

Kıvırcık Salata (*Lactuca sativa* var. *crispa*) Bitkisinin Bazı Özellikleri Üzerine Ağır Metal Uygulamalarının Etkileri

Sevinç Kiran¹, Şebnem Kuşvuran², Fatma Özkay¹, Ş. Şebnem Ellialtıoğlu³

¹Toprak Gübre ve Su Kaynakları Araştırma Enstitüsü, Ankara

²Çankırı Karatekin Üniversitesi, Kızılırmak Meslek Yüksekokulu, Çankırı

³Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Ankara

e-posta: sevinç.kiran@gtthb.gov.tr

Özet

Bu çalışmada, ağır metal içeriği yüksek sulama suyu ile sulanmış kıvırcık salata bitkisinin bazı morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimi ortaya koymak amaçlanmıştır. Kontrollü sera koşullarında yürütülen çalışmada tohum ekiminden itibaren 30 günlük bitkiler çeşitli dozlarda ağır metallerin karışımını içeren 4 farklı sulama suyu (Kontrol: 0 ppm; I. Karışım: 0.2 ppm Cu + 0.01 ppm Cd + 5 ppm Pb + 2 ppm Zn; II. Karışım: 0.4 ppm Cu + 0.02 ppm Cd + 10 ppm Pb + 4 ppm Zn, III. Karışım: 0.8 ppm Cu + 0.04 ppm Cd + 20 ppm Pb + 8 ppm Zn) ile sulanmaya başlanmıştır. Bitkiler 4 hafta boyunca tarla kapasitesi düzeyinde sulandıktan sonra bu sürenin sonunda hasat edilerek örnekler alınmıştır. İncelenen parametreler; yeşil aksam ve kök yaş ağırlığı, yeşil aksam ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu, yaprak alanı, MDA miktarı, süperoksit dismutaz ve glutatyon redüktaz enzim aktiviteleri olarak belirlenmiştir. I ve II. Karışım ağır metal uygulamaları kıvırcık salata bitkisinin yeşil aksam ve kök yaş- kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu, yaprak alanı değerlerinde farklılık oluşturmazken, III. Karışım değerlerde düşüşlere neden olmuştur. MDA miktarı ile SOD ve GR enzim aktiviteleri, ağır metal uygulamaları ile birlikte bitkilerde artış göstermiştir. Antioksidatif enzim sisteminin ağır metal stresine karşı koruma konusunda etkin olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kıvırcık salata (*Lactuca sativa* var. *crispa*), Cu, Cd, Pb, Zn

The Effects of Heavy Metal Applications on Some Characteristics of Lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) Plants

Abstract

In this study, it was aimed to demonstrate the effect of heavy metal applications on some morphological, physiological and biochemical characteristics of lettuce. In studies conducted under controlled greenhouse conditions, lettuce plants subjected to four different levels heavy metal irrigation at 30 days after sowing (Control: 0 ppm; I. mixture: 0.2 ppm Cu + 0.01 ppm Cd + 5 ppm Pb + 2 ppm Zn; II. mixture: 0.4 ppm Cu + 0.02 ppm Cd + 10 ppm Pb + 4 ppm Zn; III. mixture: 0.8 ppm Cu + 0.04 ppm Cd + 20 ppm Pb + 8 ppm Zn). Four weeks after at heavy metal treatment, young plants were harvested and the shoot fresh and dry weight, root fresh and dry weight, shoot and root length, and leaf areas, MDA amount, superoxide dismutase (SOD) and glutathione reductase (GR) activities were determined. The lettuce plants were adversely affected by heavy metal applications. In parallel to increase the dose, heavy metal mixtures led to a reduction in values of fresh and dry weight of shoot and root, stem and root length, leaf area. MDA amounts and antioxidative enzyme activities increased in plants irrigated with water containing a mixture of heavy metal. As the results of study, heavy metal stress caused decreasing plant growth, and development however increasing membrane damage, and SOD and GR activities with increasing heavy metal doses. On the other hands, these results indicate that lettuce plants respond to heavy metal induced oxidative stress by enzymatic defense systems.

