



**PALMIYE BUDAMA ATIKLARINDAN BİYOKÖMÜR
ELDESİ VE SALVIA OFFICINALIS İLE BAKIR
FİTOREMEDİASYONUNA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞE BAHAR KARAKOÇ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
ARALIK - 2023**

**PALMIYE BUDAMA ATIKLARINDAN BİYOKÖMÜR
ELDESİ VE *SALVIA OFFICINALIS* İLE BAKIR
FİTOREMEDİASYONUNA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AYŞE BAHAR KARAKOÇ
ORCID ID: 0009-0009-5608-7639**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Danışman

**Doç. Dr. Zeynep Görkem DOĞAROĞLU
ORCID ID: 0000-0002-6566-5244**

**MERSİN
ARALIK – 2023**

ÖZET

PALMIYE BUDAMA ATIKLARINDAN BİYOKÖMÜR ELDESİ VE *SALVIA OFFICINALIS* İLE BAKIR FİTOREMEDİASYONUNA ETKİSİ

Artan nüfus ile birlikte endüstrileşen dünyada çeşitli üretim faaliyetleri sonucunda açığa çıkan atıkların alıcı ortama gelişigüzel bırakılması ve denetiminin sağlanamaması sonucunda, beslendiğimiz toprak, içtiğimiz su, nefes aldığımız hava kirlenmekte ve döngünün sonunda vücudumuza girip sağlığımızı bozmaktadır.

Bu çalışmada son yıllarda toprak iyileştirilmesinde sıkça kullanılan ve toprağın su tutma kapasitesini yükseltip, verimini arttıran ve sürdürülebilir bir proses olan biyokömür üretiminin belli bir yönetim sistemi olmayan belediye park bahçe atıklarından üretilmesi sağlanarak atıkların verimli bir şekilde ve çevreye faydalı bir şekilde kullanılması hedeflenmiştir. Çalışmada bakır ile kirlenmiş toprağın fitoremediasyon metodu ile iyileştirilmesinde biyokömürün etkinliği araştırılmıştır. Bu sayede büyük ölçüde komposta giden dal budama atıklarının toprakta daha verimli kullanılıp kullanılmayacağı belirlenerek, sürdürülebilir bir sistem kurulması hedeflenmiş ve düzenli olarak oluşan bu organik atıkların sıfır atık yaklaşımı ile değerlendirilmesi ve kirlenmiş toprakların remediasyonuna fayda sağlanması amaçlanmıştır.

Budama atıklarından elde edilen biyokömürün belediye faaliyetleri sonucu oluşan palmye ağacı budama atıklarından üretilmesi planlanmış olup, böylelikle toprak kirliliğinde ağır metallerle mücadelede daha az maliyetli bir sistemin kullanılması ve organik maddenin toprak verimliliğinde kullanılması hedeflenmiştir. Bu sistemle oluşan dal budama atıklarının yönetimi daha kolay hale gelecek ve biyokömür üretilerek organik atıklara bir katma değer sağlanmış olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Ağır metal, Bakır, Biyokömür, Fitoremediasyon, Toprak kirliliği

Danışman: Doç. Dr. Zeynep Görkem DOĞAROĞLU Mersin Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

BIOCHAR PRODUCTION FROM PALM PRUNING WASTES AND ITS EFFECT ON COPPER PHYTOREMEDIATION WITH *SALVIA OFFICINALIS*

As a result of the indiscriminate release of wastes released as a result of various production activities in the industrialized world with increasing population and the inability to control them, the soil we feed, the water we drink, the air we breathe are polluted and at the end of the cycle, they enter our bodies and disrupt our health.

