

Farklı pH'lardaki Sulama Sularının, Cd ile Kontamine Olmuş Toprakta Yetiştirilen Sorgum Bitkisinin Bazı İz Element (Zn, Mn, Co, Cr, Ni ve Pb) İçeriklerine Etkisi

Hava Şeyma İNCİ^{1*}, Bedriye BİLİR², Erdal ÇAÇAN¹, Selim ÖZDEMİR¹, Eren İNAK¹, Faik BİNGÖL¹

¹Bingöl Üniversitesi, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Bingöl, Türkiye

²Şırnak Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Şırnak, Türkiye

*Sorumlu Yazar: hsyilmaz@bingol.edu.tr

Geliş Tarihi: 21.08.2023 Düzeltme Geliş Tarihi: 02.10.2023 Kabul Tarihi: 02.10.2023

ÖZ

Çevre kirliliği, dünya çapında mücadele edilen ve uzun yıllar daha mücadelesi artarak devam edecek olan önemli bir sorundur. Çevre kirliliği zincirinin en önemli halkaları arasında tarımsal kirlilik, ağır metaller ve Cd kirliliği sayılabilir. Günümüzde kontamine alanların tarımda kullanılmasında sorgum bitkisi oldukça ön plana çıkmaya başlamıştır. Elementlerin bitkiler tarafından içinde buldukları çözültiden alınabilmelerinde birçok faktör etkili olsa da en önemlisi toprak pH'sıdır. Toprak pH'sı bitkilerin topraktan daha az ya da daha fazla iz element alımına etkide bulunmaktadır. Toprakların pH değerleri ise değişimi kısa vadede kolay olmayan bir süreçtir. Bu çalışmada Cd ile kontamine (10 mg kg⁻¹ Cd) olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin, farklı pH'lardaki sulama suları ile sulanmasının, bitkinin bazı iz element içeriğine olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma saksı denemesi şeklinde kurulmuş, toprakta kontaminasyon sağlanmış ve sorgum bitkilerinin vejetasyon süresi (~120 gün) boyunca 5 farklı pH (pH: 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0) düzeyine sahip su ile sulanmıştır. Hasat sonrası bitkinin kök, gövde, yaprak ve salkımlarında Zn, Mn, Co, Cr, Ni ve Pb konsantrasyonları ölçülmüştür. Bitki organları arasındaki iz element konsantrasyonu dağılımında Pb istatistiksel olarak önemsiz bulunurken, diğer elementlerin konsantrasyonları p<0.01 düzeyinde önemli bulunmuş ve Zn: salkım>gövde>yaprak>kök, Mn: yaprak>kök>salkım=gövde, Co: kök>yaprak>gövde=salkım, Cr: kök>yaprak>salkım>gövde ve Ni: kök>yaprak=salkım>gövde sıralamasını izlemiştir. Artan sulama suyu pH seviyeleri ile birlikte Zn, Mn ve Pb konsantrasyonları genellikle azalış göstermiş, Ni konsantrasyonu yükselen pH'ya paralel şekilde düzenli azalmış, Cr konsantrasyonu ise pH'nın artması ile artış göstermiş ve Co konsantrasyonu istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Sonuçta sulama suyundaki pH değişimi sorgum bitkisinin iz element alımında ve bu elementlerin bitki organları arasındaki dağılımında değişime neden olmuştur.

Anahtar kelimeler: Ağır metal, iz element, pH, sorgum

The Effect of Irrigation Waters at Different pHs on Some Trace Element (Zn, Mn, Co, Cr, Ni ve Pb) Contents of Sorghum Plant Grown in Cd Contaminated Soil

ABSTRACT

Environmental pollution is an important problem that is being tackled around the world and will continue to be increasingly struggled for many years to come. Among the most important links of the environmental pollution chain are agricultural pollution, heavy metals and Cd pollution. Today, sorghum plant has started to come into prominence in the use of contaminated areas in agriculture. Although many factors are effective in the absorption of elements from solution by plants, the most important one is soil pH. Soil pH affects the uptake of less or more trace elements by plants from the soil. The pH values of the soils are not easy

to change in the short term. The aim of this study is to investigate the effect of irrigation of sorghum plant grown in soil contaminated with Cd ($10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Cd}$) with irrigation water of different pH on some trace element content of the plant. The study was established as a pot experiment, soil contamination was ensured and sorghum plants were irrigated with 5 different pH (pH: 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0) water throughout the vegetation period (~120 days). After harvest, Zn, Mn, Co, Cr, Ni and Pb concentrations were measured in the roots, stems, leaves and cluster of the plant. Pb was not found to be statistically significant in the trace element concentration distribution among plant organs. Concentrations of other elements were found to be significant at the $p < 0.01$ level and Zn: cluster>stem>leaf>root, Mn: leaf>root>cluster=stem, Co: root>leaf>stem=cluster, Cr: root>leaf>cluster>stem and Ni: root>leaf=cluster>stem. With increasing pH levels of irrigation water, Zn, Mn and Pb concentrations generally decreased, Ni concentration decreased regularly in parallel with increasing pH, Cr concentration increased with increasing pH and Co concentration was statistically insignificant. As a result, the pH change in the irrigation water caused a change in the trace element uptake of the sorghum plant and the distribution of these elements among the plant organs.

Key words: Heavy metal, trace element, pH, sorghum

GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması, sanayileşme ve tarımsal uygulamaların yoğunluğu sebebiyle özellikle topraklarda ağır metal kirliliği hızlanmaktadır (Sönmez ve Kılıç, 2021). Kirlenmiş topraklarda en fazla bulunan ağır metaller arasında Cd, Cr, Pb, As ve Hg sayılabilir (Khalid ve ark., 2017). Tüm ortamlarda bulunabilen Cd^{+2} , en zararlı ağır metal kirleticilerden biri olarak tanımlanmıştır (Chakravarty ve Srivastava, 1992). Cd^{+2} kirliliği bitki büyümesini ciddi şekilde etkiler ve dünya çapında önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir (Zhu ve ark., 2021). Toprak pH'sı, bitkilerde iz elementlerin translokasyonlarını belirleyen, bu elementlerin çözünürlüğünü, hareketliliğini ve biyoyararlanımını kontrol eden en önemli etmenlerdendir (Forstner, 1995; Neina, 2019). Doğal çevrede, toprak pH'sının toprağın biyojeokimyasal süreçleri üzerinde muazzam bir etkisi vardır. Bu nedenle toprak pH'sı, toprağın biyolojik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini ve süreçlerini, bitki büyümesini ve biyokütle verimini etkileyen "ana toprak değişkeni" olarak tanımlanmaktadır (Brady ve ark., 2008; Minasny ve ark., 2016). Yüksek pH değerlerinde negatif yükler baskınken, düşük pH değerlerinde pozitif yükler hakimdir (Gillman, 2007). Ayrıca iz elementlerin mevcudiyetini de etkileyen çözünmüş organik karbonun miktarı ve sorpsiyonu toprak pH'sı tarafından kontrol edilir (Kupka ve Gruba, 2022). Düşük pH'da iz elementler, yüksek desorpsiyon veya düşük adsorpsiyon nedeniyle genellikle çözünür. Toprakların pH artışı ile yüzey alanında pozitif yük miktarının azalmasından dolayı metal iyonları ile yüzeydeki pozitif yüklü kenar grupları arasında elektrostatik çekme kuvveti artar ve daha fazla adsorpsiyon gerçekleşir (Tanaydın ve ark., 2020). Adsorpsiyonun sifıra yakın bir seviyeden neredeyse tamamen adsorbe edildiği bu pH ise pH-adsorpsiyon eşiği olarak ifade edilmektedir (Bradl, 2004). Fakat, belli bir pH'dan sonra pozitif yüklü metal iyonlarının hareketliliği azalarak metal iyonlarının çökmesinden dolayı adsorpsiyon azalmaya başlamaktadır (Tanaydın ve ark., 2020). Toprakta bulunan iz elementlerin durumu, hem toprak çözeltisinde oluşan iyonik türlerinin özelliklerine hem de toprak pH'sından ayrı olarak toprağın kimyasal sisteminin özelliklerine bağlıdır. Araştırmalar, artan toprak pH'sı ile çoğu iz elementin çözünürlüğünün azalacağını ve bunun da toprak çözeltisinde düşük konsantrasyonlara yol açacağını ortaya koymuştur (Kabata-Pendias, 2011). Toprak pH'sındaki herhangi bir artış veya azalış, metal çözünürlüğü üzerinde belirgin etkiler üretmekte ve bu durum büyük olasılıkla metallerin iyonik türlerine ve pH değişiminin yönüne bağlı olarak değişmektedir (Neina, 2019). Forstner (1995) toprak pH'sındaki bir birimlik düşüşün metal çözünürlüğünde on kat artışa neden olduğunu belirtmiştir; toprakta bulunan 1200 mg kg^{-1} toplam Zn içeriğinin toprak çözeltisinde, pH 7'de sadece yaklaşık 1 mg Zn L^{-1} 'i mevcut iken, pH 6'da bu konsantrasyon 100 mg Zn L^{-1} 'e, pH 5'te 40 mg Zn L^{-1} 'e yükselmiştir. Ülkemizde yem bitkileri ekiliş alanları arttırılmaya çalışılmakta, değişik toprak ve iklim koşullarına adapte olabilecek farklı bitkiler araştırılmaktadır. Sorgum (*Sorghum bicolor*) tür ve melezleri bu bitkilerin başında gelmektedir (Çiğdem ve Uzun, 2006). Sorgum bitkisi abiyotik stres koşullarında mısıra göre daha toleranslıdır ve olumsuz çevre şartlarına sahip bölgelerde silajlık mısıra alternatif olabilecek potansiyele sahiptir (Yücel ve ark., 2020). Sorgum kuraklığa, ısı stresine ve kirliliğe karşı dayanıklı bir bitkidir. Yapılan bir çok çalışmada sorgum bitkisinin sürgünlerinde Cd, Cu, Pb ve Zn biriktirebilmekte ve ayçiçeği ile mısıra göre daha yüksek biyokütle üretimine sahip olduğu bildirilmiştir (Epelde ve ark., 2009; Zhuang ve ark., 2009). Yapılan çalışmalar toprak pH'sının değişimi doğrultusunda elementlerin alınabilirliğine odaklanmıştır, ancak bilindiği gibi toprak tamponlama kapasitesi çok yüksek bir ortamdır ve toprak pH'sının değişimi kısa vadede kolay olmamaktadır; toprakların pH değişimine bağlı olarak ortaya koydukları direnç toprakların tamponluk özelliklerini ifade etmektedir (Aydın ve Sezen 1990). Oysa sulama suyunun pH'sında yapılacak bir

