine karşı çeltikte kullanılabilecek potansiyel bir ön işlem olduğunu göstermektedir.

Yem bitkilerinin çimlenme sürecine bazı ağır metallerin etkisini belirlemek amacıyla yürütülen bir çalışmada, yaygın fiğın ağır metallere karşı en yüksek toleransa sahip tür olduğu, buna karşılık sorgumun en duyarlı tür olduğu belirlenmiştir. Metal toksisitesi bakımından genel sıralama “Hg> Cd> Pb> Cr> Ni” şeklinde belirlenmiştir. Özellikle 400 ve 800 mg L⁻¹ dozlarında uygulanan cıva ve kadmiyum, diğer metallerin aynı konsantrasyonlarına kıyasla daha belirgin toksik etki göstermiştir (Ertekin, 2018).

Kadmiyum ile kirlenmiş topraklarda farklı klorür tuzları (NaCl, KCl ve CaCl₂) uygulamalarının makarnalık buğday bitkisinin Cd alımı üzerindeki etkilerini belirlemek üzere yapılan bir çalışmada, hem Cd içermeyen hem de Cd ile kontamine olmuş koşullarda, Cl⁻’un Na⁺, K⁺ ve Ca²⁺ formlarında uygulanmasının, bitki kuru madde veriminde genel bir azalma eğilimi yarattığı gözlemlenmiştir. Bu azalma, özellikle 4.0 g/kg dozunda uygulanan NaCl ve KCl ile belirginleşmiştir. En yüksek Cd dozunda kontrol bitkilerinde kuru madde verimi 649 mg/bitki iken, aynı koşullarda 4.0 g/kg NaCl uygulaması bu verimi yaklaşık %58 azaltarak 276 mg/bitki düzeyine düşürmüştü, KCl uygulamasında ise verim yaklaşık %46 azalarak 352 mg/bitki olarak kaydedilmiştir. Yeşil aksam Cd konsantrasyonlarına bakıldığında, Cl⁻ içeren tuz uygulamaları Cd birikimini anlamlı düzeyde artırmıştır. 1 mg/kg Cd uygulaması altında, tuz ilavesiz kontrol bitkisinde Cd konsantrasyonu 8.31 mg/kg iken; aynı Cd dozuna ek olarak 4.0 g/kg dozunda sırasıyla NaCl, KCl ve CaCl₂ uygulamaları bu değeri sırasıyla 26.4, 20.2 ve 13.5 mg/kg düzeylerine çıkarmıştır. Elde edilen bulgular, klorür tuzlarının Cd alımını artırıcı etkisinin bulunduğu ve bu etkinin şiddetinin tuza eşlik eden katyona bağlı olduğunu ortaya koymuştur (Özkutlu, 2020).

Zengin ve Munzuroğlu (2004) tarafından gerçekleştirilen bu araştırmada, cıva (HgCl₂) ve kadmiyumun (CdCl₂·H₂O) fasulye (*Phaseolus vulgaris*) fidelerinin kök, gövde ve yaprak gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, bir haftalık fideler 10 gün süreyle farklı konsantrasyonlardaki cıva ve kadmiyum çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre, hem cıva hem de kadmiyum uygulamaları fidelerin kök, gövde ve yaprak gelişimini anlamlı düzeyde baskılamıştır. Ağır metal konsantrasyonlarındaki artış, bitki gelişimindeki inhibisyon oranında da artışa neden olmuş; benzer şekilde, maruz kalma süresinin uzaması büyüme geriliğini daha da şiddetlendirmiştir. Bitkinin farklı organları arasında kök gelişiminin ağır metal stresine kar-

şı en duyarlı doku olduğu, bunu sırasıyla gövde ve yaprakların izlediği tespit edilmiştir. Ayrıca, karşılaştırmalı olarak cıva uygulamasının kadmiyuma kıyasla daha yüksek toksik etki gösterdiği belirlenmiştir.

Farklı kadmiyum dozlarının çemen bitkisinin bazı morfolojik ve kimyasal özelliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada, kadmiyum dozunda artışla beraber bitki boyu, kök uzunluğu, kök ve gövde yaş ağırlığı, yaprak ağırlığı ve yaprak sayısı değerlerinin azaldığı, lipit peroksidasyon ve askorbat peroksidaz aktivitesinin ise arttığı belirlenmiştir. Yine artan Cd dozlarının Ca, K, Mg ve Na içeriklerini kontrole kıyasla arttırdığı, Zn ve Mn birikimini ise azalttığı bildirilmiştir. Kadmiyum stresi altında en fazla Ca, Mg ve Mn birikiminin yapraklarda, K ve Na birikiminin gövde, Fe, Zn ve Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb ve Se birikiminin ise kök aksamında olduğu belirlenmiştir (Tunçtürk ve ark., 2020).

