



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOLOJİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YEREL KARACADAĞ ÇELTİK (*Oryza sativa* L.) ÇEŞİDİNDE KURŞUN
STRESİ ÜZERİNE SALİSİLİK ASİT ve METİL JASMONAT
UYGULAMALARININ ETKİLERİ**

Hıdır ALTUN

**Haziran – 2024
BATMAN**

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOLOJİ ANA BİLİM/ANA SANAT DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YEREL KARACADAĞ ÇELTİK (*Oryza sativa* L.) ÇEŞİDİNDE KURŞUN
STRESİ ÜZERİNE SALİSİLİK ASİT ve METİL JASMONAT
UYGULAMALARININ ETKİLERİ

Hıdır ALTUN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Pınar KARAKUŞ ORCAN

Haziran - 2024
BATMAN

TEZ KABUL VE ONAYI

Hıdır ALTUN tarafından hazırlanan “Yerek Karacadağ Çeltik (Oryza sativa L.) Çeşidinde Kurşun Stresi Üzerine Salisilik Asit ve Metil Jasmonat Uygulamalarının Etkileri” adlı tez çalışması 04/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü BİYOLOJİ Ana Bilim/Ana Sanat Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Çiğdem IŞIKALAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Pınar KARAKUŞ ORCAN.

Üye

Prof. Dr. Filiz AKBAŞ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Hıdır ALTUN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YEREL KARACADAĞ ÇELTİK (*Oryza sativa* L.) ÇEŞİDİNDE KURŞUN STRESİ ÜZERİNE SALİSİLİK ASİT ve METİL JASMONAT UYGULAMALARININ ETKİLERİ

Hıdır ALTUN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Biyoloji Ana Bilim Dalı

Danışman: Üyesi Pınar KARAKUŞ ORCAN

2024, 68 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Pınar KARAKUŞ ORCAN
Prof. Dr. Filiz AKBAŞ
Prof. Dr. Çiğdem IŞIKALAN

Bu tez çalışmasında ekzojen metil jasmonat (MeJA) ve salisilik asidin (SA) kurşun (Pb) metali stresi altındaki çeltik bitkilerinde fotosentetik pigment içeriği (klorofil-a, klorofil-b, toplam karotenoid), prolin, malondialdehit (MDA), toplam protein içerikleri üzerindeki etkiler ve ağır metal toksisitesini azaltma yeteneği araştırılmıştır. Deneyde farklı konsantrasyonlardaki Pb (0, 100, 400 ppm) stresine maruz bırakılan Karacadağ çeltik çeşidi Hazro popülasyonuna ait bitkilere, yapraktan püskürtme yoluyla 2 farklı konsantrasyonda metil jasmonat (MeJA) ve salisilik asitin (SA) ayrı ayrı (2mM ve 20mM SA ile 20µM ve 100 µM MeJA) ve kombine etkileri (2mM SA+20µM MeJA) uygulanmıştır. Çeltik bitkilerinde fotosentetik pigment içerikleri için sonuçlar değerlendirildiğinde; Pb stres faktörü uygulamasında (100 ve 400 ppm) klorofil-a içeriğinde kontrol grubuna göre anlamlı artışların olduğu görülmüştür. Pb toksisitesine yanıt olarak meydana gelen bu artış, bitkinin klorofil-a içeriği bakımından stresten etkilenmediğini göstermiştir. Klorofil-b ve toplam karotenoid içeriğinde Pb'nin her iki konsantrasyonu için, kontrol grubuna göre azalmanın olduğu ve dolayısıyla bitkinin bu bakımından Pb toksisitesinden etkilendiği tespit edilmiştir. İncelenen her üç fotosentetik pigment içeriği için en yüksek artış iki elisitörün birlikte uygulandığı (2 mM SA+20 µM MeJA) gruptaki bitkilerden elde edilmiştir. 400 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile oluşturulan gruplar düşük MDA içeriği göstermiş ve en yüksek azalmanın 0,537 µmol/g TA ile 2 mM SA+20 µM MeJA uygulanan bitkilerde olduğu görülmüştür. Bu durum, bu uygulamada lipit peroksidasyonun engellendiğini ve Pb stresine karşı koyarak MDA içeriğini düşürdüğü sonucu çıkarılmasına yol açmıştır. 400 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin tek başına uygulaması toplam fenolik madde içeriğinde artışa yol açarken, flavonoid madde içeriklerinde azalmalar kaydedilmiştir. İki parametrede de yüksek konsantrasyondaki Pb uygulamasında elisitörlerin kombine uygulaması içeriklerde önemli oranda artışla sonuçlanmıştır. 100 ppm Pb stres faktörüne maruz

bırakılan eltik bitkilerinde elisitör uygulaması prolin içeriğini konsantrasyona bağlı olarak değişen şekillerde etkilerken, 400 ppm Pb stresinde prolin içeriğinde anlamlı artışlar olmuştur. Tüm uygulamalar içerisinde toplam protein içeriği yönünden en yüksek artış 8,325 mmol/g TA ile 400 ppm Pb+2 mM SA+20 M MeJA uygulanan deney grubunda elde edilmiş ve bu grupta toplam protein miktarı bakımından en yüksek iyileşme sağlanmıştır.400 ppm Pb stres faktörüne karşı eltik bitkilerine uygulanan elisitörlerin konsantrasyon arttıķa Pb içeriğinde anlamlı düşüşler olmuş ve bu düşüşlerde MeJA'nın Pb toksisitesine karşı koymada SA'dan daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu tez çalışmasında, özellikle de yüksek Pb konsantrasyonunda (400 ppm), MeJA+SA'nın birlikte uygulamaları MDA miktarını azaltıp fotosentetik pigmentler, toplam protein, prolin ve sekonder metabolitleri iyileştirerek Pb'nin toksik etkisini indüklemiş ve incelenen tüm bu özellikler yönünden en iyi sonuçların elde edilmesine yol açmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ağır metal, kurşun stresi, metil jasmonat, *Oryza sativa* L., salisilik asit.



**ABSTRACT
MS THESIS**

**TEZ EFFECTS OF SALICYLIC ACID AND METHYL JASMONATE
APPLICATIONS ON LEAD STRESS IN LOCAL KARACADAĞ
RICE (*Oryza sativa* L.) VARIETY**

Hıdır ALTUN

Batman University Graduate Education Institute

Biology Department of Science

Advisor: Asst. Prof. Dr. Pınar KARAKUŞ ORCAN

2024, 68 Pages

Jury

Asst.Prof.Dr. Pınar KARAKUŞ ORCAN

Prof. Dr. Filiz AKBAŞ

Prof. Dr. Çiğdem IŞIKALAN

In this thesis the effects of exogenous methyl jasmonate (MeJA) and salicylic acid (SA) on photosynthetic pigment content (chlorophyll-a, chlorophyll-b, total carotenoid), proline, malondialdehyde (MDA), total protein contents and their ability to reduce heavy metal toxicity in rice plants under lead (Pb) metal stress were investigated. In the experiment, two different concentrations of MeJA and SA were applied separately (2 and 20 mM SA; 20 and 100 µM MeJA) and in combination (2mM SA+20µM MeJA) to the plants of Hazro population of Karacadağ rice variety exposed to different concentrations of Pb (0, 100, 400 ppm) stress by foliar spraying. When the results for photosynthetic pigment contents in rice plants are evaluated; it was observed that there were significant increases in the chlorophyll-a content in Pb stress factor application (100 and 400 ppm) compared to the control group. This increase in response to Pb toxicity showed that the plant was not affected by stress in terms of chlorophyll-a content. It was determined that there was a decrease in chlorophyll-b and total carotenoid content for both concentrations of Pb compared to the control group, indicating that the plant was affected by Pb toxicity in this respect. The highest increase for all three photosynthetic pigment contents examined was obtained from plants in the group where two elicitors were applied together (2 mM SA + 20 µM MeJA). At 400 ppm Pb toxicity, groups formed by the addition of elicitors showed low MDA content, and the highest decrease was observed in 2 mM SA+20 µM MeJA treated plants with 0.537 µmol/g TA. This led to the conclusion that lipid peroxidation was prevented in this application and reduced MDA content by counteracting Pb stress. At 400 ppm Pb toxicity, the application of elicitors alone led to an increase in total phenolic content, while flavonoid content decreased. In both parameters, the combined application of elicitors at high concentrations of Pb resulted in a significant increase in the contents. In rice plants exposed to 100 ppm Pb stress factor, elicitor application affected the proline content in varying ways depending on the concentration, while there were significant

increases in proline content at 400 ppm Pb stress. Among all applications, the highest increase in total protein content was obtained in the experimental group treated with 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA with 8.325 mmol/g TA and the highest improvement in terms of total protein content was achieved in this group. There were significant decreases in the Pb content of the elicitors applied to rice plants against the 400 ppm Pb stress factor as the concentration increased, and it was determined that MeJA was more effective than SA in counteracting Pb toxicity in these decreases. In conclusion, in this thesis, especially at high Pb concentrations (400 ppm), MeJA+SA co-application induced the toxic effect of Pb by decreasing MDA and improving photosynthetic pigments, total protein, proline and secondary metabolites and led to the best results in terms of all these properties studied.

Keywords: Heavy metal, lead stress, methyl jasmonate, *Oryza sativa* L., salicylic acid.



ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı ile Biyoloji Bölümü Araştırma Laboratuvarında yürütülmüştür.

Çalışmalarında her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösterip destek olan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Pınar KARAKUŞ ORCAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında ki yardımlarından dolayı yüksek lisans öğrencileri Ayşe Gül DEMİR, Rıfat ÇİFTÇİ ve Adem YILMAZ' a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında destekleri ve sevgileri ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli eşim Kübra ve çocuklarım Davut ve Yakup'a sevgilerimi sunuyorum.

Ayrıca bu süreçte sağladıkları imkân ve desteklerinden dolayı görev yaptığım Bismil Şair Cahit Sıtkı Tarancı Anadolu Lisesi Müdürleri, Müdür Yardımcıları ve Öğretmenlerine teşekkürlerimi sunarım.

Bu yüksek lisans tezini, hayatını ilme adayan ve beni bu şiarla yetiştiren, ilme olan ilgimin ve sevgimin nedeni babam, Davut ALTUN' a ithaf ediyorum.

**Hıdır ALTUN
BATMAN - 2024**

İÇİNDEKİLER

ÖZET .	IV
ÖNSÖZ.....	VIII
İÇİNDEKİLER	IX
SİMGELER VE KISALTMALAR	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Kurşun ve Bitkiler Üzerindeki Etkileri	2
1.2. Salisilik Asit (SA).....	3
1.3. Metil Jasmonat (MeJA)	4
1.4. Çeltik ve Yerel Karacadağ Çeltiği	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	23
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	43
5.1. Sonuçlar	43
5.2. Öneriler	44
ÖZGEÇMİŞ.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

ABA	:	Absisik Asit
As	:	Arsenik
Cd	:	Kadmiyum
Co	:	Kobalt
CO ²	:	Karbon dioksit
Cr	:	Krom
Cu	:	Bakır
DNA	:	Deoksiribo nükleik asit
Fe	:	Demir
G	:	Gram
gTA	:	Gram Taze Ağırlık
Hg	:	Civa
H ₂ O ₂	:	Hidrojen Peroksit
HNO ₃	:	Nitrik asit
IAA	:	İndol-3-Asetik asit
JA	:	Jasmonik Asit
K	:	Potasyum
kg	:	Kilogram
lt	:	Litre
MDA	:	Malondialdehit
MeJA	:	Metil Jasmonat
Mg	:	Magnezyum
Mn	:	Mangan
Mo	:	Molibden
mM	:	Milimolar
ml	:	Mililitre
Na	:	Sodyum
NaOCl	:	Sodyum hipokloritte
Na ₂ CO ₃	:	Sodyum karbonat
NH ₄	:	Amonyum
Ni	:	Nikel
NO	:	Nitrik Oksit
PAL	:	Fenilalanin Amonyum Liyaz
Pb	:	Kurşun
PbCl ₂	:	Kurşun Klorür
[Pb(NO ₃) ₂]	:	Kurşun nitrat
ppm	:	Milyonda bir birim
Pro	:	Prolin
PS	:	Fotosistem
rpm	:	1 dakikadaki devir sayısı
ROS	:	Reaktif Oksijen Türleri
SA	:	Salisilik Asit
SM	:	Sekonder Metabolit
TBA	:	Thiobarbiturik asit
TCA	:	Trikoloroasetik asit
Zn	:	Çinko
µm	:	Mikrometre

1. GİRİŞ

Bitkilerin gelişimlerini olağan bir şekilde sürdürebilmeleri için, maruz bırakıldıkları durumların en uygun seviyede olması gerekmektedir (Çulha, 2011). Olumsuz koşullarda üreme döngüsünün tamamlanmasını, hayatta kalmayı sağlayan bir dizi sistem geliştirmiş olan bitkiler (Weng ve ark., 2021) sürekli optimum çevre koşullarında olmayabilir ve bu koşullar bitkide baskı yada diğer bir isimlendirme ile “stres” oluşturabilir. Dolayısıyla bitkilerin büyüme, gelişme ve metabolik faaliyetleriniolumsuz yönde etkileyen her türlü faktöre “**stres**” denir (Gürel ve Avcıoğlu, 2001).

Stresi oluşturan faktörler biyotik faktörler (hayvanlar, bitkiler vb.) ve abiyotik faktörler (su, sıcaklık, mineraller, ağır metaller vb.) olarak sınıflandırılır (Larcher, 1995). Abiyotikfaktörlerin yol açtığı stres, küresel çapta ürün başarısızlığının temel sebebidir ve birçok ürün için verimi yaklaşık % 50 azaltmaktadır. Bu baskının tarım endüstrisinin sürdürülebilirliğini tehdit ettiği yapılan farklı çalışmalarla da ifade edilmiştir (Naz ve ark., 2022; Saeed ve ark., 2022; Saini ve ark., 2022; Hussain ve ark., 2023).

Abiyotik stres faktörlerinin en önemlilerinden biri ağır metal toksisitesidir. Atomik yoğunluğu 6 g/cm^3 'ten büyük olan metal ve metaloitler grubu olarak tanımlanan ağır metallerden; bakır (Cu), çinko (Zn), molibden (Mo), nikel (Ni), demir (Fe), mangan (Mn) ve kobalt (Co), bitkilerin gelişmesi için mutlak gerekli olan mikro besin elementleri arasında yer aldıkları halde, yüksek yoğunluklarda bitkide toksik etkiye yol açmaktadır. Cıva (Hg), kadmiyum (Cd), Arsenik (As) ve kurşun (Pb) gibi ağır metaller ise bitki büyüme ve gelişimi için gerekli olmayıp, aksine toksik etki gösteren elementlerdir (Raskin ve ark., 1994; Rascio ve Navari-Izzo, 2011).

Endüstriyel faaliyetler, araçların egzozlarından çıkan gazlar, maden kaynakları ve işletmeleri, tektonik, gübreleme ve ilaçlama gibi işlevler ağır metal kirliliğine sebep olmaktadır (Zengin ve Munzuroğlu, 2004; Seven ve ark., 2018). Canlı bir organizmaya zarar verme seviyesi ağır metalin miktarına, kimyasal çeşitlerine ve maruz kalma süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bunun yanı sıra ağır metal toksisitesine karşı bitkilerin göstermiş oldukları tolerans derecesi, bitkinin ve elementin türüne, strese maruz kalma süresine ve şiddetine, strese maruz kalan doku veya organın yapısına bağlı

olarak farklılık göstermektedir (Yerli ve ark., 2020). Ağır metallerin bitki doku ve hücrelerinde toplanması; mineral besin maddelerinin alımı, enzim aktivitesi, nükleik asit yapısı, transpirasyon, fotosentez, klorofil oluşumu ve çimlenme gibi birçok doğal olarak işleyen olayları olumsuz yönde etkilemektedir (Kıran ve Şahin, 2015). Ağır metallere maruz kalan bitkilerde ayrıca oksijen metabolizmasında baskı meydana gelebilir ve bu durum hücrenin zarar görmesine yol açar (Yadav, 2010). Ağır metal toksisitesi ile başa çıkmak için, bitkiler fizyolojik ve biyokimyasal, morfolojik ve moleküler tepkiler dahil olmak üzere bazı uyum mekanizmaları geliştirmiştir (Chen ve ark., 2020).

Günlük yaşamımızın en önemli besin kaynağı tahıllar da diğer bitkiler gibi yaşam döngülerinde pek çok olumsuz çevresel koşullara maruz kalırlar (Gullet ve ark., 2019). Dünyada, hemen hemen bir buçuk milyar hektar tarım alanı bulunmakta ve bunun yaklaşık yedi milyar dekarına tahıl ekilmektedir. Bunlardan çeltik, bütün tahıl ürünleri içinde ortalama % 22'sini karşılayarak üretimde %28'lik pay almaktadır (Donduran, 2014). Ekolojik açıdan birçok bölgesi çeltik yetiştiriciliğine uygun olan ülkemizde, çeltik yetiştiriciliğinin bölgelere göre dağılımı incelendiğinde; Güneydoğu Anadolu, Batı ile Doğu Marmara ve Batı Karadeniz en önemli çeltik yetiştirme bölgeleri olarak bilinmektedir (Anonim, 2011; TUİK, 2013).

1.1. Kurşun ve Bitkiler Üzerindeki Etkileri

Kurşun (Pb), insanlar tarafından birkaç bin yıldır kullanılan (Gupta ve ark., 2010), tüketimi azalmaya devam eden ve ana kullanımı pillerde olan bir ağır metaldir (Külahcı, 2020). Kurşun toprakta, suda, havada ve aynı zamanda canlı organizmalarda bulunur, çevrede yaşayan organizmaları etkileyen en yaygın ve toksik elementtir (Shahid ve ark., 2011).

Kurşun, genellikle kontamine topraklarda bulunurlar ve insanlar üzerinde olumsuz sağlık etkilerine neden olurlar (Balali-Mood ve ark., 2021). Çevredeki kirlenmeleri esas olarak endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanırken, ana doğal kaynaklar ise kaya ayrışması ve yanardağ patlamasıdır (da Silva ve ark., 2020). Arsenikten sonra en tehlikeli kirletici olarak kabul edilen kurşun biyolojik olarak parçalanamayan bir elementtir ve bu nedenle toprak, hava ve su yoluyla bitkilere, insanlara bulaşabilir (Natasha ve ark., 2020)

Çalışmalar toksik metallerin metabolik yollardaki anahtar enzimlerin ortaya çıkmasını, moleküler düzeyde değiştirebildiğini ve protein profillerinde değişikliklere neden olabileceğini göstermiştir (Singh ve ark., 2016). Pb de enzim aktivitesini etkileyerek çeşitli metabolik süreçlerde yer alan çok sayıda enzimin işlev bozukluğuna neden olabilir (Mitra ve ark., 2020). Pb, bitki büyümesine, klorofil içeriğine, dolayısıyla fotosentezin azalmasına (Dere, 2019) yol açabilen yani karbondioksit özümleme hızına müdahale eden ve bitkilerde oksidatif stres ve DNA hasarına neden olan bir metaldir. Ayrıca doğal koşullar altında bitkiler tarafından kolayca emilen, toksik etkisi olan bir ağır metaldir (Kumar ve Prasad, 2018).

Tüm bu nedenlerden dolayı günümüzde de kurşun kaynaklı toksik etki, toksisitenin nedenleri, toksisiteye karşı oluşturulan fizyolojik ve moleküler cevaplar ile tolerans mekanizmalarının ortaya çıkmasına yönelik araştırmalar önemini hala korumakta olup, yaygın bir şekilde devam etmektedir.

1.2. Salisilik asit (SA)

Bitkilerin savunma sistemi, dâhili ve harici stres faktörlerinin sebep olduğu olumsuzluklarla mücadele etmek için Sekonder (ikincil) Metabolit (SM) adı verilen kimyasal maddelerin üretimini artırır (Danova ve Pistelli, 2022; Jakovljevic ve ark., 2022). Bitkisel organizmalar, lignin ve pigmentlerin üretimi, allelopati, biyotik ve abiyotik stres faktörlerine verilen yanıtların kontrolü de dâhil olmak üzere bir dizi metabolik aktivitede rol oynadığı gösterilen ve bir fenolik bileşik olan Salisilik Asiti (SA; 2- hidroksibenzoik asit) sentezler (Talaat ve Todorova, 2022).

Ticari olarak sentetik üretimi 1874 yılında Almanya'da başlayan SA ilk olarak Raffaele Piria tarafından 1838'de söğüt ağacının (*Salix spp.*) kabuğunda keşfedilmiştir (Sharma ve ark., 2020). Kavramsal olarak, bitkilerin immünolojik tepkisinde bir sinyal molekülü olarak hizmet eden SA, bitkinin gelişimi ve yaşlanmasında, stomaların açılıp kapanmasında, hücre büyümesi, solunum, çiçeklenme, tohum çimlenmesi, fide gelişimi, hastalık direnci gibi büyümenin çeşitli yönlerini düzenleyen ve geniş bir fenolik bileşik spektrumu olarak tanımlanmıştır (Rodas-Junco ve ark., 2020).

Büyüme ve gelişmenin düzenlenmesinde önemli bir bitkisel hormon olarak görev yapan SA, bir dizi savunma proteininin sentezlenmesi de dahil olmak üzere, bitki

fizyolojisini ve metabolizmasını etkileyerek çeşitli çevresel stres faktörlerinden kaçınma ve kısmen de olsa üstesinden gelme konusunda bitkilere destek sağlamaktadır (Vicente ve Plasencia, 2011; Cai ve ark., 2015). Ayrıca, SA hem reaktif azot türlerinin hem de reaktif oksijen türlerinin etkili bir temizleyicisidir (Saleem ve ark., 2021). Bitki içinde kloroplastlarda ve sitoplâzmada üretilen SA (Hassoon ve Abduljabbar, 2019), kütikül eksikliği olan bitkilerdeki kütikül mumları ile desteklenen apoplast yoluyla etki alanına teslim edilir (Lim ve ark., 2020).