değişimin bitkiler tarafından elementlerin (iz, mikro, ağır metal) alınma durumlarını ne yönde etkileyeceği ile ilgili çok fazla çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada Cd ile kontamine (10 mg kg⁻¹ Cd) olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin, farklı pH'lardaki sulama suları ile sulanmasının, bitkinin bazı iz element (Zn, Mn, Co, Cr, Ni ve Pb) içeriklerine olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

MATERYAL ve METOT

Çalışma 2022 yılı yaz sezonunda Bingöl Üniversitesi Ziraat Fakültesi bahçesinde tesadüf parselleri deneme desenine göre saksı denemesi olarak kurulmuş ve yürütülmüştür. Çalışmada toprak kampüs alanından temin edilmiş 4 mm çapındaki elekten elenmiş ve saksılara 10 kg ağırlığında tartılarak konulmuştur. Daha sonra gübre uygulaması yapılmıştır (20 kg da⁻¹ N ve 10 kg da⁻¹ P₂O₅). Cd kirliliği; 10 mg kg⁻¹ konsantrasyonunda hesaplanarak ticari olarak temin edilen kadmiyum sülfat (3Cd₃SO₄ 8H₂O) ile sağlanmıştır. Bitkisel materyal olarak Master BMR silajlık sorgum çeşidi kullanılmıştır. Tohumlar viyollere ekilmiş fideler eşit büyüklüğe (10-15 cm) geldiğinde Cd ile kontamine toprağa aktarılmıştır. Fidelerin kirliliği toprağa aktarılmasından sonraki hasata kadar olan tüm sulamalar vejetasyon dönemi boyunca (~120 gün) 5 farklı pH seviyesinde (pH düzeyleri: 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0) ayarlanmış su ile günlük yapılmıştır. Hasada kadar olan süre içerisinde pH'sı ayarlanarak uygulanan tüm sulama sularının saksılardan sızmasına özen gösterilmiştir.

Deneme toprağına ait bazı özellikler

Denemede kullanılan toprağının pH'sı 6.88 ile nötr (Sağlam, 2012) olup, tuzsuzdur (190.3 µs cm⁻¹) (Dellavalle, 1992). Kireç miktarı %1.96 değeri ile kireçli sınıfta (Çağlar, 1949; Evliya, 1964) yer alırken organik madde (%0.38) içeriği çok azdır (Ülgen ve Yurtsever, 1974). Vejetasyon süresi boyunca pH 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0 seviyelerine göre ayarlanan su ile bitkiler sulanmış ve sulama suyu pH seviyelerinin artışına paralel olarak bu süreç sonunda toprakların pH'ları da artarak pH 6.26- pH 7.05 aralığında değişim göstermiştir. Ayrıca deneme öncesi Cd kontaminasyonu olmayan toprakta alınabilir iz element konsantrasyonları; Zn:1.7 mg kg⁻¹, Mn: 33.45 mg kg⁻¹, Co: 0.62 mg kg⁻¹, Cr: 0.14 mg kg⁻¹, Ni: 0.68 mg kg⁻¹ ve Pb: 1.02 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

İz element (Zn, Mn, Co, Cr, Ni ve Pb) konsantrasyonlarının belirlenmesi

Vejetasyon süresini tamamlayıp hasat olgunluğuna erişen sorgum bitkisi, 120. günün sonunda bitkinin kök, gövde, yaprak ve salkımları ayrı ayrı olacak şekilde hasat edilmiştir. Hasat edilen bitki numuneleri önce musluk suyunda daha sonrada saf suda yıkanıp 65°C etüvde yaklaşık 48 saat süre ile sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulup, öğütülerek analize hazır hale getirilmiştir.

Analize hazır hale getirilen bitki numunelerindeki iz elementler (Zn, Mn, Co, Cr, Ni ve Pb) Campbell ve Plank (1998); Kaçar ve İnan (2008); Gürbüz ve ark. (2016) tarafından bildirilen yöntemlere göre mikrodalga toplam yakma cihazında nitrik asit (HNO₃) ilavesi ile yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra süzme ve gerekli seyreltme işlemi tamamlandıktan sonra Zn, Mn, Co, Cr, Ni ve Pb elementlerinin konsantrasyonları Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi (AAS) cihazında belirlenmiştir.

İstatistiksel Analizler

Tesadüf parselleri deneme desenine göre yürütülen çalışmada sorgum bitkisinin kök, gövde, yaprak ve salkımlarından analizler ile elde edilen tüm verilere, "JMP 13.2.0" programı kullanılarak varyans analizi yapılmış ve elde edilen ortalamalar Tukey çoklu karşılaştırma testi ile değerlendirilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Çinko (Zn) Konsantrasyonu

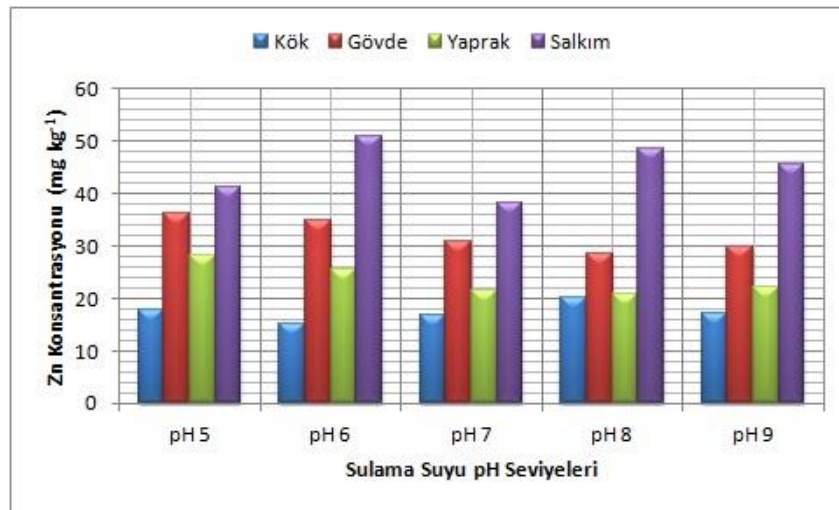
Farklı pH seviyelerine sahip sulama sularının Cd ile kontamine olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin Zn konsantrasyonları Çizelge 1'de verilmiştir. Sorgum bitkisinin Zn konsantrasyonu üzerine pH seviyeleri, bitki organları ve pH seviyeleri x bitki organları interaksyonunun etkisi istatistiksel olarak çok önemli (p<0.01) bulunmuştur.