Keywords: Lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*), Cu, Cd, Pb, Zn

Giriş

Çeşitli insan aktiviteleri sonucu üretilen gerek sanayi gerekse de şehirsel atıkların (pil, akü, termometre, kurşun tetraetil gibi benzine katılan maddeler vs.) içinde bol miktarda bulunan ağır metaller, hem çevre kirliliğine neden olmakta hem de insan sağlığını ciddi ölçüde tehdit etmektedirler. Bu tehdit ekosistemlerin birinci derece üreticileri

konumundaki bitkiler üzerinde çok daha fazladır. Fiziksel özellik açısından ağır metal tanımı, yoğunluğu 5 g/cm³'ten daha yüksek olan metaller için kullanılmaktadır. Bu grubun içine kurşun, kadmiyum, krom, demir, kobalt, bakır, nikel, civa ve çinko olmak üzere 60'tan fazla metal girmektedir (Stobrawa ve ark., 2008). Bazı ağır metaller bitki beslenmesi için önemli oldukları halde yüksek konsantrasyonlarda organizmaya girdikten sonra kolay kolay

atılamazlar. Bu ağır metaller bitkide toksik etki göstererek bitkiyi strese sokmakta bazı fizyolojik aktiviteler üzerinde inhibitör olarak rol oynamaktadırlar (Fernandes ve Henriques, 1991). Bunlar bakır (Cu), demir (Fe), mangan (Mn), molibden (Mo), çinko (Zn), kobalt (Co) ve nikel (Ni)'dir. Bununla birlikte kadmiyum (Cd), krom (Cr), civa (Hg) ve kurşun (Pb) gibi ağır metaller de çeşitli yollardan tarımsal ekosisteme girmektedirler. Ağır metallerin bitkideki zararlı etkileri derişimlerine ve çözünabilirliklerine bağlı olarak değişmekle birlikte bitki dokularında aşırı birikimi mineral beslenme, transpirasyon, fotosentez, enzim aktivitesi, nükleik asit yapısı, klorofil biyosentezi, çimlenme gibi canlılık ilgili çeşitli olaylarda değişime neden olabilmektedir (Bergman, 1992; Costa ve Morel, 1994).

Yıllık ortalama 172.207 ton üretim değeriyle kıvrıcık salata, bolca tüketilen, mineral maddeler bakımından zengin, insanların yaş sebbe gereksinimini büyük ölçüde karşılayan bir sebzedir (Anonymous, 2014). Ağır metal ile kirlenmiş alanlarda ve ağır metal içerikli sularla kıvrıcık salata yetiştiriciliğinin giderek artması bitkisel gelişimi olumsuz yönde etkilemekte ve elde edilen ürünlerin sağlık açısından risk taşımasına yol açmaktadır.

Bu çalışmada, kıvrıcık salata bitkilerine uygulanan ağır metal (Cu, Cd, Pb ve Zn) dozu ve farklı kombinasyonlarının, bitkilerdeki bazı morfolojik ve biyokimyasal özellikler üzerinde oluşturduğu değişiklikler incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Araştırma, kontrollü sera koşullarında (23-25°C ve %50-55 nispi nem) yürütülmüş ve bitkisel materyal olarak kıvrıcık salata (*Lactuca sativa* var. *crispa*) bitkisinin orta erkenci standart kıvrıcık Green Wave çeşidi kullanılmıştır. Kıvrıcık salata tohumları, içinde toprak karışımı (1:1:1= kum: çiftlik gübresi: orta bünyeli toprak) bulunan yaklaşık 7.5 L hacmindeki plastik saksılara ekilmiştir. Gelişen bitkiler 4 hafta boyunca tarla kapasitesi düzeyinde sulanmıştır. Bitkiler 30 günlük olduklarında, ağır metal içerikli sulama suyu uygulamalarına geçilmiştir. Uygulamalar; 1) Kontrol, 2) I. Karışım (0.2 ppm Cu + 0.01 ppm Cd + 5 ppm Pb + 2 ppm Zn (sulama suyunda maksimum izin verilen iz element konsantrasyonlarının 2 katı: Anonymous, 1985), 3) II. Karışım (0.4 ppm Cu + 0.02 ppm Cd + 10

ppm Pb + 4 ppm Zn), III. Karışım (0.8 ppm Cu + 0.04 ppm Cd + 20 ppm Pb + 8 ppm Zn) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneme süresince saksıların tamamı tarla kapasitesi düzeyinde sulanmıştır. Sera koşullarında stres uygulaması yapılan bitkilerin 4 hafta boyunca gelişimi sağlandıktan sonra bitkiler hasat edilerek ölçüm ve analizler için örnek alınmıştır. Bitki yeşil aksam ve köklerde yaş ve kuru ağırlıkları, kök ve gövde boyları, yaprak alanları, lipid peroksidasyonu ve antioksidatif enzim (süperoksit dismutaz, glutatyon redüktaz) miktarlarını belirlemek üzere ölçüm ve analizler yapılmıştır.

