

Atıf İçin: Çirka, M. (2023). Bor ve Arıtma Çamur Uygulamalarının Börülçenin (*Vigna unguiculata* L.) Mikro Element ve Ağır Metal İçeriğine Etkisi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 684-699.

To Cite: Çirka, M. (2023). Effect of Boron and Sewage Sludge Applications on Micro Element and Heavy Metal Content of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 684-699.

Bor ve Arıtma Çamur Uygulamalarının Börülçenin (*Vigna unguiculata* L.) Mikro Element ve Ağır Metal İçeriğine Etkisi

Mustafa ÇİRKA^{1,2}

Öne Çıkanlar:

- Stres
- Toksik etki

Anahtar Kelimeler:

- Bor
- Ağır metaller
- Börülçe
- Arıtma çamuru

ÖZET:

Bu çalışma, bor ve arıtma çamuru uygulamalarının börülçe (*Vigna unguiculata* L.) bitkisinin mikro element ve ağır metal içeriklerindeki değişimler üzerine etkilerinin belirlenmesi için yapılmıştır. Deneme, iklim odasında, tesadüf parsellerinde faktöriyel deneme desenine göre 3 tekerrürlü olacak şekilde yürütülmüştür. Karagöz börülçe çeşidinin kullanıldığı çalışmada dört doz bor (0 mg/kg, 50 mg/kg, 100 mg/kg ve 200 mg/kg bor) ve dört doz arıtma çamuru (%0, %2.5, %5 ve %10) deneme faktörleri olarak uygulanmıştır. Çalışma sonucunda arıtma çamuru uygulamaları ile börülçenin mikro element içerikleri hem artış hem de azalış göstermişken, ağır metal içeriklerinde alüminyum hariç diğerleri artış göstermiştir. En yüksek değerlere %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamalarında ulaşılmıştır. Bor uygulamaları ile mikro element içerikleri genel olarak artış göstermiştir. Artan bor uygulamalarıyla birlikte bitkide Al, Cd, Co, Cr ve Pb gibi ağır metal içeriklerinde artış sağlanırken, As ve Ni içeriklerinde ise azalmaların oluştuğu tespit edilmiştir. Bor x arıtma çamuru interaksyonunda arıtma çamurunun neden olduğu olumsuzlukları bor uygulamalarının tolere ettiği görülmüştür. Bu nedenle börülçe bitkisinde arıtma çamuru uygulamalarının neden olduğu değişken ağır metal içeriklerinin bor uygulamaları ile dengelenebileceği söylenebilir.

Effect of Boron and Sewage Sludge Applications on Micro Element and Heavy Metal Content of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.)

Highlights:

- Stress
- Toxic effect

Keywords:

- Boron
- Heavy metals
- Cowpea
- Sewage Sludge

ABSTRACT:

This study was carried out to determine the effects of boron and sewage sludge applications on the changes in micro element and heavy metal contents of the cowpea (*Vigna unguiculata* L.) plant. The experiment was carried out in the climatic chamber, in complete randomized plots, according to the factorial design with 3 replications. In the study where the Karagöz cowpea variety was used, four doses of boron (0 mg/kg, 50 mg/kg, 100 mg/kg, and 200 mg/kg boron) and four doses of sewage sludge (0%, 2.5%, 5%, and 10%) were applied as factors. As a result of the study, micro element contents of cowpea have both increased and decreased with sewage sludge applications, while heavy metal contents except aluminum have increased. The highest values were reached with 5% and 10% sewage sludge applications. Micro element contents generally increased with boron applications. With increasing boron applications, heavy metal contents such as Al, Cd, Co, Cr and Pb increased, while As and Ni contents decreased. It was observed that boron applications tolerated the negativities caused by the sewage sludge in the boron x sewage sludge interaction. Therefore, it can be said that the variable heavy metal contents caused by sewage sludge applications in cowpea plant can be balanced with boron applications.

^{1,2} Mustafa ÇİRKA (Orcid ID: 0000-0001-6506-7407), ¹ İğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, İğdır, Türkiye. ² Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Van, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mustafa ÇİRKA, e-mail: m_cirka@hotmail.com

GİRİŞ

Anavatanı Hindistan, Güney Asya ve Afrika olan börülce tek yıllık bir bitki olup, karakteristik özelliğinden dolayı sıcaklığı sever ve en iyi yetiştirme sıcaklığı 20-30°C'dir. Ülkemizde genellikle Ege Bölgesinde (Manisa, Muğla, Denizli, İzmir, Çanakkale, Balıkesir ve Isparta) yetiştirildiği için bölgenin bir ürünü olarak görülmesini sağlamıştır. Akdeniz bölgesi (Antalya ve Hatay) börülce yetiştiriciliğinde ikinci konumdadır (Günay, 1992). Dünyada 14.911.307 ha alanda börülce ekimi yapılarak 8.986.191 ton kuru ürün elde edilmiştir (FAO, 2021). Hall ve ark., (2003, 2004), börülçenin dünyada tropikal ve yarı kurak bölgelerde, kuraklığa ve sıcaklığa tolerans açısından diğer yemeklik tane baklagillere nazaran daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Yüksek oranlarda vejetatif aksama olan börülce bu özelliğinden dolayı toprak muhafazasında ve karışık ekimde ön plana çıkmaktadır. Çeltik tarımının yapıldığı bölgelerde münavebe bitkisi olarak kullanılmaktadır (Çulha ve Bozoğlu, 2016). Afrika'da tarımı geniş alanlara yayılan börülçenin olgun tohumlarındaki %20-25 protein, bu bitkiyi bölge insanı için temel protein kaynağı durumuna getirmiştir (Idahosa ve ark., 2010). Ayrıca börülce yüksek kaliteli protein bakımından dünyanın her yerinde tercih edilmektedir. Yapılan bazı çalışmalar, börülçenin kanser ve iltihabın ilerlemesinde koruyucu bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir (Jayathilake ve ark., 2018).

Yasal sınırlar kapsamında arıtma çamurları süs bitkisi yetiştiriciliğinde ve verimi düşük topraklarda hem organik gübre ve hem de toprak düzenleyici olarak kullanımı yapılmaktadır (Akat ve ark., 2013; Demirkan ve ark., 2014). Sıvı ve katı olarak kentsel atıkların arıtımı sonucu ortaya çıkan arıtma çamuru, arıtma işlemlerine bağlı olarak %0.25 ile %12 oranında katı maddelerden oluşan kokulu atıklardır (Durak, 2005). İçerisinde makro ve mikro besin elementlerini bulunduran arıtma çamurları, alternatif gübre kaynağıdır. Ayrıca birçok firma, çamurun bünyesindeki organik maddeden dolayı toprak düzenleyici olarak kullanılabilmesinin gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu gibi ifadeler birçok ülkede arıtma çamurunun kullanılmasını artırmıştır (Strauch, 1991; Düring ve Gäth, 2002). Arıtma çamuru ve suyu toprakta yer alan faydalı bakteriler için alternatif kaynaktır. Diğer bir ifadeyle, ağır metallerin, pestisitlerin uzaklaştırılmasında ve azot bağlayan bakteriler (*Nitrosomonas*) gibi birçok bakteriyi toprağa kazandırma noktasında faydalı olabilirler (Hanjra ve ark., 2012; Oved ve ark., 2001).

Arıtma çamurundaki ağır metallerin bitki hücrelerine girmesine engel olan hücre duvarının yapısal işlevinde bor elementi yer almaktadır (Pan ve ark., 2012; Wu ve ark., 2017). Hücre duvarının oluşumunda birinci derecede rol alan bor, toksik elementlerin bitkiler üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmaktadır (Riaz ve ark., 2021). Bor, hücre duvarında olduğu gibi; hücre membranlarının yapısal bütünlüğü üzerinde de belirleyici rollere sahiptir. Bor noksanlığında, hücre membranlarının stabilitesi bozulmakta ve çok geçirgen/sızdıran bir özellik kazanmaktadır (Dordas ve Brown 2005). Bor elementi mikro elementler arasında ki tek ametaldir. Bor bakımından temel mineral olan turmanil, kompleks borosilikat mineralidir. Doğada saf olarak bulunmayan bor elementi genelde diğer elementler ile bileşik halinde bulunur (Sür ve ark., 2001). Bitkilerde dokuların çoğalmasında ve hücre duvarının oluşumunu sağlayan bor, karbonhidrat sentezinde ve bitki bünyesinde şekerlerin yer değiştirmesinde görev alır (Plaster, 1992; Boşgelmez ve ark., 2001; Gardiner ve Miller, 2008; McCauley ve ark., 2009). Bitkide genç yapraklarda kloroz, kalınlaşan yaprak uçları ve koyu mavi-yeşil renkler şeklinde eksikliğini gösteren bor elementi ile birlikte bitki yaprak ve gövdelerinde kırılğan bir yapı ortaya çıkmaktadır (McCauley ve ark., 2009; Kacar ve Katkat, 2010). Bor elementinin toksik etkisi, bitki yapraklarında yanmış bir görünümünün ve daha sonrasında yaprakların erken dökülmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Yaşlı yaprakların uç kısmında meydana gelen sararmalar daha sonra yaprak kenarlarına ve orta damara doğru yayılır (Özbek ve ark., 2001; Kacar ve Katkat, 2010). Makro ve mikro elementler içeren arıtma çamurlarının farklı alanlarda değerlendirilmesi, ortaya çıkabilecek çevre kirliliğinin azaltılmasına ve

sorunların çözülmesine olanak sağlayacaktır (Kabata-Pendias, 2011). Ayrıca arıtma çamurunun farklı alanlarda kullanılmasının çevre üzerindeki yükü azaltacağı gibi, çeşitli ekonomik katkıların da sağlayabileceği ortaya konmuştur (Akat ve ark., 2015).