Çok sayıdaki çalışmaya göre Salisilik Asit (SA), hastalıklara karşı direnci kontrol ederek zorlu ortamlarda bitki gelişimini ve büyümesini teşvik eder (Bawa ve ark., 2019; Narasimhamurthy ve ark., 2019), DNA hasarını azaltır ve oksidatif stresi azaltmak için antioksidanları artırır. SA ayrıca kurşun toksisitesini düzenleyerek abiyotik stres faktörlerine karşı toleransın artmasına (Kaur ve ark., 2021) sebep olmaktadır.

1.3. Metil Jasmonat (MeJA)

“Abiyotik ve biyotik stres durumunda büyük bir sinyal molekülü” olarak tanımlanmış olan ve jasmonik asidin (JA) uçucu bir metil esteri olan MeJA, bitkilerde morfolojik fonksiyonlardan, moleküler fonksiyonlara birçok olayda önemli bir rol oynar. Uçucu doğası ve biyolojik membranlar yoluyla nüfuz etme kapasitesi nedeniyle MeJA, bitkilerde intra ve inter-iletişimi (bitkinin kendi hücreleri arasındaki ve diğer bitkilerle iletişimi) kolaylaştırabilen, savunma tepkilerini, özellikle de antioksidan sistemleri düzenleyen önemli bir bitkisel hormon olarak kabul edilir (Murthy ve ark. 2014; Ho ve ark., 2020).

Jasmonatlar, böcek zararlılarına, patojenlere ve abiyotik streslere karşı bitki direncinde kritik bir rol oynar (Ali ve Baek, 2020). Bitkilere karşı indüklenen bu direncin sonuçları, birçok tahıl ürünüde de görüldüğü gibi tohum çimlenmesinde ve çimlenme sonrası fide gelişiminde gecikmeler şeklinde ortaya çıkabilir (Lahuta ve ark., 2018). Bitki elisitörlerinin tohum tedavileri üzerine olan etkisi domates (*Solanum lycopersicum* L.) 'de, lahana (*Brassica oleracea*) ve çeltikte (*Oryza sativa* L.) yapılan çalışmalar ile araştırılmıştır. Bu çalışmalar, tohumların JA veya MeJA ile tohum muamelesinin bitkilerdeki otçullara karşı direnci artırabileceğine dair raporlar

sağlamıştır (Paudel ve ark., 2014; Haas ve ark., 2018; Kraus ve Stout, 2019). JA ayrıca, büyüme kontrolü, ikincil metabolizma ve tuz stresi, kuraklık, soğuk stresi ile ilişkili sinyaller de dâhil olmak üzere bitki büyümesi ve gelişiminde önemli roller oynar (Pauwels ve ark., 2008).

Bitkilerde fenolik asitlerde dahil ikincil metabolitlerin biyosentezi, canlı ve cansız elisitörlerden etkilenir ve çoğunlukla ortaya çıkmayanlardan daha yüksek seviyelere yol açar. Bu durumdan hareketle elisitör uygulamalarının bitki ikincil metabolit düzeyini etkileyeceği, bitki fizyolojik ve biyokimyasal kapasitesini de değiştirebileceği söylenebilir (Andiç, 2021).

1.4. Çeltik ve Yerel Karacadağ Çeltiği

Pirinç (*Oryza sativa* L.) dünya nüfusunun yaklaşık yarısının temel gıda kaynağıdır ve birçok ülkenin gıda güvenliğinde önemli bir rol oynamaktadır (Sarkar ve ark., 2018). Tropikal ve ılıman bölgelerde yaygın olarak yetiştirilen pirinç, suda çimlenebilen ve suda çözünmüş oksijeni kullanarak gelişen tek tane türüdür. Dünyadaki sulama suyunun ortalama % 34 - 43' ü pirinç yetiştiriciliğinde kullanılmaktadır (Rajwade ve ark., 2018; Tas, 2021).

Çeltik (*Oryza sativa*. L), mısır ve buğdaydan sonra önemli bir tahıl mahsulü olarak dünyanın çeşitli bölgelerinde üretilmektedir. İnsan popülasyonundaki artışla birlikte pirinç talebi de artmıştır (Wu ve ark., 2019). Yerel Karacadağ çeltik çeşidi, çevresel koşullar bakımından kritik yılları başarıyla atlatabilmeleri, ayrıca yerel tüketici isteklerini karşılayan kalite özelliklerine sahip olması nedeniyle vazgeçilmez niteliktedir. Karacadağ çeltiğinin en önemli özelliği rengi, aroması, lezzeti ile bölge halkının en çok aradığı çeşit olması, bu bölgede yaşayan insanların damağına hitap etmesidir. Karacadağ Çeltiğinin kalite özelliğinin yetiştirildiği bölgenin iklim ve toprak özelliklerinden ileri geldiği bilinmektedir (Kaya, 2013).

Çeltik su isteği fazla olan bir bitki olduğu için özellikle de su kaynaklı metal stresine maruz kalır. Bu nedenle Pb ve Cd gibi ağır metal stresleri pirinç verimliliğini büyük ölçüde sınırlar. Salisilik asit, jasmonatlar, indoleketik asit ve selenyum gibi bazı ekzojen maddelerin daha önce bitkilerde Pb stresini hafifletmede önemli sonuçlar elde ettiği bulunmuştur (Gillani ve ark., 2021). Bitkiler, fitohormonlarının seviyelerini

değiştirerek metal ve metaloid kaynaklı abiyotik stresle başa çıkarlar. Abiyotik stres koşulları altında, kök hücreler fitohormonların hızlı sentezini uyarabilir (Zhang ve ark., 2023). Hormon uygulanması bitkilerde metallerin birikimini azaltır, bitki büyümesi ve gelişimi de fitohormonlar tarafından düzenlenebilmektedir (Verma ve ark., 2020).

Sonuç olarak bu tez çalışmasında da literatüre katkı sağlamak için *Oryza sativa* L. Hazro popülasyonu bitkisinin kurşun kirlenmesinin ardından kullanılan iki farklı elisitör (Salisilik asit ve Metil jasmonat) uygulaması yapılarak fotosentetik pigment, toplam protein, prolin, Pb, MDA içeriği ve toplam fenolik ile flavonoid içerikleri analizlerine ait verilerin karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmeleri amaçlanmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Abiyotik stres faktörlerinden biri olan ağır metal toksisitesi bitkilerin gelişim, yapısal, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler mekanizmalarında değişimlere neden olarak olumsuz yönde etkilemektedir. Ağır metaller arasında bulunan kurşun, en sık görülen kirleticilerden biridir (Şeşzik ve ark., 2015).

Zea mays L. çeşitlerinin (Neelam ve Desi) yüksek Pb (0, 10, 20 ve 30 ppm) stresine maruz kalması kökün bastırılmasına önemli derecede neden olmasına rağmen, toprak üstü organların büyümesinde minimum düzeyde etkili olmuştur. Yüksek Pb konsantrasyonunda, Neelam cinsinde fotokimyasal verimlilik daha fazla etkilenmiştir. Araştırmacı çeşitlere göre değişen bu sonuçların Pb birikimi ile ilgili olduğunu belirtmiştir (Ghani, 2010).

Pb' nin, *Elaeagnus angustifolia L.* çeliklerinde kambiyum işlevi üzerinde farklı hormon kombinasyonlarının etkileri araştırılmıştır. Pb stres faktörüne maruz bırakılan bitkiler ile kıyaslandığında hormon uygulanan bitkilerde yaprakların daha iyi geliştiğini belirtilmiştir. Kullanılan hormon karışımları kambiyum işlevi üzerindeki Pb hasarlarını önemli ölçüde iyileştirmiştir (Gök, 2010) .

Çinko (Zn) ve Pb' nin karalahana ve pazı bitkilerindeki etkilerinin araştırılmış olduğu çalışmada, Zn verilen bitkilerin köklerinde fazla Zn birikimi meydana gelirken, Pb uygulanan bitkilerin farklı dokularında önemsenecek kadar birikim olmamıştır. Uygulanan ağır metalin cinsi ve yoğunluğuna bağlı olarak yapraklarda klorozlar meydana gelmiştir. Ayrıca tüm bitkilerde klorofil miktarında da azalmalar olmuştur (Şafak, 2011).

Farklı konsantrasyonlardaki kurşunun mısır (*Zea mays L.*) bitkisinin büyümesi üzerine etkisinin incelendiği çalışmada; çimlenme, erken fide büyümesi, kök-sürgün uzunluğu, kök sürgün taze ve kuru ağırlıkları, toplam protein içeriklerinde azalmaların meydana geldiği saptanmıştır (Hussain ve ark., 2013).

Farklı yoğunluklardaki kurşunun buğday (*Triticum aestivum L.*) bitkisi üzerindeki etkileri incelendiğinde, sürgün/kök uzunluğu, sürgün taze/kuru ağırlıkları, filiz sayısı gibi morfolojik göstergelerin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca uygulamada kurşunun, klorofil a ve b gibi fotosentetik pigmentlerin ve Na⁺, K⁺ iyon içeriğinin azalmasına, fakat karoten içeriğinin artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Kurşunun

buğday bitkisinin büyüme ve gelişmesi üzerinde hasar verici etkiye sahip olduğu gösterilmiştir **(Bhatti ve ark., 2013)**.

Su sümbülünün (*Eichhornia crassipes*) kurşun toleransı ile ilgili yapılan uygulamada, kurşunun zehirleyici etkisinin palizat ile sünger parankimasının kalınlığında ve stomada değişiklikler meydana getirdikleri görülmüştür. Kurşunun zehirleyici etkisi, kök anatomisinde herhangi bir etki meydana getirmezken, ksilem ve floemde olumlu farklılıklar meydana getirmenin yanı sıra apoplastik yollarda engellerin artmasını sağlamıştır. Ayrıca kurşun, yapraklarda tüm antioksidan enzimlerin artmasına neden olmuştur **(Pereira ve arkadaşları, 2014)**.

Kurşun (Pb) ve çinkonun (Zn) bir yaşındaki Altuni Fener ağacı (*Koelreuteria paniculata*) ve Zelkova ağacı (*Zelkova schneideriana*) genç bitkilerinin büyümesi üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Bitki organlarındaki Pb ve Zn içerikleri ölçülmüş, sonuçlar metal stresinin bitkideki fotosistem II (PS II)'nin fotokimyasal söndürmesini ve kuantum verimliliğini azalttığını göstermiştir. Aynı zamanda, maksimum net fotosentetik oran, maksimum kuantum kullanım verimliliği ve organ biyokütlesinin azaldığı saptanmıştır **(Huang ve ark., 2019)**.

Pb, bitki büyümesine ve verimliliğine zarar veren toksik bir ağır metaldir. JA ve SA gibi fitohormonlar ve prolin (Pro) gibi ozmoprotektanlar bitkilerin fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerinde önemli bir rol oynar. Yapılan bir çalışmada JA, SA, Prolinin ekzojen uygulamalarının ve bunların kombinasyonunun mısırdaki Pb stresi toleransı üzerindeki etkileri araştırmıştır. Pb maruziyeti mısır bitkisinin büyümesini, ürün verimini, fotosentetik pigment içeriklerini ve mineral besin maddelerini (azot, fosfor ve potasyum) azaltırken elektrolit sızıntısının ve malondialdehit (MDA) birikiminin, ozmolitlerin, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanların arttığı saptanmıştır. Buna karşın JA, SA, Prolin ve bunların kombinasyonlarının bitki büyümesini ve pigment biyosentezini arttırdığı ve elektrolit sızıntısını, MDA birikimini ve Pb konsantrasyonunu azalttığı rapor edilmiştir **(Sofy ve ark., 2020)**.

Pirinç (*Oryza sativa* L.) bitkileri ile kurşun-metil jasmonatın (MJ) neden olduğu moleküler hücre dinamikleri arasındaki etkileşimi incelemek için bitkileri hidroponik olarak tek başına veya kombinasyon halinde Pb ve MeJA uygulamasına maruz bırakılmıştır. MeJA uygulaması PCS1, PCS2 ve ABCC1 genlerinin ekspresyonunu modüle etmiş, prolin ve klorofil metabolizmasını ayarlayarak kurşun stresli pirincin

büyümesini ve verimini arttırmıştır. Ayrıca MeJA uygulaması, antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak ve MDA, hidrojen peroksit endojen seviyelerini azaltarak Pb toksisitesine maruz kalan pirinç bitkilerinin oksidatif stresini hafifletmiştir. Araştırmacılar çalışma sonuçlarının, kurşunla kirlenmiş alanlarda sağlıklı gıda üretmek için umut verici bir stratejinin geliştirilmesi için moleküler bir anlayış ve hücrel etkileşim şeması sağlayabildiği sonucuna varmışlardır **(Salavati ve ark., 2021)**.

Salisilik asitin farklı konsantrasyonlarda (0, 0.1 ve 0.5 mM) üç ekmeklik buğday çeşidindeki biyokimyasal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için çalışma yapmıştır. Pb konsantrasyonunun 0 ila 1,5 mM arasında artırılması, klorofil ve karotenoidlerde azalmalara neden olmuş, Pb seviyelerindeki artış ile protein, çözünür şeker içeriği ve prolin miktarı da artmıştır. Dolayısıyla SA uygulamaları ekmeklik buğday (*T. aestivum L.*) çeşitlerinin biyokimyasal özelliklerini geliştirerek Pb' nin etkisini önemli ölçüde azaltmıştır. Maksimum iyileşme 0,5 mM SA konsantrasyonunda sağlanmış ve SA uygulamasının Pb'nin buğdaydaki olumsuz etkisini en aza indirmek için uygun olduğu sonucuna varılmıştır **(Gillani ve ark., 2021)**.

Üç ağır metal olan kadmiyum (Cd), bakır (Cu) ve kurşun (Pb) 'un üç farklı konsantrasyonda (100, 200 ve 300M) Mercan köşkü (*Origanum majorana L.*) ve Üzerlik otu (*Peganum harmala L.*) üzerindeki etkisini incelenmiştir. Ağır metallere kirlenmiş toprakta çimlenme ve antioksidan enzim aktiviteler ölçülmüştür. Glutasyon peroksidaz, glutasyon redüktaz ve süperoksit dismutazın aktivitesi her iki bitkide de artmıştır. Kök biyokütlesi, kontrole kıyasla her iki bitki için de stres altında azalmış ve köklerin sürgünlerden daha fazla ağır metal stresinden etkilendiği belirtilmiştir. Araştırmacılar her iki bitkinin de Cd, Cu ve Pb'nin neden olduğu oksidatif strese karşı koruyan etkili bir antioksidan sisteme sahip olduğunu belirtmişlerdir **(Elallem ve ark., 2022)**.

0.1 mM Pb ($PbCl_2$) toksisitesine maruz kalan buğday bitkilerine yapraktan 0, 10 mM, 20 mM ve 40 mM olmak üzere 4 farklı asparagin uygulamasının bitki fizyolojik gelişimine ve antioksidan savunma sistemine olan etkilerini incelemek amacıyla yapılan başka bir çalışmada Pb toksisitesi bitkinin hidrojen peroksit, malondialdehid içeriğini arttırmış ve asparajin uygulaması ile hidrojen peroksit ve MDA miktarında azalma gözlemlenmiştir **(Sürücü, 2022)**.

Üç bezelye çeşidini Cd stresine (0, 50, 100 μm) maruz bırakmış ve 2 hafta boyunca MeJA (0, 1, 5, 10 μm) uygulanmıştır. Kadmiyum stresi her üç bezelye çeşidinin de fotosentetik pigment içerikleri azalırken Cd konsantrasyonundaki artış lipid peroksidasyonunda önemli ölçüde artışa yol açmıştır. MeJA'nın eksojen uygulaması, antioksidan enzimlerde (süperoksit dismutaz, peroksidaz ve katalaz) aktivitesini, fotosentetik pigmentleri ve PSII verimliliğini arttırmıştır. MeJA uygulaması sürgün ve köklerin taze ve kuru ağırlıklarının arttırarak bezelye çeşitlerinin daha iyi büyümesini sağlamıştır **(Manzoor ve ark., 2022)**.

Pb'nin fasulye (*Vicia faba* L.) bitkilerinde fizyolojik ve kimyasal etkisini incelemek için, Kurşun Nitratın [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] farklı dozlarını (200, 500, 1000, 2000 ppm) kum ve komposttan (50 / 100) oluşan kültür substratını eklenmiştir. Bu çalışmalarının sonucunda fasulye bitkilerinin kuru ağırlığında, nispi su miktarında ve klorofil pigment içeriklerinde azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca köklerde ve saplarda sodyum (Na)' da önemli bir azalma saptanmıştır **(Bouziani ve ark., 2023)**.

Pb stresi uyguladıkları mısır bitkilerinin ekimden 40 gün sonra, kurşun stresi uygulanmayan mısır bitkilerine oranla yaprak sayılarında önemli ölçüde azalma olduğunu saptanmıştır **(Alhammad ve ark., 2023)**.

Bakır (Cu) ve Kurşun (Pb) tuzlarının farklı konsantrasyonlarının (200, 500 ve 1000 ppm) kış buğdayı bitkilerinde tohum çimlenmesi üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Ağır metal stresinin PAL (Fenilalanin Amonyum Liyaz) enzimlerinin aktivitesinde ve fenolik bileşiklerin birikiminde bir artışa neden olduğu görülmüştür. Ayrıca araştırmacıların yaptıkları çalışmada, toplam fenol ve flavonoidlerin en yüksek içeriği, genellikle test edilen ağır metallerin en düşük konsantrasyonunda (200 ppm) gözlenmiştir **(Jańczak-Pieniżek ve ark., 2022)**.

Kadmiyum stresi altında 'Tiannong 9' (kadmiyuma toleranslı) ve 'Fenghe 6' (kadmiyuma duyarlı) mısır çeşitlerinde Hemin'in sükroz ve nitrojen metabolizması ile endojen hormonlar üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Sonuçlar Hemin'in kadmiyum stresi altında mısır yapraklarında sakkaroz içeriğinin ve NO_3^- içeriğinin artmasına, NH_4^+ içeriğinin ise azalmasına işaret etmektedir. Kadmiyum stresi altında yaprak ve köklerdeki IAA ve GA içerikleri artmış, ABA, MeJA ve SA azalmıştır. Araştırmacılar Hemin'in sakkaroz ve nitrojen metabolizmasını artırarak ve endojen hormonları

düzenleyerek mısırdaki kadmiyum stresini hafifletebildiğini ifade etmişlerdir **(Zhao ve ark., 2023)**.

MeJA' nın Se ile Cd stresi altında acı biber büyümesi üzerindeki birleşik etkilerini incelenmiştir. Sonuçlar, Cd'nin toplam klorofil ve karotenoid birikimini baskıladığını, fotosentezi azalttığını, nitrik oksit (NO) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) gibi endojen sinyal moleküllerinin içeriğini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca MeJA ve Se'nin birlikte uygulanması, malondialdehit (MDA) birikimini önemli ölçüde azaltmış ve antioksidan enzimlerin ve savunmayla ilgili enzimlerin aktivitelerini geliştirmiştir **(Zhang ve ark., 2023)**.

Farklı Pb konsantrasyonlarına (0, 600, 800 mg/kg) maruz bırakılan iki farklı salkım fasulye çeşidinde (RGC 1055 ve RGC 1066), metil jasmonatın (0, 10, 30 ve 50 µM) büyüme, antioksidan enzimler ve Pb alımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırmacılar MeJA'nın her iki çeşitte de büyümeyi, antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak ve Pb birikimini azaltarak kurşunun zararlı etkisini arttırdığı sonucuna varmıştır **(Sharma ve ark., 2023)**.

JA, SA, prolinin ekzojen uygulamalarının ve bunların kombinasyonunun mısırdaki Pb stresi toleransı üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Pb'ye maruz kalma mısır bitkilerini ciddi şekilde etkileyerek fotosentetik pigmentleri ve mineral (azot, fosfor ve potasyum) besin maddelerini azaltmış malondialdehit (MDA) birikimini, ozmolitleri ve enzimatik olmayan ve enzimatik antioksidanları ise arttırmıştır. JA, SA, prolin ve bunların kombinasyonunun uygulanması bitki büyümesini arttırmış ve pigment biyosentezini teşvik etmiştir. Ayrıca MDA birikimi ve Pb konsantrasyonu azalmıştır. Tüm uygulamalar prolin ve toplam çözünür şeker üretimini, glutatyon, süperoksit dismutaz, katalaz, peroksidaz aktivitelerini, fenol ve mineral besin maddelerin miktarını arttırdı. Araştırmacılar uygulamaların, mısır bitkilerinin Pb toksisitesinin neden olduğu oksidatif hasarın üstesinden gelme yeteneğini arttırdığını özellikle de kombinasyonun büyüme ve gelişme için en etkili uygulama olduğunu rapor edilmiştir **(Sofy ve ark., 2020)**.