Bitkilerde yeşil aksam ve kök kısımları birbirinden ayrılarak yaş ve kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Her genotipten tesadüfi olarak seçilen 4'er bitkinin yeşil aksam ve kök kısımları hassas terazide tartılarak g olarak yaş ağırlıkları belirlenmiş, daha sonra 65°C'de etüvde 48 saat kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları da gram olarak belirlenmiştir (Daşgan ve Koç, 2009; Kuşvuran, 2010). Her tekerrürden alınan bitkilerin kök ve gövde boyları milimetrik bir cetvel yardımıyla, yaprak alanları ise Licor LI-3000A model yaprak alan ölçer ile ölçülmüştür.

Lipid peroksidasyonunun ölçümü Lutts ve ark. (1996) tarafından anlatılan yöntem izlenerek gerçekleştirilmiş ve hücre zarlarının hasar görmesinin bir ifadesi olan lipid peroksidasyonunun bir ürünü olan malondialdehit (MDA) miktarı, µmol/g taze ağırlık (T.A.) olarak belirlenmiştir.

Enzim analizleri için 1 g taze yaprak ve doku örnekleri sıvı azot içerisinde porselen havanlarda ezildikten sonra, içinde 0.1 mM Na-EDTA bulunan 50 mM'lık 10 ml'lik fosfor tampon çözeltisi (pH:7.6) ile homojenize edilmiş, 15 dk 15000 g'de santrifüj edildikten sonra ölçüm yapılmaya kadar +4°C sıcaklıkta tutulmuştur. Ölçümler Analytik Jena 40 model spektrofotometrede gerçekleştirilmiştir. Enzim ölçümünde son hacimler, tampon çözeltisiyle tamamlanmıştır. Süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesi NBT'nin (nitro blue tetrazolium kloridin) ışık altında O₂ tarafından indirgenmesi yöntemine göre; glutatyon redüktaz (GR) aktivitesi Çakmak ve Marschner (1992) ve Çakmak (1994)'e göre 340 nm'de (E=6.2 mM cm⁻¹) NADPH'nın oksidasyonu esas alınarak belirlenmiştir.

Tesadüf parselleri deneme desenine göre 3 tekrarlı olarak kurulan denemelerden elde edilen sayısal değerler varyans analizine tabi tutulmuş, LSD testi yapılmış ve farklılık dereceleri %5 düzeyinde harflendirme yoluyla gösterilmiştir. Bu amaçla MSTAT-C (Freud ve ark., 1989) paket programından yararlanılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Ağır metal stresinin yeşil aksam-kök yaş ağırlıkları, yeşil aksam kuru ağırlığı, kök-gövde boyları ve yaprak alanı, MDA miktarı ve glutatyon redüktaz enzim aktiviteleri üzerine etkileri istatistiksel bakımından önemli ($p < 0.05$), süperoksit dismutaz enzim aktivitesi üzerine etkisi ise önemsiz bulunmuştur ($p > 0.05$).

Ağır metal uygulamalarının kıvrıcık salata bitkisinin yeşil aksam yaş ağırlık değerleri üzerine olan etkisi incelendiğinde; I. ile II. karışımın, kontrol bitkileriyle istatistiksel bakımdan aynı düzeyde olacak şekilde bir miktar artışa yol açtığı, ancak en yüksek seviyede ağır metal dozlarını içeren III. karışımın toksik etki yaratarak yeşil aksam yaş ağırlık değerlerinde önemli seviyede düşüşlere neden olduğu belirlenmiştir (59.50, 55.33 ve 55.17 g/bitki) (Şekil 1). En düşük yeşil aksam yaş ağırlık değeri ise III. karışım uygulanmış bitkilerde saptanmıştır (43.83 g/bitki). Nitekim Manivasagaperumal ve ark. (2011), düşük seviyede bakırın, Rout ve Das (2003) düşük seviyede çinkonun bitkilerde bitki gelişimini bir miktar artırabileceğini ifade ederken; Vaillant ve ark. (2005) ve Ghani ve ark. (2010), yüksek konsantrasyonlardaki bakır, kadmiyum ve çinkonun bitkilerde strese neden olarak, klorofil biyosentezi, fotosentetik aktivite, mineral beslenme, membran geçirgenliği gibi çok sayıda fizyolojik olayı olumsuz yönde etkileyerek bitki yaş ağırlıklarında azalmalar meydana getirebileceğini bildirmişlerdir.