Yapılan benzer bir çalışmada artan miktarlarda uygulanan arıtma çamurunun toprağın NH_4^+ , NO_3^- , Na, K, Ca, Mg ve alınabilir P içeriğini kontrol uygulamasına göre önemli düzeyde artırmıştır. Arıtma çamuru uygulanmayan kontrole göre toprağın yarayışlı Fe, Cu, Mn, Zn ve B içeriği de artan arıtma çamuru dozlarına bağlı olarak önemli düzeylerde artmıştır. Arıtma çamuru uygulanmayan kontrole göre toprağın yarayışlı Fe, Cu, Mn, Zn ve B içeriği de artan arıtma çamuru dozlarına bağlı olarak önemli düzeylerde artmıştır. Arıtma çamuru uygulamalarına bağlı olarak meydana gelen bu artışlar arıtma çamurunun bitki besin elementi içeriği ile birlikte, mineralizasyona ve topraktaki pH değişimine bağlı olarak açıklanabilir (Küçükhemek ve ark., 2006).

Yapılan literatür taramalarında arıtma çamuru uygulamalarında borun etkinliği ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, arıtma çamuru uygulamalarıyla birlikte börülcede mikro element ve ağır metal içeriği üzerinde bor uygulamalarının etkisi incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü'nden temin edilen Karagöz börülce (*Vigna unguiculata* L) çeşidi kullanılmıştır. Ekime hazırlanan tohumlar öncelikle çimlenme testine tabi tutularak çimlenme yüzdelere bakılmıştır. Bitkilerden yaprak örneklerinin alınabilmesi için deneme süresince bitkilerin morfolojik özelliklerinin gelişimi izlenmiştir.

Denemede kullanılan arıtma çamuru Van Edremit Biyolojik Kanalizasyon Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Çamur şeklinde getirtilen arıtma çamuru kuruması için havadar bir ortamda bekletilmiştir. Kurutulan arıtma çamuru 2 mm elekten geçebilecek kadar öğütülmüştür. Denemede kullanılan toprak Tarla Bitkileri Bölümüne ait deneme alanından temin edilmiştir. Alınan toprak örneği kurutulduktan sonra 2 mm'lik eleklerden elenmiş ve saksılara hesaplanan ölçülerde çamurları ile karıştırılarak doldurulmuştur.

Katı Ortam (1500 g)	Toprak (g)	Arıtma Çamuru (g)
Toprak+AÇ _{2.5}	1450	50
Toprak+AÇ ₅	1400	100
Toprak+AÇ ₁₀	1300	200

Metot

Çalışma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarla Bitkileri Bölümü iklimlendirme odasında tesadüf parselleri deneme deseni 'ne göre faktöriyel düzende 3 tekerrürlü olacak şekilde kurulmuştur. Arıtma çamurunun 4 dozu (AÇ₀; %0, AÇ_{2.5}; %2.5, AÇ₅; %5.0, AÇ₁₀; %10) ile Bor'un 4 dozu (B₀;0 mg/kg, B₅₀;50 mg/kg, B₁₀₀;100 mg/kg, B₂₀₀;200 mg/kg) Borik asitten (H_3BO_3) hazırlanarak yetiştirme ortamlarına saf suda çözdürüldükten sonra yarısı tohum ekiminde, geri kalan yarısı ise çıkışlar tamamlandıktan ve tekleme işlemi yapıldıktan sonra uygulanmıştır. Bitkilerin su ihtiyaçları saf su ile karşılanmıştır. Bitkilerin su gereksinimi 2 günde bir her bir saksıya 80 cc saf su ilave edilerek karşılanmıştır ve 1.5 kg toprak alan saksılara 4 tohum ekilmiştir. Saksılardaki çıkışlar kontrol gruplarında ilk 3 günde sağlanırken artan arıtma çamuru dozlarına bağlı olarak çıkışlar 3 ile 4 gün arasında değişkenlik göstermiştir. Bitkilerde stres tohum ekimden itibaren 15 gün sonra ortaya çıkmış ve çalışma stresten 5 gün sonra sonlandırılmıştır. Çıkışların tamamlanmasıyla birlikte her saksıda bir

bitki kalacak şekilde seyreltme yapılmış ve bitkilerde stresin ortaya çıkmasıyla çalışma sonlandırılmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan arıtma çamuru ve deneme toprağında yapılan analizlerin sonuçları

Materyal	O.M.	pH	Tuz	Fe	Zn	Mn	Cu	Co	Ni	Cd	Cr
	%		μ S/cm								
AÇ	29.8	7.72	1582	5815	3146	1013.9	539.3	388	177.2	100	1897
Toprak	0.53	8.78	213	35.1	11.4	28.6	12.2	3.6	4.1	3.54	1.54

Ağır metal ve mikro elementlerin analizleri için hasat edilen toprak üstü bitki örnekleri musluk suyu ve sonrasında saf sudan geçirildikten sonra etüvde 48 saat boyunca 40 °C'de kurumaya bırakılmış ve kurutulmuş yaprak örnekleri (Kacar, İnal 2008)'ye göre hazırlanmıştır. Kurutulan örnekler bitki öğütme değirmeni yardımıyla öğütülmüş ve analize hazır hale getirilmiştir. Kurutulan örneklerde mikro element ve ağır metal analizleri Kacar ve İnal (2008)'in bildirdiği şekilde kuru yakma yöntemi uygulanarak ekstraktlar elde edilmiş ve ICP-OES aleti ile elementler belirlenmiştir.

Denemede kullanılan arıtma çamuru ve toprağın toplam mikro element ve ağır metal içerikleri (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Co, Cr, Ni) yaş yakma sonucu elde edilen ekstraktların ICP-OES aletinde okutulması suretiyle belirlenmiştir (Kacar ve İnal, 2008). Arıtma çamuru ve toprağın tuzluluk ve pH analizleri 1:2.5 oranında hazırlanan örnek: su süspansiyonunda belirlenmiştir (Grewelling ve Pech, 1960). Organik madde analizi Modifiye edilmiş Walkey Black yöntemine göre belirlenmiştir (Walkley, 1947).

Verilerin İstatistiksel Analizi

Denemede elde edilen veriler, Costat (sürüm 6.34) paket programı aracılığıyla varyans analizine tabi tutulmuştur. Ortalamalar ise LSD çoklu karşılaştırma testine göre yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Uygulamaların Börülçenin Mikro Element İçerikleri Üzerine Etkisi

Uygulamaların börülçenin mikro element içerikleri üzerine etkisine ait varyans analiz sonuçları Çizelge 2'de, uygulamalara ait ortalamalar ve oluşan LSD grupları Çizelge 3'te ve interaksiyonlara ait veriler Şekil 1'de verilmiştir.

Çizelge 2. Bor ve arıtma çamuru uygulamalarının börülçenin Cu, Mn B, Zn ve Fe içeriklerine etkisine ait varyans analiz sonuçları

V.K.	S.D.	Cu		Mn		B		Zn		Fe	
		K.O.	F	K.O.	F	K.O.	F	K.O.	F	K.O.	F
B	3	77.86	177.7**	49501	6134.5**	726	123.2**	3.798	15.14**	3376	62.89**
AÇ	3	249.3	568.9**	4483	555.6**	1488	252.4**	63.66	253.7**	61982	1154.5**
BxAÇ	9	22.28	50.8**	426	52.8**	148	25.17**	36.11	143.9**	2107	39.25**
Hata	32	0.44		8.06		5.86		0.251		53.69	

*, %5; **, %1; AÇ; Arıtma Çamuru; B; Bor

Çizelge 2'de görüleceği üzere arıtma çamuru, bor x arıtma çamuru interaksiyonunun interaksiyonun mikro elementler üzerine %1 düzeyinde istatistiksel olarak önemli etkide bulunduğu belirlenmiştir.

Yetiştirme ortamına artan bor uygulamaları ile börülçenin bor içeriğinde artışlar belirlenmiştir. Kontrolde 41.76 mg/kg olan bor içeriği 200 mg/kg bor uygulaması ile 184.55 mg/kg 'a yükselmiştir. Ortama arıtma çamuru uygulamasının artışı ise bor içeriğinde düşüşe neden olmuştur. Kontrol bitkilerinde 107.83 mg/kg olan bor içeriği %10 arıtma çamuru uygulaması ile 62.66 mg/kg 'a düşmüştür (Çizelge 3). Bor x arıtma çamuru interaksiyonunun börülçenin bor içeriğine etkisi incelendiğinde börülçede en düşük bor içeriği 27.47 mg/kg ve 25.14 mg/kg ile B₀xAÇ₁₀ ve B₁₀₀xAÇ₁₀ uygulamalarında

belirlenmişken, en yüksek bor içeriği ise 209.95 mg/kg ile B₂₀₀xAÇ₀ uygulamasında belirlenmiştir. Genel olarak arıtma çamuru uygulamalarının artışı ile börülçenin bor içeriğinde görülen değişimler bor uygulamalarının yapılmasına karşılık düşüş eğilimi devam etmiştir (Şekil 1.A). Börülçenin bor içeriğindeki değişim uygulanan bor dozlarına bağlı olarak en düşük ve en yüksek değerler arasında %341.9'lük bir artış elde edilmişken arıtma çamuru uygulamalarında bu oran %71.4'lik bir azalış olarak belirlenmiştir (Çizelge 3). Bu durum bor uygulamaları ile bitkinin topraktan alabileceği yararlı bor miktarının artışı ile açıklanabilirken arıtma çamuru uygulamalarında görülen düşüş ise muhtemelen arıtma çamurunun ayrışması ile toprak demir oksit ve alüminyum oksit miktarında artışın meydana gelmesine bağlı olarak borun daha fazla adsorpsiyonundan kaynaklanmış olabilir. Elrashidi ve O'Connor (1982) toprakta borun adsorpsiyonu üzerine kalsiyum karbonatlar yanı sıra pH'ya bağlı olarak alüminyum oksit ve demir oksitlerin de etkili olduğunu bildirmişlerdir. Nitekim korelasyon analiz sonuçlarında da görüleceği üzere (Çizelge 7) alüminyum ile bor arasında negatif ilişki görülmektedir. Bunun yanı sıra arıtma çamuru uygulamasının artışına paralel olarak toprak organik madde içeriği de artış göstermektedir. Şekil 1.A'da görüleceği üzere börülçenin bor içeriği ortama bor uygulanmadığı ve uygulandığı koşullarda artan arıtma çamuru dozları ile azalış göstermektedir. Bu durum toprak organik maddesinin artışının bitkilerin bor alınımı üzerine olumsuz etkiyi de beraberinde getirdiğini göstermektedir. Yapılan bir çalışmada toprak organik madde düzeyi ile toprakların yararlı bor kapsamı arasında negatif ilişki olduğu Budak ve Günel (2015) tarafından bildirilmektedir.