Nitrik oksit (NO) donörü olan sodyum nitroprussidin (SNP, 0, 50 ve 100 µM) uygulanmasının Pb (0, 150 ve 300) altındaki pirinç bitkilerinin morfolojik, biyokimyasal ve moleküler tepkileri üzerindeki etkileri hidroponik koşullarda araştırılmıştır. Pb stresi, pirinç fidelerinde fotosentetik pigmentleri ve nitrojeni (N) azaltmış ve hidrojen peroksit (H₂O₂), metilglioksal (MG), malondialdehit (MDA)

birikimini arttırmıştır. Bununla birlikte, SNP, klorofil ve prolin metabolizmasını geliştirerek, klorofil ve prolin içeriğini arttırmış ve Pb stresli pirinç fidelerinin büyümesini uyarmıştır **(Sayyadi ve ark., 2023)**

Pb stresi altındaki kenaf bitkilerinde eksojen metil jasmonatın (MeJA) metal alımı üzerindeki etkileri ve metal toksisitesini azaltma yeteneği araştırılmıştır. Sonuçlar, MeJA ön uygulamalarının test edilen tüm konsantrasyonlarda bitki kuru ağırlığını, bitki boyunu ve kök yapısını önemli ölçüde arttırdığını ortaya çıkardı. Ancak MeJA konsantrasyonunun artmasıyla birlikte sürgündeki biyoakümülyasyon faktörü başlangıçta azalmış ve daha sonra artmıştır. MeJA ön uygulaması, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanları da artırarak lipid peroksidasyonunu, O_2^- ve H_2O_2 birikimini azaltmış ve Pb stresi altında fotosentetik pigment içeriğini de geri kazandırmıştır **(Mubeen ve ark., 2024)**.

Kurşunun bitkiler üzerindeki toksik etkilerini ve buna bağlı olarak Pb' ye toleranslı bitkiler geliştirmek için birden fazla farklı teknolojilerin (biyoinformatik, biyoteknoloji) bir aradaki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda yüksek seviyelerde kurşuna maruz kalan bitkilerde, oksijen üreten kompleks, organel bütünlüğü, fotosistem II bağlantısı ve elektron taşıma zinciri dahil çok sayıda temel metabolik faaliyetin bozulduğunu saptanmıştır. Ayrıca, biyoinformatik ile entegrasyonun ve biyoteknolojik araçların kullanımının Pb' ye toleranslı mahsullerin geliştirilmesine yardımcı olabileceğini rapor edilmiştir **(Ilyas ve ark., 2024)**.

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Bitki Materyali

Bu çalışma Batman Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü Araştırma Laboratuvarı ile Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yürütülmüştür. Çalışmada, başlangıç materyali olarak, yerel üreticilerden temin edilmiş olan yerel Karacadağ çeltik çeşidinin Hazro popülasyonuna ait olgun tohumlar kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Karacadağ çeltik çeşidi (Hazro popülasyonu) tohumlarının genel görünümü

Karacadağ çeltiğinin sürgün boyu ortalama 104 cm' dir. Yaprak durumu horizontal olup salkımları yere yatıktır. Çeltik taneleri sarı renkli ve uzun olup 1000 tane ağırlığı 28 g' dır. 135 günde olgunlaşan Karacadağ çeltiği, 500-600 kg/da verim potansiyeline sahip, pirinç randımanı % 60 olan bir çeşittir (Anonim, 2015).

Çeltik Bitkisinin Takson Hiyerarşisi:

Alem: Plantae

Bölüm: Angiosperms

Sınıf: Monocots
Takım: Poales
Aile: Poaceae
Cins: Oryza
Tür: *Oryza sativa* L.

3.2. Yöntem

3.2.1. Çözeltilerin Hazırlanması

¼ Hoagland (Hoagland ve Arnon, 1938) besin çözeltisi için; litre başına toz haldeki “Hoagland’s No. 2 Basal Salt Mixture”den 0.4 gram (g) tartılarak toplam hacim 1 lt olacak şekilde distile suda eritildi.

100 ppm kurşun çözeltisi hazırlamak için; hassas terazide 0,1658 g kurşun nitrat [$Pb(NO_3)_2$] tartıldı. Kurşun nitrat 100 mL' lik volumetrik şişeye aktarıldı. Damıtılmış su eklenerek şişe yaklaşık 3/4'üne kadar doldurulup, çözelti tamamen çözünene kadar şişe vortekslendikten sonra damıtılmış su ile 100 mL' ye tamamlandı.

400 ppm kurşun çözeltisi hazırlamak için; hassas terazide 0,6632 g tartılan kurşun nitrat [$Pb(NO_3)_2$], 100 mL' lik volumetrik şişeye alındı. Bir miktar distile su eklenerek vortekslendikten sonra distile su ile şişe 100 mL' ye kadar tamamlanarak çözelti hazır hale getirildi.

2 mM Salisilik Asit çözeltisi hazırlamak için; hassas terazide 0.27624 g salisilik asit tartıldı. Tartılan salisilik asit bir karıştırma kabına aktarılıp, az miktarda distile su ile tamamen çözünene kadar iyice karıştırıldı. Çözünmüş salisilik asit balon jojeye aktarılıp, distile su ile 100 ml' ye kadar tamamlandı. Daha sonra çözelti homojen hale gelene kadar iyice karıştırılıp, çözelti hazır hale getirildi.

20 mM Salisilik Asit çözeltisi hazırlamak için; hassas terazide 5,5248 g miktarında tartılan salisilik asit az miktarda distile su ile tamamen çözünene kadar vortekslendi. Daha sonra balon jojeye aktarılıp, distile su ile 100 ml' ye kadar tamamlandı ve çözelti hazır hale getirildi.

20 μM Metil Jasmonat (MeJA) çözeltisi hazırlamak için; yoğunluğu 1,03 olan % 95' lik saflıktaki çözeltinin önce molaritesi hesaplandı. Hesaplanan molariteye göre, çözeltiden 0,045 ml alınarak distile su ile hacim 100 ml' ye tamamlandı. Daha sonra bu karışım vortexlenerek, çözelti hazır hale getirildi.

100 μM Metil Jasmonat (MeJA) çözeltisi hazırlamak için; yoğunluğu 1,03 olan % 95' lik saflıktaki çözeltiden 0,225 ml alınarak distile su ile hacim 100 ml' ye tamamlandı. Daha sonra bu karışım vortexlenerek, çözelti hazır hale getirildi.

3.2.2. Çeltik Bitkilerinin Yetiştirilmesi

Diyarbakır Karacadağ yerel çeltiğinin benzer dolgunluk ve büyüklüğe sahip tohumları %5'lik sodyum hipokloritte (NaOCl) 3 dakika bekletildikten sonra steril saf su ile çalkalanarak NaOCl 'den arındırıldı. Yüzey sterilizasyonu sağlanan tohumlar, imbibisyon işlemi için yaklaşık 24 saat süre ile distile su içerisinde bekletildi. Sterilizasyon ve imbibisyon işlemlerinden sonra tohumlar, torf, perlit ve toprak (3:3:1 oranında) içeren saksılara ekilerek, bitki büyüme odasında gelişmeye bırakıldı. 4 haftalık gelişim sürecinde haftada 2 defa olmak suretiyle $\frac{1}{4}$ Hoagland besin solüsyonu ile sulandı (Şekil 3.2. ve 3.3.).

Çeltik tohumlarının çimlendirilmesi, gelişimi, kurşun stresi ve elisitör uygulamalarının tümü optimum koşulların sağlandığı büyüme odasında yapılmıştır. Büyüme odası; $30\text{-}60\ \mu\text{m}/\text{m}^2\text{s}^1$ ışık şiddetine sahip cıvalı Flüoresan lambalar (400 W, MBFR/U, Thorn) ve ortam sıcaklığını $25\pm 2^\circ\text{C}$ de sabit tutan bir sıcaklık kontrol sistemi bulunmaktadır. Ayrıca büyüme odasının ışık periyodu 16 saat aydınlık 8 saat karanlık olacak biçimde ayarlanmıştır (3000-5000 lüks).



Şekil 3.2 Çeltik tohumlarının ekimden sonra 1 haftalık görünümü



Şekil 3.3 Çeltik tohumlarının ekimden sonra 4 haftalık görünümü

3.2.3. Kurşun Stresi ve Elisitör Uygulamaları

4 haftalık gelişim peryodundan sonra Pb stresinin oluşturulması için fidelere farklı konsantrasyonlarda (0, 100 ve 400 ppm) kurşun nitrat [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] uygulaması 14 gün (haftada 2 defa) süresince yapıldı. Daha sonra bitkiler Tablo 3.1.'de belirtildiği şekilde gruplara ayrıldı (Tablo 3.1.) ve 14 gün boyunca farklı konsantrasyonlardaki elisitör (Salisilik Asit ve Metil Jasmonat) ile kurşun stresi uygulanmaya devam edildi. (Şekil 3.4 ve 3.5)



Şekil 3.4. 400 ppm Pb uygulamasına maruz bırakılan çeltik bitkilerinin 14 günlük gelişimi

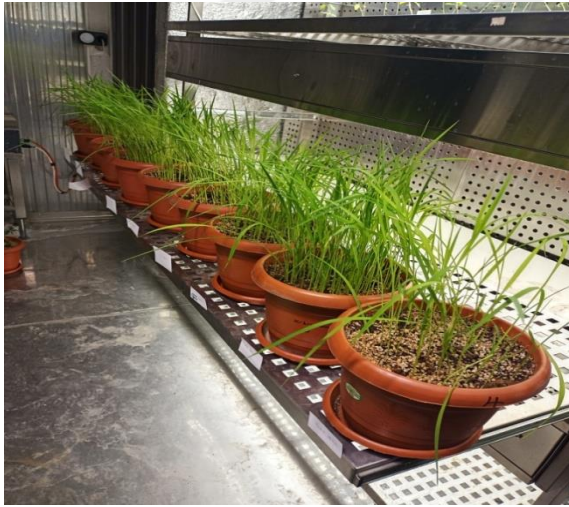


Şekil 3.5. 400 ppm Pb+2mM SA+20 µM MeJA uygulamasındaki çeltik bitkilerinin 14 günlük gelişimi

Tablo 3.1. Elisitör ve kurşun stresi uygulamaları

1. Kontrol- 0 ppmPb(NO₃)₂uygulaması
2. 100 ppm Pb(NO₃)₂uygulaması
3. 400 ppm Pb(NO₃)₂uygulaması
4. 100 ppm Pb(NO₃)₂+ 2 mM SA uygulaması
5. 100 ppm Pb(NO₃)₂ + 20 mM SA uygulaması
6. 100 ppm Pb(NO₃)₂ + 20 µM MeJA uygulaması
7. 100 ppm Pb(NO₃)₂ + 100 µM MeJA uygulaması
8. 400 ppm Pb(NO₃)₂ + 2 mM SA uygulaması
9. 400 ppm Pb(NO₃)₂ + 20 mM SA uygulaması
10. 400 ppm Pb(NO₃)₂ + 20 µM MeJA uygulaması
11. 400 ppm Pb(NO₃)₂ + 100 µM MeJA uygulaması
12. 100 ppm Pb(NO₃)₂ + 2 mM SA + 20 µM MeJA uygulaması
13. 400 ppm Pb(NO₃)₂ + 2 mM SA + 20 µM MeJA uygulaması

Salisilik asit, metil jasmonat ve iki elisitörün birlikte uygulandığı denemeler yaprakтан пүскүртме şeklinde yapıldı ve tüm uygulamalar üç tekrarlı olarak yürütüldü (Şekil 3.4).

**Şekil 3.6. Çeltik bitkilerine kurşun stresi ve elisitör uygulamaları**

14 günlük elisitör ve kurşun stresi uygulaması sonrası, her bir uygulamadan alınan yaprak örnekleri kurutulup toz haline getirildikten sonra yapılacak analizlere göre serin ve kuru bir ortamda ve/veya sıvı azotta öğütülerek derin dondurucuda (-42 °C) saklanmak suretiyle hazır hale getirildi (Şekil. 3.5. ve 3.6.).



Şekil 3.7. Hasat sonrası sıvı azot ile örneklerin muhafazaya hazırlanması



Şekil 3.8. Hasat sonrası örneklerin kurutulmaya bırakılması

3.2.4. Ölçüm ve analizler

3.2.4.1. Fotosentetik pigment içeriklerinin belirlenmesi

Klorofil a, *klorofil b* ve *karotenoid* içeriği ölçümleri Arnon (1949)' a göre yapılmıştır. Rastgele alınan 0.25 g taze yaprak örnekleri 2 mL % 80'likasetonla havanda homojenize edilmiştir. Homojenat filtre kâğıdından süzdürülerek daha sonra % 80'lik aseton ile 5 mL' ye tamamlanmıştır. Ekstraktlar 5000 rpm' de 5 dk santrifüj edilerek, absorbans değerleri spektrofotometrik olarak klorofil a 663, klorofil-b645 ve karotenoid 480 nm' de alınmıştır. Fotosentetik pigment miktar ölçüm çalışmaları 3 tekerrürlü olarak, aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\text{mg klorofil-a / g doku} = [\Delta A_{663} \times 12.70 - \Delta A_{645} \times 2.69] (V/1000 \times W)$$

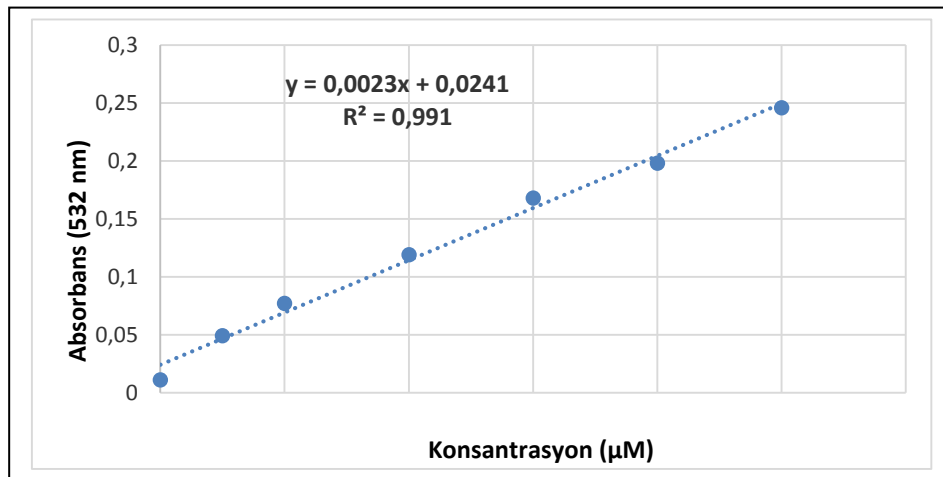
$$\text{mg klorofil-b / g doku} = [\Delta A_{645} \times 22.90 - \Delta A_{663} \times 4.68] (V/1000 \times W)$$

$$\text{mg karotenoid / g doku} = [\Delta A_{480} + \Delta A_{663} \times 0.114 - \Delta A_{645} \times 0.638/112.50] (V/1000 \times W)$$

Eşitliklerde; Δ , ekstraktın belirtilen dalga boyundaki absorbens değerini; V, % 80' lik asetonun ml olarak son hacmini; W, ekstre edilen dokunun g olarak yaş ağırlığını göstermektedir.

3.2.4.2. Malondialdehit (MDA) Miktarının Belirlenmesi

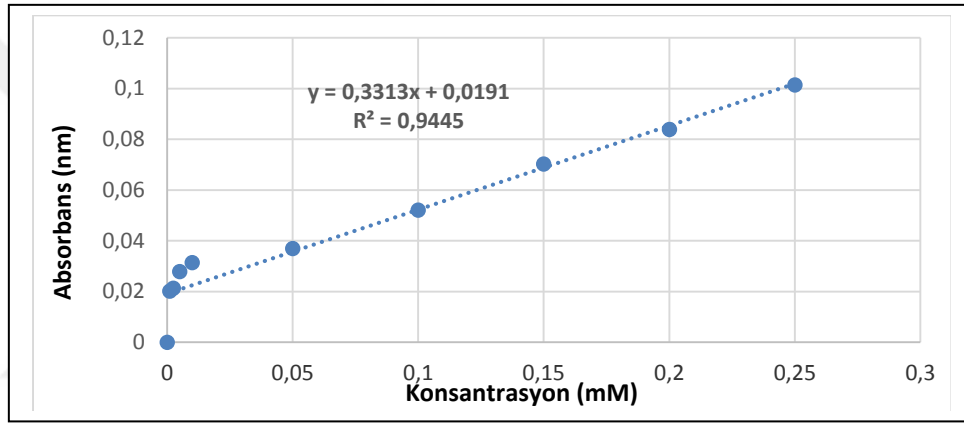
Çeltik yaprağının dokularında oluşan hücre membran hasarını ölçmek için lipit peroksidasyonunun son ürünü olan MDA miktarı tiyobarbitürik asit (TBA) testi ile belirlendi. Lipit peroksidasyonunun ölçüsü olan MDA içeriği Ohkawa ve ark. (1979)' na göre belirlenmiştir. 100 mg' lık örnekler tartılarak, üzerine 2 ml %5' lik trikloroasetikasit (TCA) eklenerek homojenizasyon sağlanmıştır. Hazırlanan bu karışım 25 °C 12000 rpm' de 20dakika süre ile santrifüj edilmiştir. 0.4 µl süpernatant ve içinde % 0.5 oranında tiyobarbitürik asit (TBA) bulunan 0.4 µl %20'lik TCA çözeltisi içeren reaksiyon karışımı, 95 °C' lik sıcak su banyosunda 1 saat tutulduktan sonra reaksiyonu durdurmak amacıyla buz banyosuna konulmuş ve 10000 rpm 10 dakika santrifüjlenerek karışımların absorbens değerleri UV-Vis spektrofotometre yardımıyla 532 nm dalga boyunda köre karşı okunmuştur. Yaprak dokularındaki MDA miktarı, standart 1,1,3,3-Tetraethoxypropane (MDA) grafiğinden elde edilecek eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. MDA standart eğrisi

3.2.4.3. Prolin içeriğinin belirlenmesi

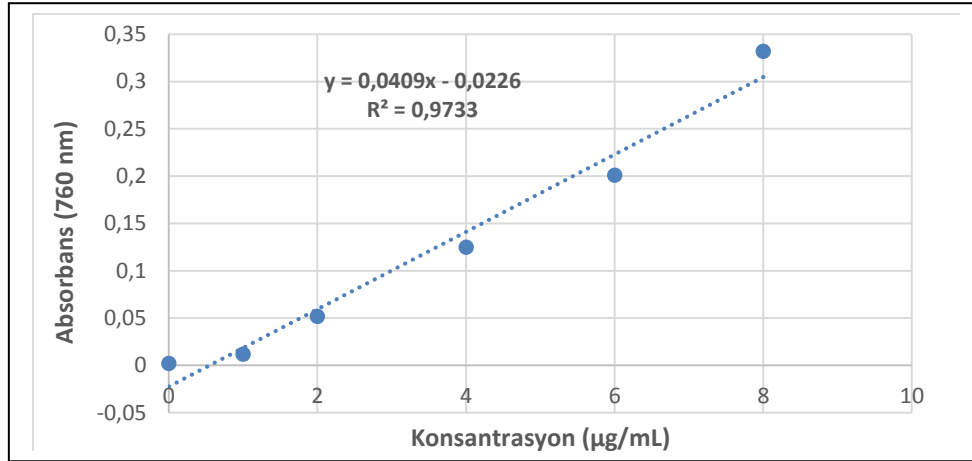
Prolin miktarı spektrofotometrik olarak Asit Ninhidrin metodu ile belirlenmiştir (Bates ve ark., 1973). 100 mg taze yaprak örneği % 40'lık 2 ml metanol ile ekstrakte edilerek 1 ml ekstrakt, 1 ml glasiyal asetik asit ve 6 M ortofosforik asitten (3:2 v/v) oluşan karışım üzerine 25 mg ninhidrin ilave edilerek 1 saat süre ile 100 °C de inkübasyona bırakılmıştır. Sonraki aşamada ise karışımların bulunduğu tüpler soğutulularak 5 ml toluen ilave edilmiştir. Yaprak örneklerinin prolin miktarının belirlenmesi için tüplerin üst kısmında oluşan fazın absorbans değeri 528 nm dalga boyunda ölçülmüştür.



Şekil 3.10. L-Prolin standart eğrisi

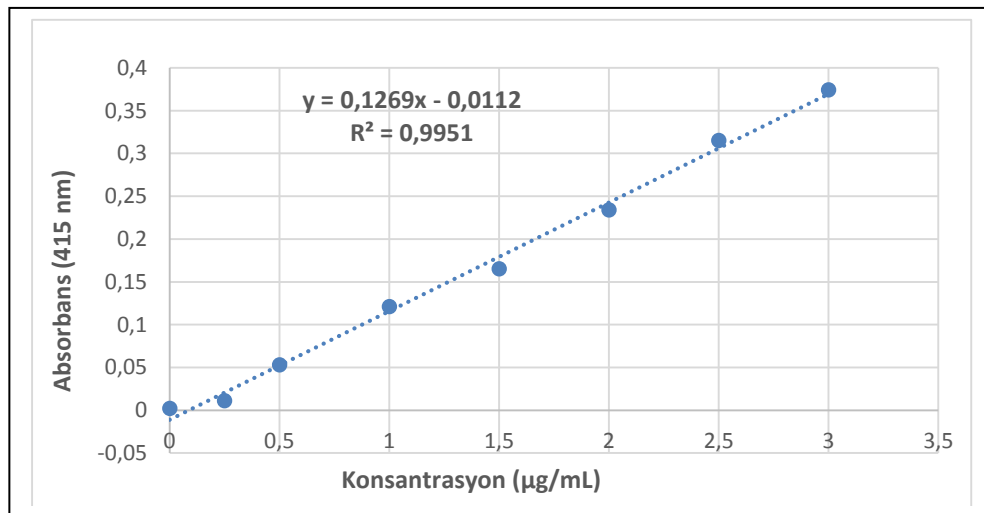
3.2.4.4. Toplam Fenolik ve Flavonoid Madde İçeriklerinin Belirlenmesi

Toplam fenolik içeriği Folin-Ciocalteu reaktifi kullanılmak üzere gallik asite eş değer olarak tespit edilmiştir (Slinkard ve Singleton, 1977). Ekstrelerin 1000 ppm konsantrasyonda çözeltileri hazırlanarak 100 µg ekstre içeren örnek çözeltileri distile su ile 4.6 mL' ye tamamlanarak, bu karışıma 100 µL Folin-Ciocalteu Reaktifi (FCR) ve 3 dakika sonra %2'lik Na₂CO₃ çözeltisinden 300 µL ilave edilerek oda sıcaklığında iki saat boyunca inkübe edilmiştir. Farklı konsantrasyonlardaki gallik asit çözeltileri için de aynı işlem uygulanarak inkübasyon sonrasında 760 nm dalga boyunda spektrofotometrik ölçüm alınmıştır.