In this study, it is aimed to use waste efficiently and in a way that is beneficial to the environment by ensuring that biochar production, which is a sustainable process that has been frequently used in soil improvement in recent years and increases the water retention capacity of the soil and increases its productivity, is produced from municipal park and garden wastes that do not have a certain management system. In the study, the effectiveness of biochar in remediating copper-contaminated soil with the phytoremediation method was investigated. In this way, it was aimed to establish a sustainable system by determining whether branch pruning waste, which largely goes to compost, could be used more efficiently in the soil, and to evaluate these regularly generated organic wastes with a zero waste approach and to benefit the remediation of contaminated soils.

Biochar obtained from pruning wastes is planned to be produced from palm tree pruning wastes generated as a result of municipal activities, thus it is aimed to use a less costly system in combating heavy metals in soil pollution and to use organic matter in soil fertility. With this system, it will be easier to manage the branch trunk wastes and biochar will be produced and an added value will be provided to organic wastes.

Keywords: Heavy metal, Copper, Biochar, Phytoremediation, Soil Pollution.

Advisor: Doç. Dr. Zeynep Görkem DOĞAROĞLU, Department of Environmental Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam aşamasında danıőmanlıęımı üstlenerek bilgi birikimiyle bana her zaman katkıda bulunan değerli danıőmanım Doç. Dr. Zeynep Gökem DOğAROğLU'na, yapıcı değerlendirme ve bilgilendirmeleriyle tez çalıőmamda destek olan Prof. Dr. Yaęmur UYSAL ve Doç. Dr. Ferit KOCAÇINAR'a teşekkür ederim.

Çalışma azmi ve bilime olan tutkusuyla bana her zaman yardımcı olan ve bu tez çalıőması sırasında veri analizleriyle ilgili verdiği değerli fikirleri için arkadaőım Dr.Onur ÖZTORNACI'ya teőekkürlerimi sunarım.

Destekleriyle her zaman yanımda olduklarını hissettiğim değerli çalışma arkadaőlarıma ve arkadaőlıkları için Oęuzhan MEHRİ, Melike ERSOY ve Burçin AKTAő'a, katkıları için Cafer Sadık GÜNGÖR'e teşekkür ederim.

Son olarak hayat tecrübeleri ve sonsuz sevgileriyle her zaman yanımda olan, kıymetli annem Müzeyyen KARAKOÇ ve kıymetli babam Mahmut KARAKOÇ'a, ablam olduğu için kendimi őanlı hissettiğim Iőın Cansu KUVVETLİ'ye ve sonsuz enerjileriyle her zaman yüzümüzü güldüren yeğenlerim Neőe KUVVETLİ ve Ayza KUVVETLİ'ye teşekkür ederim.

Ayşe Bahar KARAKOÇ
Mersin,2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	ii
ONAY	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLOLAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1.GİRİŞ	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMALARI	3
2.1. Biyokütlenin Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması.....	3
2.1.2. Biyokütle Üretim Teknolojileri.....	4
2.2. Biyokömürün Tarihçesi.....	5
2.3. Biyokömür Üretimi.....	6
2.3.1. Piroliz.....	6
2.3.1.1. Hızlı Piroliz.....	6
2.3.1.2. Yavaş Piroliz.....	7
2.4. Biyokömür Özelliklerini Etkileyen Faktörler.....	7
2.4.1. Biyokömürün Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	7
2.4.2. Biyokömürün Toprak Üzerindeki Etkileri.....	8
2.5. Tarım ve Hayvancılıkta Biyokömür Uygulamaları.....	9
2.6. Ağır Metaller.....	10
2.6.1. Bakır.....	11
2.6.2. Tarımsal Alanlarda Ağır Metal Etkileri.....	11
2.6.3. Ağır Metalin Bitkilere Etkileri.....	13
2.7. Ağır Metalle Kirlenmiş Toprağı İyileştirme Yöntemleri.....	13
2.7.1. Fitoremediasyon.....	14
2.7.1.2. Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Ağır Metal Giderimine Etkisi.....	16
2.8. Adaçayı.....	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Atık Temini.....	18
3.2. Piroliz İşlemi ve Biyokömür Eldesi.....	18
3.3. Biyokömürün Ph ve Elektriksel İletkenlik Ölçümü.....	19
3.4. Biyokömür Karakterizasyonu.....	19
3.5. Saksı Denemesi.....	20
3.6. Klorofil Ölçümü.....	22
3.7. Bitki Büyüme Parametreleri.....	22
3.8. İstatiksel Analiz.....	23
4.BULGULAR VE TARTIŞMA	24
4.1. Biyokömür Karakterizasyonu.....	24
4.2. Saksı denemeleri.....	27
4.2.1. Bitki büyüme parametreleri.....	27
4.2.2. Bakır İçeriği.....	32
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	34
6. KAYNAKLAR	36
7. ÖZGEÇMİŞ	48