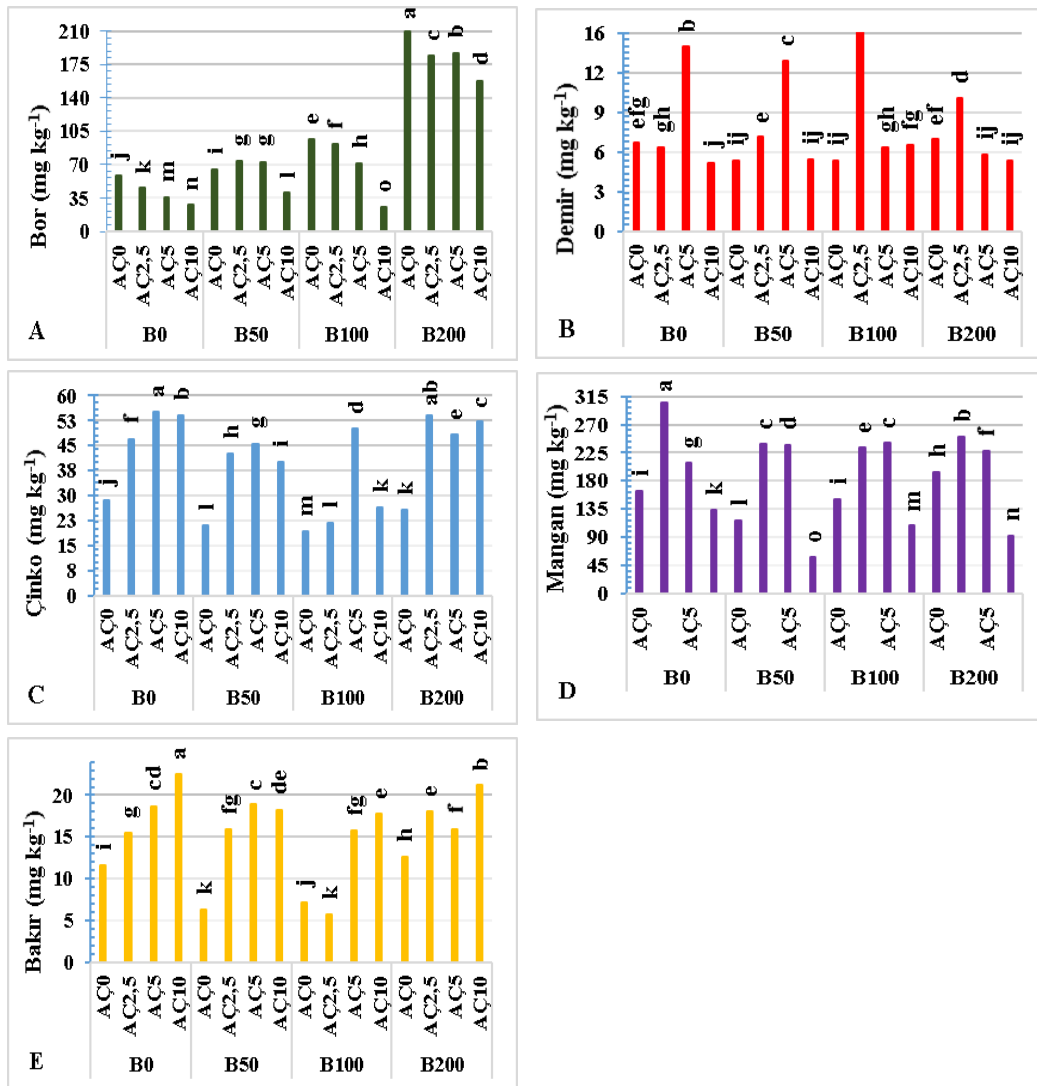
Çizelge 3. Arıtma çamuru ve bor uygulamalarının börülçenin mikro element içeriğine ait ortalamalar ve oluşan LSD grupları

Uygulamalar	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	mg/kg				
Bor, mg/kg					
0	41.76 D	8.32 AB	202.75 A	46.15 A	17.04 A
50	62.69 C	7.95 B	162.83 D	37.30 B	14.81 B
100	70.95 B	8.59 A	183.33 C	29.41 C	11.62 C
200	184.55 A	7.29 C	190.92 B	45.16 A	16.97 A
LSD (%5)	2.36	0.41	5.94	1.96	0.54
Arıtma çamuru, %					
0	107.38 A	6.29 B	156.08 C	23.73 C	9.40 D
2.5	98.28 B	9.98 A	257.25 A	41.33 B	13.81 C
5.0	91.62 C	10.08 A	228.42 B	49.76 A	17.31 B
10.0	62.66 D	5.82 C	98.08 D	43.19 B	19.93 A
LSD (%5)	2.36	0.41	5.94	1.96	0.54

A, B, C, D; Farklı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak önemli fark vardır

Börülçenin demir içeriği bor uygulamaları ile kontrole göre azalış, artış ve azalış şeklinde bir değişim göstermiştir. Bor uygulanmayan kontrol parselinde demir içeriği 8.32 mg/kg iken 50 mg/kg bor uygulamasında 7.95 mg/kg'a düşmüş, 100 mg/kg bor uygulamasında en yüksek değere yani 8.59 mg/kg'a yükselmişti. Ancak 200 mg/kg bor uygulamasında ise en düşük değer olan 7.29 mg/kg demir içeriği belirlenmiştir. Arıtma çamuru uygulamaları ile börülçenin demir içeriği kontrole göre artış ve azalış şeklinde değişim göstermiştir. Kontrol bitkilerinde 6.29 mg/kg olan demir içeriği %2.5 ve %5 arıtma çamuru uygulamalarında sırasıyla 9.98 mg/kg ve 10.08 mg/kg'a yükselmişken, %10 arıtma çamuru uygulamasında keskin bir düşüş ile demir içeriği 5.82 mg/kg'a düşmüştür (Çizelge 3). Bor x arıtma çamuru etkileşimini incelendiğinde en düşük demir içeriği 5.35 mg/kg ile B₀xAÇ₁₀ uygulamasında, en yüksek demir içeriği ise 15.55 mg/kg ile B₁₀₀xAÇ_{2.5} uygulamasında belirlenmiştir (Şekil 1.B). Bor uygulama dozlarının artışı ile börülçenin demir içeriği kontrol bitkilerine göre azalış, artış ve azalış şeklinde bir değişim göstermiştir. Kontrole göre en düşük demir içeriği borun en yüksek uygulama dozunda belirlenmiş ve ikisi arasındaki fark %15.6 olarak belirlenmiştir. Bu durum ortama ilave edilen

borun topraktaki yararlı demir ile alınmaz formlar oluşturmasından kaynaklanmış olabilir. Goldberg (1997) borun torakta alüminyum ve demir oksitler, magnezyum hidroksit, kil mineralleri, kalsiyum karbonat ve organik madde tarafından adsorbe edildiğini bildirilmektedir. Bunun yanı sıra yapılan çalışmalarda bitkide bor ile demir arasında önemli negatif ilişki olduğu da bildirilmektedir (Uysal ve ark., 2017). Emir (2017) yapmış olduğu çalışma sonucunda bor uygulamalarının artışına bağlı olarak bitkinin demir ve mangan içeriklerinin azaldığını bildirmiştir. Ortamda arıtma çamurunun uygulama dozunun artışı ile kontrole göre demir içeriğinde artış ve azalış belirlenmiştir. Kontrole göre elde edilen en yüksek demir değerindeki artış %5 arıtma çamuru uygulamasında ve %60.2 oranında gerçekleşmiştir. Arıtma çamurunun %10 uygulandığı bitkilerin demir içeriği kontrole göre %8.1'lik bir azalış göstermiştir (Çizelge 3).



Şekil 1. Arıtma çamuru x bor interaksiyonunun Börülçenin mikro element içeriğine etkileri

Ortama ilave edilen arıtma çamuru dozlarının belirli bir seviyesine kadar börülçenin demir içeriğinde gerçekleşen artış muhtemelen arıtma çamurunun sahip olduğu yüksek demir içeriğinden kaynaklanmış olabilir (Çizelge 1). Son doz arıtma çamuru uygulamasında ise demir içeriğinde görülen düşüş ise yüksek organik madde içeriği ile alınabilir demir arasındaki ilişkiden kaynaklanmış olabilir. Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen veriler ışığında toprak organik maddesi ile demir kompleks oluşturarak bitkiler tarafından alınabilirliği düşmektedir (Kooijman ve ark., 2009; Güneş ve ark., 2013;

Fink ve ark., 2016). Bazı ağır metallerin yetiştirme ortamda mevcudiyetinin fazlalığı bitkilerin demir alımını azalttığı bildirilmektedir (Kacar ve Katkat, 1999).

Çizelge 3'te görüleceği üzere kontrol bitkilerinde 46.15 mg/kg olan çinko içeriği 50 ve 100 mg/kg bor uygulamalarında sırasıyla 41.33 mg/kg ve 29.41 mg/kg çinko değerlerine düşürmüşken 200 mg/kg bor uygulamasında çinko içeriği 45.16 mg/kg olarak belirlenmiştir. Arıtma çamurunun dozlarının artışına paralel olarak çinko içeriğinde kontrole göre artış göstermiştir. Kontrolde 23.73 mg/kg olan çinko içeriği %2.5, %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamalarında sırasıyla 41.33 mg/kg, 49.76 ve 43.19 mg/kg çinko değerleri elde edilmiştir. Bor x arıtma çamuru interaksyonunun etkisine bakıldığında en düşük çinko içeriğine B₁₀₀xAÇ₀ uygulamasında 19.4 mg/kg, en yüksek mangan içeriğine ise 55.1 mg/kg ile B₀xAÇ₅ uygulamasında ulaşılmıştır (Şekil 1.C).