Düşük dozda ağır metaller içeren I. karışımın kıvrıcık salata bitkilerinin yeşil aksam kuru ağırlık değerleri üzerinde de yaş ağırlık değerlerinde olduğu önce bir miktar artışa yol açtığı, ancak daha sonra ağır metal dozlarındaki artışa paralel olarak yeşil aksam kuru ağırlık değerlerinde azalmalara neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 1). Kontrol bitkilerine oranla en yüksek yeşil aksam kuru ağırlık değerleri I. karışım ağır metal uygulanan bitkilerde belirlenirken, en düşük yeşil aksam kuru ağırlık değerleri ise III. karışım uygulanan

bitkilerde saptanmıştır (8.65 g/bitki). Akıncı ve ark. (2010) domatestede kurşun stresinin, Bouazizi ve ark. (2010) fasulyede bakır stresinin, yeşil aksam kuru ağırlık değerlerinde düşüşlere yol açtığını bildirmişlerdir.

Kıvrıcık salata bitkilerinin kök yaş ağırlık değerleri, I. ile II. karışım uygulamaları ile birlikte kontrol bitkilerine oranla istatistiksel bakımdan farklılık yaratacak düzeyde artışa yol açarken, III. karışım kök yaş ağırlığında dikkati değer şekilde azalmalara neden olmuştur (Şekil 1). En yüksek kök yaş ağırlıkları istatistiksel bakımdan aynı grupta yer alacak şekilde; I. ile II. karışım uygulamalarında belirlenmiştir (7.17 ve 7.00 g/bitki). En düşük kök yaş ağırlığı değerini ise II. karışım uygulaması vermiştir (4.67 g/bitki). Kurşun stresine maruz kalmış bitkilerin kök yaş ağırlıklarında azalma meydana geldiği; Fargaşová (1994) ve El-Ghamery ve ark. (2003) tarafından da çinkonun kök hücrelerinde birikerek mitoz bölünmeyi engellediğini ve ayrıca hücrelerin ligninleşmesini sağlayarak kök gelişimini azalttığı bildirilmiştir.

Kök kuru ağırlığı bakımından da ortaya çıkan farklılıklar, istatistiksel olarak önemli düzeyde olmakla birlikte elde edilen veriler Şekil 1'de gösterilmiştir. Kök kuru ağırlık değerleri, I. ve II. karışım uygulamaları ile birlikte kontrol bitkilerine göre artış göstermiş (0.50 g/bitki ile 0.48 g/bitki), ancak en yüksek ağır metal dozlarını içeren III. karışım ile birlikte önemli düzeyde azalmıştır (0.31 g/bitki). Nitekim mısırdaki, sarımsakta, çin lahanasında ve mercimekte kurşunun uygulama dozuna ve süresine bağlı olarak diğer organlara göre kökte daha fazla biriktiği, normal bölünen hücre sayısını engelleyerek kök ve fide gelişimini etkilediği, böylece kök ile gövdenin kuru ağırlıklarını azalttığı belirlenmiştir (Liu ve ark., 1994; Jiang ve Liu, 2000; Kıran ve Munzuroğlu, 2004; Ergün ve Öncel, 2010).

II. karışımın içermiş olduğu ağır metal dozları kıvrıcık salata bitkilerinin yaprak alanlarında kontrol bitkilerine oranla istatistiksel bakımdan önemli düzeyde artışları sağlayacak şekilde düşük seviyelerde kalmış ve bitkilerde toksik etki yaratmamıştır (Şekil 1). Ancak doz artışının yüksek seviyelere ulaşması yaprak alanındaki azalmaları kaçınılmaz kılmış, kontrol bitkilerine göre en düşük değerler III. karışım uygulanan bitkilerde saptanmıştır (133.42

cm²/bitki). Sharma ve Dubey (2005) ile Manivasagaperumal ve ark. (2011) da, kurşun ve bakır elementlerinin hücre turgoru ve hücre duvarı stabilitesini, stoma hareketlerini ve yaprak alanını azaltabileceğini ifade etmişlerdir.

Ağır metal koşulları altında kıvrıkcık salata bitkisinin gövde ve kök boylarında meydana gelen değişimler Şekil 1'de gösterilmiştir. Buna göre; stres uygulanan gruplar içerisinde en yüksek gövde boyları II. karışım uygulamasında belirlenmiş (19.67 cm), I. ve II. karışım uygulanan bitkilerin gövde boylarındaki değerler kontrol bitkileri ile istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır. Dozların arttığı III. karışım'da ise gövde boyu diğer uygulamaların tümünden istatistiksel olarak daha düşük bulunmuştur (16.33 cm). Vassilev ve ark. (2002) kadmiyum, Manivasagaperumal ve ark. (2011) bakır elementlerinin, hücre bölünmesini olumsuz yönde etkilediğini ve gövde uzunluğunda azalmalara yol açtığını bildirmişlerdir. Kontrol bitkilerine oranla kök uzunluklarında, I ile II. karışım uygulamaları istatistiksel bakımdan aynı grupta yer alacak şekilde ve önemli düzeyde artış meydana getirmiştir (15.67 ile 15.00 cm). Stres altındaki bitkilerin köklerinde bir miktar uzama artışı ortaya çıkmıştır. Ancak yüksek dozda ağır metal içeren III. karışım, kıvrıkcık salata bitkilerinde toksik etki göstererek kontrol bitkilerine göre kök boylarında azalmaya yol açmıştır. Yüksek dozdaki kadmiyum elementinin sürgün gelişimini de olumsuz yönde etkilediği Salt ve ark. (1995); kurşunun bitki köklerinde sürgünlere göre daha fazla biriktiği ve hücre bölünmesini engellediği de Verma ve Dubey (2003) tarafından önceki yıllarda rapor edilmiştir.