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Dünya çapında biyokömür üretimi	6
Tablo 2.2. Tarım ve hayvancılıkta biyokömür uygulamaları	9
Tablo 2.3. Bazı Ağır Metallerin Sınıflandırılması.....	12
Tablo 3.1. Saksı denemesinde kullanılan torf özellikleri	20
Tablo 3.2. Örnek grubu.....	21



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Biyokömür üretim teknolojileri ve oluşan ürünler	5
Şekil 2.2. Fitoremediasyon tiplerinin şematik gösterimi	15
Şekil 3.1. Palmiye kınından elde edilen biyokömür	18
Şekil 3.2. Ögütülerek toz haline getirilmiş biyokömür	19
Şekil 3.3. Saksılara eklenen torf örnekleri	20
Şekil 3.4. Tartılan bakır (Cu) örneği.....	21
Şekil 3.5. Biyokömür ve bakır'ın saksıya eklenmesi.....	22
Şekil 3.6. Ekimi tamamlanan saksılar.....	22
Şekil 3.7. Çözünürleşmek üzere şişelenen bitkiler	23
Şekil 3.8. Çözünürleşen bitkiler	23
Şekil 4.1. Palmiye atıklarından elde edilen biyokömürün XRD difraktometresi.....	25
Şekil 4.2. Palmiye atığı biyokömürüne ait FTIR spektrumu.....	26
Şekil 4.3. Biyokömüre ait SEM analizi	26
Şekil 4.4. Kontrol grubu ve 40mg/kg Cu örneği içeren saksılar.....	28
Şekil 4.5. Hasat öncesi ölçülen bitki boyları.....	28
Şekil 4.6. Dikim işleminden 8 hafta sonra ölçülen klorofil değeri.....	29
Şekil 4.7. Bitkilerin yaş ve kuru ağırlıklarına ilişkin grafikler.....	30
Şekil 4.8. Kuru ağırlığın yaş ağırlığa oranı.....	31
Şekil 4.9. Farklı biyokömür ve farklı bakır oranlarına göre bitkideki Cu derişimi.....	32

SİMGELER ve KISALTMALAR

Kısaltma/Simge	Tanım
T.C.	Türkiye Cumhuriyeti
YÖK	Yükseköğretim Kurulu
MEÜ	Mersin Üniversitesi
Cd	Kadmiyum
Pb	Kurşun
Zn	Çinko
N	Azot
K	Potasyum
Na	Sodyum
NaCl	Sodyum Klorür
CaCrO ₄	Kalsiyum Kromat
Ppm	Parts Per Million
EC	Elektriksel İletkenlik
BK	Biyokömür
kW	Kilowatt
EJ	Exajoule
Cu	Bakır
As	Arsenik

1.GİRİŞ

Günümüzde nüfusun hızla artmasıyla birlikte ortaya çıkan doğal kaynakların bilinçsiz kullanımı ve artan tüketim alışkanlıkları gibi etkilerle, diğer atık türleriyle birlikte organik atık miktarı da artış göstermiştir. Artan organik atıkların kompost üretimi gibi yeniden kullanımı uzun zaman öncesine dayanmaktadır. Günümüzde ilerleyen teknolojilerle organik atıkların yeniden kullanımında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Böylece hem doğadan alınan hammadde kullanımında azalma hem de maddi açıdan tasarruf sağlanmış olacaktır. Bu sebeple, ülkelerin önümüzdeki yıllarda değişen dünyaya uyum sağlamaları ve sürdürülebilirliğin oluşturulması açısından güncel uygulamaların kullanımı önem arz etmektedir.