Uygulanan bor miktarı artıkça börülçenin çinko içeriği kontrole göre düşmüş, ancak Bor'un 200 mg/kg uygulamasında neredeyse kontrol seviyesinde çinko içeriğine yükselmiştir. Kontrol ile Bor'un 100 mg/kg uygulaması arasında %56.9 oranında bir düşüş belirlenmiştir. Ortama arıtma çamurunun ilavesi artıkça çinko içeriği kontrole göre artış göstermiş ve en yüksek değer (%5 AÇ; 49.76 mg/kg) ile kontrol arasında %109.80 oranında artış gerçekleşmiştir (Çizelge 3). Bor x arıtma çamuru interaksyonu incelendiğinde en düşük çinko içeriği B₁₀₀xAÇ_{2.5} (19.40 mg/kg) uygulamasında, en yüksek çinko içeriği ise B₀xAÇ₅ (55.10 mg/kg) uygulamasında tespit edilmiştir. En yüksek çinko içeriğine sahip bitkiler ile kontrol grubu bitkilerin çinko içeriği arasında %93.3 oranında fark olduğu görülmektedir (Şekil 1.C). Arıtma çamuru uygulamaları ile toprak pH'sında önemli değişimler olduğu ve çinko alımının artığı bildirilmektedir (Anguissola Scotti ve ark., 1999; Zhang ve ark., 2002). Yapılan çalışmada toprakların değişebilir çinko içeriği ile toprak pH'sı arasında negatif ilişki olduğu buna karşılık inorganik çinko içeriği ile pH arasında ise pozitif ilişki olduğu bildirilmiştir (Torri ve Lavado, 2008). Uygulanan arıtma çamurunun çinko içeriğinin yüksek oluşu da börülçenin ağır metal içeriğini artırmıştır (Çizelge 1).

Bor uygulamalarının artışı ile börülçenin mangan içeriği kontrole göre azalış göstermiştir. Kontrol bitkilerinde 202.75 mg/kg olan mangan içeriği 200 mg/kg bor uygulaması ile 190.92 mg/kg'a düşmüştür. Arıtma çamurunun %2.5 uygulamasında börülçenin mangan içeriğinde en yüksek değer olan 257.25 mg/kg mangan değerine ulaşılmışken, %10 arıtma çamuru uygulamasında ise en düşük değer olan 98.08 mg/kg belirlenmiştir (Çizelge 3). Bor x arıtma çamuru interaksyonunun etkisine bakıldığında en düşük mangan içeriğine B₅₀xAÇ₁₀ uygulamasında 58.0 mg/kg, en yüksek mangan içeriğine ise 304.3 mg/kg ile B₀xAÇ_{2.5} uygulamasında ulaşılmıştır (Şekil 1.D).

Börülçenin mangan içeriğini artıran bor uygulamaları ile sırasıyla %24.5, 10.6 ve %6.2 oranlarında düşüşe neden olmuştur. Arıtma çamuru uygulama dozlarının artışı ile önce artış, sonra azalış belirlenmiştir. Arıtma çamurunun %2.5 ve %5 uygulama dozlarında sırasıyla 64.8 ve %43.3 oranlarında artış elde edilmişken, %10 arıtma çamuru uygulamalarında ise 59.1 oranında düşüş elde edilmiştir (Çizelge 3). Bor x arıtma çamuru interaksyonunun etkisi incelendiğinde arıtma çamuru uygulamalarının artışı ile mangan içeriğinde kontrole göre önce artış gerçekleştiği, arıtma çamurunun %10 uygulamalarında ise azalışlar belirlenmiştir. Bor uygulamalarının olduğu koşullarda mangan içeriğinde arıtma çamurunun artan dozlarının sağladığı artışlar kısmen de olsa azalma yönünde bir durum ortaya koymuştur. En düşük mangan içeriğine B₅₀xAÇ₁₀ (58 mg/kg) uygulamasında, en yüksek mangan içeriğine ise B₀xAÇ_{2.5} (304 mg/kg) uygulamasında ulaşılmış ve bu iki değer arasında %424.1'lik bir fark belirlenmiştir. Yetiştirme ortamına uygulanan arıtma çamurunun artışı ile mangan içeriğinde elde edilen azalışlar toprak organik madde içeriğinin artışından kaynaklanmaktadır. Kacar ve Katkat (1999)'ın bildirdiği üzere mangan alımını etkileyen faktörler olarak organik maddesi yüksek topraklar, kireçli-alkalin topraklar, kötü drene olan topraklar ve kumlu tekstürlü topraklar olduğun belirtmişlerdir. Organik madde uygulanmış topraklarda mineralizasyon ile H⁺ iyonlarının açığa çıkmakta ve bunun sonucunda

toprak pH'sında düşüş (Garzon ve ark., 2011) gerçekleşmesi sonucunda mangan organik maddelerce daha fazla adsorbe olmakta (Allard ve ark., 2017) ve bunun sonucunda bitkilerin mangan alımı azalmaktadır (Şekil 1). Bor uygulamaları ile bitkinin mangan içeriğinde gözlenen azalış bor ile mangan arasında gerçekleşen adsorpsiyondan kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim Ren ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada bor'un mangan oksitler tarafından adsorpsiyona uğratıldığını bildirmiştir. Bor-mangan adsorpsiyonu nedeniyle bitkilerin mangan alımı azalmaktadır (Şekil 1).

Börülçenin bakır içeriği bor dozlarının 50 mg/kg ve 100 mg/kg uygulama dozlarında kontrole göre düşüş göstermiş ve sırasıyla 14.81 mg/kg ve 11.62 mg/kg olarak belirlenmişken, 200 mg/kg bor uygulamasında 16.97 mg/kg ile kontrole yakın bir değer vermiştir. Arıtma çamuru dozlarının artışı ile kontrolde 9.40 mg/kg olan bor içeriği %2.5, %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamalarında sırasıyla 13.81 mg/kg, 17.31 mg/kg ve 19.93 mg/kg değerlerine ulaşmıştır (Çizelge 3). Şekil 1. E'de görüleceği üzere bor x arıtma çamuru interaksyonunda en düşük bakır içeriğine B₁₀₀xAÇ_{2.5} uygulamasında 5.75 mg/kg, en yüksek bakır içeriğine ise 22.52 mg/kg ile B₀xAÇ₁₀ uygulamasında ulaşılmıştır (Şekil 1.E).

Börülçenin bakır içeriği uygulanan 50 ve 100 mg/kg bor dozları artışı ile kontrole göre azalmış, 200 mg/kg bor uygulamasında ise kontrole yakın bir bakır içeriği belirlenmiştir. Kontrol ile 100 mg/kg bor uygulaması arasında %46.6 oranında düşüş olduğu belirlenmiştir. Arıtma çamuru uygulama dozunun artışı ile bakır içeriğinde kontrole göre artış gerçekleşmiştir. Kontrol ile %10 arıtma çamuru uygulaması arasında %112.0 oranında artış olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3). Arıtma çamuru uygulamaları ile bakır içeriğinde görülen artış arıtma çamurunun bakır içeriğinin yüksek olmasından (Çizelge 1) kaynaklanmış olabilir. Ayrıca arıtma çamuru ilavesi ile toprağın organik madde içeriğinde artış sağlanmakta (Torri ve ark., 2003) ve organik maddenin mineralizasyonu sırasında açığa çıkan organik ve karbonik asitler (Chang ve ark., 1991; Hao ve Chang, 2002; McCauley ve ark., 2017) toprak pH'sında düşüşe neden olmakta ve böylece mikro elementlerin bitkiye yararlılığını artırmaktadır.

Uygulamaların Börülçenin Ağır Metal İçerikleri Üzerine Etkisi

Uygulamaların börülçenin ağır metal içerikleri üzerine etkisine ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4 ve 5'te, uygulamalara ait ortalamalar ve oluşan LSD grupları Çizelge 7'de ve bor x arıtma çamuru interaksyonuna ait sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 4. Arıtma çamuru ve bor uygulamalarının börülçenin Al, As, Ni ve Pb içeriklerine etkisine ait varyans analiz sonuçları

V.K.	S.D.	Al		As		Ni		Pb	
		K.O.	F	K.O.	F	K.O.	F	K.O.	F
B	3	4663	182.4**	6.628	198.4**	580.01	107.1**	2.852	77.91**
AÇ	3	19826	775.6**	7.628	228.3**	751.44	138.8**	6.447	176.1**
BxAÇ	9	3303	129.2**	1.523	45.6**	107.96	19.9**	0.319	8.71**
Hata	32	25.5		0.033		5.41		0.037	

*, %5; **, %1; AÇ; Arıtma Çamuru; B; Bor

Arıtma çamuru, bor x arıtma çamuru interaksyonun ağır metaller üzerine etkisi %1 düzeyinde önemli olduğu görülmektedir (Çizelge 4, 5).