Cd, Cr, Hg, Ni ve Pb ağır metallerinin farklı dozlarının at dişi mısırdada çimlenme ve erken fide evresindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, en yüksek sürgün kuru ağırlık değerinin kadmiyum uygulamasından elde edildiği, Hg ve Cd ağır metallerinin 400 ve 800 mg L⁻¹ dozlarının diğer ağır metallerin aynı dozlarından daha fazla toksik etkide bulunduğu tespit edilmiştir (Ertekin ve Bilgen, 2021).

Ying Chen ve arkadaşları tarafından 2024 yılında yapılan çalışmada, Cd ve asit toleransına göre seçilen ve 16S rRNA dizileme yöntemiyle tanımlanan üç Cd-tolerant bakteri (*Bacillus velezensis* QZG6, *Enterobacter cloacae* QZS3 ve *Bacillus cereus* QZS8) belirlenmiştir. Hidroponik koşullarda yapılan uygulamalarda, bu bakterilerle aşıl原因anan *Sorghum bicolor* bitkilerinde sırasıyla %31,52, %50,20 ve %26,93 oranlarında biyokütle artışı gözlenmiştir. Özellikle QZS3 ile aşıl原因anan bitkilerde, Cd stresine bağlı olarak süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POD) enzim aktiviteleri ile malondialdehit (MDA) içeriğinde sırasıyla %65,74, %31,52 ve %80,91 oranında azalma tespit edilmiştir. Seçilen Cd-tolerant bakterilerin *S. bicolor* ile birlikte kullanıldığında Cd ile kirlenmiş toprakların biyoremediasyonunda etkili olabileceğini göstermektedir. Bakterilerin hem Cd detoksifikasyon mekanizmaları hem de besin elementi desteği ve hormon üretimi yoluyla bitki gelişimini teşvik ettiği sonucuna varılmıştır. Çalışma, mikrobiyal ve bitkisel uygulamaların entegre edilerek Cd kirliliğine karşı sürdürülebilir çözümler sunabileceğine dair önemli kanıtlar ortaya koymaktadır.

KADMIYUMUN TOPRAKTAN UZAKLAŞTIRILMASI

Ağır metallerin topraktan uzaklaştırılmasında çevre dostu ve sürdürülebilir bir yöntem olan fitoremediasyon, bitkilerin bu metallerin absorpsiyonunu, birikimini ve zararsız hâle getirilmesini sağlayan doğal

bir arıtım tekniğidir. Bu yöntemde, özellikle hiperakümülatör olarak adlandırılan ve yüksek metal toleransına sahip bitkiler tercih edilmektedir. Hiperakümülatör bitkiler, yüksek düzeyde ağır metal içeren ortamlarda gelişim gösterebilen, topraktan aldıkları metalleri gövde ve yapraklarında biriktirerek çevreden uzaklaştırılmasını mümkün kılan özel bitkilerdir. Bu bitkilerin kökleri, metallerin topraktan yüksek oranda alımını sağlarken, bunları hızlı bir şekilde bitkinin üst kısımlarına taşır ve burada depolar. Bu özelliği sayesinde fitoremediasyon yöntemi hem ekonomik hem de görsel açıdan cazip bir alternatif hâline gelmektedir (Glass, 1999). Geleneksel arıtma tekniklerine göre daha az maliyetli olması, kolay uygulanabilirliği ve doğaya zarar vermemesi, bu yöntemin önemini artırmaktadır. Hiperakümülatör bitkilerin yetiştirildiği alanlarda ağır metaller ya toprakta sabit hâle getirilerek zararsız biçime dönüştürülür ya da doğrudan bitkiler vasıtasıyla ortamdan uzaklaştırılır. *Thlapsi* sp., *Urtica* sp., *Taraxacum officinale*, *Chenopodium* sp., *Polygonum sachalase* ve *Allyssim* sp. gibi türlerin kadmiyum, bakır, kurşun, nikel ve çinko gibi metaller karşısında birikim yetenekleri oldukça yüksektir. Bu nedenle bu türler, kirlenmiş sahaların temizlenmesinde dolaylı yöntemlerle kullanılabilir (EPA, 1995). Dünya genelinde yaklaşık 400 hiperakümülatör bitki türü tespit edilmiştir. Türkiye’de ise bu gruba giren bazı bitkiler arasında *Viola arvensis* (tarla menekşesi), *Brassica napus* (kanola), *Helianthus annuus* (ayçiçeği) ve *Hypericum perforatum* (sarı kantaron) sayılabilir. Ülkemizde hiperakümülatör özellik taşıyan 18 farklı familyaya ait 38 tür bulunmakta olup, tür çeşitliliği açısından *Poaceae* (buğdaygiller) familyası 13 tür ile başı çekmektedir. Ancak bu bitkilerin bir kısmı aynı zamanda insanlar ve hayvanlar tarafından gıda olarak tüketilebilecek türlerdir. Bu da besin zinciri yoluyla ağır metallerin insan bünyesine geçme riskini doğurmaktadır. Özellikle kadmiyum gibi toksik metallerin et, süt ve diğer gıda ürünleri aracılığıyla vücuda girmesi, uzun vadede sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, hiperakümülatör bitkiler sadece toprak temizliği veya metal geri kazanımı açısından değil, aynı zamanda gıda güvenliği bakımından da dikkatle değerlendirilmelidir.