Tarımsal atıklar, belediye atıkları gibi atık oluşumunun sürekli olarak gerçekleştiği alanlarda ortaya çıkan organik atıkların yönetimi, ülkemizde genel olarak düzenli depolama tesislerinde depolanarak biyogaz üretiminde kullanılmaktadır. Yapılan yoğun tarımsal üretim süreçlerinde oldukça çeşitli ve yüksek miktarlarda tarımsal atıklar meydana gelmektedir. Çevreye terk edilen veya yakılan bu atıklar çevresel açıdan önemli bir kirlilik etmeni olmakla birlikte insan ve diğer canlılar açısından da bir tehdit oluşturmaktadır (Sumer vd., 2016). Organik atıkların yönetiminde ülkemizde en yaygın kullanılan yöntem, atıkların düzenli depolama sahalarına götürülerek bertaraf edilmesidir. Bunun yanında, diğer alternatif atık işleme yöntemleri arasında yer alan kompostlaştırma ve yakma ekonomik avantajlarından dolayı en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir.

Düzenli depolama sahalarına gelen atıklardaki organik maddeler mikroorganizmalar aracılığı ile biyokimyasal olarak parçalanır. Bu parçalama sürecinde atıkların geldiği düzenli depolama sahalarının üzeri belirli seviyelere geldikten sonra kapatılır ve ortamdaki oksijen mikroorganizmalar tarafından tüketilerek anaerobik bir ortam sağlanmış olur bu aşamadan sonraki süreç anaerobik mikroorganizmalar aktiviteleriyle ilerler. Bu faaliyetler sonucu oluşan ürünlerin başında kirleticilere sahip sızıntı suyu ve depo gazlarıdır. Depo gazlarının içeriğinde neredeyse aynı oranda metan ve karbondioksit gazı ile eser miktarda çeşitli uçucu organik bileşikler bulunur. Yapılan çalışmalarda metan (CH₄) gazının karbondioksite (CO₂) göre 28 kat daha fazla güneş ışığını absorbe edebildiği belirlenmiştir (Öztürk, 2018). Dünyada bu işlemlerle organik atıklardan tekrar faydalanılması ve doğal kaynakların kullanımında azalma ve çevreye duyarlı bir sistem oluşturulması hedeflenmektedir.

Tarımsal faaliyetlerde kullanılan toprak; kayaçların parçalanmasıyla oluşur, gıda temini açısından önemli bir unsurdur ve diğer canlılar için de yaşam kaynağıdır. Toprağın en önemli özelliği yenilenemez doğal bir kaynak olmasıdır. Bu nedenle sürdürülebilir toprak yönetimi anlayışının tarımdan sanayiye kadar her alana entegre edilmesi gerekmektedir. Tarımsal faaliyetler sırasında toprağa müdahale şekli toprak kalitesini direkt etkilerken, iyi uygulamalar toprak kalitesini olumlu yönde etkiler ve toprağın verimi arttırılır.