Çizelge 5. Arıtma çamuru ve bor uygulamalarının börülçenin Cd, Co ve Cr içeriklerine etkisine ait varyans analiz sonuçları

V.K.	S.D.	Cd		Co		Cr	
		K.O.	F	K.O.	F	K.O.	F
B	3	0.1299	509.5**	0.287	5.63**	11.153	120.9**
AÇ	3	0.1120	439.1**	1.397	27.3**	15.205	164.8**
BxAÇ	9	0.0574	225.0**	0.321	6.28**	8.964	97.2**
Hata	32	0.0003		0.051		0.092	

**, %1 düzeyinde önemli; AÇ; Arıtma Çamuru; B; Bor

Çizelge 6'da görüleceği üzere bor uygulamaları ile börülçenin alüminyum içeriği kontrol bitkilerine göre artış göstermiştir. Kontrol bitkilerinde 69.49 mg/kg olan alüminyum içeriği 50 mg/kg, 100 mg/kg ve 200 mg/kg bor uygulamalarında sırasıyla 90.97 mg/kg, 136.57 mg/kg ve 157.99 mg/kg olarak belirlenmiştir. Arıtma çamuru uygulamaları ile börülçenin alüminyum içeriğinde önce artış sonra düşüş belirlenmiştir. Kontrol bitkilerinde 129.37 mg/kg olan alüminyum içeriği %2.5 arıtma çamuru uygulamasında 132.19 mg/kg 'a yükselmişken, %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamalarında sırasıyla 95.90 mg/kg ve 97.55 mg/kg 'a düşmüştür. Bor x arıtma çamuru interaksyonunun alüminyum içeriği üzerine etkisi incelendiğinde en düşük alüminyum içeriğine B₁₀₀xAÇ₀ uygulamasında, en yüksek alüminyum içeriğine ise B₀xAÇ₁₀ uygulamasında sırasıyla 54.21 mg/kg ve 201.57 mg/kg olarak belirlenmiştir (Şekil 2.A).

Bor uygulamaları ile börülçenin alüminyum içeriği kontrol bitkilerine göre artış göstermiştir. En yüksek alüminyum içeriği 200 mg/kg bor uygulamasında elde edilmiştir. Kontrole göre %127.5'lük bir artış gerçekleşmiştir. Bor uygulamaları ile alüminyum içeriğinde gözlenen artış toprakta kalsiyum alüminyum silikatlardaki alüminyum ile borun yer değiştirmesi (Parks ve Shaw, 1941) ve toprak çözeltisinin alınabilir alüminyum içeriğinin artışından kaynaklanmış olabilir. Bunun yanı sıra kök bölgesi pH'sında ki değişimin bitkilerin alüminyuma karşı direncini veya duyarlılığını etkilenmesi (Wagatsuma ve Ezoe, 1985) alüminyum içeriğinin artışına neden olmuş olabilir. Yapılan çalışmalarda bor uygulamalarının kök hücrelerinde alüminyumun birikimini azalttığı (LeNoble ve ark., 1996, Stass ve ark., 2007, Zhou ve ark., 2015) ve dolayısıyla alınan alüminyumların kök üstü organlara taşındığı ifade edebiliriz.

Çizelge 6. Arıtma çamuru ve bor uygulamalarının börülçenin ağır metal içeriklerine ait ortalamalar ve Oluşan LSD grupları

Uygulamalar	Al	As	Cd	Co	Cr	Pb	Ni
	mg/kg						
Bor, mg/kg							
0	69.49 D	3.060 A	0.185 B	0.963 A	4.039 B	2.880 A	30.588 A
50	90.97 C	1.556 C	0.093 C	0.834 AB	2.776 C	2.507 B	25.172 B
100	136.57 B	2.454 B	0.071 D	0.661 B	2.349 D	1.937 C	13.935 C
200	157.99 A	1.531 C	0.299 A	1.005 A	4.342 A	3.033 A	24.194 B
LSD (%5)	4.20	0.152	0.013	0.188	0.253	0.159	1.935
Arıtma çamuru, %							
0	129.37 A	1.139 C	0.071 D	0.494 C	2.234 D	1.823 D	12.818 C
2.5	132.19 A	1.893 B	0.091 C	0.796 B	3.667 B	2.116 C	22.136 B
5.0	95.90 B	2.858 A	0.215 B	0.854 B	4.815 A	3.081 B	30.054 A
10.0	97.55 B	2.713 A	0.271 A	1.320 A	2.791 C	3.337 A	28.880 A
LSD (%5)	4.20	0.152	0.013	0.188	0.253	0.159	1.935

A, B, C, D; Farklı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli fark vardır

Börülçenin arsenik içeriği üzerine bor uygulamaları düşüş yönünde etki etmiştir. Kontrol bitkilerinde 3.060 mg/kg olan arsenik içeriği 50 mg/kg, 100 mg/kg ve 200 mg/kg bor uygulamalarında sırasıyla 1.556 mg/kg, 2.454 mg/kg ve 1.531 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Arıtma çamuru dozları arttıkça börülçenin arsenik içeriği artış göstermiştir. Kontrol bitkisinde 1.139 mg/kg olan arsenik içeriği %2.5, %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamaları ile sırasıyla 1.893 mg/kg, 2.858 mg/kg ve 2.713 mg/kg olarak belirlenmiştir (Çizelge 6). Bor x arıtma çamuru interaksyonunu incelendiğinde en düşük arsenik içeriği 0.58 mg/kg ile B₅₀xAÇ₀ uygulamasında, en yüksek arsenik içeriği 4.462 mg/kg ile B₀xAÇ₁₀ uygulamasında belirlenmiştir (Şekil 2.B).

Arsenik içeriği bor uygulama dozları ile azalış göstermiş ve en düşük değer 200 mg/kg bor uygulamasında belirlenmiştir. Kontrole göre %99.9 oranında düşüş belirlenmiştir. Bor uygulamaları ile bitkinin arsenik içeriğinde azalmalar olduğu Zhu ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada bildirmişlerdir.

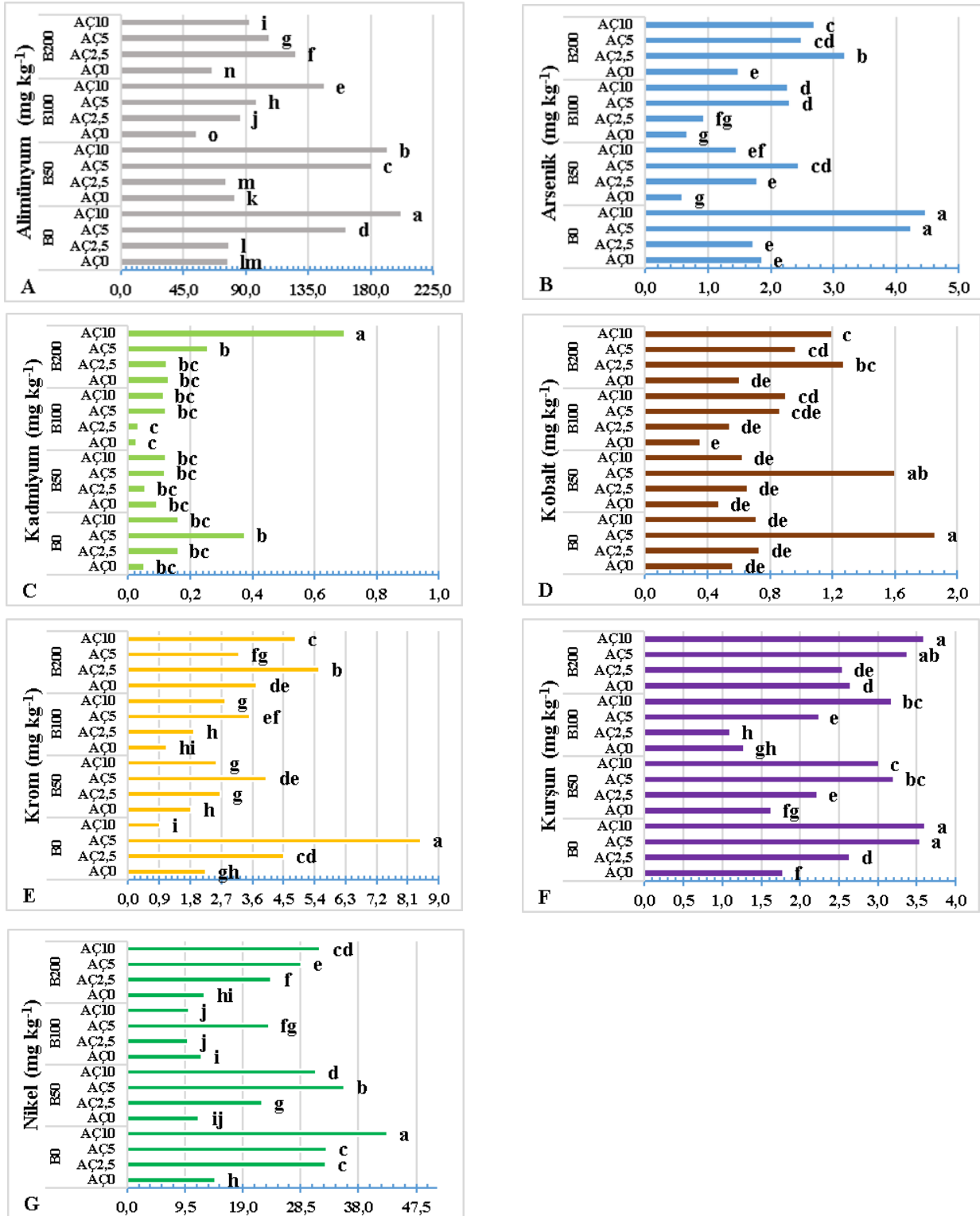
Çizelge 6'da görüleceği üzere bor uygulamaları ile börülçenin kadmiyum içeriği önce azalış sonra artış şeklinde etki etmiştir. Kontrol bitkilerinde 0.183 mg/kg olan kadmiyum içeriği 50 mg/kg ve 100 mg/kg bor uygulamalarında sırasıyla 0.093 mg/kg ve 0.071 mg/kg 'a düşmüşken, 200 mg/kg bor uygulamasında en yüksek kadmiyum içeriğine (0.299 mg/kg) ulaşmıştır. Arıtma çamuru uygulama dozu artıkça börülçenin kadmiyum içeriğinde artış belirlenmiştir. Kontrol bitkilerinde 0.071 mg/kg olan kadmiyum içeriği %2.5, %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamaları ile sırasıyla 0.091 mg/kg, 0.215 mg/kg ve 0.271 mg/kg'a yükselmiştir. Bor x arıtma çamuru interaksyonunun börülçenin kadmiyum içeriğine etkisi incelendiğinde B₁₀₀xAÇ₁₀ uygulamasında en düşük (0.024 mg/kg), B₂₀₀xAÇ₁₀ uygulamasında ise en yüksek (0.695 mg/kg) kadmiyum içerikleri elde edilmiştir (Şekil 2.C).