SONUÇ

Günümüzde sanayi faaliyetlerinin artması, kontrolsüz kimyasal gübre ve pestisit kullanımı ile atık suların tarımda sulama amaçlı değerlendirilmesi, toprak ve su kaynaklarında kadmiyum kirliliğini ciddi şekilde artırmaktadır. Bu durum, su canlılarından toprağın verimliliğine kadar pek çok ekosistem bileşeni üzerinde olumsuz etkilere yol açarken, kadmiyumun bitki dokularına geçişi; fotosentez, solunum, büyüme ve gelişme gibi temel fizyolojik süreçleri bozmakta ve ürün verimini azaltmaktadır. Böylece hem bitkisel üretim düşmekte hem de elde edilen ürünlerin güvenliği tehlikeye girmektedir. Kadmiyum ve diğer ağır metaller, çevrede doğal yollarla parçalanamayan toksik elementler olmaları nedeniyle bitkiler üzerinde ciddi fizyolojik ve biyokimyasal bozulmalara yol açmaktadır. Bitkilerin kök, gövde ve yaprak gibi organlarında birikerek su ve besin maddesi alımını engellemekte; klorofil sentezi, fotosentez, enzim aktiviteleri ve azot metabolizması gibi hayati işlevleri sekteye uğratmaktadır. Bu durum, bitki gelişiminin durmasına, verimin azalmasına ve hatta bitkinin ölümüne kadar varan sonuçlar doğurabilmektedir. Özellikle tarımsal üretimde, ağır metal kirliliği bitki kalitesini ve gıda güvenliğini tehdit eden önemli bir sorundur. Bu nedenle, kadmiyum gibi ağır metallerin bitkisel sistemler üzerindeki etkilerinin iyi anlaşılması hem sürdürülebilir tarım uygulamaları hem de çevre sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, hiperakümülatör bitkilerin kullanıldığı fitoremediasyon gibi biyolojik temizleme yöntemleri, kirlenmiş alanların rehabilitasyonunda etkili ve çevre dostu çözümler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alcantara, E., Romera, F. J., Canete, M., & De La Guardia, M. D. (1994). Effects of heavy metals on both induction and function of root Fe (III) reductase in Fe-deficient cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants. *Journal of Experimental Botany*, 45(12), 1893–1898.
- Ayçiçek, M., İnce, M., & Yaman, M. (2008). Kadmiyum'un pamuk bitkisinin çimlenme, erken fide gelişimi ve metal içeriği üzerine etkileri. *International Journal of Science & Technology*, 3(1): 1-11.
- Ayhan, B., Ekmekçi, Y., & Tanyolaç, D. (2007). Erken fide evresindeki bazı mısır çeşitlerinin ağır metal (kadmiyum ve kurşun) stresine karşı dayanıklılığının araştırılması. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(8): 411 – 422.
- Chen, Y., Wu, X., Lin, Z., Teng, D., Zhao, Y., Chen, S., & Hu, X. (2024). Screening of cadmium resistant bacteria and their growth promotion of *Sorghum bicolor* (L.) Moench under cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, 116012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116012>
- Chitra, R., Rao, G. M., & Subramanian, S. (2011). Comparative study on accumulation of cadmium in maize, tobacco and wheat. *Environmental Science Journal*. (Cilt/sayı yok).
- Demirbaş, A., & Coşkan, A. (2019). Biyokömür ve kadmiyum uygulamalarının mısır bitkisinin verimi ve besin maddesi alımına etkileri. *Türk Tarım Dergisi – Gıda Bilimi ve Teknolojisi*, 7(Special Issue 2), 109–114. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7isp2.109-114.3169>
- Doğaroğlu, Z. G. (2018). Kadmiyum, kurşun ve çinko metallerinin marul (*Lactuca sativa*) tohumlarının çimlenme özellikleri üzerine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 299–308. <https://doi.org/10.17482/uumfd.417228>
- Ertekin, E. N. (2018). Yaygın olarak tarımı yapılan yem bitkilerinde bazı ağır metallerin çimlenme üzerine etkisi. [Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Ertekin, E. N., & Bilgen, M. (2021). Bazı ağır metallerin at dişi mısır (*Zea mays* L.)'da çimlenme ve erken fide gelişimi üzerine etkileri. *Biological Diversity and Conservation*, 14(2), 198–207. <https://doi.org/10.46309/biodicon.2021.889901>
- EPA. (1995). *Contaminants and remedial options at select metals-contaminated sites* (EPA/540/R-95/512.6). U.S. Environmental Protection Agency.
- Glass, D. J. (1999). Economic potential of phytoremediation. In I. Raskin & B. D. Ensley (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment* (pp. 15–31). John Wiley & Sons.
- Gouia, H., Gorbil, M. H., & Meyer, C. (2000). Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean. *Plant Physiology and Biochemistry*, 38(6), 629–638.
- Guo, T. R., Zhang, G. P., & Zhang, Y. H. (2008). Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, cadmium and copper.