Su ve toprak yaşamsal faaliyetlerimiz için en önemli unsurlardandır bu sebeple doğal kaynakların kullanımında doğru bir yönetim planlanması ve uygulanması gerekmektedir. Çeşitli üretim faaliyetleri sonucu oluşan atıkların hiçbir işlem uygulanmadan alıcı ortama bırakılması ya da gübreleme gibi işlemler sonucunda, ağır metaller olarak bilinen ve bulunduğu ortam için zararlı olabilen metaller alıcı ortamlara verilmektedir. Ekosisteme karışan ağır metaller hava, su ve toprakta birikerek insan vücuduna geçebilmektedir. Toprakta biriken ağır metaller, bitkiler vasıtasıyla insan vücuduna geçerek insan sağlığını tehlikeye atmaktadırlar (Apaydın, 2005). Ağır metallerin alıcı ortama verilmesi çevresel kirlilik oluşturarak doğal kaynakları kullanılmaz hale getirmektedir. Yine tarım arazilerinin yanlış işlenmesi, bilinçsiz sulama, zirai ilaç ve gereğinden fazla gübre kullanılması gibi etkiler sonucunda verimlilik düşerken, artan çevre kirliliğiyle birlikte etkileşimde olduğumuz ortamda ağır metaller de birikmeye başlar. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda, fazla miktarda arseniğin kemik ve solunum sistemi kanserine sebep olabildiği, nikel zehirlenmesine bağlı olarak alerjik reaksiyonların ortaya çıkabildiği yine yüksek orandaki civanın böbrek rahatsızlıklarına, sinir sisteminde hasarlara, hamilelikte düşüğe neden olduğu belirlenmiştir (Çağlarımak ve Hepçimen, 2010).

Gıda güvenliği için yetiştirilen ürünlerin temiz toprak ve temiz suda yetiştirilmesi esastır. Tarımsal üretim ve bitki gelişimi açısından toprağın temiz ve verimli olması önemli olduğundan, toprakların verimliliğini korumak ve arttırmak amacıyla kullanılan en yaygın uygulamalardan bir tanesi topraklara organik kökenli materyallerin ilavesidir ve bu amaçla aktif karbon, leonardit, kompost, gibi birçok organik kökenli malzeme kullanılabilir. Bu malzemelerden birisi de önemi gittikçe artan biyokömürdür (Mahamane, 2020). Organik maddelerin oksijensiz ortamda ya da az oksijenli ortamda yakılmasıyla elde edilen biyokömür, toprağın su tutma kapasitesini arttırması, kirleticilerin tutulması gibi alanlarda kullanılarak toprak verimliliğinde ve bitki gelişiminde son yıllarda öne çıkan bir teknolojik gelişim olarak görülmektedir.

Doğal kaynakların kullanımıyla elde edilen biyokütlenin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş, rüzgâr, dalga gibi enerjilerden en büyük farkı yenilenebilir karbon kaynağı olarak kullanılmasıdır (Akgül, 2017). Dünyada artan enerji krizi ve ülkelerin enerji bağımlılığı göz önüne alındığında biyokütlenin doğal ve sürdürülebilir bir kaynak olması sebebiyle yapılan çalışmalarda biyokütlenin enerji ihtiyaçlarına cevap verebileceği görülmüştür.

Bu çalışmanın temel amacı, belediye faaliyetleri sonucu oluşan palmiye ağacı budama atıklarından biyokütle temin edilmesi, bu atıklardan biyokömür eldesi ve biyokömürün bakır ile kirlenmiş toprakların fitoremediasyon metodu ile iyileştirilmesine etkisi araştırılmıştır.

2.KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Sürdürülebilirlik, günümüzde her konuda öne çıkmakla birlikte çevresel sürdürülebilirlik, biz ve bizden sonraki nesillerin yaşam kalitesini doğrudan etkileyecek bir kavram olarak kullanılmaktadır. Konuya toprak verimliliği açısından bakıldığında, tarım arazilerinin özelliğini kaybetmeden üretimde verimli bir şekilde kullanılması sürdürülebilir bir yaşam ve insanlık için önem arz etmektedir.