Lipid peroksidasyon ürünü olan MDA miktarı ile, SOD ve GR enzim aktivitelerinin de incelendiği çalışmada, ağır metal uygulamalarından elde edilen sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Ağır metal stresi, en yüksek MDA değerini III. karışım uygulanan bitkilerde vermiştir (7.39 $\mu\text{mol/g T.A.}$). Kontrol bitkileri ise 2.30 $\mu\text{mol/g T.A}$ değeri ile en düşük MDA değerine sahip olmuştur. Ağır metal stresi bitki hücrelerinde hasara yol açmış ve MDA miktarları bakımından önemli düzeyde artışlar meydana getirmiştir. Ağır metallerin serbest radikal oluşumuna yol açtığı, bu yolla membran lipitlerinin oksidatif yıkımına neden olduğu, bilinmektedir (Zengin ve Munzuroğlu, 2005).

Shah ve ark. (2001) kadmiyum stresi, Verma ve Dubey (2003) kurşun stresi, Dey ve ark. (2007) kadmiyum ve bakır stresi koşullarında MDA miktarlarının arttığını bildirmişlerdir.

Süper oksit dismutaz (SOD), glutatyon redüktaz (GR) gibi enzimler oksidatif strese karşı etkin antioksidatif enzimler arasında yer almaktadır. Cu, Mn, Fe ve Zn toksisitesi koşullarında SOD enzim aktivitesi uyarılmaktadır (Prasad ve ark., 1999). Çalışmamızda SOD enzim aktivitesi bakımından ortaya çıkan değişim istatistiksel bakımdan önemlilik derecesinde bulunmamış olsa da, ağır metal uygulamaları ile birlikte artışlar meydana gelmiştir. En yüksek SOD değeri, II. karışım uygulamasında elde edilmiştir (155.34 U dak⁻¹ mg⁻¹ T.A.) (Şekil 2). Kontrol bitkileri ise en düşük SOD ölçümüne sahip olmuştur (102.22 U dak⁻¹ mg⁻¹ T.A.). Morela ve ark. (2007) marulda, Bharwana ve ark. (2014) pamukta kurşun stresinin, İslam ve ark. (2014) buğdayda çinko stresinin SOD enzim aktivitesinde artışa yol açtığını ifade etmişlerdir.

GR, kloroplastlarda olduğu gibi mitokondri ve sitoplazmada da bulunmakta ve askorbat-glutatyon döngüsünün hız sınırlayıcı son basamağını katalizlemektedir (Foyer ve ark., 1997). Ağır metal uygulamaları genel olarak GR enzim aktivitesinde artışlara yol açmıştır. GR enzim aktivitesi, en yüksek değeri II. karışım uygulamasında (131.67 $\mu\text{mol dak}^{-1}$ mg⁻¹ T.A.), en düşük değeri ise I. karışım uygulamasında vermiştir (94.00 $\mu\text{mol dak}^{-1}$ mg⁻¹ T.A.). Çalışmadan elde edilen bulgular Dey ve ark. (2007), Dinakar ve ark. (2008), ve Grata'o ve ark. (2008)'in bulgularıyla paralellik göstermektedir.