Kadmiyum içeriği ise bor uygulamaları ile kontrole göre önce azalış göstermiştir ve bu azalış %160.6 oranında gerçekleşmiştir. Ancak borun 200 mg/kg uygulamasında kadmiyum içeriği kontrole göre artış göstermiş ve artış oranı %61.6 düzeyinde gerçekleşmiştir. Yapılan çalışmada bor ve silisyum uygulamalarının kadmiyumun alımını ve birikimini engelledikleri bildirilmiştir (Chen ve ark., 2019). Borun son doz uygulamasında kadmiyum içeriğindeki artış muhtemelen bor dozunun yüksekliğinden dolayı bitkinin strese girmesinden dolayı kadmiyum alımını engelleyen gen ekspresyonunun (Wu ve ark., 2020) devre dışı kalmasına bağlı olarak borun kadmiyumu hücre duvarlarında ki şelatlama görevinin (Zhang ve ark., 2019) azalmasından kaynaklanmış olabilir.

Börülçenin kobalt içeriği bor uygulamalarının artışı ile önce azalış sonra artış şeklinde bir değişim göstermiştir. Kontrol bitkilerinde 0.963 mg/kg olan kobalt içeriği 50 mg/kg ve 100 mg/kg bor uygulamalarında sırasıyla 0.834 mg/kg ve 0.661 mg/kg olarak düşüş belirlenmişken, 200 mg/kg bor uygulamasında en yüksek değer olan 1.005 mg/kg kobalt içeriği tespit edilmiştir. Arıtma çamuru uygulamalarının artışı ile kobalt içeriğinde artış elde edilmiş ve en yüksek kobalt içeriği %10 arıtma çamuru uygulamasında 1.320 mg/kg olarak belirlenmiştir (Çizelge 6). Bor x arıtma çamuru interaksyonunun börülçenin kobalt içeriğine etkisi incelendiğinde en düşük kobalt içeriği 0.348 mg/kg ile B₁₀₀xAÇ₀ uygulamasında, en yüksek kobalt içeriği ise 1.856 mg/kg ile B₀xAÇ₅ uygulamasında belirlenmiştir (Şekil 2.D).

Kobalt içeriği bor uygulamaları ile önce azalış göstermiş ve %45.6 oranında gerçekleşmişken, 200 mg/kg bor uygulamasında artış elde edilmiştir. Bu artış oranı kontrole göre %4.3 düzeyinde gerçekleşmiştir. Bor ile kobaltın ilişkisi üzerine yapılan çalışmada borun kobalt hidroksit ile adsorpsiyona uğradığı (Kluczka ve ark., 2018) dolayısıyla bor dozları ile başlangıçta kobaltın içeriğinde gözlenen düşüş bu durumdan kaynaklanmış olabilir.

Bor uygulama dozu artıkça börülçenin krom içeriğinde kontrol bitkilerine göre önce düşüş sonra artış elde edilmiştir. Kontrol bitkilerinde 4.039 mg/kg olan krom içeriği 50 mg/kg ve 100 mg/kg bor uygulamalarında sırasıyla 2.776 mg/kg ve 2.349 mg/kg krom içeriği belirlenmişken, 200 mg/kg bor uygulamalarında ise en yüksek değer olan 4.342 mg/kg krom içeriği elde edilmiştir. Arıtma çamuru uygulamaları ile kontrol bitkilerine göre önce artış sonra düşüş belirlenmiştir. Kontrol bitkilerinde 2.234 mg/kg olan krom içeriği %2.5 ve %5 arıtma çamuru uygulamaları ile sırasıyla 3.667 mg/kg ve 4.815 mg/kg krom içeriği tespit edilmişken %10 arıtma çamuru uygulamasında 2.791 mg/kg krom içeriği belirlenmiştir (Çizelge 6). Bor x arıtma çamuru interaksyonunu incelediğimizde en düşük krom içeriği B₀xAÇ₁₀ uygulamasında 0.911 mg/kg, en yüksek krom içeriği ise B₀xAÇ₅ uygulamasında 8.479 mg/kg olarak belirlenmiştir (Şekil 2.E). Börülçenin krom içeriği kontrole göre borun 100 mg/kg uygulamasında %71.9 oranında düşüş göstermiş ancak 200 mg/kg bor uygulaması ise kontrolünde üzerinde artış sağlamış ve %7.5 oranında gerçekleşmiştir. Kurşun içeriği bor dozları ile önce azalmış ve bu oran %48.7 düzeyinde gerçekleşmişken, borun son doz (200 mg/kg) uygulamasında %2.6'lık bir artış belirlenmiştir.



Şekil 2. Arıtma çamuru x bor interaksiyonunun börülcenin ağır metal içeriği üzerindeki etkileri

Kurşun elementi, çevresel kirlilik bakımından önemli bir yere sahip olduğu kabul edilir (Kaya ve ark., 2019). Börülcenin kurşun içeriği bor uygulama dozlarının artışı ile kontrol bitkilerine göre önce azalış sonra artış göstermiştir. Kontrol bitkilerinde 2.880 mg/kg olan kurşun içeriği 50 mg/kg ve 100 mg/kg bor uygulamalarında sırasıyla 2.507 mg/kg ve 1.937 mg/kg kurşun içeriği belirlenmişken, 200 mg/kg bor uygulamalarında ise 3.033 mg/kg kurşun içeriği elde edilmiştir. Arıtma çamuru uygulama dozlarının artışı ile kurşun içeriği kontrol bitkilerine göre artış göstermiştir. Kontrol bitkilerinde 1.823 mg/kg olan kurşun içeriği %2.5, %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamaları ile sırasıyla 2.116 mg/kg, 3.081

mg/kg ve 3.337 mg/kg olarak belirlenmiştir (Çizelge 6). Börülçenin kurşun içeriği üzerine interaksiyonunun etkisi incelendiğinde en düşük kurşun içeriği $B_{100 \times A\check{C}_{2.5}}$ uygulamasında 1.092 mg/kg, en yüksek kurşun içeriği ise $B_{200 \times A\check{C}_{10}}$ uygulamasında 3.598 mg/kg olarak elde belirlenmiştir (Şekil 2.F).

Börülçenin nikel içeriği bor uygulama dozunun arşı ile kontrol bitkilerine göre azalış göstermiştir. Kontrol bitkilerinde 30.588 mg/kg olan nikel içeriği en düşük değere 100 mg/kg bor uygulamasında 1.935 mg/kg olarak belirlenmiştir. Arıtma çamuru uygulama dozunun arışına paralel olarak nikel içeriği de kontrol bitkilerine göre artış göstermiştir. En düşük nikel içeriği 12.818 mg/kg ile kontrol bitkilerinde, en yüksek nikel içeriği ise 30.054 mg/kg ve 28.880 mg/kg ile %5 ve %10 arıtma çamuru uygulamalarında belirlenmiştir (Çizelge 6). Nikel içeriği bor uygulama dozları ile kontrole göre genel olarak azalış göstermiş ve en belirgin düşüş 100 mg/kg bor uygulamasında %119.5 oranında gerçekleşmiştir (Çizelge 6). Börülçenin nikel içeriği üzerine bor x arıtma çamuru interaksiyonunun etkisi incelendiğinde en düşük nikel içeriklerine $B_{100 \times A\check{C}_{2.5}}$ ve $B_{100 \times A\check{C}_{10}}$ uygulamalarında sırasıyla 10.058 ve 10.180 mg/kg olarak belirlenmişken en yüksek nikel içeriği ise 42.703 mg/kg ile $B_0 \times A\check{C}_{10}$ uygulamasında belirlenmiştir (Şekil 2.G).

Arıtma çamuru uygulamalarının börülçenin ağır metal içeriğine etkisi incelendiğinde genel olarak arıtma çamuru dozlarının artışı ile As, Cd, Co, Cr, Pb ve Ni içerikleri lineer artış göstermiş, alüminyumda ise azalış olduğu belirlenmiştir. Kontrole göre en belirgin artışlar %10 arıtma çamuru uygulamalarında belirlenmiş ve kontrole göre sırasıyla arsenikte %138.2, kadmiyumda %281.7, kobaltta %167.2, kurşunda %83.0 ve nikelde %125.3 oranlarında belirlenmiştir. Kromda en yüksek artış %5 arıtma çamuru uygulamasında belirlenmiş ve bu oran %115.5 düzeyinde gerçekleşmiştir. Alüminyumda gözlenen azalış kontrole göre %10 arıtma çamuru uygulamasında ve %32.6 oranında gerçekleşmiştir. Bozkurt ve Yarılgaç (2003) ve Schiptsova ve ark (2020) arıtma çamuru uygulamaları ile toprakların ağır metal konsantrasyonlarında artış olduğu ve bunun sonucunda bitkilerinde ağır metal içeriklerinde yükselmeler olduğunu bildirmişlerdir. Bunun nedeni arıtma çamurlarının özellikle endüstriyel bölgelerden elde edilen arıtma çamurlarının yüksek oranda ağır metal içermelerinden kaynaklanmaktadır (Kowalik ve ark., 2021).