Şekil 3.11. Galik asit standart eğrisi

Toplam flavonoid miktarları kersetine eşdeğer olarak alüminyum nitrat yöntemi ile belirlenmiştir (Moreno ve ark., 2000). 1000 ppm' lik kersetin çözeltisi hazırlanmış ve bu çözeltiden 0,25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 ve 200 µL alınarak hacimleri % 80' lik etanol ile 4.8 mL' ye tamamlanmıştır. Daha sonra karışımın üzerine 0.1 mL 1 M potasyum asetat ve bir dakika sonra 0.1 mL %10'luk alüminyum nitrat ilave edilecek ve 40 dakika inkübasyon süresinden sonra 415 nm' de kontrole karşı UV spektrofotometresinde absorbansları okunmuştur.



Şekil 3.12. Kersetin standart eğrisi

3.2.4.5. Toplam Protein İçeriğinin Belirlenmesi

eltiklerin kök ve yeşil aksamalarının protein analizi Lowry ve ark. (1951)'nın yöntemine göre yapılmıştır. 0,5 gram taze materyal 0,1 M fosfor tamponunda (pH 7) homojenize edildikten sonra 12000 rpm'de 10 dakika santifrüj edilmiştir. Süpernatanttan 0,3 mL alınmış, üzerine alkali zelti ilave edilip 15 dakika oda sıcaklığında belirtilmiştir. Daha sonra Folin-Ciocalteu ayıracı eklenerek 30 dakika oda sıcaklığında bekletilmiş ve 750 nm dalga boyunda absorbans okunmuştur. Standart olarak bovin serum albumin (BSA) kullanılmıştır.

3.2.4.6. Kurşun Derişimlerinin Belirlenmesi

Kurşun (Pb) derişimlerini belirlemek için kurutularak öğütülmüş örneklerin üzerine yoğunlaştırılmış HNO₃ ilave edilmiş ve oda sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra ısısı ayarlanabilen ısıtıcı tabla üzerinde renkli buharlar kayboluncaya kadar yavaş yavaş ısıtılmıştır. Örneklerin tümü buharlaştıktan ve dipteki tortu kuruduktan sonra HCl ile sulandırılan örneklerdeki Pb derişimleri atomik absorbsiyon spektrofotometresi kullanılarak belirlenmiştir (olak 2009).

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Fotosentetik Pigment İçeriklerinin Belirlenmesi

Pb stresinin fotosentetik pigment içerikleri üzerinde meydana getirdiği değişimlerin belirlenmesi amacıyla yerel Karacadağ çeltik (*O. sativa* L.) çeşidindeki klorofil-a, klorofil-b ve toplam karotenoid içeriği incelenmiş ve sonuçlar Tablo 4.1 ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. *O. sativa* L. bitki ekstralarının fotosentetik pigment içeriklerinde meydana gelen değişimler*

Ekstreler	Klorofil-a (mg/g TA)	Klorofil-b (mg/g TA)	Toplam karotenoid (mg/g TA)
Kontrol	1,207±0,466 ^h	0,517±0,051 ^f	3,769±1,235 ^d
100ppm Pb	1,355±0,182 ^d	0,494±0,494 ^f	3,720±1,336 ^d
400ppm Pb	1,238±0,222 ^f	0,452±0,452 ^{kh}	3,068±1,010 ^f
100ppm Pb+2mM SA	1,451±0,058 ^b	1,051±0,517 ^b	4,312±0,215 ^c
100ppm Pb+20mM SA	1,016±0,050 ^l	0,427±0,427 ^k	3,099±0,156 ^f
100ppm Pb+20µM MeJA	1,150±0,069 ^k	0,390±0,390 ^l	3,722±0,637 ^d
100ppm Pb+100µM MeJA	1,237±0,033 ^f	0,461±0,461 ^h	3,706±0,137 ^d
400ppm Pb+2mM SA	0,996±0,342 ^l	0,369±0,369 ^l	3,457±0,153 ^e
400ppm Pb+20mM SA	1,259±0,210 ^f	0,560±0,560 ^e	3,713±0,070 ^d
400ppm Pb+20µM MeJA	1,320±0,355 ^e	0,619±0,619 ^d	4,112±1,029 ^c
400ppm Pb+100µM MeJA	1,389±0,331 ^c	0,970±0,450 ^c	4,681±0,710 ^b
100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA	1,179±0,564 ^{kh}	0,450±0,450 ^{kh}	3,871±0,677 ^d
400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA	1,536±0,100 ^a	2,737±0,607 ^a	5,528±0,767 ^a

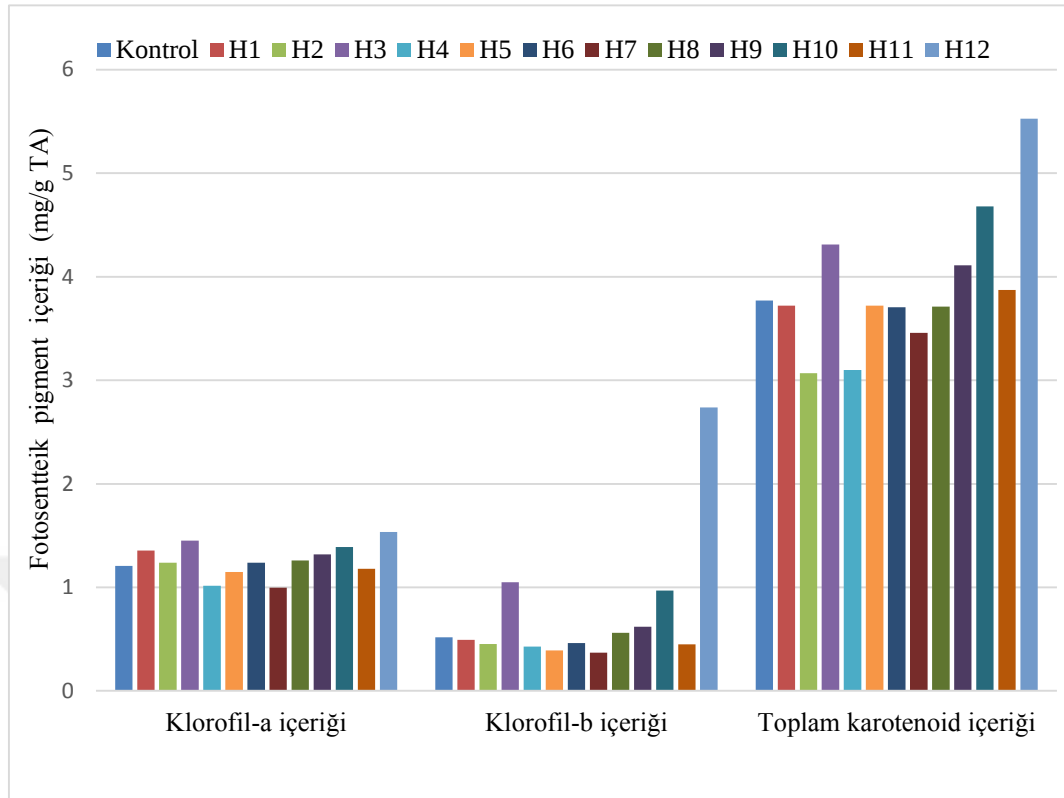
*Değerler 3 paralel ölçümün ortalaması ve standart sapması şeklinde verilmiş olup, aynı sütundaki farklı harfler ortalamalar arasındaki önemi ifade etmektedir ($p \leq 0.05$).

Klorofil-a içeriği için sonuçlar incelendiğinde; 100 ve 400 ppm Pb uygulamasında kontrol grubuna göre bir artış olduğu ve bu artışın istatistiksel olarak da anlamlı olduğu görülmüştür. Pb toksisitesine yanıt olarak kontrole göre meydana gelen bu artış, bitkinin klorofil-a içeriği bakımından stresten etkilenmediğini göstermektedir (Tablo 4.1). 100 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi sonucu, klorofil-a içeriği bakımından en fazla yükselme 2 mM SA eklenen deney grubunda (1,451 mg/g TA) elde edilmiştir. 400 ppm Pb toksisitesinde ise elisitör eklenmesi sonucu klorofil-a içeriğinde genel olarak (2 mM SA hariç) artışlar gözlenmiş ve dolayısıyla Pb stres faktörüne karşı

çeltik bitkilerinde iyileştirmeler olduğu sonucuna varılmıştır. Klorofil-a içeriği bakımından en yüksek artış 1,536 mg/g TA değeri ile 400 ppm Pb+2 mM SA+20 µM MeJA uygulanan deney grubunda olmuş ve Pb toksisitesini iyileştirici etki gösterdiği görülmüştür (Şekil 4.1).

Klorofil-b içeriği için sonuçlar değerlendirildiğinde, Pb'nin iki konsantrasyonunda da kontrol grubuna göre azalmanın olduğu ve dolayısıyla bitkinin klorofil-b içeriği bakımından Pb toksisitesinden etkilendiği görülmüştür (Tablo 4.1). 100 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile en fazla klorofil-b içeriği yükselmesinin 2 mM SA eklenen deney grubunda (1,051 mg/g TA), en düşük miktarın ise 20 µM MeJA (0,390 mg/g TA) eklenen grupta olduğu görülmüştür. Genel olarak 100 ppm Pb toksisitesinde 2mM SA eklenen grup haricinde diğer gruplarda klorofil-b içeriğinde düşüş görülmüştür. 400 ppm Pb toksisitesinde ise, elisitörlerin eklenmesi ile en fazla klorofil-b içeriği yükselmesinin 2,737 mg/g TA ile 2 mM SA+20 µM MeJA uygulanan deney grubunda olduğu görülmüştür. 400 ppm grubunda en fazla düşüşün 2 mM SA uygulamasında (0,369 mg/g TA) olduğu, diğer deney gruplarında ise yükseliş olduğu görülmüştür (Şekil 4.1).

100 ile 400 ppm Pb stres faktörüne maruz bırakılan çeltik bitkilerinde toplam karotenoid miktarları bakımından kontrole göre azalmanın görüldüğü ve dolayısıyla bitkilerin stresten etkilendiği sonucu çıkarılmıştır (Tablo 4.1). Elisitörlerin ayrı ayrı uygulanması 100 ppm Pb toksisitesindeki gruplarda düşük konsantrasyonlarda karotenoid içeriğinde artışa, yüksek konsantrasyonlarda ise düşüğe yol açmıştır. Yani tek başına uygulamada, elisitör konsantrasyonu arttıkça toplam karotenoid içeriğinde düşüş gözlenmiştir. En fazla artış 2 mM SA eklenen deney grubunda (4,312 mg/g TA) olmuş ve en düşük miktar 20 mM SA (3,099 mg/g TA) eklenen grupta elde edilmiştir. 400 ppm Pb toksisitesinde elisitör uygulaması tüm gruplarda toplam karotenoid içeriğini arttırmış ve istatistiksel olarak da anlamlı bulunmuştur. Klorofil-a ve klorofil-b içeriğinde olduğu gibi toplam karotenoid içeriğinde de en yüksek artış iki elisitörün birlikte uygulandığı (2 mM SA+20 µM MeJA) gruptan elde edilmiş ve bu grupta Pb stresini iyileştirici etki gösterdiği görülmüştür (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. *O. sativa* L. bitki ekstraktlarının fotosentetik pigment içeriklerinde meydana gelen değişimler (H1: 100ppm Pb; H2: 400ppm Pb; H3: 100ppm Pb+2mM SA; H4: 100ppm Pb+20mM SA; H5: 100ppm Pb+20µM MeJA; H6: 100ppm Pb+100µM MeJA; H7: 400ppm Pb+2mM SA; H8: 400ppm Pb+20mM SA; H9: 400ppm Pb+20µM MeJA; H10: 400ppm Pb+100µM MeJA; H11: 100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA; H12: 400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA)

4. 2. Malondialdehit (MDA) Miktarının Belirlenmesi

Bitkilerde biyotik ya da abiyotik streslerin öncelikli etkilerinden biri olarak gösterilen lipid peroksidasyonu yani yağların yükseltgenmesi sonucu bozulması neticesinde ortaya çıkan son ürünlerinden biri olan MDA analizleriyle Karacadağ çeltiklerinin Hazro popülasyonunda stresin öncelikli hedefi olan membranlardaki etkileri deneylenip sonuçlar araştırılmıştır (Tablo 4.2 ve Şekil 4.2).

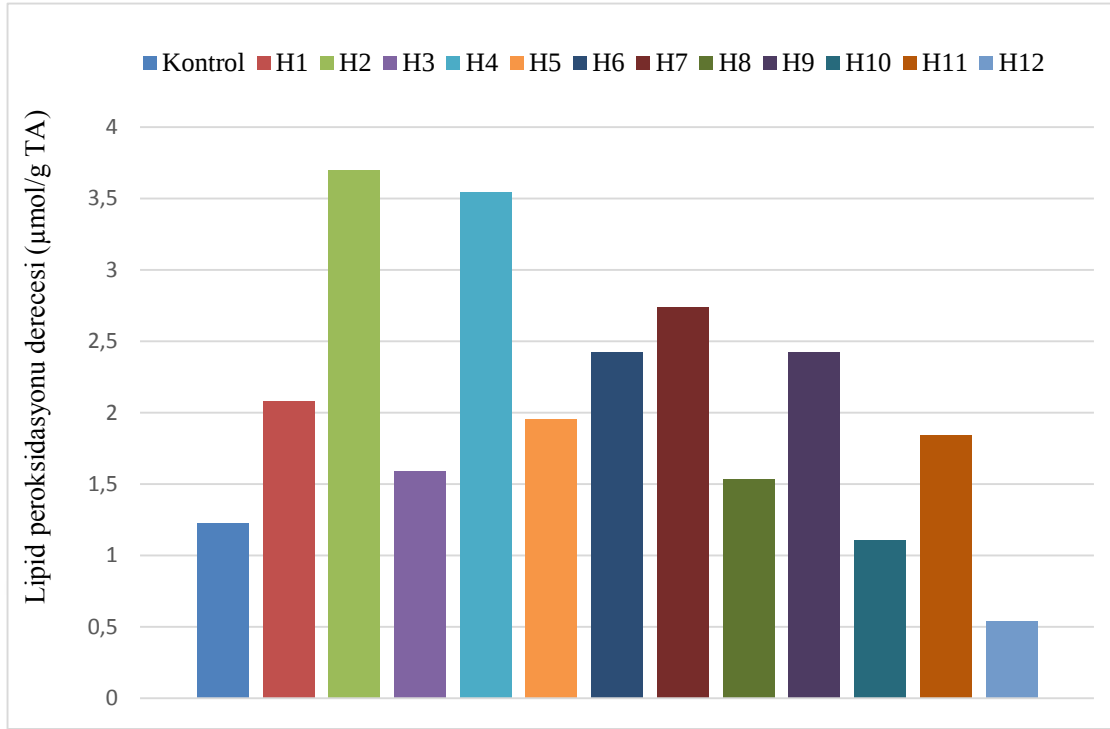
Tablo 4.2. *O. sativa* L. bitki ekstralarının MDA içeriklerinde meydana gelen değişimler

Ekstreler	Lipid peroksidasyonu Derecesi ($\mu\text{mol/g TA}$)
Kontrol	1,224 $\pm$ 0,037 ^m
100ppm Pb	2,078 $\pm$ 0,070 ^e
400ppm Pb	3,700 $\pm$ 0,034 ^a
100ppm Pb+2mM SA	1,593 $\pm$ 0,014 ^k
100ppm Pb+20mM SA	3,541 $\pm$ 0,046 ^b
100ppm Pb+20μM MeJA	1,958 $\pm$ 0,042 ^f
100ppm Pb+100μM MeJA	2,421 $\pm$ 0,031 ^d
400ppm Pb+2mM SA	2,736 $\pm$ 0,032 ^c
400ppm Pb+20mM SA	1,536 $\pm$ 0,094 ^l
400ppm Pb+20μM MeJA	2,423 $\pm$ 0,042 ^d
400ppm Pb+100μM MeJA	1,107 $\pm$ 0,057 ⁿ
100ppm Pb+2mM SA+20μM MeJA	1,842 $\pm$ 0,040 ^h
400ppm Pb+2mM SA+20μM MeJA	0,537 $\pm$ 0,078 ^o

* Değerler 3 paralel ölçümün ortalaması ve standart sapması şeklinde verilmiş olup, aynı sütunda gösterilen farklı harfler ortalamalar arasındaki önemi ifade etmektedir ($p \leq 0.05$).

Kontrole göre (1,224 $\mu\text{mol/g TA}$) 100 ppm Pb uygulamasında MDA düzeyinin yaklaşık 2 katartarak 2,078 $\mu\text{mol/g TA}$ olduğu, 400ppm' de ise yaklaşık 3 kat artarak 3,700 $\mu\text{mol/g TA}$ olduğu gözlenmiştir (Tablo 4.2). Dolayısıyla deney gruplarında lipid peroksidasyonunu en fazla artırarak bitki hücrelerine en fazla zarar veren grubun 400 ppm Pb toksisitesi ile oluşturulan uygulamada olduğu görülmüştür. Bu da Pb toksisitesinin çeltik bitkilerinde lipid peroksidasyonuna sebep olup, strese yol açtığını göstermektedir. 100 ppm Pb toksisitesine maruz kalan bitkilerde düşük SA ve MeJA uygulaması lipid peroksidasyonunda düşüşe, yüksek uygulamalar ise artışa yol açmıştır. En fazla MDA miktarı 20 mM SA eklenen deney grubunda (3,541 $\mu\text{mol/g TA}$), en düşük miktar 2 mM SA (1,593 $\mu\text{mol/g TA}$) eklenen grupta olmuştur (Tablo 4.2).

400 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile oluşturulan gruplar düşük MDA içeriği göstermiş ve bu düşüşler istatistiksel olarak da anlamlı bulunmuştur (Tablo 4.1). En fazla MDA miktarları azalmasının 0,537 $\mu\text{mol/g TA}$ ile 2 mM SA+20 $\mu\text{M MeJA}$ uygulanan deney grubunda olduğu görülmüştür. Bu durum, bu uygulamada lipid peroksidasyonun engellendiğini ve Pb stresine karşı koyarak MDA içeriğini düşürdüğü sonucu çıkarılmasına yol açmıştır. Bu durum, hücre membran zararında ortaya çıkan MDA miktarını azaltıp, lipid peroksidasyonunu azaltan ve böylelikle Pb stresine karşı direnci ortaya çıkaran SA ve MeJA elisitörlerinin kombine etkisidir (Tablo 4.2 ile Şekil 4.2).