Journal of Environmental Sciences, 20(5), 540–544.

- Haktanır, K., & Arcak, S. (1998). *Çevre kirliliği* (Yayın No. 1503). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü.
- Karataş, S., & Konuşkan, Ö. (2022). Improvement of rice (*Oryza sativa*) germination and seedling growth under cadmium stress conditions using different seed priming agents. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17(2), 119–128. <https://doi.org/10.54975/isubuzfd.1171385>
- Kırbağ Zengin, F., & Munzuroğlu, Ö. (2004). Fasulye fidelerindeki (*Phaseolus vulgaris* cv. Strike) sitokinin içeriği üzerine bazı ağır metallerin (Hg⁺⁺, Cd⁺⁺, Cu⁺⁺ ve Pb⁺⁺) etkileri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 48–54.
- Mohamnpuria, N., Rana, N. K., & Yadav, S. K. (2007). Cadmium stress responses in plants. *Journal of Plant Science*, 2(1), 10–17.
- Öktüren Asri, F., & Sönmez, S. (2006). Ağır metal toksisitesinin bitki metabolizması üzerine etkileri. *Derim*, 23(2), 36–45.
- Öktüren Asri, F., Sönmez, S., & Çıtak, S. (2007). Kadmiyumun çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Derim*, 24(1), 32–39.
- Özkan, G. (2009). Endüstriyel bölge komşuluğunda kıyıs alandaki hava kalitesi; Muallimköy’de partikül maddede ve topraktaki ağır metal kirliliği [Yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü].
- Özkutlu, F. (2020). Makarnalık (*Triticum turgidum* L. durum) buğday Cd konsantrasyonu üzerine değişik (NaCl, KCl ve CaCl₂) tuz uygulamalarının etkisi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 9(1), 145–150. <https://doi.org/10.29278/azd.719313>
- Paschke, M. W., Valdecantos, A., & Redente, E. F. (2005). Manganese toxicity thresholds for restoration grass species. *Environmental Pollution*, 135(2), 313–322.
- Phalsson, A. M. B. (1989). Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 47(3–4), 287–319.
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169–181.
- Salt, D. E., Price, R. C., Pickering, I. J., & Raskin, I. (1995). Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology*, 109(4), 1427–1433.
- Sanita di Toppi, L., & Gabbrielli, R. (1999). Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 41(2), 105–130.
- Sheoran, I. S., Singal, H. R., & Singh, R. (1990). Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Photosynthesis Research*, 23(3), 345–351.
- Sönmez, O., & Kılıç, F. N. (2021). Toprakta ağır metal kirliliği ve giderim yöntemleri. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(2), 493–507.

- Stresty, T. V. S. & Madhava Rao, K. V. (1999). Ultrastructural alterations in response to zinc and nickel stress in the root cell of pigeonpea. *Environmental and Experimental Botany*, 41(1), 3–13.
- Tunçtürk, R., Tunçtürk, M., & Nohutçu, L. (2020). Kadmiyum stresi altında yetiştirilen *Trigonella foenum-graecum* L. bitkisinin bazı büyüme ve fizyolojik parametrelerinin incelenmesi. *ÇOMÜ Zir. Fak. Derg.*, 8 (2): 455–464.
- Türkmen, M., Akyurt, İ., Duran, K., & Türkmen, A. (2016). Giresun yöresinden bazı yenilebilir bitkilerde metal birikimlerinin değerlendirilmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 6(14), 99–105.