Çizelge 1. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisinin Zn içeriğine etkisi

Sulama Suyu pH Seviyeleri	Zn konsantrasyonları (mg kg ⁻¹)				
	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
pH 5	17.67i-l**	36.35d	28.33ef	41.17c	30.92AB**
pH 6	15.17l	35.00d	25.67fg	51.00a	31.71A
pH 7	16.67kl	31.00e	21.50hi	38.35cd	26.88D
pH 8	20.17h-k	28.5ef	20.83hij	48.67ab	29.54BC
pH 9	17.00jkl	30.00e	22.33gh	45.50b	28.71C
Ortalama	17.33D**	32.20B	23.73C	44.94A	CV(%):4.20
LSD (0.05)	Organlar:1.22	pH seviyeleri:1.45	Organlar x pH seviyeleri:3.86		

** : P<0.01

Farklı pH seviyelerindeki sulama suyu ile yetiştirilen bitkinin organları arasındaki Zn konsantrasyonu salkım>gövde>yaprak>kök şeklinde sıralanmıştır (Şekil 1). Zn konsantrasyonu en fazla bitki salkımında (44.94 mg kg⁻¹) belirlenirken en az Zn konsantrasyonu bitki kökünde (17.33 mg kg⁻¹) belirlenmiştir. Soudek ve ark. (2014) çinkonun köklerden daha fazla sürgünlerde birikmesinin bitkilerin hiperkümülyasyon özelliklerinin karakteristiğinden kaynaklandığını ve çinkonun köklerden sürgünlere taşınmasının Cd gibi sınırlı olmadığını bildirmişlerdir. Tang ve ark. (2009) *Arabis paniculata* bitkisinde Zn, Pb ve Cd gibi elementlerin köklerden daha fazla sürgünlerde biriktiğini ifade etmişlerdir. Buğdayda yürütülen çalışmada ise çinkonun yapraklardan tanelere taşındığı fakat yapraklardan köklere taşınmadığı bildirilmiştir (Webb ve Loneragan, 1990). Sulama suyu pH seviyelerinin artması ile birlikte Zn konsantrasyonunda genellikle azalış görülmüştür. En fazla Zn konsantrasyonu istatistiki olarak aynı ortalama grubunda yer alan pH 6 (31.71 mg kg⁻¹) ve pH 5 (30.92 mg kg⁻¹)'te belirlenirken en az Zn konsantrasyonu pH 7 (26.88 mg kg⁻¹) olarak belirlenmiştir. Çinkonun (Zn) sorpsiyon ve desorpsiyon mekanizmaları toprak pH'sı tarafından kontrol edilmektedir. Toprakların pH'sı yükseldikçe (pH>6.5) çinkonun desorpsiyonu sürekli olarak azalırken (Singh ve ark., 2008) güçlü bir şekilde adsorbe edilmektedir (Mossa ve ark., 2021) ve bu da çinkonun bitkiler tarafından alınımı sınırlandırmaktadır. Adamczyk-Szabela ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada *Valeriana officinalis* L. bitkisinin yetiştirildiği toprağın pH'sını yükselttiklerinde bitkideki Zn konsantrasyonunun azaldığını bildirmişlerdir. Bu sonuçlar ise düşük pH koşullarının yüksek metal hareketliliğine neden olduğu anlayışını doğrulamaktadır (Landner ve Reuther 2005; Violante ve ark., 2010). pH seviyesi x bitki organları interaksiyonunda en fazla Zn konsantrasyonu (51.00 mg kg⁻¹) pH 6'da bitki salkımında belirlenirken, en düşük Zn konsantrasyonu (15.17 mg kg⁻¹) pH 6'da bitkinin kökünde belirlenmiştir.



Şekil 1. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun, sorgum bitkisi organlarındaki Zn konsantrasyonuna etkisi

Mangan (Mn) Konsantrasyonu

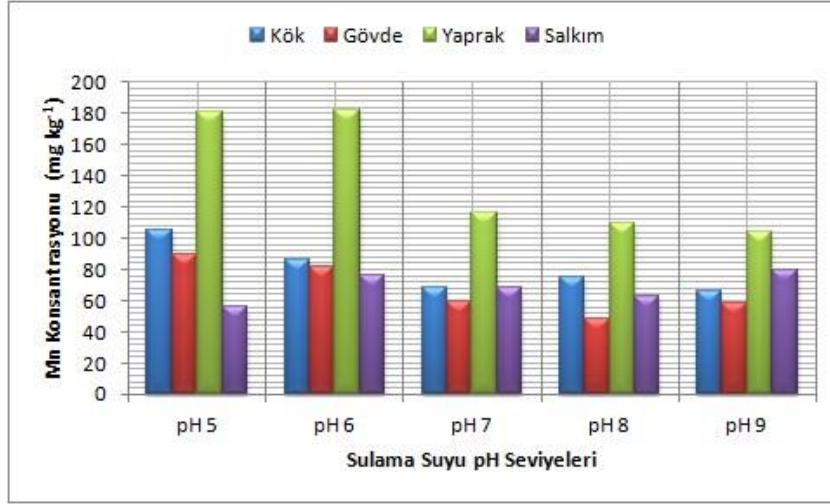
Farklı pH seviyelerine sahip sulama sularının, Cd ile kontamine olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin Mn konsantrasyonlarına etkisi Çizelge 2'de verilmiştir. Sorgum bitkisinin Mn konsantrasyonu üzerine pH seviyeleri, bitki organları ve pH seviyeleri x bitki organları interaksiyonunun etkisi istatistiksel olarak çok önemli ($p < 0.01$) bulunmuştur.

Çizelge 2. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisinin Mn içeriğine etkisi

Sulama Suyu pH Seviyeleri	Mn konsantrasyonları (mg kg ⁻¹)				
	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
pH 5	104.83bcd**	90.00b-e	181.17a	56.50gh	108.13A**
pH 6	85.67c-f	81.67c-g	181.83a	76.5d-h	106.42A
pH 7	68.17e-h	59.5fgh	116.33b	68.00e-h	78.00B
pH 8	75.50e-h	48.17h	109.17bc	63.00e-h	73.96B
pH 9	66.00e-h	58.67fgh	104.5bcd	79.83d-g	77.25B
Ortalama	80.03B**	67.60C	138.60A	68.77C	CV(%):10.33
LSD (0.05)	Organlar:8.98	pH seviyeleri:10.73	Organlar X pH seviyeleri:28.46		