Sonuç

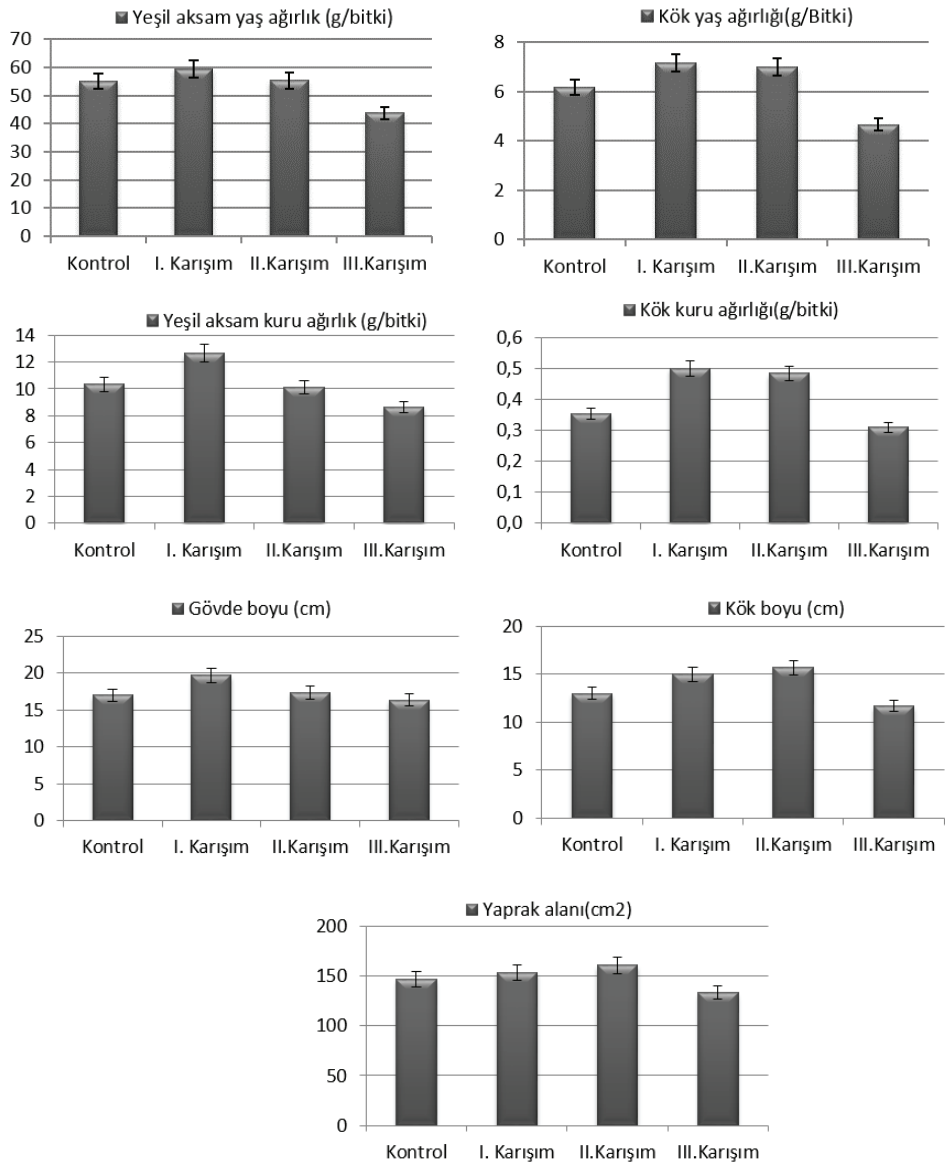
Kıvrıkcık salata bitkisine farklı oranlarda Cu, Cd, Pb ve Zn ağır metalleri karışımlarının uygulandığı bu çalışmada; uygulanan doz miktarının arttığı kombinasyonda belirgin olarak yeşil aksam ve köklerin yaş ve kuru ağırlıklarında, kök ve gövde boyunda, yaprak alanı değerlerinde düşüş meydana gelmiş, MDA miktarı ve antioksidatif enzim aktivitelerinde artış belirlenmiştir. Kısa süreli ve düşük dozdaki ağır metal bileşimleri bitkilerin bazı morfolojik ve biyokimyasal özelliklerinde uyarıcı etki yapmış ve gelişmede artışlara neden olmuştur. Ancak sürenin uzaması veya dozun artmasıyla birlikte ağır metallerin hasar verici etkileri

açıkça görülmeye başlamıştır. Bitkilerin, pek çok abiyotik stres faktöründen korunmada olduğu gibi, ağır metal stresinin olumsuz etkisini hafifletmek için antioksidatif enzim aktivitelerini etkin çalıştırmak yolunu kullandıkları izlenimi edinilmiştir.