Ormansızlaştırma, çayır ve meraların aşırı otlatmadan kaynaklı toprağın tahribi, çölleşme, verimli toprakların göç, nüfus artışı ve kentleşmeyle kaybedilmesi, madencilik faaliyetleri, kimyasal gübre uygulamaları toprağın kullanımını olumsuz etkileyen ve kalitesini bozan başlıca yanlış uygulamalar olarak sayılabilmektedir (Özdemir, 2013). Toprağın varlığını ve sürdürülebilirliğini korumak için; toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik karakterinin korunması, bozulmuş toprak ve marjinal alanların restorasyonu, toprağın sağladığı ekosistem hizmetlerinin, su varlığı ve kalitesinin muhafazası, toprak üretkenliğinin doğal kapasitesine kadar artırılması, toprakların öneminin gündemde tutulması gibi uygulamalar yapılmalıdır (Çağlarımak ve Hepçimen, 2010). Bu çalışmalar tüm ülkelerin yönetim anlayışında yer almalı ve insanlar bu konuda bilinçlendirilmelidir. Bu kapsamda eğitimler verilmeli, çiftçiler, sanayi kuruluşları bu anlayışı benimsemelidir.

Dünyada ilk kez sürdürülebilirlik kavramı 1987 yılında Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Komisyonu (World Commission on Environment and Development) 'Ortak Geleceğimiz' (Our Common Future) raporunda kullanılmıştır. Sürdürülebilirlik kavramı ilk kez somut verilerle bu raporda yer almakla birlikte 1992 yılında Rio'da Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansında sürdürülebilirliğin öneminden bahsedilmiştir. Bu toplantıda uluslararası boyutta uygulanacak hususlar hakkında kararlar alınmıştır. Alınan bu kararlarla birlikte biyolojik kökenli kaynakların çevre ve mevcut doğal kaynakların korunmasında faydalı olma potansiyelleri keşfedilmiş olup, bu kaynakların çevresel uygulamalarda kullanımına yönelim artmıştır.

Bu çalışmaların artışı yeni metotların gelişmesine fayda sağlayarak biyo-malzemelerle ilgili gelişim sağlanmaktadır (On Birinci Kalkınma Planı, 2019-2023). Bu kapsamda yapılan çalışmalarda biyokömür öne çıkmış ve toprağın verimliliğini korumak ve arttırmak, ekolojik dengenin düzenlenmesi amacıyla kullanımı günümüzde uygulanmakta, ayrıca bozunan toprağın restorasyonunu sağlamak amacıyla da biyokömür kullanılmaktadır (Karaman, 2019).

2.1. Biyokütlenin Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması

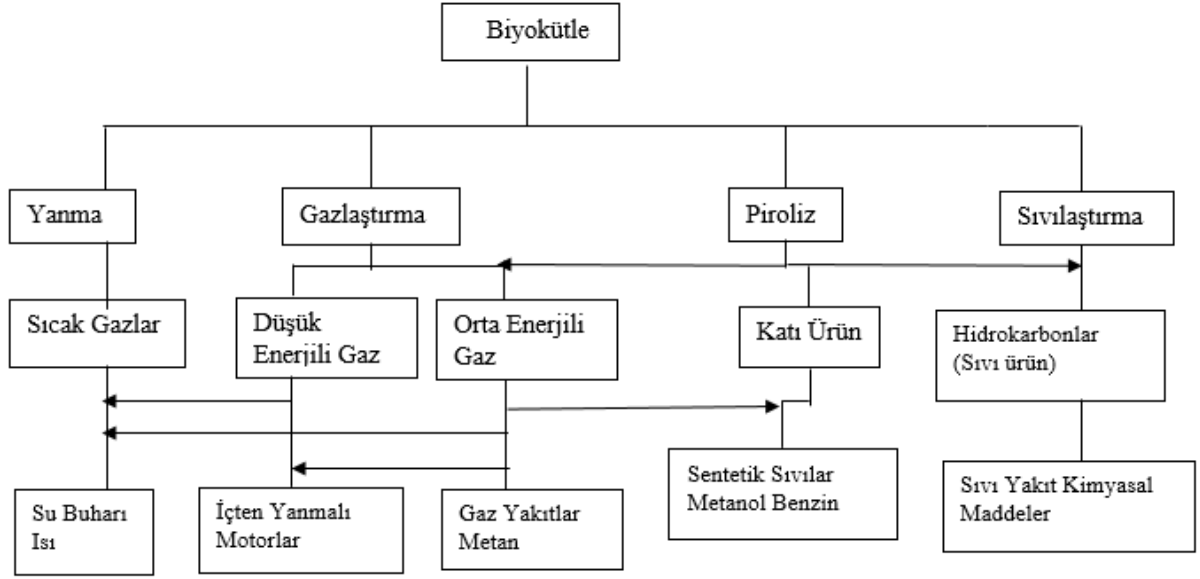
Biyokütle canlı organizmalardan oluşan tüm maddeleri içermektedir. Küçük mikroskobik canlılardan ormandaki devasa boyuttaki ağaçlara kadar büyük bir alanı kapsamaktadır. Organik maddeler içeren endüstri atıkları ve belediye atıkları da biyokütlenin içerisine girmektedir (Akgül,