** : $P < 0.01$

Farklı pH seviyelerindeki sulama suyu ile yetiştirilmiş bitkinin organları arasındaki Mn konsantrasyonu yaprak>kök>salkım=gövde şeklinde sıralanmıştır (Şekil 2). En çok Mn konsantrasyonu bitkinin yaprağında (138.60 mg kg⁻¹) belirlenirken en az Mn konsantrasyonu istatistiksel olarak aynı grupta yer alana bitki gövdesinde (67.60 mg kg⁻¹) ve salkımında (68.77 mg kg⁻¹) belirlenmiştir. Benzer şekilde Adamczyk-Szabela ve ark. (2022) melisa ve karahindiba bitkilerinin toprak üstü organlarının Mn konsantrasyonunu köklerden daha yüksek bulmuşlardır. Page ve Feller (2005) buğdayda manganın köklerden daha ziyade sürgünde birikme eğiliminde olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum manganın köklerden ksileme salındığı, terleme yoluyla yapraklara taşındığı ve aynı zamanda floemde hareketinin kısıtlı olmasından kaynaklandığı ile ilişkilendirilmiştir (Page ve ark., 2006). Sulama suyunun pH seviyelerinin artması ile birlikte Mn konsantrasyonunda azalma görülmüştür. En fazla Mn konsantrasyonu pH 5 (108.13 mg kg⁻¹) ve pH 6 (106.42 mg kg⁻¹) da belirlenirken en az Mn konsantrasyonu istatistiksel olarak aynı grupta yer alan pH 7 (78.00 mg kg⁻¹), pH 8 (73.96 mg kg⁻¹) ve pH 9 (77.25 mg kg⁻¹) da belirlenmiştir. Bu durum pH yükselmesi ile metallerin az çözünür veya çözünemez formdaki karbonat veya fosfat oluşturma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Bunun tam aksine pH'nın düşmesi ile metal elementler bitkiler tarafından kullanılabilir iyonik forma dönüşmektedirler (Olaniran ve ark., 2013). pH ve redoks koşullarının topraktaki Mn biyoyararlanımını etkilediği oldukça belirgindir (Marschner 1995; Porter ve ark. 2004). Yüksek redoks potansiyeli (Kogelmann ve Sharpe 2006) ile karakterize edilen asidik topraklarda, mangan oksitler kolaylıkla bitkiler için alınabilir form olan Mn⁺² iyonlarına indirgenir (Adriano 2001; Watmough ve ark., 2007). Toprak pH'sının yükselmesi ile kimyasal Mn⁺² oksidasyonu ile bitkiler için alımı kolay olmayan MnO₂, Mn₂O₃, Mn₃O₄ ve hatta Mn₂O₇ oluşumuna neden olmaktadır (Guest ve ark., 2002; Ducic ve Polle, 2005; Gherardi ve Rengel, 2004; Humphries ve ark., 2007). Ayrıca, bu oksitler toprak parçacıklarında kolaylıkla absorbe edilerek manganın biyoyararlanımını daha da azaltabilir (Fageria ve ark. 2002). pH seviyeleri x bitki organları interaksiyonunda en fazla Mn konsantrasyonu (181.83 mg kg⁻¹) pH 6'da bitki yaprağında belirlenirken en düşük Mn konsantrasyonu (48.17 mg kg⁻¹) pH 8'de bitki gövdesinde belirlenmiştir.



Şekil 2. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun, sorgum bitkisi organlarındaki Mn konsantrasyonuna etkisi

Kobalt (Co) Konsantrasyonu

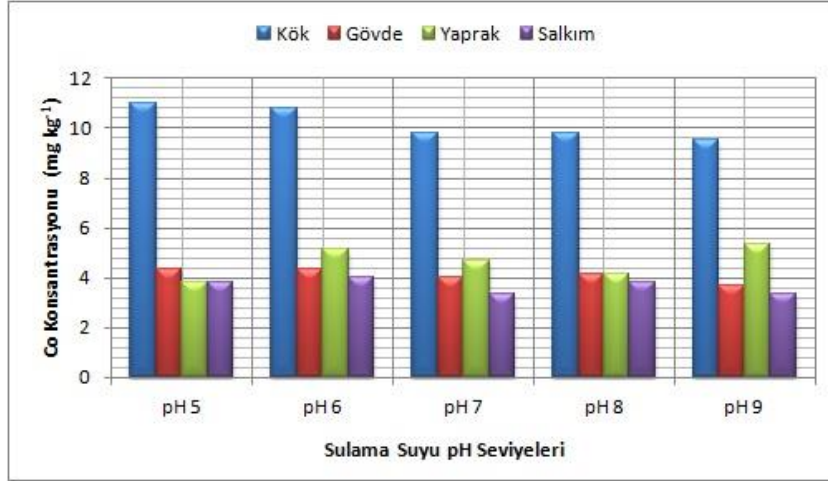
Farklı pH seviyelerine sahip sulama sularının Cd ile kontamine olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin Co konsantrasyonları Çizelge 3'te verilmiştir. Co konsantrasyonlarının bitki organlarındaki dağılımı $p < 0.01$ düzeyinde önemli bulunmuştur.

Çizelge 3. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisinin Co içeriğine etkisi

Sulama Suyu pH Seviyeleri	Co konsantrasyonları (mg kg ⁻¹)				Ortalama
	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	
pH 5	11.00 ^{öd}	4.33	3.83	3.83	5.75 ^{öd}
pH 6	10.83	4.33	5.17	4.00	6.08
pH 7	9.83	4.00	4.67	3.33	5.46
pH 8	9.83	4.17	4.17	3.83	5.50
pH 9	9.5	3.67	5.33	3.33	5.58
Ortalama	10.20A**	4.10BC	4.63B	3.77C	CV(%):12.83
LSD (0.05)	Organlar:0.72	pH seviyeleri:-		Organlar X pH seviyeleri:-	

** : $P < 0.01$ ve öd: önemli değil.

Farklı pH seviyelerindeki sulama suyu ile yetiştirilen bitkinin organları arasındaki Co konsantrasyonu kök>yaprak>gövde=salkım şeklinde sıralanmıştır (Şekil 3). Co konsantrasyonu en fazla bitki köklerinde (10.20 mg kg⁻¹) belirlenirken en az Co konsantrasyonu salkımda (3.77 mg kg⁻¹) belirlenmiştir. Bitki organları arasında Co elementinin en çok kökte belirlenmesi literatürle uyum içerisindedir. Palit ve ark. (1994) kobaltın bitkilerde hareketliliğinin düşük olduğunu ve bu yüzden köklerden yapraklara taşınımının sınırlı olduğunu bildirmişlerdir. Marschner (1995) ve Welch (1995) kobaltın floemde hareketliliğinin az olduğunu bu yüzden bitkilerin köklerinde daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Zeller ve Feller (1998) buğdayda yürüttükleri çalışmada kobaltın tanede daha az biriktiğini rapor etmişlerdir. Sulama suyunun pH seviyesinin artması ve pH seviyesi x bitki organları interaksyonunun ise Co konsantrasyonu üzerine önemli bir etkisi görülmemiştir.



Şekil 3. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisi organlarındaki Co konsantrasyonuna etkisi

Krom (Cr) Konsantrasyonu

Farklı pH seviyelerine sahip sulama sularının Cd ile kontamine olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin Cr elementi içeriğine olan etkisi incelenmiştir. pH seviyeleri, bitki organları ve pH seviyeleri x bitki organları interaksiyonuna ait ortalamalar istatistiki olarak çok önemli ($p < 0.01$) bulunmuş ve Çizelge 4'te verilmiştir.

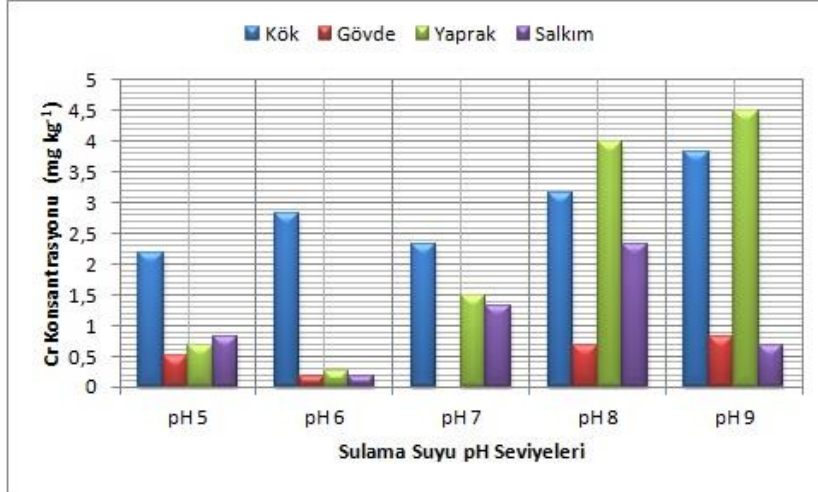
Çizelge 4. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisinin Cr içeriğine etkisi

Sulama Suyu pH Seviyeleri	Cr konsantrasyonları (mg kg ⁻¹)				
	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
pH 5	2.17de**	0.50hı	0.67ghı	0.83fgh	1.04BC**
pH 6	2.83cd	0.17hı	0.25hı	0.17hı	0.86C
pH 7	2.33d	0.00ı	1.50ef	1.33fg	1.29B
pH 8	3.17bc	0.67ghı	4.00a	2.33d	2.54A
pH 9	3.83ab	0.83fgh	4.50a	0.67ghı	2.46A
Ortalama	2.87A**	0.43D	2.18B	1.07C	CV(%):15.85
LSD (0.05)	Organlar:0.26	pH seviyeleri:0.31	Organlar X pH seviyeleri:0.83		