Börülçenin ağır metal içerikleri üzerine bor x arıtma çamuru interaksiyonu incelendiğinde en düşük alüminyum içeriğine $B_{100 \times A\check{C}_0}$ (54.2 mg/kg) uygulamasında, en yüksek değer ise $B_0 \times A\check{C}_{10}$ (201.6 mg/kg) uygulamasında ulaşılmış ve bu iki değer arasında %271.9'luk bir fark belirlenmiştir. Börülçenin arsenik içeriği bor uygulamaları yapılan ortamlarda arıtma çamurunun artışına rağmen azalış göstermiştir. En yüksek arsenik içeriği $B_0 \times A\check{C}_{10}$ (4.46 mg/kg) uygulamasında belirlenmişken, en düşük arsenik içeriğine $B_{50 \times A\check{C}_0}$ (0.58 mg/kg) uygulamasında belirlenmiş ve bu iki değer arasında %668.9 oranında fark elde edilmiştir. Ortamda bor uygulama dozlarının artışı arıtma çamuru uygulama dozları ile gerçekleşen kadmiyum içeriğinde düşüşü sağlayamamıştır. En düşük kadmiyum içeriğine $B_0 \times A\check{C}_0$ (0.050 mg/kg) uygulamasında, en yüksek kadmiyum içeriğine $B_{100 \times A\check{C}_{10}}$ (0.695 mg/kg) uygulamasında belirlenmiş ve bu iki değer arasında %1290'luk bir fark belirlenmiştir. Ortama bor uygulanmaması durumunda kobalt içeriği arıtma çamuru dozları ile artış göstermiştir. Bor uygulandığı koşullarda arıtma çamuru dozlarını artışı ile kobalt içeriğinde gözlenen artış düşmüştür. En düşük kobalt içeriğine $B_{100 \times A\check{C}_0}$ (0.348 mg/kg) uygulamasında, en yüksek kobalt içeriğine $B_0 \times A\check{C}_5$ (1.856 mg/kg) uygulamasında ulaşılmış bu iki değer arasında %433 oranında fark belirlenmiştir. Börülçenin krom içeriği bor uygulanmadığı koşullarda arıtma çamuru dozları ile artış göstermiştir. Ortama bor uygulandığı durumlarda krom içeriğinde gözlenen arıtma çamuru dozlarına bağlı artış düşük seviyelerde kalmıştır. En düşük krom içeriğine $B_{100 \times A\check{C}_0}$ (1.12 mg/kg) uygulamasında, en yüksek krom içeriğine $B_0 \times A\check{C}_5$ (8.48 mg/kg) uygulamasında ulaşılmış bu iki değer arasında %657

oranında fark belirlenmiştir. Bor uygulamalarının kurşun ve nikel içerikleri üzerine arıtma çamuru uygulamalarında gözlenen artışı belirgin bir şekilde değiştirememiştir. En düşük kurşun ve nikel içeriklerine B₁₀₀XAC_{2.5} (1.09 mg/kg/10.06 mg/kg) uygulamasında, en yüksek kurşun içeriğine B₀XAC₁₀ (3.60 mg/kg/42.70 mg/kg) uygulamasında ulaşılmış bu iki değer arasında %230 ve 324 oranlarında fark belirlenmiştir (Şekil 2). Arıtma çamuru uygulamalarında gözlenen ağır metal içeriklerindeki değişimler üzerine bor uygulamalarının etkisi muhtemelen borun bitki bünyesindeki görev aldığı birçok biyokimyasal olayları düzenlemesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 7. Korelasyon analiz sonuçları

	B	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Al	-0.409**	-									
As	-0.085	0.634***	-								
Cd	0.206	0.123	0.463***	-							
Co	0.040	0.472***	0.620***	0.495***	-						
Cr	0.168	0.161	0.494***	0.547***	0.788***	-					
Cu	-0.073	0.679***	0.802***	0.530***	0.552***	0.421**	-				
Mn	0.193	-0.277	0.077	-0.227	0.217	0.337*	-0.079	-			
Ni	-0.155	0.628***	0.683***	0.458**	0.461***	0.330*	0.776***	0.097	-		
Pb	0.017	0.648***	0.753***	0.631***	0.554***	0.461***	0.888***	-0.158	0.723***	-	
Zn	0.036	0.474***	0.787***	0.529***	0.604***	0.565***	0.823***	0.248	0.836***	0.707***	-
Fe	-0.038	0.202	0.184	-0.053	0.518***	0.463***	-0.082	0.450**	0.001	-0.074	0.074

Korelasyon analiz tablosu incelendiğinde bor ile alüminyum arasında negatif ilişki (r ;-0.409), alüminyum ile arsenik (r ;0.634), kobalt (r ;0.472), bakır (r ;0.679), nikel (r ;0.628), kurşun (r ;0.648) ve çinko (r ;0.474) arasında pozitif ilişki, arsenik ile kadmiyum (r ;0.463) kobalt (r ;0.620) krom (r ;0.494***) bakır (r ;0.802***), nikel (r ;0.683***), kurşun (r ;0.753***) ve çinko (r ;0.787***) arasında pozitif ilişki, kadmiyum ile kobalt (r ;0.495***), krom (r ;0.547***), bakır (r ;0.530***), nikel (r ;0.458***), kurşun (r ;0.631***) ve çinko (r ;0.529***) arasında pozitif ilişki, kobalt ile krom (r ;0.788***), bakır (r ;0.552***), nikel (r ;0.461***), kurşun (r ;0.554***), çinko (r ;0.604***) ve demir (r ;0.518) arasında pozitif ilişki, krom ile bakır (r ;0.421***), mangan (r ;0.337*), nikel (r ;0.330*), kurşun (r ;0.461***), çinko (r ;0.565***) ve demir (r ;0.463***) arasında pozitif ilişki, bakır ile nikel (r ;0.776***), kurşun (r ;0.888***) ve çinko (r ;0.823***) arasında pozitif ilişki, mangan ile demir (r ;0.450**) arasında pozitif ilişki, nikel ile kurşun (r ;0.723***) ve çinko (r ;0.836***) arasında pozitif ilişki ve kurşun ile çinko (r ;0.707***) arasında pozitif ilişki belirlenmiştir (Çizelge 7).

SONUÇ

Bor ve arıtma çamuru uygulamaların Börülçenin mikro element ve ağır metal içerikleri üzerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada analizi yapılan elementlerin değerlerinde arıtma çamuru ve bor uygulama dozlarının değişimine bağlı olarak element içeriklerinde belirgin artışlar ve azalışlar elde edilmiştir. Arıtma çamurunun neden olduğu yüksek ağır metal ve mikro element içerikleri bor dozları ile daha dengeli bir seviyelere gelmiştir. Ancak yüksek bor dozları da kimi elementlerin içeriklerinde yüksek artışlara neden olmuştur. Elde edilen veriler neticesinde arıtma çamuru uygulanmış alanlarda yetiştirilen bitkilerde bor uygulaması ile birlikte özellikle ağır metal içeriklerinde önemli iyileşmeler sağlanacağı öngörülmektedir. Bu çalışmanın, bundan sonra yapılacak tarla çalışmalarına ışık tutacağını düşünüyorum.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında verdikleri teknik bilgiler ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Murat TUNÇTÜRK, Doç. Dr. Ferit SÖNMEZ, Dr. Bulut SARGIN ve Ziraat Yüksek Mühendis Turgay BAŞDİNÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar Çatışması

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmiştir.

KAYNAKLAR

- Akat, H., Demirkan, Ç. G., Yokaş, İ. (2013). Atık Su Arıtma Çamurlarının Süs Bitkisi Yetiştiriciliğinde Kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(1), 129-141.
- Akat, H., Demirkan, G. Ç., Akat, Ö., Yağmur, B., Yokaş, İ. (2015). Arıtma Çamuru Uygulamalarının Limonium Sinuatum'compindi White' çeşidinde Bitki Gelişimi, Verim Ve Çiçek Kalitesi Üzerine Etkileri. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 52(1), 107-114.
- Allard, S., Gutierrez, L., Fontaine, C., Croué, J. P., & Gallard, H. (2017). Organic matter interactions with natural manganese oxide and synthetic birnessite. *Science of The Total Environment*, 583, 487-495.
- Scotti, I. A., Silva, S., & Baffi, C. (1999). Effects of fly ash pH on the uptake of heavy metals by chicory. *Water, Air, and Soil Pollution*, 109(1), 397-406.
- Boşgelmez, A., Boşgelmez, İ. İ., Savaşçı, S., Paslı, N. (2001). Ekoloji – II (Toprak), *Başkent Klise Matbaacılık*, Kızılay-Ankara.
- Bozkurt, M. A., & Yarılgaç, T. (2003). The effects of sewage sludge applications on the yield, growth, nutrition and heavy metal accumulation in apple trees growing in dry conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(5), 285-292.
- Budak, M., Günal, H. (2015). Tuzlu-Alkali Topraklarda Bor Konsantrasyonunun Uzaysal Değişkenliğinin Jeostatistiksel Analizi ve Haritalanması. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 52(2), 191-202.
- Chen, D., Chen, D., Xue, R., Long, J., Lin, X., Lin, Y., & Song, Y. (2019). Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants. *Journal of hazardous materials*, 367, 447-455.
- Chang, C., Sommerfeldt, T. G., & Entz, T. (1991). *Soil chemistry after eleven annual applications of cattle feedlot manure* (Vol. 20, No. 2, pp. 475-480). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Çulha, G., & Bozoğlu, H. (2016). Farklı kültürel uygulamalarla yetiştirilen amazon ve sırma börülce çeşitlerinin verim ve verim özellikleri. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 25(Özel Sayı-1), 177-183.
- Demirkan, G. Ç., Akat, H., & Yokaş, İ. (2014). Atık su arıtma çamurunun *Clarkia amoena* (Yer Açelyası) türünde bitki gelişimi ve çiçeklenme üzerine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 28(2), 49-58.
- Durak, Z. (2005). Adana Sofulu düzensiz çöp depolama alanında oluşan çöp sızıntı sularının bitki yetiştirilmesinde kullanılması. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*.
- Dordas, C., & Brown, P. H. (2005). Boron deficiency affects cell viability, phenolic leakage and oxidative burst in rose cell cultures. *Plant and soil*, 268(1), 293-301.
- Düring, R. A., & Gäth, S. (2002). Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where will we go?. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4), 544-556.
- Elrashidi, M. A., & O'connor, G. A. (1982). Boron sorption and desorption in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 46(1), 27-31.
- Emir, C. (2017). *Bor gübrelenmesinin kereviz (Apium graveolens L.) ve turp (Raphanus sativus L.) bitkilerinin verim ve bazı bitki özelliklerine etkisi* (Master's thesis, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- FAO (2021). Statistics Database (The Production and Production Area of Cowpea). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize> (Erişim Tarihi: 13.01.2023).
- Erdinç, U., Şen, O. F., Kılıç, Ö. B. D., Candan, N., Uzun, N., Üner, K., & Rahmanoğlu, N. (2017). Determination of soil plant available boron and boron nutritional status of tomato plants in major industrial tomato cultivated areas of Turkey. *Journal of Boron*, 2(3), 161-167.
- Fink, J. R., Inda, A.V., Tiecher, T., Barrón, V. (2016). Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciencia e agrotecnologia*, 40, 369-379.
- Gardiner, D.T., Miller, R.W. (2008). *Soils in Our Environment*. 11th Edition, Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle Hill, Ne Jersey, USA.