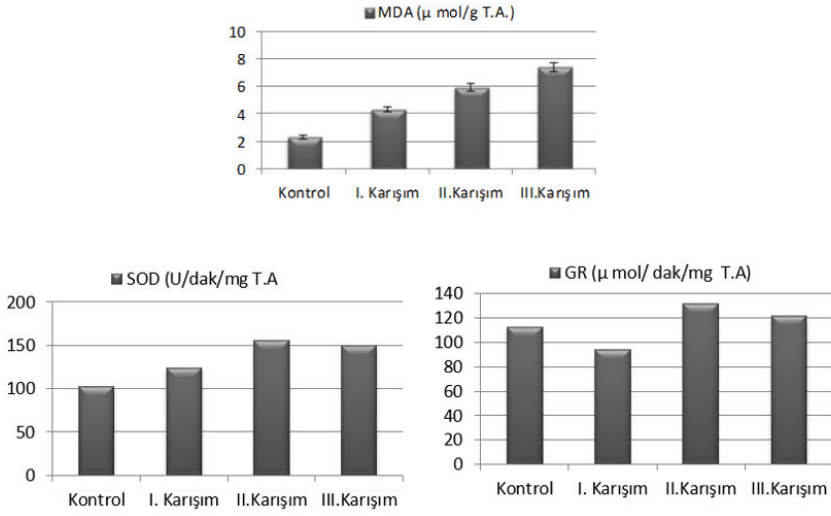
Kaynaklar

- Akinci, I.E., Akinci, S., Yılmaz, K., 2010. Response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to lead toxicity: Growth, element uptake, chlorophyll and water content. *African J. of Agricultural Research* 5(6):416-423.
- Anonymous, 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper. 29, Rev.1. Rome. Erişim: Mart 2014.
- Anonymous, 2014. Türkiye İstatistik Kurumu <http://tuikrapor.tuik.gov.tr/reports>. Erişim: Mart 2015.
- Bergmann, W., 1992. Nutritional Disorders of Plants: Development, Visual and Analytical Diagnosis. New York, 695s.
- Bharwana, S.A., Ali, S., Farooq, M.A., Iqbal, N., Hameed, A., Abbas, F., Ahmad, M.S.A., 2014. Glycine betaine-induced lead toxicity tolerance related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes suppressed lead uptake and oxidative stress in cotton. *Turkish Journal of Botany*, 38: 281-292.
- Bouazizi, H., Jouli, H.A., El Ferjani, E., 2010. Copper toxicity in expanding leaves of *Phaseolus vulgaris* L.: antioxidant enzyme response and nutrient element uptake. *Ecotoxicology and Envir. Safety*. 73(6): 1304-1308.
- Cakmak, I., Marschner, H., 1992. Magnesium deficiency and highlight intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol.*, 98: 1222-1226.
- Cakmak, I., 1994. Activity of ascorbate-dependent H₂O₂ scavenging enzymes and leaf chlorosis are enhanced in magnesium and potassium deficient leaves, but not in phosphorus deficient leaves. *J. Exp. Bot.*, 45:1259-1266.
- Costa, G., Morel, J.L., 1994. Water relations, gas exchange and amino acid content in Cd-treated lettuce. *Plant Physiology and Biochemistry*, 32(4):561-570.
- Daşgan, H.Y., Koç, S., 2009. Evaluation of salt tolerance in common bean genotypes by ion regulation and searching for screening parameters. *Journal of Food, Agriculture Environment*, 7(2): 363-372.
- Dey, S.K., Dey, J., Patra, S., Pothal, D., 2007. Changes in the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in wheat seedlings exposed to cadmium and lead stress. *Braz. J. Plant Physiol.*, 19(1):53-60.
- Dinakar, N., Nagajyothi, P.C., Suresh, S., Udaykiran, Y., Damodharam, T., 2008. Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedlings. *Journal of Environmental Sciences* 20: 199-206.
- El-Ghamery, A.A., El-Kholy, M.A., El-Yousser, A., 2003. Evaluation of cytological effects of Zn²⁺ in relation to germination and root growth of *Nigella sativa* L. and *Triticum aestivum* L. *Mutation Research*, 537: 29-41.
- Ergün, N., Öncel, 2010. Effects of cadmium and zinc on growth and some biochemical parameters of lentil seedlings (*Lens esculenta* L.). C.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi. 31(2): 63-72.
- Fargašová, A., 1994. Effect of Pb, Cd, Hg, As and Cr on germination and root growth of *Sinapis alba* seeds. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 52: 452-456.
- Fernandes, J.C., Henriques, F.S., 1991 Biochemical, physiological and structural effects of excess copper in plants. *Bot. Rev.*, 57: 246-273.
- Foyer, C.H., Lopez-Delgado, H., Dat, J.F., Scott, I.M., 1997. Hydrogen peroxide and glutathione-associated mechanisms of acclamatory stress tolerance and signalling. *Physiol. Plant*, 100: 241-254.
- Freed, R., Einensmith, S.P., Guets, S., Reicosky, D., Smail, V.W., Wolberg, P., 1989. User's guide to MSTAT-C, an analysis of agronomic research experiment. Michigan State University, USA.
- Ghani, A., Shah, A.U., Akhtar, U., 2010. Effect of lead toxicity on growth, chlorophyll and lead (Pb) content of two varieties of maize (*Zea mays* L.). *Pakistan J. Nutrition* 9(9): 887-891.
- Gratao, P.L., Monteiro, C.C., Antunes, A.M., Peres, L.E.P., Azevedo, R.A., 2008. Acquired tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Micro-Tom) plants to cadmium-induced stress. *Ann. Appl. Biol.*, 153: 321-333.
- Islam, F., Yasmeen, T., Ali, Q., Ali, S., Arif, M.S., Hussain, S., Rizvi, H., 2014. Influence of *Pseudomonas aeruginosa* as PGPR on oxidative stress tolerance in wheat under Zn stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104: 285-293.
- Jiang, W., Liu, D., 2000. Effects of Pb²⁺ on root growth, cell division, and nucleolus of *Zea*