2017). Böylece atık oluşumunun düzenli olarak meydana geldiği alanlarda biyokömür üretimi yapılarak sürdürülebilirlik sağlanabilmektedir. Biyokütle ekosistem içerisinde bulunan bitki ve hayvan gibi tüm canlıları içermesi sebebiyle yerli ve temiz enerji kaynağı olarak kullanılabilen, sürdürülebilir ve yenilenebilir doğal bir kaynaktır. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımının yaygınlaştırılması ve geliştirilmesi dünya ülkeleri için önem arz etmektedir. Bu yaklaşımı benimseyen, uygulayabilen ve sistemle uyumlu hale getirip geliştirebilen ülkeler için, enerjide dışa bağımlılığı azaltabilecek potansiyel bir kaynak olarak biyokütle değerli bir hammaddedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yapılan analizlere göre biyokütlenin 2050 yılında dünya enerji ihtiyacını %25 ile %33 arasında karşılayabileceği (250 EJ) belirlenmiştir (Yuan vd., 2011). Biyokütle bitki ve hayvan kalıntılarını da kapsadığından enerji üretimi için kullanılacak bir karbon kaynağı olarak da değerlendirilebilmektedir. Hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesinde, elde edilen ürünlerin ve oluşan atıkların organik kökenli olması sebebiyle biyokütleler çevresel sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadırlar.

2.1.2. Biyokütle Üretim Teknolojileri

Biyokütlenin enerji üretiminde kullanılması atıkların çevresel etkilerinin önlenmesinde kullanılabilen sürdürülebilir enerji üretim yollarından biridir. Biyokütle fosil yakıtlarla rekabete ve tarım atıklarına bağlı olmakla birlikte üretim teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında biyokütlenin yoğunlaştırılıp enerji kaynağı olarak kullanımı için bazı teknolojik sistemlerin uygulanması gerekmektedir. Örneğin, biyokütlenin kuru ve odunsu haldeki enerji yoğunluğu pelet gibi fiziksel uygulamalarla artırılabilirken, piroliz uygulaması ile biyo-yağ eldesi de biyokütlenin enerji kaynağına (hammaddesine) dönüşümüne birer örnek olarak verilebilmektedir (Cao vd., 2015).

Yapılan çalışmalarda biyokütleden sağlanan enerjinin %65 i orman atıklarından, %35 lik kısmı ise tarımsal faaliyetler sonucu oluşan atıklardan elde edildiği görülmektedir (Alvarez vd., 2016). Biyokütlenin içeriğine bakıldığında yüksek molekül ağırlığı içeren karbonhidrat polimerler ve oligomerlerin toplam ağırlığın %65-75'ini, ligninin de %18-35'ini oluşturduğu bilinmektedir. Ayrıca biyokütle içeriğinde, düşük molekül ağırlığa sahip organik ekstraktifler ve anorganikler de %4-10 civarındadır. Selüloz, lignin ve hemiselüloz içeriği biyokütlenin cinsine göre değişmektedir. Ancak bu üç öge biyokütle için en temel yapılarıdır (Strehler ve Stuetzle, 1987).