** : $P < 0.01$

Farklı pH seviyelerinin, bitki organları arasındaki Cr konsantrasyonu kök>yaprak>salkım>gövde şeklinde sıralanmıştır (Şekil 4). En çok Cr konsantrasyonu bitkinin köklerinde (2.87 mg kg^{-1}) belirlenirken en az Cr konsantrasyonu bitkinin gövdesinde (0.43 mg kg^{-1}) ölçülmüştür. İstatistiki olarak tüm bitki organları farklı ortalama gruplarını oluşturmuştur. Zayed ve ark. (1998) kromun (Cr^{+3}) hücre duvarlarına bağlanma eğiliminin bulunduğunu bitki içerisinde kolay bir şekilde yer değiştiremediğini ve çoğunlukla bitki köklerinde yoğunlaştığını ve bununla muhtemel sebebinin kromun, kök hücrelerince vakuollerde tutulması olabildiğini bildirmişlerdir. Mısır bitkisi topraktaki Cr konsantrasyonundan ve toprağın bazı özelliklerinden bağımsız olarak kromu (Cr) diğer vejetatif ve generatif organlarına göre en fazla köklerinde içermektedir (Golovatyj ve Bogatyreva, 1999). pH seviyelerinin artması ile birlikte özellikle pH 6'dan itibaren Cr konsantrasyonunda artış görülmüştür. En fazla Cr konsantrasyonu istatistiki olarak aynı ortalama grubunda yer alan pH 8 (2.54 mg kg^{-1}) ve pH 9 (2.46 mg kg^{-1})'da belirlenirken en az Cr konsantrasyonu pH 6 (0.86 mg kg^{-1})'da belirlenmiştir. Genellikle iz element konsantrasyonlarının düşen pH ile artması beklenmektedir. Bu çalışmada durum beklenenin tersi yönde gelişmiş artan pH seviyeleri bitkide Cr konsantrasyonunun artmasına sebep olmuştur. Toprak pH'sı ile topraktaki ağır metal hareketliliği ve bitkilerdeki biyoyararlanım arasındaki negatif korelasyon literatürde iyi bir şekilde belgelenmiştir (Shahid ve ark., 2017a). Toprak pH'ındaki düşüş (< 7) ağır metallerin desorpsiyonuna neden olurken, daha yüksek pH değerlerinde ($\text{pH} > 8$) metaller toprak matrisi içinde çökler (Shahid ve ark., 2012). Bu şekilde, metaller genellikle daha düşük pH değerlerinde yüksek çözünürlüğe, hareketliliğe ve

biyoyararlanıma sahiptir ve bunun tersi de geçerlidir (Shahid ve ark., 2017b). Toprak pH'sının toprakta Cr sorpsiyonu/desorpsiyonu üzerindeki etkisi, kimyasal formuna göre değişir. Cr(III)'ün toprak katısından solüsyona desorpsiyonu en çok düşük pH'da belirginken, toprak partikülleri üzerindeki Cr(VI) adsorpsiyonu pH'nın düşmesiyle artar (Dias Ferreira ve ark., 2015). $pH > 5$ 'te Cr(III) Cr(OH)₂ türünü oluşturur. Cr(III)'ün düşük pH'larda (<3.9) değişebilir katyon Cr(III) olarak var olduğu, yüksek pH'larda hidroliz yoluyla Cr(OH)₂ türleri oluşturduğu ve düşük pH'larda (<3,9) Cr(III) ve yüksek pH'larda hidroliz yoluyla Cr(OH)₂ türleri oluşturduğu bildirilmiştir (Shadreck ve Mugadza, 2013). Bu, artan pH seviyelerinde ölçülen Cr konsantrasyonunun artmasını kısmen açıklayabilir. pH seviyesi x bitki organları interaksiyonunda en fazla Cr konsantrasyonu (4.50 mg kg⁻¹) pH 9'da bitkinin yapraklarında belirlenirken en düşük Cr konsantrasyonu (0.00 mg kg⁻¹) pH 7'de bitkinin gövdesinde belirlenmiştir. Krom (Cr) elementi için emilimin kökte başladığı, daha sonra sap ve gövde dokuları ile yaprak ve meyvelere taşındığı ifade edilmiştir (Gropper ve Smith, 2012; Hua ve ark., 2012).



Şekil 4. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisi organlarındaki Cr konsantrasyonuna etkisi

Nikel (Ni) Konsantrasyonu

Farklı pH seviyelerine sahip sulama sularının Cd ile kontamine olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin Ni elementi içeriğine olan etkisi incelenmiştir. pH seviyeleri, bitki organları ve pH seviyesi x bitki organları interaksiyonuna ait ortalamalar istatistiki olarak çok önemli ($p < 0.01$) bulunmuş ve Çizelge 5'te verilmiştir.

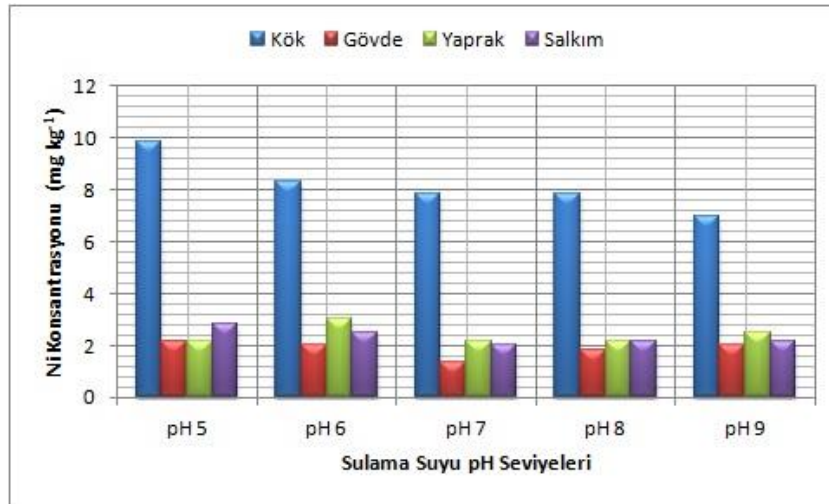
Çizelge 5. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisinin Ni içeriğine etkisi

Sulama Suyu pH Seviyeleri	Ni konsantrasyonları (mg kg ⁻¹)				
	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
pH 5	9.83a**	2.17def	2.17def	2.83de	4.25A**
pH 6	8.33b	2.00def	3.00d	2.50de	3.96A
pH 7	7.83bc	1.33f	2.17def	2.00def	3.33B
pH 8	7.83bc	1.83ef	2.17def	2.17def	3.50B
pH 9	7.00c	2.00def	2.50de	2.17def	3.42B
Ortalama	8.17A**	1.87C	2.40B	2.33B	CV(%) : 9.07
LSD (0.05)	Organlar: 0.33		pH seviyeleri: 0.39	Organlar X pH seviyeleri: 1.04	