- mays L. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 65:786-793.
- Kıran, Y., Munzuroğlu, Ö., 2004. Mercimek (*Lens culinaris* Medik.) tohumlarının çimlenmesi ve fide büyümesi üzerine kurşunun etkileri. F.Ü. Fen ve Mühendislik Dergisi 16(1): 1-9.
- Kuşvuran, Ş., 2010. Kavunlarda kuraklık ve tuzluluğa toleransın fizyolojik mekanizmaları arasındaki bağlantılar. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., 355s., Adana.
- Liu, D.H., Jiang, W.S., Wang, W., Zhao, F.M., Lu, C. 1994. Effects of lead on root growth cell division and nucleolus of *Allium cepa*. Environ. Pollut. 86: 1-4.
- Lutts, S., Kinet, J.M., Bouharmont, J., 1996. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. Ann. Bot., 78: 389-398.
- Manivasagaperumal, R., Vijayarangan, P., Balamurugan, S., Thiagarajan, G., 2011. Effect of copper on growth, dry matter yield and nutrient content of *Vigna radiata* (L.) Wilczek. Journal of Phytology 3(3):53-62.
- Morela, V.R.F., Capraru, G., Bara, I., Arteni, V., 2007. Lead acetate effect on superoxide dismutase activity in *Lactuca sativa* L., Mona and Syrena cultivars. Genetics and Molecular Biology. 8:115-118.
- Prasad, K.V.S.K., Paradha, S.P., Sharmila, P., 1999. Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in *Brassica juncea*. Environ. Exp. Bot. 42: 1-10.
- Rout, G.R. , Das, P., 2003.Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I.Zinc. Agronomie 23:3-11.
- Salt, D., Price, R., Pickering, I., Raskin, I., 1995. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. Plant Physiol., 109:1427-1433.
- Shah, K., Kumar, R.G., Verma, S., Dubey, R.S., 2001. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. Plant Science, 161:1135-1144.
- Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Lead toxicity in plants. Braz. J. Plant Physiol., 17(1):35-52.
- Stobrawa, K., Lorenc-Plucińska, G., 2008. Thresholds of heavy metal toxicity in cuttings of european black poplar (*Populus nigra* L.) determined according to antioxidant status of fine roots and morphometrical disorders. Sci. of the Total Environ., 390: 86-96.
- Vaillant, N., Monnet, F., Hitmi, A., Sallanon, H., Coudret, A., 2005. Comparative study of responses in four *Datura* species to a zinc stress. Chemosphere, 59:1005-1013.
- Vassilev, A., Lidon, F.C., Matos, M.C., Ramalho, J.C., Yordanov, I., 2002. Photosynthetic performance and content of some nutrients in cadmium-and copper-treated barley plants. Journal of Plant Nutrition., 25(11):2343-2360.
- Verma, S., Dubey, R.S., 2003. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. Plant Sci., 164:645-655.
- Zengin, K.F., Munzuroğlu, Ö., 2005. Fasulye fidelerinin (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Strike) klorofil ve karotenoid miktarı üzerine bazı ağır metallerin (Ni^{++} , Co^{++} , Cr^{+++} , Zn^{++}) etkileri. Fırat Üniv. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 17: 164-172.



Şekil 1. Ağır metal stresi uygulanan marul bitkilerinin yeşil aksam-kök yaş ağırlığı, yeşil aksam-kök kuru ağırlığı, gövde-kök boyu ve yaprak alanı içeriğinde meydana gelen değişimler



Şekil 2. Ağır metal stresi uygulanan marul bitkilerinin MDA miktarı, SOD ve GR aktivitelerinde meydana gelen değişimler