Şekil 4.2. *O. sativa* L. bitki ekstralarının MDA içeriklerinde meydana gelen değişimler (H1: 100ppm Pb; H2: 400ppm Pb; H3: 100ppm Pb+2mM SA; H4: 100ppm Pb+20mM SA; H5: 100ppm Pb+20µM MeJA; H6: 100ppm Pb+100µM MeJA; H7: 400ppm Pb+2mM SA; H8: 400ppm Pb+20mM SA; H9: 400ppm Pb+20µM MeJA; H10: 400ppm Pb+100µM MeJA; H11: 100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA; H12: 400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA)

4. 3. Toplam Fenolik ve Flavonoid Madde İçeriklerinin Belirlenmesi

Bitkilerde bulunan fenolik ve flavonoid bileşikler, özellikle stres durumlarında ortaya çıkan sekonder metabolitlerin başında gelir. Bu bileşikler başta zararlı canlılara karşı doğal savunma mekanizmalarını oluşturmalarının yanında abiyotik stres koşullarında da ortaya çıkmaktadır. Karacadağ çeltiğinin Pb ağır metali toksisitesine karşı uygulanan elisitörlere (SA ve MeJA) gösterdiği değişimler toplam fenolik ve flavonoid madde miktarları bakımından incelenmiş ve bu değişimler Tablo 4.3 ile Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.3. *O. sativa* L. bitki ekstralarının toplam fenolik ve flavonoid içeriklerinde meydana gelen değişimler*

Ekstreler	Toplam Fenolik İçeriği (μg GAEs/mg ekstre) ⁱⁱ	Toplam Flavonoid İçeriği (μg QEs/mg ekstre) ⁱⁱⁱ
Kontrol	71,584 $\pm$ 1,224 ^e	226,565 $\pm$ 2,080 ⁿ
100ppm Pb	56,024 $\pm$ 0,190 ⁿ	243,383 $\pm$ 1,969 ^m
400ppm Pb	61,858 $\pm$ 0,138 ^m	391,363 $\pm$ 0,811 ^d
100ppm Pb+2mM SA	66,741 $\pm$ 1,017 ^k	487,323 $\pm$ 1,696 ^b
100ppm Pb+20mM SA	45,525 $\pm$ 1,034 ^o	310,040 $\pm$ 1,744 ^h
100ppm Pb+20μM MeJA	67,974 $\pm$ 2,034 ^h	452,979 $\pm$ 1,077 ^c
100ppm Pb+100μM MeJA	61,858 $\pm$ 1,069 ^m	299,141 $\pm$ 2,249 ^k
400ppm Pb+2mM SA	70,110 $\pm$ 1,085 ^f	357,020 $\pm$ 0,956 ^e
400ppm Pb+20mM SA	74,750 $\pm$ 2,048 ^c	229,343 $\pm$ 1,686 ⁿ
400ppm Pb+20μM MeJA	72,860 $\pm$ 2,010 ^d	314,141 $\pm$ 2,249 ^f
400ppm Pb+100μM MeJA	83,251 $\pm$ 1,328 ^b	285,575 $\pm$ 1,235 ^l
100ppm Pb+2mM SA+20μM MeJA	66,136 $\pm$ 2,051 ^l	301,414 $\pm$ 1,811 ^k
400ppm Pb+2mM SA+20μM MeJA	92,249 $\pm$ 1,121 ^a	553,030 $\pm$ 1,649 ^a

*Değerler 3 paralel ölçümün ortalaması ve standart sapması şeklinde verilmiş olup, farklı harfler ortalamalar arasındaki önemi ifade etmektedir ($p \leq 0.05$). ii Gallik asite eşdeğer toplam fenolik madde miktarı. iii Kersetine eşdeğer toplam flavonoid madde miktarı

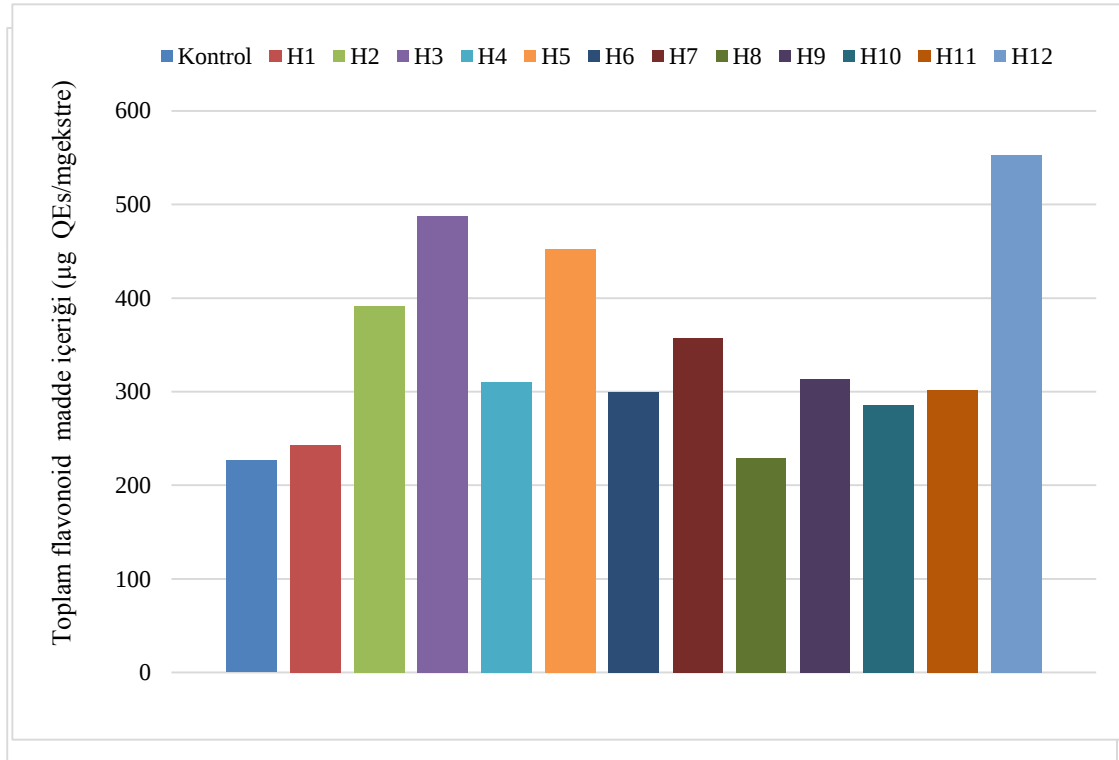
4.3.1. Toplam Fenolik Bileşiklerin Değişimi

Kurşun stresine maruz kalan çeltik bitkilerinin yapraklarındaki toplam fenolik bileşik miktarları Pb' nin iki konsantrasyonda da (100 ppm ve 400 ppm) kontrol grubuna göre azalmanın olduğu görülmüştür (Tablo 4.3).

100 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi toplam fenolik madde içeriğinde genel anlamda artışa yol açmıştır (20 mM SA hariç). 100 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile en fazla fenolik içeriğin yükselmesinin 20 μ M MeJA eklenen deney grubunda (67,974 μg GAEs/mg), en düşük miktarın ise 20 mM SA (45,525 μg GAEs/mg) eklenen grupta olduğu görülmüştür (Tablo 4.3). Pb toksisitesinde elisitör eklenmelerinin ardından bahsedilen iyileşmelerin gerçekleşmesi, SA ve MeJA'nın toksisiteye karşı bitkiyi koruduğu sonucunun çıkarılmasına yol açmıştır.

400 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile toplam fenolik madde miktarının arttığı ve bu artışın istatistiksel olarak da anlamlı olduğu görülmüştür. 400

ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile 2 mM SA eklenen grup hariç tüm uygulamalarda artış olmuş ve en yüksek artış 92,249 µg GAEs/mg ile 2 mM SA+20 µM MeJA uygulanan deney grubunda olduğu görülmüştür (Tablo 4.3). Sonuç olarak toplam fenolik içeriğinde 400 ppm ağır Pb toksisitesinde çeltik bitkilerine elisitörlerin eklenmesi ile genel olarak iyileştirici etki gösterdiği görülmüştür. En çok iyileşmenin de iki elisitörün birlikte uygulandığı grupta olduğu görülmüştür (Şekil 4.3).



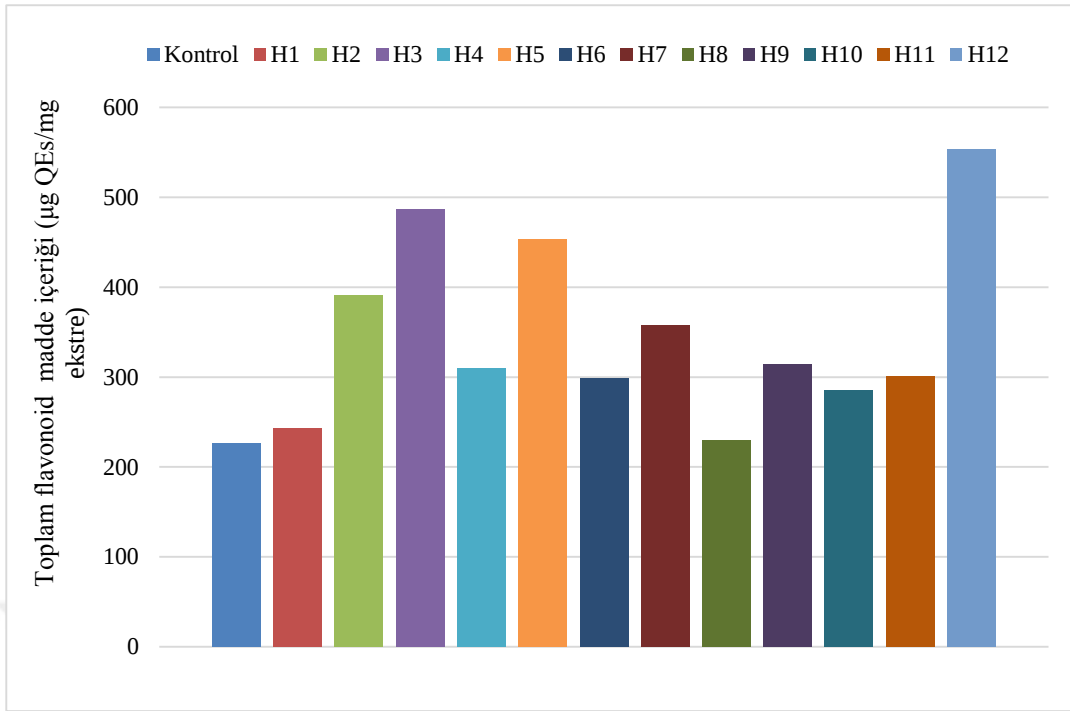
Şekil 4.3 *O. sativa* L. bitki ekstraktlarının toplam fenolik madde içeriklerinde meydana gelen değişimler (H1: 100ppm Pb; H2: 400ppm Pb; H3: 100ppm Pb+2mM SA; H4: 100ppm Pb+20mM SA; H5: 100ppm Pb+20µM MeJA; H6: 100ppm Pb+100µM MeJA; H7: 400ppm Pb+2mM SA; H8: 400ppm Pb+20mM SA; H9: 400ppm Pb+20µM MeJA; H10: 400ppm Pb+100µM MeJA; H11: 100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA; H12: 400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA)

4.3.2. Toplam Flavonoid Bileşiklerin Değişimi

Kurşun stresine maruz kalan çeltik bitkilerinin yapraklarındaki toplam flavonoid madde miktarları kontrol grubu ile kıyaslandığında, hem 100 hem de 400 ppm Pb konsantrasyonunda artmanın görüldüğü, dolayısıyla Pb toksisitesinden flavonoid madde içeriğinin çok fazla etkilenmediği görülmüştür (Tablo 4.3).

100 ppm Pb uygulamasında eklenen elisitörler toplam flavonoid madde içeriğini arttırmış ve bu artış istatistiksel olarak da anlamlı bulunmuştur. Hem SA hem de MeJA uygulamaları için konsantrasyon arttıkça flavonoid madde içeriğinde düşüş gözlenmiştir. Toplam flavonoid madde içeriği yönünden 100 ppm Pb uygulamalarında en yüksek artış 2 mM SA eklenen deney grubunda (487,323 µg GAEs/mg) olurken en düşük miktar 100 µM MeJA (299,141 µg GAEs/mg) eklenen gruptan elde edilmiştir. Elisitörlerin düşük konsantrasyondaki ayrı ayrı uygulanması, birlikte uygulamadan daha yüksek flavonoid madde içeriğine sahip olup, stresin üstesinden gelmede daha etkili olmuştur.

400 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin tek tek eklenmesi ile flavonoid madde içeriklerinin kendi kontrolüne göre (400 ppm Pb stresi uygulaması) genel olarak azaldığı görülmüştür. Bu durum, Pb toksisitesine karşı elisitörlerin ayrı ayrı eklenmesinin, genel anlamda toplam flavonoid madde içeriği yönünden çok fazla iyileştirici etkide bulunamadığı sonucunun çıkarılmasına yol açmıştır. En fazla flavonoid içeriğin yükselmesinin 553,030 µg GAEs/mg ile 2 mM SA+20 mM MeJA eklenen deney grubunda (Tablo 4.3), en az artışın ise 20 mM SA eklenen uygulamada (229,343 µg GAEs/mg) olduğu görülmüştür (Tablo 4.1). Sonuç olarak, 400 ppm Pb+2 mM SA+20 mM MeJA uygulanan grup, toplam flavonoid madde içeriği bakımından Pb stresini en fazla iyileştirici etkiyi göstermiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.4 *O. sativa* L. bitki ekstrelerinin toplam flavonoid madde içeriklerinde meydana gelen değişimler (H1: 100ppm Pb; H2: 400ppm Pb; H3: 100ppm Pb+2mM SA; H4: 100ppm Pb+20mM SA; H5: 100ppm Pb+20µM MeJA; H6: 100ppm Pb+100µM MeJA; H7: 400ppm Pb+2mM SA; H8: 400ppm Pb+20mM SA; H9: 400ppm Pb+20µM MeJA; H10: 400ppm Pb+100µM MeJA; H11: 100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA; H12: 400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA)

4.4. Prolin İçeriğinin Belirlenmesi

Bitkilerde bulunan prolin, özellikle de stres altındaki bitkilerde protein bütünlüğünün sağlanması ve enzimlerin aktive edilmesinde görev yapan önemli bir ozmoregülatördür. Ayrıca *prolin*, bitkilerde strese karşı tolerans artırıcı, antioksidan, ozmolit ve sinyal molekülü olarak da görev yapabilir. Pb ağır metali stresi altındaki çeltik bitkilerinde, uygulanan elisitörler (SA ve MeJA) varlığında gösterilen değişimler prolin içeriği bakımından incelenmiş ve bu değişimler Tablo 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.4 *O. sativa* L. bitki ekstralarının toplam prolin içeriklerinde meydana gelen değişimler*

Ekstreler	Prolin içeriği (mmol/g TA)
Kontrol	2,064±0,126 ^h
100ppm Pb	1,913±0,193 ^l
400ppm Pb	0,857±0,021 ^r
100ppm Pb+2mM SA	2,517±0,309 ^e
100ppm Pb+20mM SA	1,762±0,103 ^m
100ppm Pb+20µM MeJA	3,573±0,344 ^c
100ppm Pb+100µM MeJA	1,611±0,110 ⁿ
400ppm Pb+2mM SA	2,366±0,066 ^f
400ppm Pb+20mM SA	2,970±0,373 ^d
400ppm Pb+20µM MeJA	4,083±0,434 ^b
400ppm Pb+100µM MeJA	1,970±0,089 ^k
100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA	1,008±0,076 ^o
400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA	5,592±0,161 ^a

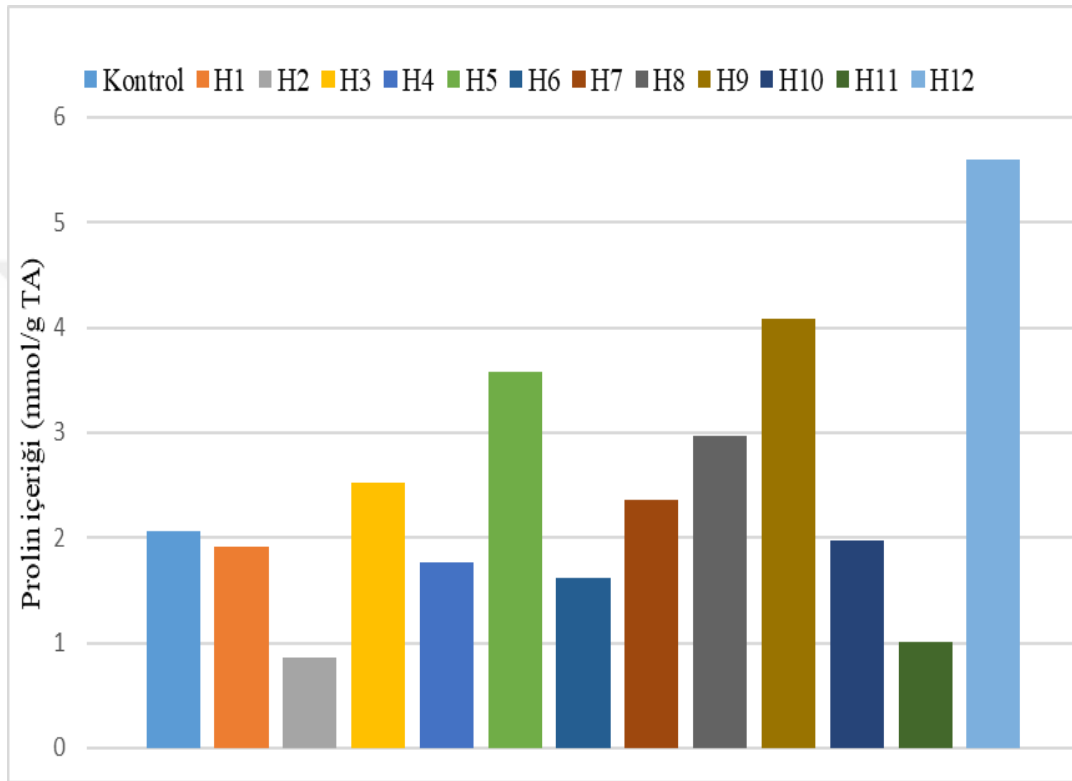
* Değerler 3 paralel ölçümün ortalaması ve standart sapması şeklinde verilmiş olup, aynı sütunda gösterilen farklı harfler ortalamalar arasındaki önemi ifade etmektedir ($p \leq 0.05$).

Kurşun stresine maruz kalan çeltik bitkilerinin yapraklarındaki prolin içeriği kontrol grubu ile kıyaslandığında, Pb' nin iki konsantrasyonda da (100 ppm ve 400 ppm) azalmanın görüldüğü, dolayısıyla Pb toksisitesinden prolin içeriğinin etkilendiği yani strese girdiği görülmüştür (Tablo 4.4).

100 ppm Pb stres faktörüne maruz bırakılan çeltik bitkilerinde elisitör uygulaması konsantrasyona bağlı olarak değişen şekillerde prolin içeriğini etkilemiştir. Tek başına uygulamalarda konsantrasyon arttıkça hem SA hem de MeJA için prolin içeriğinde düşüş olmuş ve bu düşüşler kendi kontrollerinden (100 ppm Pb) de düşük olmuştur. 100 ppm Pb stresine yanıt olarak elisitörlerin ayrı ayrı uygulaması sonucu oluşturulan gruplar ile kıyaslandığında, birlikte uygulama (2 mM SA+20 µM MeJA) 1,008mmol/g TA ile en düşük prolin içeriğine yol açarak stresin üstesinden gelmeyi başaramamıştır. 100 ppm'lik Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile en fazla prolin içeriğinin en fazla yükselmesinin 100 ppm Pb+20 µM MeJA eklenen deney grubunda (3,573 mmol/g TA) olduğu görülmüştür. En düşük miktarın ise 100 ppm Pb+100 µM MeJA (1,611 mmol/g TA) eklenen grupta olduğu görülmüştür.

400 ppm Pb stresine yanıt olarak elisitör uygulamaları prolin içeriğinde artışa yol açmıştır. SA uygulamalarında konsantrasyon artışı prolin içeriğini arttırırken, MeJA uygulamalarında konsantrasyon arttıkça prolin miktarı önemli ölçüde düşmüştür.

Elisitörlerin birlikte etkisinin incelendiği 2 mM SA+20 mM MeJA uygulaması 5,592 mmol/gTA ile en yüksek prolin içeriğine sahip olmuştur (Şekil 4.4). 400 ppm grubunda en az artışın ise 100 µM MeJA uygulamasında (1,970mmol/g TA) olduğu görülmüştür (Tablo 4.1). Sonuç olarak prolin içeriğinde en çok 400 ppm Pb+2 mM SA+20 mM MeJA uygulanan grupta Pb stresini iyileştirici etki gösterdiği görülmüştür (Şekil 4.4).



Şekil 4.5 *O. sativa* L. bitki ekstraktlarının prolin içeriklerinde meydana gelen değişimler (H1: 100ppm Pb; H2: 400ppm Pb; H3: 100ppm Pb+2mM SA; H4: 100ppm Pb+20mM SA; H5: 100ppm Pb+20µM MeJA; H6: 100ppm Pb+100µM MeJA; H7: 400ppm Pb+2mM SA; H8: 400ppm Pb+20mM SA; H9: 400ppm Pb+20µM MeJA; H10: 400ppm Pb+100µM MeJA; H11: 100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA; H12: 400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA)

4.5. Toplam Protein Miktarındaki Değişimler

Bitkilerde özellikle stres durumlarında toplam protein miktarları düşer. Karacadağ çeltiğinin Hazro popülasyonunun kurşun nitrat toksisitesindeki toplam protein miktarı ve bu kirlenmeye karşı uygulanan elisitörlerle (SA ve MeJA) beraber gösterdiği değişimleri Tablo 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4. 5 *O. sativa* L. bitki ekstralarının toplam protein içeriklerinde meydana gelen değişimler*

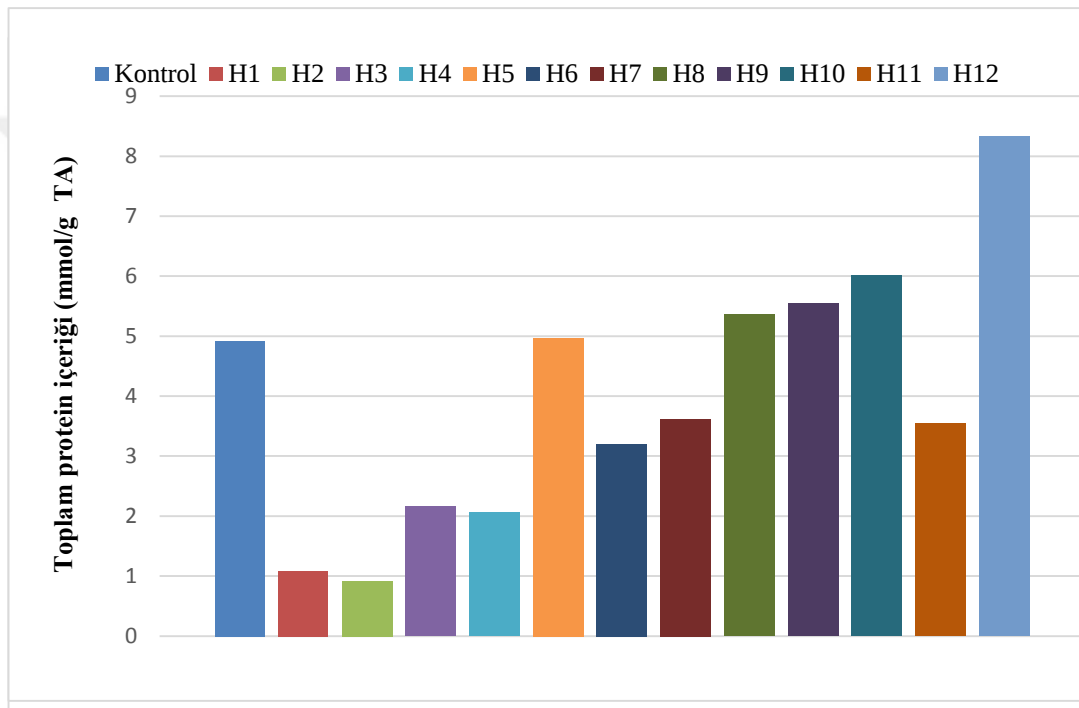
Ekstreler	Toplam Protein İçeriği (mmol/g TA)
Kontrol	4,916±0,990 ^f
100ppm Pb	1,084±0,329 ^o
400ppm Pb	0,923±0,871 ^r
100ppm Pb+2mM SA	2,167±1,022 ^m
100ppm Pb+20mM SA	2,064±0,721 ⁿ
100ppm Pb+20µM MeJA	4,966±0,531 ^e
100ppm Pb+100µM MeJA	3,201±0,969 ^l
400ppm Pb+2mM SA	3,621±1,950 ^h
400ppm Pb+20mM SA	5,354±1,479 ^d
400ppm Pb+20µM MeJA	5,542±1,701 ^c
400ppm Pb+100µM MeJA	6,005±1,141 ^b
100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA	3,547±0,878 ^k
400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA	8,325±1,202 ^a

* Değerler 3 paralel ölçümün ortalaması ve standart sapması şeklinde verilmiş olup, aynı sütundaki farklı harfler ortalamalar arasındaki önemi ifade etmektedir ($p \leq 0.05$).