- Garzón, E., González-Andrés, F., García-Martínez, V. M., & de Paz, J. M. (2011). Mineralization and nutrient release of an organic fertilizer made by flour, meat, and crop residues in two vineyard soils with different pH levels. *Communications in soil science and plant analysis*, 42(13), 1485-1496.
- Günay, A (1992). *Özel Sebze Yetiştiriciliği* Cilt: 4. Çağ Matbaası, Ankara.
- Güneş, A.M., Alpaslan, A., İnal. (2013). *Bitki Besleme ve Gübreleme*. Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Yayın no:1581, Ders kitabı:533, Ankara.
- Greweling, T., Peech, M (1960). *Chemical Soil Tests*. Cornell University Agricultural Experiment Station, New York.
- Goldberg, S. (1997). Reaction of Boron with Soils (pp: 193: 35-48). Plant and oil. Proceedings, RW Bell and B. Rerkasem (Eds.), Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands.
- Hall, A. E., Cisse, N., Thiaw, S., Elawad, H. O., Ehlers, J. D., Ismail, A. M., ... & McWatters, K. H. (2003). Development of cowpea cultivars and germplasm by the Bean/Cowpea CRSP. *Field Crops Research*, 82(2-3), 103-134.
- Hall, A. E. (2004). Breeding for adaptation to drought and heat in cowpea. *European Journal of Agronomy*, 21(4), 447-454.
- Hanjra, M. A., Blackwell, J., Carr, G., Zhang, F., & Jackson, T. M. (2012). Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy. *International journal of hygiene and environmental health*, 215(3), 255-269.
- Hao, X., & Chang, C. (2002). Effect of 25 annual cattle manure applications on soluble and exchangeable cations in soil. *Soil science*, 167(2), 126-134.
- Idahosa, D. O., Alika, J. E., & Omoregie, A. U. (2010). Genotypic variability for agronomic and yield characters in some cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Nature and Science*, 8(3), 48-55.
- Jayathilake, C., Visvanathan, R., Deen, A., Bangamuwage, R., Jayawardana, B. C., Nammi, S., & Liyanage, R. (2018). Cowpea: an overview on its nutritional facts and health benefits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(13), 4793-4806.
- Kacar, B., İnal, A. (2008). *Bitki Analizleri*. Nobel Yayın No: 1241. Fen Bilimleri, 63(1).
- Kacar, B., Katkat, V. (1999). *Gübreler ve Gübreleme Tekniği*. Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayın No: 144, Vipaş Yayın No:20, 531s., Bursa
- Kacar, B., Katkat, V. (2010). *Bitki Besleme*. 5. Baskı, Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti, Kızılay-Ankara.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soil and Plants*. 4th Edition, CRC Press, New York. ISBN: 978-1-4200-9368.
- Kaya, A. R., Eryigit, T., Uslu, O. S., Gedik, O., & Tuncturk, M. (2019). Effects of lead on seed germination and seedling growth in different sesame (*sesamum indicum*) genotypes. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28, 6574-6579.
- Kooijman, A. M., Lubbers, I., & Van Til, M. (2009). Iron-rich dune grasslands: relations between soil organic matter and sorption of Fe and P. *Environmental Pollution*, 157(11), 3158-3165.
- Kowalik, R., Latosińska, J., & Gawdzik, J. (2021). Risk analysis of heavy metal accumulation from sewage sludge of selected wastewater treatment plants in Poland. *Water*, 13(15), 2070.
- Küçükhemek, M., Gür, K., Berktaş, A. (2006). Eysel Karakterli Atıksu Arıtma Çamurlarının Çim Bitkisi Ağır Metal (Mn, Zn, Ni, Cu, Cr, Pb, Cd) İçeriği Üzerine Etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 21(3), 1-12.
- Kluczka, J., Tórz, A., Łacka, D., Kazek-Kęsik, A., & Adamek, J. (2018). Boron removal by adsorption on Cobalt (II) Doped Chitosan bio-composite. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(5), 2039-2048.
- LeNoble, M. E., Blevins, D. G., & Miles, R. J. (1996). Prevention of aluminium toxicity with supplemental boron. II. Stimulation of root growth in an acidic, high-aluminium subsoil. *Plant, Cell & Environment*, 19(10), 1143-1148.
- McCauley, A., Jones, C., Jacobsen, J. (2009). *Soil pH and Organic Matter*. Nutrient management module, 8(2), 1-12.
- McCauley, A., Jones, C., Olson-Rutz, K. (2017). *Soil pH and Organic Matter*. Nutrient management module No. 8. US Department of Agriculture (USDA), Montana State University and Montana State University Extension.

- Oved, T., Shaviv, A., Goldrath, T., Mandelbaum, R. T., & Minz, D. (2001). Influence of effluent irrigation on community composition and function of ammonia-oxidizing bacteria in soil. *Applied and environmental microbiology*, 67(8), 3426-3433.
- Özbek, H., Kaya, Z., Gök, M., Kaptan, H. (2001). *Toprak Bilimi*. 5. Baskı. ÇÜ Ziraat Fakültesi Genel Yayın No 73, Ders Kitapları Yayın No A-16, Adana.
- Parks, R. Q., & Shaw, B. T. (1942). Possible mechanisms of boron fixation in soil: I. chemical. *Soil Science Society of America Journal*, 6(C), 219-223.
- Pan, Y., Wang, Z., Yang, L., Wang, Z., Shi, L., Naran, R., & Xu, F. (2012). Differences in cell wall components and allocation of boron to cell walls confer variations in sensitivities of Brassica napus cultivars to boron deficiency. *Plant and soil*, 354(1), 383-394.
- Plaster, E. J. (1992). *Soil Science and Management*. 2nd Edition, Delmar Publishers Inc., Albany, New York, USA
- Ren, L., Zhu, D., Cui, J., Liao, S., Geng, M., Zhou, W., & Hamilton, D. (2009). Plant availability of boron doped on iron and manganese oxides and its effect on soil acidosis. *Geoderma*, 151(3-4), 401-406.
- Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Yang, G., Rizwan, M., Ali, S., & Wang, X. (2021). Boron supply alleviates cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by enhancing cadmium adsorption on cell wall and triggering antioxidant defense system in roots. *Chemosphere*, 266, 128938.
- Schiptsova, N., Larionov, G., Vasilyev, O., Fadeeva, N., & Terentyeva, M. (2020, November). Effect of sewage sludge application on heavy metals contamination in soil and carrot. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 604, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.
- Sür, A., Sür, Ö., Yiğitbaşıoğlu, H. (2001). *Mineraller ve Kayaçlar*, Bilim Yayıncılık, Ankara.
- Strauch, D. (1991). Survival of pathogenic micro-organisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge. *Revue scientifique et technique (International Office of Epizootics)*, 10(3), 813-846.
- Stass, A., Kotur, Z., & Horst, W. J. (2007). Effect of boron on the expression of aluminium toxicity in Phaseolus vulgaris. *Physiologia Plantarum*, 131(2), 283-290.
- Torri, S., Alvarez, R., & Lavado, R. (2003). Mineralization of carbon from sewage sludge in three soils of the Argentine pampas. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(13-14), 2035-2043.
- Wagatsuma, T., & Ezoe, Y. (1985). Effect of pH on ionic species of aluminum in medium and on aluminum toxicity under solution culture. *Soil science and plant nutrition*, 31(4), 547-561.
- Walakley, A., & Black, C. A. (1934). Estimation of organic carbon by chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wu, X., Riaz, M., Yan, L., Du, C., Liu, Y., & Jiang, C. (2017). Boron deficiency in trifoliolate orange induces changes in pectin composition and architecture of components in root cell walls. *Frontiers in plant science*, 8, 1882.
- Wu, X., Song, H., Guan, C., & Zhang, Z. (2020a). Boron alleviates cadmium toxicity in Brassica napus by promoting the chelation of cadmium onto the root cell wall components. *Science of The Total Environment*, 728, 138833.
- Wu, X., Song, H., Guan, C., & Zhang, Z. (2020b). Boron mitigates cadmium toxicity to rapeseed (Brassica napus) shoots by relieving oxidative stress and enhancing cadmium chelation onto cell walls. *Environmental Pollution*, 263, 114546.
- Zhang, Z. H., Zhou, T., Tang, T. J., Song, H. X., Guan, C. Y., Huang, J. Y., & Hua, Y. P. (2019). A multiomics approach reveals the pivotal role of subcellular reallocation in determining rapeseed resistance to cadmium toxicity. *Journal of experimental botany*, 70(19), 5437-5455.
- Zhang, F. S., Yamasaki, S., & Nanzyo, M. (2002). Waste ashes for use in agricultural production: I. Liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals. *Science of the total Environment*, 284(1-3), 215-225.
- Zhu, Y., Sun, G. X., Chen, Z., Hu, Y., & Zheng, R. L. (2018). Effects of boron treatment on arsenic uptake and efflux in rice seedlings. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 39(7), 3400-3408.
- Zhou, X. X., Yang, L. T., Qi, Y. P., Guo, P., & Chen, L. S. (2015). Mechanisms on boron-induced alleviation of aluminum-toxicity in Citrus grandis seedlings at a transcriptional level revealed by cDNA-AFLP analysis. *PLoS One*, 10(3), e0115485.