** : $P < 0.01$

Farklı pH seviyelerinin, bitki organları arasındaki Ni konsantrasyonu kök>yaprak=salkım>gövde şeklinde sıralanmıştır (Şekil 5). En çok Ni konsantrasyonu bitkinin köklerinde (8.17 mg kg⁻¹) belirlenirken en az Ni konsantrasyonu bitkinin gövdesinde (1.87 mg kg⁻¹) ölçülmüştür. İstatistiki olarak kök ve gövde farklı ortalama gruplarında yer alırken yaprak ve salkım aynı ortalama grubunu oluşturmuştur. Bitki organları arasında Ni

elementinin en çok kökte belirlenmesi literatürle uyum içerisinde. Cataldo ve ark. (1978) bitkilerin aldıkları nikelin (Ni) yaklaşık %50'sinin köklerde bulunduğunu bildirmişlerdir. Asemaneh ve ark. (2006) nikelin çoğu bitkide esas olarak bitkinin köklerinde bulunduğunu ifade etmişlerdir. Seregin ve Kozhevnikova (2006) nikelin (Ni) ksilem parankimasındaki hücre duvarlarında (katyon değişim bölgelerinde) tutunabilme eğiliminde olduğunu ve ayrıca nikelin (Ni) köklerde hareketinin yavaş olduğunu bildirmiştir. Yapılan çalışmalarda değişik bitki türlerinde nikelin en çok bitki köklerinde olduğu belirtilmiştir; soya fasulyesinde (Malan ve Farrant, 1998); çemende (Parida ve ark., 2003); maş fasulyesinde (Ahmad ve ark., 2007); arpa ve mısırdada (Poniedziatek ve ark., 2005); brokolide (Barış-Çingil ve Ünal, 2021) nikel özellikle kökte belirlenmiştir. Ayrıca Ni sorgum bitkisinin gövde yaprak ve salkımlarına da taşınmıştır. Welch ve Cary (1975) nikelin bitkilerde hareketli olduğunu ve büyük olasılıkla hem yapraklara hem de tohumlara taşındığını bildirmiştir. pH seviyelerinin artması ile birlikte Ni konsantrasyonunda azalma görülmüştür. En fazla Ni konsantrasyonu istatistiki olarak aynı ortalama grubunda yer alan pH 5 (4.25 mg kg^{-1}) ve pH 6 (3.96 mg kg^{-1})'te belirlenirken en az Ni konsantrasyonu istatistiki olarak aynı ortalama grubunda yer alan pH 7 (3.33 mg kg^{-1}), pH 8 (3.50 mg kg^{-1}) ve pH 9 (3.42 mg kg^{-1})'da belirlenmiştir. Siebielec ve Chaney (2006) nikelin hareketliliğinin toprakların pH seviyeleri ile ters orantılı olduğunu pH 6.5'da Ni alımında azalış olduğunu bildirmiştir. Toprak pH'sı, bitkiler tarafından Ni alımında önemli bir rol oynamaktadır. Düşük toprak pH'sı altında (asidik topraklar), Ni daha fazla çözünür ve hareketli hale gelmektedir (Rautaray ve ark., 2003; Hassan ve ark., 2019). pH seviyesi x bitki organları interaksiyonunda en fazla Ni konsantrasyonu (9.83 mg kg^{-1}) pH 5'te bitkinin köklerinde belirlenirken en düşük Ni konsantrasyonu (1.33 mg kg^{-1}) pH 7'de bitkinin gövdesinde belirlenmiştir. Nikelin esansiyel bir element olmasından dolayı floem ile tomurcuklara, meyveye ve tohum gibi diğer bitki organ ve dokularına taşındığını bildirilmiştir (McIlveen ve Negusanti, 1994; Doğru ve ark., 2021).



Şekil 5. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisi organlarındaki Ni konsantrasyonuna etkisi

Kurşun (Pb) Konsantrasyonu

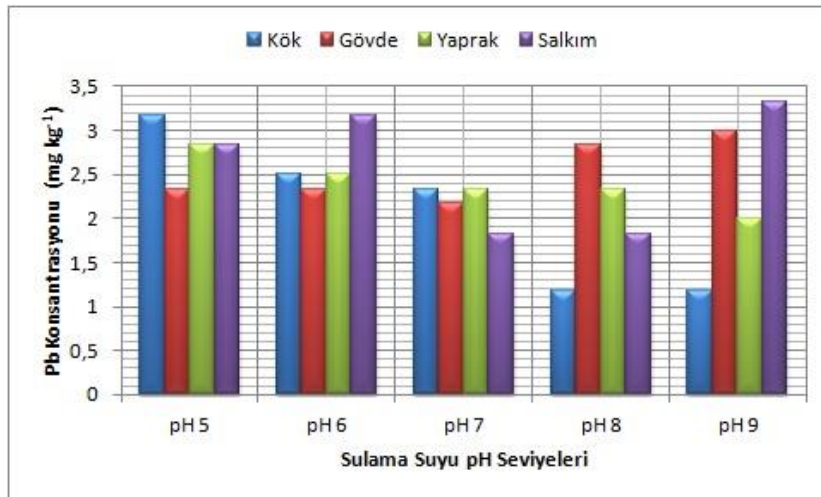
Farklı pH seviyelerine sahip sulama sularının Cd ile kontamine olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin Pb elementi içeriğine olan etkisi incelenmiştir. İstatistiki olarak pH seviyeleri ve pH seviyesi x bitki organları interaksiyonu çok önemli ($p < 0.01$) bulunurken bitki organlarına ait ortalamalar önemsiz bulunmuş ve Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisinin Pb içeriğine etkisi

Sulama Suyu pH Seviyeleri	Pb konsantrasyonları (mg kg ⁻¹)				
	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
pH 5	3.17ab**	2.33a-d	2.83a-d	2.83a-d	2.79A**
pH 6	2.50a-d	2.33a-d	2.50a-d	3.17ab	2.63A
pH 7	2.33a-d	2.17a-d	2.33a-d	1.83cd	2.17B
pH 8	1.17d	2.83a-d	2.33a-d	1.83cd	2.17B
pH 9	1.17d	3.00abc	2.00bcd	3.33a	2.5AB
Ortalama	2.27^{öd}	2.53	2.40	2.60	CV(%):15.1
LSD (0.05)	Organlar:-	pH seviyeleri:0.44		Organlar X pH seviyeleri:1.17	

** : P<0.01 ve öd: önemli değil.

Farklı pH seviyelerinin, bitki organları arasındaki Pb konsantrasyonu istatistiki olarak önemli olmamakla beraber rakamsal olarak incelendiğinde salkım>gövde>yaprak>kök şeklinde sıralanmıştır (Şekil 6). pH seviyelerinin artması ile birlikte (pH 9 hariç) Pb konsantrasyonu azalma göstermiştir. En fazla Pb konsantrasyonu pH 5 (2.79 mg kg⁻¹) ve pH 6 (2.63 mg kg⁻¹)’da belirlenirken en az Pb içeriği pH 7 (2.17 mg kg⁻¹) ve pH 8 (2.17 mg kg⁻¹)’de ölçülmüştür. Toprak pH değerinin, topraktaki mevcut ağır metallerin içeriği ile önemli bir negatif korelasyona sahip olduğu ve toprağın mevcut Pb içeriği ve çay yapraklarındaki Pb içeriğinin toprak pH değerinin azalmasıyla arttığı bildirilmiştir (Ye ve ark., 2022). Bu genel azalış durumu bitkinin kökleri ve yaprakları içinde geçerli olmuş fakat salkım ve gövde pH 9’da beklenmedik şekilde artmıştır. Benzer şekilde Yang ve ark. (2013) toprak pH’sının artması ile (sırayla pH 5.18, 5.31, 6.06 ve 7.19) tütün bitkisinin yapraklarında Pb konsantrasyonunda önce azalma sonra artma (olarak sırasıyla 8.36, 7.29, 9.55 ve 9.34 mg kg⁻¹ Pb) olduğunu ifade etmişlerdir. pH seviyeleri x bitki organları interaksiyonunda, en fazla Pb konsantrasyonu (3.33 mg kg⁻¹) pH 9’da bitkinin salkımlarında belirlenirken en düşük Pb konsantrasyonu (1.17 mg kg⁻¹) pH 8 ve pH 9’da bitkinin köklerinde belirlenmiştir. Genelin aksine bitkinin kökleri toprak üstü organlarından daha az Pb içermektedir. Ashraf ve Tang (2017) pirinç bitkisini Pb stresinde yetiştirdikleri çalışmalarında NX-18 pirinç çeşidinin, köklerinde toprak üstü organlarına göre daha az Pb biriktirdiğini ve GXZ çeşidine göre sürgüne, yapraklara, başaklara ve tanelere daha fazla Pb aktardığını açıklamışlardır.