Kurşun stresine maruz kalan çeltik bitkilerinin yapraklarındaki toplam protein içeriği kontrol grubu ile kıyaslandığında, sadece Pb stres faktörüne maruz bırakılan uygulamalarda (100 ppm ve 400 ppm) azalmanın olduğu görülmüştür (Tablo 4.5).

100 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi ile protein içeriğinde artış olmuş ve bu artış istatistiksel olarak da anlamlı bulunmuştur. Elisitörlerin ayrı ayrı eklendiği gruplarda, konsantrasyon artışı protein içeriğinde düşüşe yol açmıştır. SA uygulanan gruplardan daha yüksek toplam protein içeriğine sahip olan MeJA uygulamaları, prolin içeriği bakımından strese karşı koymada daha etkili olmuştur. En fazla artış 20 µM MeJA eklenen deney grubunda (4,966 mmol/g TA) olurken, bu gruptaki toplam protein içeriği değeri iki elisitörün birlikte uygulandığı gruptan daha yüksek olmuştur. Bu bağlamda 100 ppm Pb toksisitesine bağlı olarak elisitörlerin özellikle de MeJA'nın eklenmesi ile toplam protein miktarının artması Pb stresini azaltmıştır.

400 ppm Pb toksisitesinde elisitörlerin eklenmesi toplam protein içeriğinde önemli oranda artışa yol açmıştır. Hem SA hem de MeJA'nın ayrı ayrı tek başlarına uygulamalarında; konsantrasyon artışı toplam protein içeriğinde artışa yol açmış ve artışlarda MeJA daha etkili bulunmuştur. Hem 400 ppm hem de tüm uygulamalar içerisinde toplam protein içeriği yönünden en yüksek artış 8,325 mmol/g TA ile 400 ppm Pb+2 mM SA+20 µM MeJA uygulanan deney grubunda elde edilmiştir (Tablo 4.5) ve bu grupta yine toplam protein miktarı bakımından en yüksek iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 4.6 *O. sativa* L. bitki ekstraktlarının toplam protein içeriklerinde meydana gelen değişimler (H1: 100ppm Pb; H2: 400ppm Pb; H3: 100ppm Pb+2mM SA; H4: 100ppm Pb+20mM SA; H5: 100ppm Pb+20µM MeJA; H6: 100ppm Pb+100µM MeJA; H7: 400ppm Pb+2mM SA; H8: 400ppm Pb+20mM SA; H9: 400ppm Pb+20µM MeJA; H10: 400ppm Pb+100µM MeJA; H11: 100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA; H12: 400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA)

4.5. Pb İçeriğinin Belirlenmesi

MeJA ve SA elisitörlerinin çeltik bitkilerinin yaprak dokularındaki Pb içeriği üzerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiş ve değişimler Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

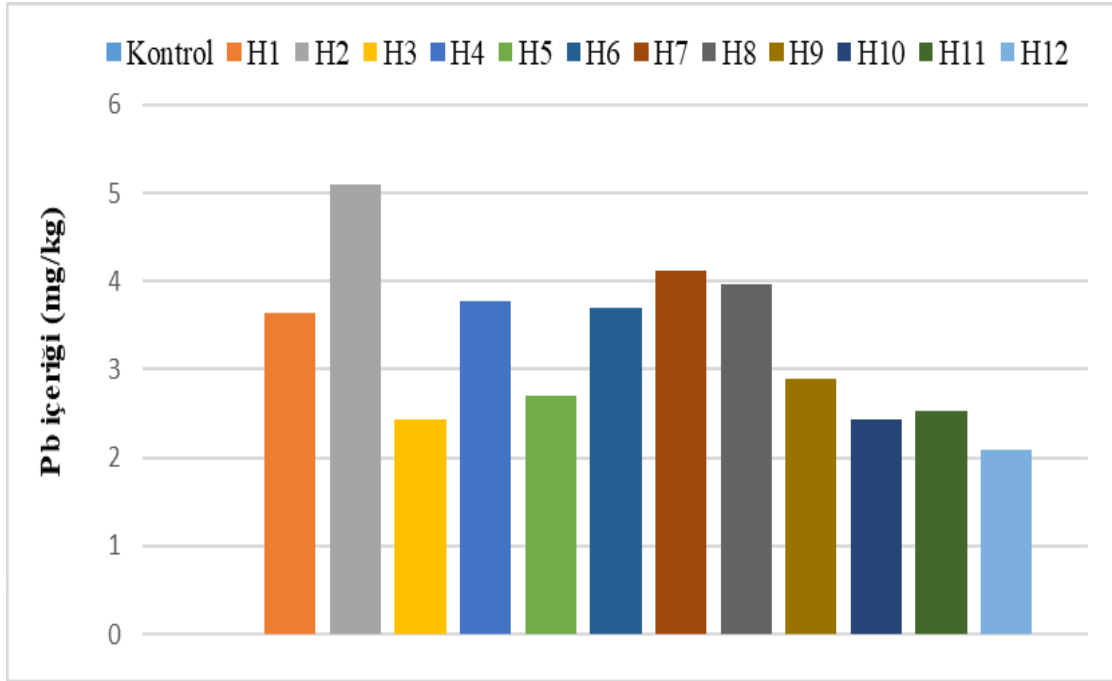
Hazro popülasyonuna ait yerel Karacadağ çeltik bitkilerinin Pb içeriği sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek değerin 5,089 mg/kg ile 400 ppm Pb uygulamasında olduğu gözlenmiştir. 100 ppm ve 400 ppm'lik Pb toksisitesinde elisitör uygulaması ile beraber Pb içeriğinde düşüşler gözlenmiş ve meydana gelen bu düşüşler, genelde istatistiksel olarak da anlamlı bulunmuştur. Bu da 100 ppm ve 400 ppm'lik Pb toksisitede eklenen elisitörlerin iyileşmeye sebep olduğu görülmüştür. Kurşun kirlenmesine karşı, elisitörlerin tek tek ya da kombine uygulamalarında da görülmüştür(Tablo 4.6).

400 ppm Pb uygulamalarında, elisitör eklenmesi kurşun içeriğinde önemli düşüşlere yol açmış ve bu düşüşler istatistiksel olarak da anlamlı bulunmuştur. Elisitörlerde ayrı ayrı tek uygulamada konsantrasyon arttıkça Pb içeriğinde düşüş olmuş ve bu düşüşlerde MeJA daha etkili olmuştur. Elisitörlerin birlikte uygulaması, tüm uygulamalar içerisinde 2,091mg/kg değeri ile en düşük Pb içeriğine sahip olmuş ve toksisiteye karşı koymuştur(Tablo 4.6).

Tablo 4. 6 *O. sativa* L.bitki ekstrelerinin toplam Pb içeriklerinde meydana gelen değişimler*

Ekstreler	Pb İçeriği (mg/kg)
Kontrol	0±0,00
100ppm Pb	3,637±0,70 ^c
400ppm Pb	5,089±0,92 ^a
100ppm Pb+2mM SA	2,444±0,65 ^f
100ppm Pb+20mM SA	3,771±0,51 ^c
100ppm Pb+20μM MeJA	2,698±0,77 ^e
100ppm Pb+100μM MeJA	3,701±0,53 ^c
400ppm Pb+2mM SA	4,116±0,35 ^b
400ppm Pb+20mM SA	3,973±0,21 ^c
400ppm Pb+20μM MeJA	2,897±0,82 ^d
400ppm Pb+100μM MeJA	2,431±0,37 ^f
100ppm Pb+2mM SA+20μM MeJA	2,533±0,69 ^f
400ppm Pb+2mM SA+20μM MeJA	2,091±0,12 ^h

* Değerler 3 paralel ölçümün ortalaması ve standart sapması şeklinde verilmiş olup, aynı sütundaki farklı harfler ortalamalar arasındaki önemi ifade etmektedir (p≤0.05).



Şekil 4.7. *O. sativa* L. bitki ekstraktlarının Pb içeriklerinde meydana gelen değişimler (H1: 100ppm Pb; H2: 400ppm Pb; H3: 100ppm Pb+2mM SA; H4: 100ppm Pb+20mM SA; H5: 100ppm Pb+20µM MeJA; H6: 100ppm Pb+100µM MeJA; H7: 400ppm Pb+2mM SA; H8: 400ppm Pb+20mM SA; H9: 400ppm Pb+20µM MeJA; H10: 400ppm Pb+100µM MeJA; H11: 100ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA; H12: 400ppm Pb+2mM SA+20µM MeJA)

Ağır metallerin toprakta aşırı birikmesi bitkiler dahil tüm organizmalar için büyük bir tehdit unsurudur. Arsenik, kurşun, kadmiyum ve cıva gibi farklı metaller ve metaloidlerin bitkiler için gerekli olmadığı ve oldukça da zararlı olduğu rapor edilmiştir (Rizwan ve ark., 2019). Kurşun, arsenikten sonra, ikinci toksik ağır metal olarak bilinmektedir. Kurşun toksisitesi fide gelişimini, kök uzamasını, klorofil üretimini, transpirasyon ve hücre bölünmesini etkileyerek bitki büyümesini engeller. Bu etkiler bitki türüne, Pb konsantrasyonuna, maruz kalma süresine ve bitki gelişim aşamasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Natasha ve ark., 2020). Yapılan çalışmalarda ağır metal stresine maruz kalan bitkilerde stresin olumsuz etkilerinin üstesinden gelmek için kullanılan ABA, IAA, SA, JA gibi bitki hormonlarının ağır metal toksisitesinin iyileştirilmesinde önemli rol oynadığı rapor edilmiştir (Emamverdian ve ark., 2015). Tüm bu nedenlerden ötürü, bu tez çalışmasında farklı konsantrasyonlardaki (0, 100, 400 ppm) Pb' ye maruz kalan çeltik (*Oryza sativa* L.) fidelerinde elisitör (SA ve MeJA) uygulamalarının, klorofil a ve b ile toplam karetonoid, toplam fenolik ve flavonoid

bileşikler, MDA miktarı, Pb, prolin ve toplam protein içerikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Fotosentez, bitki büyümesinin ve gelişiminin temelidir ve fotosentetik pigmentlerin içeriği, fotosentezin yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir (Wu ve ark., 2020). Bitkiler ağır metal stresine karşı hassastır. Metal toksisitesi bitkilerde hücre bölünmesine, hormonal homeostazise, fotosentez aktivitelerine, besin alımına müdahale ederek ve oksidatif stresi artırarak bitki büyümesini engeller (Huang ve ark., 2019; Dobrikova ve ark., 2021). Pb' ye en duyarlı fizyolojik süreçlerden biri olan fotosentez, kloroplastın pigment seviyelerindeki azalmalar nedeniyle olumsuz etkilenir (Lin ve ark., 2012). Bu tez çalışmasında da farklı mahsul türleriyle yapılan daha önceki çalışmalara benzer şekilde (Ilyas ve ark., 2024; Bouziani ve ark., 2023; Alhammad ve ark., 2023), Pb'ye maruz bırakılan yerel Karacadağ çeltiği bitkilerinin büyümesi baskılanmıştır. Acı biber bitkileri üzerine yapılan bir çalışmada karotenoid içeriğinin, Cd konsantrasyonunun artmasıyla birlikte kademeli olarak azaldığı, bu durumun, Cd'nin fotosentetik pigment sentezini bozduğunu ve kloroplastların fonksiyonunu etkilediğini göstermiştir (Zhang ve ark., 2023). Mevcut tez çalışmasında da, 100 ile 400 ppm Pb stresi klorofil-b ve toplam karotenoid içerikleri kontrollerine göre azalma göstererek hasarı arttırmıştır. Elisitörlerin etkisinin araştırıldığı pirinç (Kanu ve ark., 2022) ve buğday (Alikhani ve Abbaspour, 2019) bitkilerinde yapılan başka araştırmalarda Pb metal stresi altındaki ürünlerde bozulmalar kaydedilmiştir. MeJA ve Se uygulamasından sonra karotenoid içeriği artış göstermiş, kombine etkileri (MeJA+Se) tek başına etkiden daha anlamlı olmuştur. Lin ve ark. (2012) ve Dai ve ark. (2021), Se'nin *Oryza sativa*'da, Wei ve ark. (2021) *Solanum lycopersicum* bitkisinde silikon (Si) ve MeJA'nın sinerjik kullanımının Cd ağır metali birikimini azalttığını bildirmiştir. Mevcut çalışmada da MeJA ve SA uygulaması, Hazro popülasyonunda Pb birikimini uygulamalara göre değişen şekillerde azaltabilmiş ve kombine uygulamada (MeJA + SA) Pb birikimini azaltıcı etkisi iki ayrı uygulamaya göre daha anlamlı olmuştur. Toksik etkiler MeJA ve SA ilavesi ile telafi edilmiştir. MeJA'nın *Mentha arvensis* (Zaid ve Mohammad, 2018) ve *Triticum aestivum*'da (Kaya ve ark., 2021) fotosentezle ilgili özellikleri iyileştirdiği rapor edilmiştir. Ayrıca klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil içeriği, Pb stresi altında MeJA ile ön işleme tabi tutulan bitkilerde, önemli ölçüde artmıştır (Mubeen ve ark., 2024). Bu çalışmada, MeJA ve SA'nın Pb stresli bitkilere uygulaması, fotosentetik pigmentlerin seviyelerinde iyileşme sağlayarak tolerans seviyesini büyük oranda

arttırmış fakat bu oran hem stresin hem de elisitörlerin konsantrasyonuna bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.

Fosfolipitlerdeki doymamış yağ asitlerinin peroksidasyonu nedeniyle stres koşulları altında MDA düzeyi artar ve artan MDA reaktif oksijen türevleri (ROT) miktarını da indüklemektedir. Dolayısıyla bitkilerde oluşan stres derecesinin belirlenmesinde kullanılan MDA düzeyi, yapılan araştırmalarda önemli bir parametre olarak kullanılmıştır (Rizwan ve ark., 2019; Huang ve ark., 2019). Sharma ve ark. (2023) farklı Pb konsantrasyonlarına maruz bırakılan iki farklı salkım fasulye çeşidinde MDA içeriği Pb stresi altında artmış, ancak MeJA uygulaması, MDA içeriğini azaltarak Pb'nin toksik etkisini azaltmıştır. Aynı çalışmada eksojen olarak uygulanan MeJA'nın biyolojik membranı koruyup, lipid peroksidasyonunu düşürerek Pb stresine karşı toleransı arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada 100 ve 400 ppm Pb stres faktörüne yanıt olarak çeltik bitkisinde MDA miktarında 3 kat kadar bir artış gözlenmiş bu da bu durumun bitkide önemli ölçüde strese yol açtığını göstermektedir. Ancak SA ile MeJA uygulamalarına bağlı olarak bu hasar derecesinin azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla, sadece Pb' nin olduğu uygulama ekstresinde MDA miktarının diğer gruplara göre daha yüksek çıkması ve MeJA ile SA' nın ayrı ayrı veya birlikte uygulandığı ekstrelerde ise daha düşük çıkması; çalışmada kullanılan her iki elisitörün de çeltik bitkisinde Pb stresine karşı iyileşme sağladığı sonucunu işaret etmektedir. Yine benzer şekilde bakır, kadmiyum ve arsenik stresi koşullarında fasulye (Hanaka ve ark., 2016) ve pirinç (Mousavi ve ark., 2020) bitkilerinde yapılan başka çalışmalarda eksojen MeJA uygulamasının MDA içeriğini azalttığı rapor edilmiştir. Pb ile muamele edilmiş *Trifolium pratense* (Meng ve ark., 2022)'nin yaprak dokularında yüksek seviyelerde ROS ve MDA üretimi rapor edilmiştir. Bu durum Pb stresinin, lipid peroksidasyonuna ve membran hasarına yol açan oksidatif hasar ile ilişkilendirilmiştir. Pb stresi altındaki kenaf bitkilerinde eksojen MeJA enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanları artırarak lipid peroksidasyonunu azaltmıştır (Mubeen ve ark., 2024). MeJA'nın, özellikle de yüksek konsantrasyonunun, oksidatif stres göstergeleri üzerinde önemli bir engelleyici etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında da yüksek Pb konsantrasyonundaki yüksek MeJA uygulaması MDA içeriğinde önemli oranda düşüşe yol açarak oksidatif hasar üzerinde engelleyici etki yarattığı sonucu çıkarılabilir.

Bitkiler, abiyotik stresle başa çıkmak için çeşitli fizyolojik süreçleri kontrol eden çeşitli organik çözünenler (prolin, protein, çözünen şekerler, vb.) üretir. Pb

toksisitesinin, biber (*Capsicum annuum* L.) bitkisi üzerindeki etkileri araştırıldığında, artan Pb yoğunluğuna bağlı olarak MDA ve prolin içeriğinin arttığı görülmüştür (Britto ve ark., 2011). MeJA ve SA'nın bitkilere eksojen uygulamasının osmolitlerde, antioksidan enzimlerde ve karotenoidlerde birikime yol açarak ağır metallerin toksik etkilerini minimize edebildiği rapor edilmiştir (Rosa ve ark., 2009; Poonam ve ark., 2013). Mevcut çalışmada Pb stresi altındaki çeltik bitkileri, kontrol bitkilerine kıyasla daha düşük düzeyde prolin ve protein içeriği göstermiş ancak MeJA ve SA uygulandığında prolin ve protein konsantrasyonunda artışlar olmuştur. Benzer şekilde yapılan bir çalışmada Pb stresi altında MeJA ön işleminden sonra miktarı artan osmolitler (prolin, protein ve nişasta) hücresel homeostaziye yeniden sağlamış ve kenaf bitkilerinde toleransı iyileştirmiştir (Mubeen ve ark. 2024). Düşük MeJA ve SA konsantrasyonlarının yalnızca Pb stresli bitkilere kıyasla bu çalışmada, prolin ve protein içeriğini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Pirinç bitkilerinde yapılan başka bir çalışmada, bitkiler hidrofonik olarak tek başına veya kombine halinde Pb ve MeJA'ya maruz bırakılmış. MeJA ilavesi, prolin metabolizmasını ayarlayarak, fitoşelatin birikimini arttırmış ve kurşun stresli pirincin büyümesini geliştirmiştir (Salavati ve ark., 2021). Sofy ve ark. (2020) JA, SA ve prolinin eksojen uygulamalarının ve bunların kombinasyonunun mısır bitkilerinde Pb toksisitesinin neden olduğu oksidatif hasarın üstesinden gelme yeteneğini arttırdığını özellikle de kombinasyonun büyüme ve gelişme için en etkili uygulama olduğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmada da yüksek Pb konsantrasyonunda MeJA+SA'nın kombin uygulaması prolin içeriğini yaklaşık 5 kat arttırarak, protein içeriğini ise yaklaşık 8 kat arttırarak toleransı geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Stresli koşullarda prolin, ROS temizlemede, hücresel ozmolaritenin korunmasında, redoks homeostazisinin ve protein fonksiyonlarının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar (Ghorbani ve ark., 2018; Ghasemi-Omran ve ark., 2021). Sharma ve Dubey (2005), bir protein stabilizatörü ve metal şelatörü olarak prolinin, ağır metal toksisitesi altında bitki toleransını arttırdığını belirtmiştir. Bu nedenle bu tez çalışmasında elisitör uygulanan bitkilerde prolin ve protein birikiminin artması, stresli koşullara uyum sağlamak için bitki savunma mekanizmasının uyarıldığını gösterebilir.

Bitkiler, oksidatif stresin zararlı etkilerinin üstesinden gelmek için karmaşık bir antioksidan sistemden faydalanır ve serbest radikallerin neden olduğu zararları en aza indirmek için sekonder bileşikler biriktirir ve böylece daha düşük lipid peroksidasyonu ve hücre zarı hasarlarına neden olur (Kumar ve Sharma, 2018). Yapılan birçok

araştırmada da, çevresel streslerin etkisinde kalan bitkilerde fenolik ve flavonoid bileşik miktarlarında artışların meydana geldiği rapor edilmiştir. Lajayer ve ark. (2017), fenolik bileşiklerin enzimatik olmayan antioksidan sistemin önemli bir parçası olduğunu ve bitkinin abiyotik stresle başa çıkmasına yardımcı olduğunu bildirmişlerdir. Sentezi artan sekonder bileşikler ile kurşun ve kadmiyumun neden olduğu metalik stres arasındaki doğrudan ilişki Chen ve ark. (2019), Zoufan ve ark. (2020) tarafından da rapor edilmiştir. Kurşun uygulanan farklı arpa (*Hordeum vulgare* L.) çeşitlerinde yapraklardaki toplam fenolik madde içeriklerinin, kurşun konsantrasyonunun artması ile arttığı saptanmıştır (Gezer, 2011). Elisitörler, özellikle de MeJA ve SA, sinyal iletim yolunda flavonoidler, terpenoidler, fenilpropanoidler ve alkaloidler dahil olmak üzere ikincil metabolitlerde yer alan biyosentetik genleri aktive eder ve bitki savunma yanıtlarında önemli bir rol oynar (Cappellari ve ark., 2019; Miladinova-Georgieva ve ark., 2023). Bali ve ark., (2019) Pb stresi altındaki domates fidelerine uygulanan JA'nın ikincil metabolitlerin (toplam fenoller, polifenoller, flavonoidler ve antosiyanin) içeriğini ve bunlara bağlı bazı genlerin ekspresyonunu arttırarak Pb toksisitesini azalttığını tespit etmişlerdir. Benzer şekilde MeJA tedavisinin, arsenik stresi altında *Brassica napus*' un fenilalanin amonyak liyaz ekspresyonunu arttırdığı rapor edilmiştir (Farooq ve ark., 2016). Bu tez çalışmasında da kurşun stresine bağlı olarak çeltik (*O. sativa* L.) fidelerinin toplam fenolik miktarının azaldığı ve flavonoid bileşik miktarlarının arttığı görülmüş, elisitör kullanımının bu fenolik madde miktarındaki azalmayı tolere ettiği belirlenmiştir. Özellikle de fenolik içerik bakımından MeJA, SA' ya göre daha etkili bulunmuştur.

Bitki hücrelerindeki yüksek Pb konsantrasyonu, Pb'nin hücre vakuolleri içinde bölünmesine ve dışlanmasına, hücre duvarı ve hücre zarında çözünmeyen Pb fraksiyonunun oluşmasına neden olmaktadır (Bassegio ve ark., 2020; Shakoor ve ark., 2014). Son zamanlarda jasmonatların ağır metallerin taşıma sistemlerini düzenleme yeteneğine sahip olduğu, böylece birikimlerini sınırlandırdığı ve toleranslarını arttırdığı gösterilmiştir (Mousavi ve ark., 2020; Verma ve ark., 2020). Salavati ve ark. (2021) pirinç bitkilerinde uygulanan MeJA' nın tüm bitkide Pb alımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamasına rağmen, sürgünlerdeki Pb birikimini azalttığını bildirmiştir. Araştırmacılar bu durumun MeJA' nın kökteki Pb' yi hareketsiz hale getirerek, toprak üstü organlara translokasyonunu azalttığını gösterdiğini belirtmişlerdir. Mevcut çalışmada Pb içeriği sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek değer 400 ppm Pb uygulamasında

elde edilirken MeJA ve SA uygulanması yaprak dokularında Pb içeriğini önemli ölçüde değiştirmiştir. Sharma ve ark. (2023) Pb stresi altında MeJA' nın eksojen uygulaması sonucu iki farklı fasulye çeşidinin farklı dokularında (kök, sürgün, yaprak) Pb alımında önemli oranda azalışlar olduğunu belirtmişlerdir. MeJA' nın büyümeyi, antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak ve Pb birikimini azaltarak kurşunun zararlı etkisini azalttığı sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca MeJA uygulamasıyla Pb (Bali ve ark. 2018; Piotrowska ve ark., 2009), Cd (Ahmad ve ark., 2016) ve As (Farooq ve ark., 2018; Mousavi ve ark., 2020) alımının azalmasına ilişkin benzer sonuçlar daha önce de elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda elisitörlerden özellikle de jasmonatların, ağır metal taşıyıcı protein ekspresyonunu azaltabilecek ve sonuçta metal alımını azaltabilecek bir sinyal molekülü gibi davranabildiği vurgulanmıştır. Mevcut tez çalışmasında da yüksek Pb konsantrasyonunda, Pb alımının azaltılmasında MeJA uygulamaları SA'ya göre daha iyileştirici sonuçların oluşmasına yol açmıştır. Bu nedenle, önceki çalışmalarda da belirtildiği üzere, MeJA uygulaması ağır metal toksisitesinin indüklenmesinde etkili bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında Karacadağ çeltik çeşidinin Hazro popülasyonu için Pb stresinin ve MeJA ile SA uygulamalarının fotosentetik pigment içerikleri, MDA, Pb içeriği, prolin, toplam protein, toplam fenolik ve flavonoid madde içerikleri üzerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Klorofil-a içeriği için sonuçlar değerlendirildiğinde, en düşük miktarın 100 ppm Pb+20 mM SA ile 400 ppm Pb+2 mM SA uygulamalarında olduğu, en yüksek miktarın 400 ppm Pb+2 mM SA+20 mM MeJA uygulanan deney grubunda olduğu görülmüştür.
- Klorofil-b için en düşük miktarın sırasıyla 400 ppm Pb+2 mM SA ve 100 ppm Pb+20 μ M MeJA uygulamalarında olduğu, en yüksek miktarın ise 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA ve sonrasında 100 ppm Pb+2 mM SA gruplarında olduğu görülmüştür.
- Kurşun uygulamasına bağlı olarak çeltik yapraklarındaki toplam karotenoid miktarları için sonuçlar incelendiğinde; en düşük miktarlar 400 ppm ile 100ppm Pb+20mM SA uygulamalarında, en yüksek miktarın 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA konulan deney grubunda olduğu saptanmıştır.
- Deney gruplarında lipid peroksidasyonunu en fazla artırarak bitki hücrelerine en fazla zarar veren grubun 400 ppm Pb kirlenmesi ile oluşturulan uygulamada olduğu görülmüştür. Lipit peroksidasyonunu ve dolayısıyla membran hasarını en fazla artıran ikinci deney grubu ise 100 ppm Pb+20 mM SA uygulaması olmuştur. Kontrol grubundan daha az lipid peroksidasyonuna sebep olan deney grupları ise, 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA grubu ile 400 ppm Pb+100 μ M MeJA eklenen grup olduğu görülmüştür.
- Kurşun stresine maruz kalan çeltik bitkilerinin yapraklarındaki toplam fenolik bileşik miktarları kıyaslandığında, 100 ppm Pb+20 mM SA eklenen deney grubunda en düşük değerde olduğu görülmüştür. Fenolik bileşiklerin en çok arttığı

deney grubunun ise 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA uygulamasında olduğu görülmüştür.

- Kurşun stresine maruz kalan çeltik bitkilerinin yapraklarında toplam flavonoid madde miktarları için sonuçlar incelendiğinde tüm uygulamaların kontrolden yüksek içeriğe sahip olduğu görülmüştür. Kontrol grubuyla kıyaslandığında, en az artışın 400 ppm Pb+20 μ M MeJA eklenen deney grubunda olduğu, en fazla artışın ise 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA ve 100 ppm Pb+2 mM SA uygulamalarında olduğu saptanmıştır.

- Kurşun stresine maruz kalan çeltik bitkilerinin prolin miktarında meydana gelen değişimler kontrol grubuyla kıyaslandığında, en fazla azalışın 400 ppm Pb deney grubunda olduğu, en fazla artış 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA uygulamasında kaydedilmiştir.

- Toplam protein miktarları için sonuçlar incelendiğinde; uygulamaya bağlı olarak, kontrol grubuyla kıyaslandığında, en fazla azalışın 400 ppm'lik Pb kirlenmesinde olduğu görülmüştür. Elisitörlerin eklendiği deney gruplarında ise en az iyileşmenin 100 ppm Pb+20 mM SA eklenen deney grubunda, en fazla iyileşmenin 400 ppm Pb+2 mM SA+20 μ M MeJA eklenen grupta olduğu görülmüştür.

- Çeltik bitkilerinde elisitör uygulaması ile beraber Pb içeriğinde düşüşler gözlenmiş ve en düşük değer 400ppm Pb+2mM SA+20 μ M MeJA uygulamasından elde edilmiştir.

5.2. Öneriler

Kurşun, ikinci en toksik ağır metaldir ve bitkilerde herhangi bir biyolojik role sahip değildir. Volkanik patlamalar ve orman yangınları gibi doğal faktörler ile tekstil atık sularından yakıt ve boya endüstrisine kadar birçok antropojenik faaliyetler, kurşun kontaminasyonuna neden olmaktadır. Tarım topraklarında 150-300 mg kg⁻¹, bitkilerde ise 2 mg kg⁻¹ civarı kurşun konsantrasyonu, toksisite için eşik değeri olarak kabul edilmektedir. Bu konsantrasyon seviyeleri aşıldığında, tohum çimlenmesi ve biyokütle üretimi sınırlanmakta, besin alımı dengesi bozulmakta, klorofil degradasyonu artmakta, fotosentetik hızda azalma ve membran hasarı meydana gelmektedir (Zulfıqar ve ark.,

2019). Birçok enzim aktivitesinin inhibisyonuna neden olan kurşun, su dengesini de bozmakta, fotosentetik pigmentlerin içeriğini azaltmakta ve hidrojen peroksit, MDA, seviyelerini artırmaktadır (Okant ve Kaya, 2019). Bu tez çalışmasında, elisitörlerin (MeJA ve SA) eksojen uygulaması, konsantrasyona bağlı olarak değişen şekillerde, Pb'nin klorofil ve karotenoid içeriği üzerindeki zararlı etkilerini azaltmıştır. Pb stresi altında pirinç bitkilerinde, stres toleransını arttırabilen, osmolitlerin içeriği artmış böylelikle Pb toksisitesine karşı toleransa aktif katılım olmuş olabileceği ve hücresel homeostazi yeniden sağlanabildiği sonucuna varılmıştır.

Çalışma sonuçları, elisitörlerin fotosentetik pigmentleri, toplam proteini, prolini ve sekonder metabolitleri (toplam fenolik, flavonoid) iyileştirip, MDA miktarını azaltarak Pb'nin toksik etkisini modüle etmiş olabileceği ve böylece büyüme ve gelişme parametreleri üzerinde iyileştirici etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca özellikle yüksek Pb konsantrasyonunda (400 ppm) MeJA ve SA'nın birlikte uygulamaları incelenen tüm özellikler yönünden en iyi sonuçların elde edilmesine yol açmıştır. Dolayısıyla mevcut çalışmada, MeJA veya SA'nın ağır metal toksisitesini hafifletmek için daha önce yapılan çalışmalardan farkı, pirinç bitkilerinde Pb stresini azaltmak için yüksek konsantrasyonda birlikte kullanılmasından yatmaktadır. Elisitörlerin özellikle sinerjik etkisinin sağladığı bu iyileşme, Pb birikiminin azalması ve dolayısıyla ROS üretiminden kaynaklanan zararın en aza indirilmesi nedeniyle olmuş olabilir.

Mevcut sonuçlar, Pb toksisitesine maruz kalan bitkilerde MeJA ve SA'nın birlikte kullanımı ile ilgili yeni ek bilgiler sağlamış, ancak sinerjik etkileri ile etkinleştirilen ve Pb stresi sırasında çalışan biyokimyasal mekanizmanın daha açık bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla gelecekteki çalışmalar, Pb kirliliğinin bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için MeJA+SA sinerjik uygulamasının bitkilerde Pb alımı ve birikiminin moleküler süreçlerini anlamaya odaklanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, P., Rasool, S., Gul, A., Sheikh, S.A., Akram, N.A., Ashraf, M., Kazi, A.M. and Guzel, S., 2016, Jasmonates: multifunctional roles in stress tolerance. *Front Plant Sci* 7:813. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00813>.
- Alhammad, B. A., Ahmad, A., & Seleiman, M. F., 2023, Nano-Hydroxyapatite and ZnO-NPs Mitigate Pb Stress in Maize. *Agronomy*, 13(4), 1174.
- Ali, M., and Baek, K.-H., 2020, Jasmonic acid signaling pathway in response to abiotic stresses in plants. *Int. J. Mol. Sci.* 21:621. doi: 10.3390/ijms21020621.
- Alikhani, O., Abbaspour, H., 2019, Effects of methyl jasmonate and cadmium on growth traits, cadmium transport and accumulation, and allene-oxide cyclase gene expression in wheat seedlings. *Rev Agric Neotropica* 6:20–29.
- Andiç, B., 2021, *Salvia nemorosa* Bitkisinin Bazı Fizyolojik ve Biyokimyasal Parametreleri Üzerine Elisitörlerin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Batman ,Türkiye.
- Anonim, 2011, Ulusal Hububat Konseyi Çeltik Raporu Erişim: [www.pdd.org.tr/libs/filemanager/28_11_2011_ELT_K_ULUSAL_HUBUBAT_KONSEY_RAPORU.pdf].
- Anonim, 2015, çeşitlerimiz (online), Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü, <http://arastirma.tarim.gov.tr/ttae/Link/1/Cesitlerimiz>.
- Arnon, D.I., 1949, Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*, *Plant Physiology*, 24:1–15.
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M., 2021, Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 643972. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>.
- Bali, S., Jamwal, V.L., Kaur, P., Kohli, S.K., Ohri, P., Gandhi, S.G., Bhardwaj, R., Al-Huqail, A.A., Siddiqui, M.H., Ahmad, P., 2019 Role of P-type ATPase metal transporters and plant immunity induced by jasmonic acid against Lead (Pb) toxicity in tomato. *Ecotoxicol Environ Safety* 174:283–294.
- Bassegio, C., Campagnolo, M.A., Schwantes, D., Gonçalves Junior, A.C., Manfrin, J., Schiller, A., d.P. and Bassegio, D., 2020, Growth and accumulation of Pb by roots and shoots of *Brassica juncea* L. *Int J Phytoremed* 22:134–139.
- Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D., 1973, Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39 (1): 205-207.

- Bawa, G., Feng, L., Yan, L., Du, Y., Shang, J., Sun, X., Du, J., 2019. Pre-treatment of salicylic acid enhances resistance of soybean seedlings to *Fusarium solani*. *Plant Mol. Biol.* 101 (3), 315–323. <https://doi.org/10.1007/s11103-019-00906-x>.
- Bhatti, K. H., Anwar, S., Nawaz, K., Hussain, K., Siddiqi, E. H., Sharif, R. U., Talat, A. and Khalid, A., 2013, Effect of Heavy Metal Lead (Pb) Stress of Different Concentration on Wheat (*Triticum aestivum* L.), Middle – East Journal of Scientific Research, 14 (2): 148 – 154.
- Bouziani, E. Benouis, S. and Azzouz, F., 2023, Effect Of Pb Stress On Relative Water Content, Photosynthetic Pigments, Pb Uptake And Nutrients (Ca, Na And K) Balance in Broad Bean (*Vicia faba* l.) Plant, *Plant Archives*, 23(1), 36-43.
- Britto, J. D. A, Sebastian, S. R. and Gracelin, D. H. S., 2011, Effect Of Lead On Malondialdehyde, Superoxide Dismutase, Proline Activity And Chlorophyll Content In *Capsicum annum.*, *Bioresearch Bulletin*, 1: 093 – 098.
- Cai, H., He, M., Ma, K., Huang, Y. and Wang, Y., 2015, Salicylic acid alleviates cold-induced photosynthesis inhibition and oxidative stress in *Jasminum sambac*. *Turkish Journal of Biology*, 39: 241-247.
- Cappellari, L.D.R., Santoro, M.V., Schmidt, A., Gershenzon, J. and Banchio, E., 2019, Induction of essential oil production in *Mentha x piperita* by plant growth promoting bacteria was correlated with an increase in jasmonate and salicylate levels and a higher density of glandular trichomes. *Plant Physiol Biochem.*, 141:142–153.
- Chen, S., Wang, Q., Lu, H., Li, J., Yang, D., Liu, J., & Yan, C., 2019, Phenolic metabolism and related heavy metal tolerance mechanism in *Kandelia obovata* under Cd and Zn stress. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 169, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.004>.
- Chen, T., Li, Z., Jia, R., Huang, Z., 2020. Transcriptome analysis revealed key genes and pathways related to cadmium-stress tolerance in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). *Ind. Crops Prod.* 158, 112970 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112970>.
- Çolak, U., 2009, Gaziantep İlinde Ekimi Yapılan Ekmeklik Buğday Çeşitlerinde (Tosunbey, Ceyhan 99) Kurşun Stresinin Fizyolojik Ve Morfolojik Etkileri ile Kurşuna Tolerans Düzeylerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Gaziantep, Türkiye.
- Çulha, Ş., Çakırlar, H., 2011, Tuzluluğun bitkiler üzerine etkileri ve tuz tolerans mekanizmaları. *AKÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2): 11-34.
- da Silva, E. B., Gao, P., Xu, M., Guan, D. X., Tang, X. J., & Ma, L. Q., 2020, Background concentrations of trace metals As, Ba, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Se, and Zn in 214 Florida urban soils: Different cities and land uses. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 264, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114737>.

- Dai, Z., Yuan, Y., Huang, H., Hossain, M.M., Xiong, S., Cao, M., Ma, L.Q., 2021, Methyl jasmonate mitigates high selenium damage of rice via altering antioxidant capacity, selenium transportation and gene expression. *Sci Total Environ* 756:143848.
- Danova, K., Pistelli, L., 2022, Plant tissue culture and secondary metabolites production. *Plants* 11(23):3312.
- Dere, S., 2019, Kurşun kirliliğinin tarımsal üretime etkileri. *International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences*, 12: 108-118.
- Dobrikova, A.G., Apostolova, E.L., Han, A., Yotsova, E., Borisova, P., Sperdouli, I., Adamakis, I.D.S., Moustakas, M., 2021, Cadmium toxicity in *Salvia sclarea* L.: an integrative response of element uptake, oxidative stress markers, leaf structure, and photosynthesis. *Ecotoxicol Environ Saf* 209:111851.
- Donduran, Ö.D., 2014, Ülkemizde işlenen bazı çeltik çeşitlerinin kalite ve biyoaktif özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.
- Elallem, K., Ben Bakrim, W., Ennoury, A., Metougui, M. L., Yasri, A., & Boularbah, A., 2022, Germination parameters and responses of antioxidant enzymatic activities of two medicinal plants (*Peganum harmala* L. and *Origanum majorana* L.) under heavy metal stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 3942-3957.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F. and Xie, Y., 2015, Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response, *The Scientific World Journal*, 2015: 18.
- Farooq, A.M., Islam, F., Yang, C., Nawaz, A., Athar, R.H., Gill, A.R., Ali, B., Song, W.J., Zhou, W.J., 2018, Methyl jasmonate alleviates arsenic-induced oxidative damage and modulates the ascorbate-glutathione cycle in oilseed rape roots. *Plant Growth Regul* 84:135–148.
- Farooq, M.A., Gill, R.A., Islam, F., Ali, B., Liu, H., Xu, J., He, S., Zhou, W., 2016, Methyl jasmonate regulates antioxidant defense and suppresses arsenic uptake in *Brassica napus* L. *Front Plant Sci* 7:468.
- Gezer, E., 2011, Arpa (*Hordeum Vulgare* L.) Bitkisinin Bazı Çeşitlerinde Ağır Metal Stresi Etkilerinin Fizyolojik Olarak Araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı.
- Ghani, A., 2010, Effect of Lead Toxicity on Growth, Chlorophyll and Lead (Pb+) Contents of Two Varieties of Maize (*Zea mays* L.), *Pakistan Journal of Nutrition*, 9 (9): 887 – 89.
- Ghasemi-Omran, V.O., Ghorbani, A., Sajjadi-Otaghsara, S.A., 2021, Melatonin alleviates NaCl-induced damage by regulating ionic homeostasis, antioxidant system, redox homeostasis, and expression of steviol glycosides-related

- biosynthetic genes in in vitro cultured *Stevia rebaudiana* Bertonii. *Vitro Cell Dev Biol-Plant*. <https://doi.org/10.1007/s11627-021-10161-9>.
- Ghorbani, A., Razavi, S.M., Ghasemi Omran, V.O., Pirdashti, H., 2018, Piriformospora indica inoculation alleviates the adverse effect of NaCl stress on growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant Biol* 20:729–736.
- Gillani, S. R., Murtaza, G., & Mehmood, A., 2021, Mitigation of lead stress in *Triticum aestivum* L. seedlings by treating with salicylic acid. *Pak. J. Bot*, 53(1), 39-44.
- Gullet, B. K., Linak, W. P., Touati, A., Wasson, S. J., Gatica, S., ve King, C. J., 2019, Characterization of Air Emissions and Residual Ash from Open Burning of Electronic Wastes During Simulated Rudimentary Recycling Operations. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9, 69-79.
- Gupta, D., Huang, H., Yang, X., Razafindrabe, B. And Inouhe, M., 2010, The detoxification of Pb in *Sedum alfredii* H. is not related to phytochelatin but the glutathione. *J Hazard Mater*, 177(1-3): 437-444.
- Gürel, A. ve Avcıoğlu, R., 2001, Bitkilerde Strese Dayanıklılık Fizyolojisi, 21. bölüm, Editörler: Özcan, S., Gürel, E., Babaoğlu, M., “Bitki Biyoteknolojisi II, Genetik Mühendisliği ve Uygulamaları”, *Selçuk Üniversitesi Vakfı Yayınları*, 308-313.
- Gök, A., 2010, İğde (*Elaeagnus Angustifolia* L.) Çeliklerinin Kambiyum Faaliyeti Üzerinde Kurşun Stresine Karşı İndol-3-Asetik Asit, Gibberellik Asit Ve 6-Furfurilaminopurin Karışımlarının Etkileri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Haas, J., Lozano, E. R., Haida, K. S., Mazaro, S. M., De Souza Vismara, E., and Poppy, G. M. 2018, Getting ready for battle: do cabbage seeds treated with jasmonic acid and chitosan affect chewing and sap-feeding insects? *Entomol. Exp. Appl.* 166, 412–419. doi: 10.1111/eea.12678.
- Hanaka, A., Wójcik, M., Dresler, S., Mroczek-Zdyrska, M., Maksymiec, W., 2016, Does methyl jasmonate modify the oxidative stress response in *Phaseolus coccineus* treated with Cu. *Ecotoxicol Environ Saf* 124:480–488.
- Hassoon, A.S., Abduljabbar, I.A., 2019, Review on the role of salicylic acid in plants. In: Hasanuzzaman, M., Filho, M.C.M.T., Fujita, M., Nogueira, T.A.R. (Eds.), *In Sustainable Crop Production*. Inc., London <https://doi.org/10.5772/intechopen.89107>.
- Ho, T.T., Murthy, H.N., Park, S.Y., 2020, Methyl jasmonate induced oxidative stress and accumulation of secondary metabolites in plant cell and organ cultures. *Int J Mol Sci* 21(3):716.
- Hoagland, D.R. and Arnon, D., 1938, The water culture method for growing plants without soil. UC College of Agriculture, Ag. Exp. Station, Berkeley, CA. Circular. 347, 1-39.