Şekil 6. Farklı pH seviyelerine sahip sulama suyunun sorgum bitkisi organlarındaki Pb konsantrasyonuna etkisi

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada Cd ile kontamine (10 mg kg⁻¹ Cd) olmuş toprakta yetiştirilen sorgum bitkisinin, farklı pH'lardaki sulama suları ile sulanmasının, bitkinin bazı iz element içeriğine olan etkisi araştırılmıştır. Bitki organları arasındaki iz element konsantrasyonu dağılımında Pb istatistiksel olarak önemsiz bulunmuş ve diğer elementlerin konsantrasyonu; Zn: salkım>gövde>yaprak>kök, Mn: yaprak>kök>salkım=gövde, Co: kök>yaprak>gövde=salkım, Cr ve Ni: kök>yaprak>salkım>gövde sıralamasını izlemiştir. Sulama suyu pH seviyelerinin artışı ile birlikte Zn, Mn ve Pb konsantrasyonları genellikle azalmış, Ni konsantrasyonu yükselen pH'ya paralel şekilde düzenli azalmış, Cr konsantrasyonu ise pH'nın artması ile artış göstermiş ve Co konsantrasyonu istatistiksel olarak değişmemiştir. Sonuç olarak sulama suyundaki pH değişimi sorgum bitkisinin iz element alımında ve bu elementlerin bitki organları arasındaki dağılımında değişime neden olmuştur. Bilindiği gibi genel olarak düşük pH'larda iz elementlerin alımı artarken yüksek pH'larda alımı azalmaktadır. Tarımsal üretimdeki amaca ve ihtiyaca göre gerek mikro elementlerin alımı artırılmak istendiğinde gerek ağır metallerin alımı engellenmek istendiğinde pH değişiminin bu etkisine ihtiyaç vardır. Toprak pH'sı hızlı ve kısa zamanda değiştirilmesi güç olan bir süreçtir. Üstelik toprağa uygulanan pH'yı düşürmek ya da artırmak için kullanılan bileşiklerin toprak yapısına olumsuz etkide bulunma ihtimali de vardır. Bu bağlamda sulama suyunun sahip olduğu pH seviyesinin de iz element alımını değiştirdiği anlaşılmış ve bu durum hem toprak pH değişimi için uzun süre beklemenin önüne geçmesi açısından hem de pH değişimi için toprağa uygulanan bazı zararlı bileşiklerin kullanımına gerek duyulmaması açısından önemli görülmüştür.

Teşekkür: Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209A kapsamında "1919B012106993" nolu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı: Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti: Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

YAZAR ORCID NUMARALARI

Hava Şeyma İNCİ  <http://orcid.org/0000-0002-2670-401x>
Bedriye BİLİR <http://orcid.org/0000-0002-0038-9509>
Erdal ÇAÇAN <http://orcid.org/0000-0002-9469-2495>
Selim Özdemir <http://orcid.org/0000-0003-1840-9907>
Eren İNAK <http://orcid.org/0009-0002-4840-4891>
Faik BİNGÖL <http://orcid.org/0009-0002-3383-6448>

KAYNAKLAR

- Adamczyk-Szabela, D., Markiewicz, J., Wolf, W. M. 2015. Heavy metal uptake by herbs. IV. Influence of soil pH on the content of heavy metals in *Valeriana officinalis* L. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 1-8.
- Adamczyk-Szabela, D. ve Wolf, W. M. 2022. The impact of soil pH on heavy metals uptake and photosynthesis efficiency in *Melissa officinalis*, *Taraxacum officinalis*, *Ocimum basilicum*. *Molecules*, 27(15): 4671.
- Adriano, D.C. 2001. Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. New York: Springer-Verlag.
- Ahmad, M. S. A., Hussain, M., Saddiq, R. ve Alvi, A. K. 2007. Mungbean: a nickel indicator, accumulator or excluder?. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 78(5):319-324.
- Asemaneh, T., Ghaderian, S. M., Crawford, S. A., Marshall, A.T. ve Baker, A.J.M. 2006. Cellular and subcellular compartmentation of Ni in the Eurasian serpentine plants *Alyssum bracteatum*, *Alyssum murale* (Brassicaceae) and *Cleome heratensis* (Capparaceae). *Planta*, 225(1):193-202.
- Ashraf, U. ve Tang, X. 2017. Yield and quality responses, plant metabolism and metal distribution pattern in aromatic rice under lead (Pb) toxicity. *Chemosphere*, 176, 141-155.
- Aydın, A. ve Sezen, Y., 1990. Kireçlemenin Doğu Karadeniz Bölgesi asit topraklarının bazı özellikleri ile bazı makro ve mikro besin elementlerinin elverişliliğine etkisi. *Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(1):94-105.
- Barış-Çingil, Ç. ve Ünal, M. 2021. Nikelin brokoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) tohumlarının çimlenmesi ve

- fide gelişimi üzerine etkileri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(3):226-261.
- Bradl, H.B. 2004. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of colloid and interface science*, 277(1):1-18.
- Brady, N.C., Weil, R. R. ve Weil, R. R. 2008. The nature and properties of soils Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Campbell, C.R. ve Plank, C.O. 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. *Methods for Plant Analysis*, 37.
- Cataldo, D. A., Garland, T. R., Wildung, R. E., 1978. Nickel in plants: I. Uptake kinetics using intact soybean seedlings. *Plant Physiology*, 62(4):563-565.
- Chakravarty, B. ve Srivastava, S. 1992. Toxicity of some heavy metals in vivo and in vitro in *Helianthus annuus*. *Mutation research letters*, 283(4):287-294.
- Çağlar, K.Ö. 1949. Toprak Bilgisi. Ankara Üniversitesi Ziraat Yayınları, Ankara.
- Çiğdem, İ. ve Uzun, F., 2006. Samsun İli Taban Alanlarında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilebilecek Bazı Silajlık Sorgum Ve Mısır Çeşitleri Üzerine Bir Araştırma. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 21(1):14-19.
- Dellavalle, N.B. 1992. Determination of specific conductance in supertanat 1:2 Soil:Water Solution. In *Handbook on Reference Methods for Soil Analysis*.
- Dias-Ferreira, C., Kirkelund, G.M. ve Ottosen, L.M. 2015. Ammonium citrate as enhancement for electro-dialytic soil remediation and investigation of soil solution during the process. *Chemosphere*, 119:889-895.
- Doğru, A., Altundağ, H. ve Dündar, M.Ş. 2021. Gelişmiş bitkilerde nikel elementinin fizyolojik fonksiyonları ve nikel toksisitesi. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 33(1): 1-19.
- Ducic, T. ve Polle, A., 2005 Transport and detoxification of manganese and copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17:103–112.
- Evliya, H. 1964. Kültür Bitkilerinin Beslenmesi. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Epelde, L., Mijangos, I., Becerril, J. M. ve Garbisu, C. 2009. Soil microbial community as bioindicator of the recovery of soil functioning derived from metal phytoextraction with sorghum. *Soil Biology and biochemistry*, 41(9), 1788-1794.
- Fageria, N., Baligar, V. ve Clark, R. 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77, 185–268.
- Forstner, U. 1995. Land contamination by metals: global scope and magnitude of problem. *Metal speciation and contamination of soil*, 1-33.
- Gherardi, M. ve Rengel, Z. 2004. The effect of manganese supply on exudation of carboxylates by roots of lucerne (*Medicago sativa*) *Plant and Soil*, 260:271–282.
- Gillman, G.P. 2007. An analytical tool for understanding the properties and behaviour of variable charge soils. *Soil Research*, 45(2):83-90.
- Golovatyj, S.E. ve Bogatyreva, E.N. 1999. Effect of levels of chromium content in a soil on its distribution in organs of corn plants. *Soil Research and use of Fertilizers*, 197-204.
- Gropper, S.S. ve Smith, J.L. 2012. *Advanced Nutrition and Human Metabolism*: Cengage Learning.
- Guest, C., Schulze, D., Thompson, I. ve Huber, D. 2002. Correlating manganese X-ray absorption near-edge structure spectra with extractable soil manganese. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1172-1181.
- Gürbüz, M. A., Kardeş, T. A. ve Çebi U. 2016. Fosforun belirlenmesinde çoklu ekstraksiyon yöntemlerinin buğday bitkisinde kullanılabilirliğinin toprak ve bitki analizleri ile değerlendirilmesi. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 31(3):229-233.
- Hassan, M.U., Chattha, M.U., Khan, I., Chattha, M.B., Aamer, M., Nawaz, M., ... ve Khan, T.A. 2019. Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 12673-12688.
- Hua, Y., Clark, S., Ren, J. ve Sreejayan, N. 2012. Molecular mechanisms of chromium in alleviating insulin resistance. *The Journal of nutritional biochemistry*, 23(4):313-319.
- Humphries, J., Stangoulis, J. ve Graham, R. 2007. Manganese. In: Barker A, Pilbeam D, editors. *Handbook of Plant Nutrition*. USA: Taylor and Francis. s. 351–366.
- Kabata-Pendias, A. 2011. *Trace Elements in Soils and Plants*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Kaçar, B. ve İnal, A., 2008. Bitki analizleri, Nobel Yayın No: 1241, 892 s.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I. ve Dumat, C. 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of geochemical exploration*, 182:247-268.
- Kogelmann, W. ve Sharpe, W. 2006. Soil acidity and manganese in declining and nondeclining sugar maple stands in Pennsylvania. *Journal of Environmental Quality*, 35:433–441.