- Huang, B., Chen, Y.E., Zhao, Y.Q., Ding, C.B., Liao, J.Q., Hu, C. and Yuan, M., 2019, Exogenous melatonin alleviates oxidative damages and protects photosystem II in maize seedlings under drought stress. *Front Plant Sci.*,10:677.
- Huang, X. H., Zhu, F., Yan, W. D., Chen, X. Y., Wang, G. J., & Wang, R. J. 2019, Effects of Pb and Zn toxicity on chlorophyll fluorescence and biomass production of *Koeleria paniculata* and *Zelkova schneideriana* young plants. *Photosynthetica*, 57(2).
- Hussain, A., Nabila, A., Arshad, F., Akram, M., Khan, Z. I., Ahmad, K., Mansha, M. and Mirzaei, F., 2013, Effects Of Diverse Doses Of Lead (Pb) On Different Growth Attributes Of *Zea-Mays* L., *Agricultural Sciences*, 4(5): 262 – 265.
- Hussain, S.S., Rasheed, M., Hamzah, Saleem, M., Ahmed, ZI., Hafeez, A., 2023, Salt tolerance in maize with melatonin priming to achieve sustainability in yield on salt affected soils. *Pakistan Journal of Botany* 55.
- Jakovljevic, D., Stankovic, M., Warchol, M., Skrzype, E., 2022, Basil (*Ocimum* L.) cell and organ culture for the secondary metabolites production: a review. *Plant Cell Tissue and Organ Culture (PCTOC)* 149(1–2):61–79.
- Jańczak-Pieniążek, M., Cichoński, J., Michalik, P., Chrzanowski, G. 2022, Effect of heavy metal stress on phenolic compounds accumulation in winter wheat plants. *Molecules*, 28(1), 241.
- Ilyas, Muhammad Zahaib, Kyu Jin Sa, Muhammad Waqas Ali & Ju Kyong Lee, 2024 "Toxic effects of lead on plants: integrating multiomics with bioinformatics to develop Pb-tolerant crops." *Planta* 259.1: 18.
- Kanu, A.S., Ashraf, U., Mansaray, L.R., Abbas, F., Fiaz, S., Amanullah, S., Charley CS, Tang X (2022) Exogenous methyl jasmonate application improved physio-biochemical attributes, yield, quality, and cadmium tolerance in fragrant rice. *Front Plant Sci* 13:849477.
- Kaya, C., Ugurlar, F., Ashraf, M., Noureldeen, A., Darwish, H., Ahmad, P., 2021, Methyl jasmonate and sodium nitroprusside jointly alleviate Cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants by modifying nitrogen metabolism, Cadmium detoxification, and AsA-GSH cycle. *Front Plant Sci* 12:654780.
- Kaur, G., Sharma, P., Rathee, S., Singh, H.P., Batish, D.R., Kohli, R.K., 2021. Salicylic acid pre-treatment modulates Pb²⁺-induced DNA damage vis-à-vis oxidative stress in *Allium cepa* roots. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (37), 51989–52000. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14151-7>.
- Kaya, B., 2013, Karacadağ Yerel Ve Osmancık-97 Çeltik Varyetelerinin Bazı Yabancı Otlara Karşı Rekabet Yeteneklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 2

- Kıran, Y., Şahin, A., 2015, The effects of the lead on the seed germination, root growth and root tip cell mitotic divisions of *lens culinaris medik*. *Gazi University Journal of Science*, 18(1): 17-25
- Kraus, E. C., Stout, M. J. 2019, Seed treatment using methyl jasmonate induces resistance to rice water weevil but reduces plant growth in rice. *PLoS One* 14:e0222800. doi: 10.1371/journal.pone.0222800.
- Kumar, A., Prasad, M.N.V., 2018. Plant-lead interactions: transport, toxicity, tolerance, and detoxification mechanisms. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 166, 401–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.113>.
- Kumar, I., Sharma, RK, 2018, Production of secondary metabolites in plants under abiotic stress: an overview. *Significances of Bioengineering & Biosciences*. 2, 1-5, 10.31031/SBB.2018.02.000545.
- Külahcı, F., 2020, Environmental Distribution and Modelling of Radioactive Lead (210): A Monte Carlo Simulation Application. In: Gupta D.; Chatterjee S.; Walther C. (eds) *Lead in Plants and the Environment. Radionuclides and Heavy Metals in the Environment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21638-2_2.
- Lahuta, L. B., Zalewski, K., Głowacka, K., Nitkiewicz, B., and Amarowicz, R. 2018, Effect of methyl jasmonate on carbohydrate composition, α -amylase activity and growth of triticale (*Triticosecale* Witmack) seedlings. *J. Agr. Sci. Tech.* 19, 1127–1137.
- Lajayer, B. A., Ghorbanpour, M., Nikabadi, S., 2017, Heavy metals in contaminated environment: Destiny of secondary metabolite biosynthesis, oxidative status and phytoextraction in medicinal plants. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 145, 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.035>.
- Larcher, W., 1995, *Physiological Plant Ecology*, Published by Springer, ISBN 0-387-09795-3, New York, 506p.
- Lim, G.H., Liu, H., Yu, K., Liu, R., Shine, M.B., Fernandez, J., Burch-Smith, T., Kachroo, P., 2020, The plant cuticle regulates apoplastic transport of salicylic acid during systemic acquired resistance. *Sci. Adv.* 6 (19), eaaz0478. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz0478>.
- Lin, L., Zhou, W., Dai, H., Cao, F., Zhang, G., Wu, F., 2012, Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. *J Hazard Mater* 235–236:343–351.
- Lowry, O.H., Rosenbrough, N.J., Farr, A.L. and Randall, R.J., 1951, Protein measurement with folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193, 265-275.
- Manzoor, H., Mehwish, Bukhat, S., Rasul, S., Rehmani, M.I.A., Noreen, S., Athar, H-u-R., Zafar, Z.U., Skalicky, M., Soufan, W., Brestic, M., Habib-ur-Rahman, M., Ogbaga, C.C. and El Sabagh, A., 2022, Methyl Jasmonate Alleviated the Adverse

- Effects of Cadmium Stress in Pea (*Pisum sativum* L.): A Nexus of Photosystem II Activity and Dynamics of Redox Balance. *Frontiers in Plant Science*. Volume 13. DOI=10.3389/fpls.2022.860664.
- Meng, L., Yang, Y., Ma, Z., Jiang, J., Zhang, X., Chen, Z., Cui, G., Yin, X., 2022, Integrated physiological, transcriptomic and metabolomic analysis of the response of *Trifolium pratense* L. to Pb toxicity. *J Hazard Mater* 436:129128.
- Miladinova-Georgieva, K., Geneva, M., Stancheva, I., Petrova, M., Sichanova, M. and Kirova, E., 2023, Effects of different elicitors on Micropropagation, Biomass and secondary Metabolite production of *Stevia rebaudiana* Bertonii—*A. Rev Plants*, 12(1):153.
- Mitra, A., Chatterjee, S., Voronina, A.V., Walther, C. And Gupta, D.K., 2020, Lead Toxicity in Plants: A Review. In: Gupta D.; Chatterjee S.; Walther C. (eds) *Lead in Plants and the Environment. Radionuclides and Heavy Metals in the Environment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21638-2_6.
- Moreno, M.I.N., Isla, M.I., Sampietro, A.R. and Vattuone, M.A., 2000, Comparison of the free radical scavenging activity of Propolis from several regions of Argentina. *Journal of Ethnopharmacology*, 71: 109–114.
- Mousavi, S.R., Niknejad, Y., Fallah, H., Tari, D.B., 2020, Methyl jasmonate alleviates arsenic toxicity in rice. *Plant Cell Reports* 39:1041–1060.
- Mubeen, S., Pan, J., Saeed, W., Luo, D., Rehman, M., Hui, Z., Chen, P., 2024, Exogenous methyl jasmonate enhanced kenaf (*Hibiscus cannabinus*) tolerance against lead (Pb) toxicity by improving antioxidant capacity and osmoregulators. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33189-x>.
- Murthy, H.N., Lee, E.J., Paek, K.Y., 2014, Production of secondary metabolites from cell and organ cultures: strategies and approaches for biomass improvement and metabolite accumulation. *Plant Cell Tissue Organ Cult* 118(1):1–16.
- Narasimhamurthy, K., Soumya, K., Udayashankar, A.C., Srinivas, C., Niranjana, S.R., 2019, Elicitation of innate immunity in tomato by salicylic acid and *Amomum nilgiri* against *Ralstonia solanacearum*. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 22, 101414. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101414>.
- Natasha, N., Dumat, C., Shahid, M., Khalid, S. and Murtaza, B., 2020, Lead Pollution and Human Exposure: Forewarned is Forearmed, and the Question Now Becomes How to Respond to the Threat!. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21638-2_3.
- Naz, R., Khan, M.S., Hafeez, A., Fazil, M., Khan, M.N. et al., 2022, Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted industrial soils. *Brazilian Journal of Biology* 84.

- Ohkawa, H., Ohishi, N., Yagi, K., 1979, Assay for lipid peroxides in animal tissues by thiobarbituric acid reaction, *Analytical Biochemistry*, 95(2): 351-358.
- Paudel, S., Rajotte, E. G., and Felton, G. W. 2014, Benefits and costs of tomato seed treatment with plant defense elicitors for insect resistance. *Arthropod Plant Interact.* 8, 539–545. doi: 10.1007/s11829-014-9335-y
- Pauwels, L., Morreel K., De Witte, E., Lammertyn F., Van Montagu M., Boerjan W., Inze D., Goossens, A., 2008. Mapping methyl jasmonate-mediated transcriptional reprogramming of metabolism and cell cycle progression in cultured *Arabidopsis* cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105: 1380-1385.
- Pereira, F. J., De Castro, E. M., De Oliveira, C., Pires, M. F., Pereira, M. P., Ramos, S. J. and Faquin, V., 2014, Lead Tolerance Of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* Mart. - Pontederiaceae) As Defined By Anatomical And Physiological Traits, *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 86 (3): 1423 – 1433.
- Piotrowska, A., Bajguz, A., Godlewska-Żyłkiewicz, B., Czerpak, R., Kamińska, M., 2009, Jasmonic acid as modulator of lead toxicity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae). *Environ Exp Botany* 66:507–513.
- Poonam, S., Kaur, H., Geetika, S., 2013, Effect of jasmonic acid on photosynthetic pigments and stress markers in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. seedlings under copper stress. *Am. J. Plant. Sci.* 4, 817. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version].
- Rajwade, Y.A., Swain, D.K., Tiwari, K.N., Singh Bhadoria, P.B., 2018, Grain yield, water productivity, and soil nitrogen dynamics in drip irrigated rice under varying nitrogen rates. *Agronomy Journal*, 110(3): 868-878.
- Rascio, N. and Navari-Izzo, F., 2011, Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180: 169-181.
- Raskin, I., Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, S. and Salt, D.E. 1994, Bioconcentration of Heavy Metals by Plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 5: 285-290.
- Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A. and Waris, A.A., 2019, Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214:269–277.
- Rodas-Junco, B.A., Nic-Can, G.I., Munoz-Sanchez, A., Hernandez-Sotomayor, S.M., 2020, Phospholipid signaling is a component of the salicylic acid response in plant cell suspension cultures. *Int. J. Mol. Sci.* 21 (15), 5285. <https://doi.org/10.3390/ijms21155285>.
- Rosa, M., Prado, C., Podazza, G., Interdonato, R., González, J.A., Hilal, M., Prado, F.E., 2009, Soluble sugars: Metabolism, sensing and abiotic stress: A complex

- network in the life of plants. *Plant Signal. Behav*; 4, 388–393. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version].
- Saeed, S., Ullah, A., Ullah, S., Noor, J., Ali, B. et al., 2022, Validating the Impact of Water Potential and Temperature on Seed Germination of Wheat (*Triticum aestivum* L.) via Hydrothermal Time Model. *Life* 12.
- Saini, A., Manuja, S., Kumar, S., Hafeez, A., Ali, B. et al., 2022, Impact of cultivation practices and varieties on productivity, profitability, and nutrient uptake of rice (*Oryza sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) Cropping System in India. *Agriculture* 12: 1678.
- Salavati, J., Fallah, H., Niknejad, Y. et al., 2021, Methyl jasmonate ameliorates lead toxicity in *Oryza sativa* by modulating chlorophyll metabolism, antioxidative capacity and metal translocation. *Physiol Mol Biol Plants* 27, 1089–1104; <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00993-5>.
- Saleem, M., Fariduddin, Q., Janda, T., 2021, b. Multifaceted role of salicylic acid in combating cold stress in plants: a review. *J. Plant Growth Regul.* 40 (2), 464–485. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10152-x>.
- Sarkar, N., Ghosh, U., Biswas, R.K., (2018). Effect of Drip Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Summer Rice Cultivation In Pots, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1), 37-40.
- Sayyadi, G., Niknezhad, Y., Fallah, H., 2023, Sodium nitroprusside ameliorates lead toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by modulating the antioxidant scavenging system, nitrogen metabolism, lead sequestration mechanism, and proline metabolism. *Environmental Science and Pollution Research*, Volume 30, Number 9, Page 24408.
- Sędzik, M., Smolik, B. and Malkiewicz, M. K., 2015, Effect Of Lead Germination And Some Morphological And Physiological Parameters Of 10-Day-Old Seedlings Of Various Plant Species, *Environmental Protection And Natural Resources*, 26 (3): 22 – 27.
- Seven, T., Can, B., Darende, B.N. ve Ocak, S. 2018, Hava ve toprakta ağır metal kirliliği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(2): 91-103.
- Shahid, M., Pinelli, E., Pourrut, B., Silvestre, J. and Dumat, C., 2011, Lead-induced genotoxicity to *Vicia faba* L. roots in relation with metal cell uptake and initial speciation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 74:78-84.
- Shakoor, M.B., Ali, S., Hameed, A., Farid, M., Hussain, S., Yasmeen, T., Najeeb, U., Bharwana, S.A., Abbasi, G.H., 2014, Citric acid improves lead (Pb) phytoextraction in *Brassica napus* L. by mitigating Pb-induced morphological and biochemical damages. *Ecotoxicol Environ Safety* 109:38–47.

- Sharma, A., Sidhu, G.P.S., Araniti, F., Bali, A.S., Shahzad, B., Tripathi, D.K., Breestic, M., Skalicky, M., Landi, M., 2020. The role of salicylic acid in plants exposed to heavy metals. *Molecules* 25 (3), 540. <https://doi.org/10.3390/molecules25030540>.
- Sharma, P., Dubey, R.S., 2005, Lead toxicity in plants. *Braz J Plant Physiol* 17:35–52.
- Sharma, Y., Kumari, N., Sharma, V. 2023, Effect of methyl jasmonate in enhanced growth, antioxidants and reduced Pb uptake in contrasting cluster bean cultivars. *Vegetos* (2023) 36:127–132. <https://doi.org/10.1007/s42535-022-00491-3>.
- Singh, R., Kalia, S., Sharma, S. K., and Kalia, R., 2016, Recent advances in understanding the role of growth regulators in plant growth and development *in vitro*-I: conventional growth regulators. *Indian For.* 142, 459–470.
- Slinkard, K., Singleton, V.L., 1977, Total phenol analyses: Automation and comparison with manual methods, *Am J EnolViticult*, 28: 49–55.
- Sofy, M. R., Seleiman, M. F., Alhammad, B. A., Alharbi, B. M., & Mohamed, H. I., 2020, Minimizing adverse effects of pb on maize plants by combined treatment with jasmonic, salicylic acid and proline. *Agronomy*, 10(5), 699.
- Sürek, H., 2002, Çeltik Tarımı, *Hasad Yayınları*, İstanbul.
- Sürücü, M., 2022, Kurşun (Pb) Stresi Altındaki Buğday Bitkilerine Asparagin Uygulamasının Fizyolojik Ve Biyokimyasal Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Anabilim Dalı. Harran Üniversitesi. Şanlıurfa.
- Şafak, N., 2011, Karalâhana (*Brassica Oleracea* Var. *Acephala*) Ve Pazı (*Beta Vulgaris* Var. *Cicla*)' da Kurşun Ve Çinko Stresinin Araştırılması, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tas, I., 2021, Production cost and water savings of paddy produced by drip irrigation. *Current Trends in Natural Sciences*, 10(19): 151-165.
- Talaat, N.B., Todorova, D., 2022, Antioxidant machinery and glyoxalase system regulation confers salt stress tolerance to wheat (*Triticum aestivum* L.) plants treated with melatonin and salicylic acid. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 1–14 <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00907-8>.
- TÜİK, 2013, Türkiye İstatistik Kurumu Bitkisel Üretim İstatistikleri Veri Tabanı http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001, 01.04.2014.
- Verma, G., Srivastava, D., Narayan, S., Shirke, P.A., Chakrabarty, D., 2020, Exogenous application of methyl jasmonate alleviates arsenic toxicity by modulating its uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicol Environ Safety* 201:110735.
- Vicente, M.R.S. and Plasencia, J., 2011, Salicylic acid beyond defence: its role in plant growth and development. *Journal of Experimental Botany*, 62(10): 3321-3338.

- Wei, T., Li, X., Yashir, N., Li, H., Sun, Y., Hua, L., Ren, X., Guo, J., 2021, Effect of exogenous silicon and methyl jasmonate on the alleviation of cadmium-induced phytotoxicity in tomato plants. *Environ Sci Pollut R* 28:51854–51864.
- Weng, J.K., Lynch, J.H., Matos, J.O., Dudareva, N., 2021, Adaptive mechanisms of plant specialized metabolism connecting chemistry to function. *Nat. Chem. Biol.* 17 (10), 1037–1045. <https://doi.org/10.1038/s41589-021-00822-6>.
- Wu, C., Tang, S., Li, G., Wang, S., Fahad, S. et al., 2019, Roles of phytohormone changes in the grain yield of rice plants exposed to heat: A review. *PeerJ* 7: e7792.
- Wu, X., Song, H., Guan, C., Zhang, Z., 2020, Boron mitigates cadmium toxicity to rapeseed (*Brassica napus*) shoots by relieving oxidative stress and enhancing cadmium chelation onto cell walls. *Environ Pollut* 263:114546.
- Yadav, S. K., 2010, Heavy Metals Toxicity in Plants: An Overview on the Role of Glutathione, Phytochelatins in Heavy Metal Stress Tolerance of Plants, *South African Journal of Botany*, 76: 167 – 179.
- Yerli, C., Çakmakçı, T., Şahin, Ü. ve Tüfenkçi, Ş. 2020, Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(Özel Sayı): 103-114.
- Zaid, A., Mohammad, F., 2018, Methyl Jasmonate and nitrogen interact to alleviate cadmium stress in menthe arvensis by regulating physio-biochemical damages and ROS detoxification. *J Plant Growth Regul* 37:1331–1348.
- Zengin, F. K. ve Munzuroğlu, Ö., 2004, Fasulye Fidelerindeki (*Phaseolus Vulgaris* Cv. Strike) Sitokinin İçeriği Üzerine Bazı Ağır Metallerin (Hg⁺⁺, Cd⁺⁺, Cu⁺⁺ ve Pb⁺⁺) Etkileri, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 2 (2): 48 – 54.
- Zhang, C., Huang, R., Zhan, N. et al., 2023, Methyl jasmonate and selenium synergistically mitigative cadmium toxicity in hot pepper (*Capsicum annuum* L.) plants by improving antioxidase activities and reducing Cd accumulation. *Environ Sci Pollut Res* 30, 82458–82469 <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28273-7>.
- Zhao, M., Meng, Y., Wang, Y., Sun, G., Liu, X., Li, J., ... Gu, W., 2023, Exogenous Hemin alleviates cadmium stress in maize by enhancing sucrose and nitrogen metabolism and regulating endogenous hormones. *International Journal of Phytoremediation*, 25(3), 368–380. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2086212>.
- Zoufan, P., Azad, Z., Rahnama Ghahfarokhie, A., & Kolahi, M., 2020, Modification of oxidative stress through changes in some indicators related to phenolic metabolism in *Malva parviflora* exposed to cadmium. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 187, 109811. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109811>.
- Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Maqsood, M., Hussain, M., Ishfaq, M., Ahmad, M. & Anjum, M.Z., 2019, Lead toxicity in plants: Impacts and redemediation.

Journal of Environmental Management, 250, 109557. DOI:
10.1016/j.jwnmN.2019.109557