- Kupka, D. ve Gruba, P. 2022. Effect of pH on the sorption of dissolved organic carbon derived from six tree species in forest soils. *Ecological Indicators*, 140:108975.
- Landner, L. ve Reuther, R. 2005. Metals in society and in the environment. A critical review of current knowledge on fluxes, speciation, bioavailability and risk for adverse effects of copper, chromium, nickel and zinc. *Environmental Pollution*, 8:139–274.
- Lindsay, W.L. ve Norvell W.A. 1978. Development of A DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. *Soil Science Society of American Proceeding*, 42, 421-428.
- Malan, H.L. ve Farrant, J.M. 1998. Effects of the metal pollutants cadmium and nickel on soybean seed development. *Seed Science Research*, 8(4):445-453.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants, New York: Academic Press.
- McIlveen, W. D. ve Negusanti, J. J. 1994. Nickel in the terrestrial environment. *Science of the Total Environment*, 148(2-3):109-138.
- Minasny, B., Hong, S. Y., Hartemink, A.E., Kim, Y.H. ve Kang, S.S. 2016. Soil pH increase under paddy in South Korea between 2000 and 2012. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221:205-213.
- Mossa, A.W., Gashu, D., Broadley, M.R., Dunham, S.J., McGrath, S.P., Bailey, E.H. ve Young, S.D. 2021. The effect of soil properties on zinc lability and solubility in soils of Ethiopia—an isotopic dilution study. *Soil*, 7(1):255-268.
- Neina, D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and environmental soil science*, 1-9.
- Olaniran, A.O., Balgobind, A. ve Pillay, B. 2013. Bioavailability of heavy metals in soil: impact on microbial biodegradation of organic compounds and possible improvement strategies. *International journal of molecular sciences*, 14(5), 10197-10228.
- Palit, S., Sharma, A. ve Talukder, G. 1994. Effects of cobalt on plants. *Botanical Review*, 60: 149–181.
- Page, V. ve Feller, U. 2005. Selective transport of zinc, manganese, nickel, cobalt and cadmium in the root system and transfer to the leaves in young wheat plants. *Annals of Botany*, 96:425-434.
- Page, V., Weisskopf, L. ve Feller, U. 2006. Heavy metals in white lupin: uptake, root-to-shoot transfer and redistribution within the plant. *New Phytology*, 171:329-341.
- Parida, B. K., Chhibba, I. M. ve Nayyar, V.K. 2003. Influence of nickel-contaminated soils on fenugreek (*Trigonella corniculata* L.) growth and mineral composition. *Scientia Horticulturae*, 98(2):113-119.
- Poniedziałek, M., Sękara, A., Ciura, J. ve Jędrzczyk, E. 2005. Nickel and manganese accumulation and distribution in organs of nine crops. *Folia Horticulturae*, 17(1):11-22.
- Porter, G., Bajita-Locke, J., Hue, N., ve Strand, S. 2004. Manganese solubility and phytotoxicity affected by soil moisture, oxygen levels, and green manure additions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35:99–116.
- Rautaray, S.K., Ghosh, B.C. ve Mitra, B.N. 2003. Effect of fly ash, organic wastes and chemical fertilizers on yield, nutrient uptake, heavy metal content and residual fertility in a rice–mustard cropping sequence under acid lateritic soils. *Bioresource Technology*, 90(3):275-283.
- Sağlam, T.M. 2012. Toprak Kimyası. Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tekirdağ.
- Singh, D., McLaren, R.G. ve Cameron, K.C. 2008. Effect of pH on zinc sorption–desorption by soils. *Communications in soil science and plant analysis*, 39(19-20):2971-2984.
- Seregin, I. ve Kozhevnikova, A.D. 2006. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 53(2):257-277.
- Shadreck, M. ve Mugadza, T. 2013. Chromium, an essential nutrient and pollutant: A review. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 7(9):310-317.
- Shahid, M., Dumat, C., Aslam, M. ve Pinelli, E. 2012. Assessment of lead speciation by organic ligands using speciation models. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 24(4):248-252.
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N. K., ... ve Rashid, M. I., 2017a. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*, 178:513-533.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N.K. ve Antunes, P.M. 2017b. Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume*, 241:73-137.
- Siebielec, G. ve Chaney, R.L. 2006. Manganese fertilizer requirement to prevent manganese deficiency when liming to remediate Ni-phytotoxic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(1-2):163-179.
- Soudek, P., Petrova, S., Vankova, R., Song, J. ve Vanek, T. 2014. Accumulation of heavy metals using Sorghum sp. *Chemosphere*, 104:15–24.

- Sönmez, O. ve Kılıç, F.N. 2021. Heavy metal pollution in soil and removal methods. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research (TURKAGER)*, 2(2): 493-507.
- Tanaydın, Z.B., Tanaydın, M.K., Muharrem, İ. ve Demirkıran, N. 2020. Bakır ve kadmiyumun perlit ile adsorpsiyonu ve adsorpsiyon özelliklerinin karşılaştırılması. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 208-218.
- Tang, Y.T., Qiu, R.L., Zeng, X.W., Ying, R.R., Yu, F.M. ve Zhou, X.Y. 2009. Lead, zinc, cadmium hyperaccumulation and growth stimulation in *Arabis paniculata* Franch. *Environmental and Experimental Botany*, 66(1):126-134.
- Ülgen, N. ve Yurtsever, N. 1974. Türkiye gübreler ve gübreleme rehberi. Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Teknik Yayınlar No:28. Ankara
- Violantel, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A.G. ve Pigna, M. 2010. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of Soil Science Plant Nutrition*, 10(3):268–292.
- Watmough, S., Eimer, M. ve Dillon, P. 2007. Manganese cycling in central Ontario forests: response to soil acidification. *Applied Geochemistry*, 22:1241–1247.
- Webb, M.J. ve Loneragan, J.F. 1990. Zinc translocation to wheat roots and its implications for phosphorus/zinc interaction in wheat plants. *Journal of Plant Nutrition*, 13: 1499–1512.
- Welch, R.M. ve Cary, E.E. 1975. Concentration of chromium, nickel, and vanadium in plant materials. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 23(3):479-482.
- Welch, R.M. 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 14: 49–82.
- Yang, X., Zhang, S., Tian, Y., Guo, W. ve Wang, J. 2013. The influence of humic acids on the accumulation of lead (Pb) and cadmium (Cd) in tobacco leaves grown in different soils. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13(1):43-53.
- Ye, J., Zhang, Q., Liu, G., Lin, L., Wang, H., Lin, S., ... ve He, H. 2022. Relationship of soil pH value and soil Pb bio-availability and Pb enrichment in tea leaves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(3):1137-1145.
- Yücel, C., İnal, İ., Gündel, F., Oluk, C.A., Yücel, H. ve Hatipoğlu, R. 2020. Adana Koşullarında Bazı Tatlı Sorgum Genotiplerinin Posa Verimi Ve Silaj Kalite Özellikleri. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 7(9):230-238.
- Zayed, A., Lytle, C.M., Qian, J.H. ve Terry, N. 1998. Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. *Planta*, 206(2):293-299.
- Zhuang, P., Wensheng, S.H.U., Zhian, L.I., Bin, L.I.A.O., Jintian, L.I. ve Jingsong, S.H.A.O. 2009. Removal of metals by sorghum plants from contaminated land. *Journal of Environmental Sciences*, 21(10), 1432-1437.
- Zeller, S. ve Feller, U. 1998. Redistribution of cobalt and nickel in detached wheat shoots: Effects of steam-girdling and of cobalt and nickel supply. *Biologia Plantarum*, 41: 427–434.
- Zhu, T., Li, L., Duan, Q., Liu, X. ve Chen, M. 2021. Progress in our understanding of plant responses to the stress of heavy metal cadmium. *Plant Signaling & Behavior*, 16(1):1836884.