Şekil 2.1. Biyokömür üretim teknolojileri ve oluşan ürünler (Karadayı, 2021).

Biyokütleden enerji üretiminde Şekil 2.1.'de belirtilen üretim teknolojileri arasında en yaygın ve basit olarak kullanılan yöntemlerden biri yakmadır. Piroliz yöntemi, oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta kimyasal bozunma sonucu oluşan ürün olarak tanımlanır. Gazlaştırma ise biyokütlenin yüksek sıcaklıklarda oksijen varlığında kısmi olarak okside edilerek yanabilen bir gaz karışımına dönüştürülmesi işlemidir (Özyurtkan, 2006).

2.2. Biyokömürün Tarihçesi

Tarihsel olarak bakıldığında, biyokömürün insanlar tarafından toprağa uygulanması geleneğinin binlerce yıldır uygulanan bir işlem olduğu görülmektedir. Son yıllarda, Amazonda geçmiş çağlardan kalan Terra Preta denilen fosil toprakların keşfi ile biyokömür kavramı ortaya çıkmış, bu yöntemle C ile zenginleştirilmiş —Terra Preta— siyah topraklarının verimliliğinin yüksek oluşu, bu toprakların besin değerlerinin ve fosfor (P), potasyum (K) gibi organik madde değerinin yüksek oluşu birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Demirbaş, 2001). Bu bölgede şiddetli tropikal yağmurlar olmasına rağmen zengin toprak yapısından ötürü halen son derece verimli olduğu bilinmektedir. Biyokömür orman yangınlarından ötürü dünya genelinde birçok ormanlık alanda doğal olarak bulunabilmektedir (Hunt vd., 2017).

Biyokömür üretimi yakın zamanda dünya genelinde giderek yaygınlaşmaya başlamıştır. Asya bölgesinde Japonya ve Korede bilim adamları tarafından sıkça kullanılmaktadır. 1990'lı yıllarda yapılan araştırmalarda biyokömürün karbondioksit emisyonunu azaltma amacıyla kullanımının verimli olduğu görülmüş ve iklim değişikliği ile mücadele konusunda fayda sağlayabileceği belirlenmiştir (Üçgül ve Akgül, 2010; Han vd., 2020). Bunun yanında biyokömürün diğer kullanım alanları; su

filtrasyonu, iyileştirme süreçleri, hayvan yemi takviyesi, sera gazı emisyon kontrolü sayılabilmektedir (Garcia vd., 2022).

Biyokömürün dünya pazarındaki yeri gelişen teknolojilerle ve sürdürülebilir bir kaynak olması sebebiyle her geçen gün artmaktadır.

Tablo 2.1. Dünya çapında biyokömür üretimi (Garcia vd., 2022)

Pazar	Mevcut Biyokömür Üretimi
Çin	>300.000 (500.000'e kadar) ton/yıl büyümeye devam ediyor
Amerika Birleşik Devletleri	~50.000 ton/yıl büyüyor
Avrupa	> 20.000 ton/yıl büyüyor
Avustralya	~5000 ton/yıl büyüyor

Son yıllarda yeni uygulamaların kullanılmaya başlanması ile birlikte dünya genelinde biyokömür kullanımı artarak devam etmektedir. Biyokömürün çevresel fayda ve sürdürülebilirlik konusunda olumlu bir etkiye sahip olması Tablo 2.1. 'de görüldüğü gibi büyük ekonomileri olan ülkeler tarafında da dikkat çekmiş, bu ülkelerde biyokütlelerin hammadde olarak kullanımı ve biyokömür üretiminin her geçen gün arttığı görülmektedir.

2.3. Biyokömür Üretimi

2.3.1. Piroliz

Pirolizin tarihsel olarak gelişimine baktığımızda 1800'lü yıllarda verimli şekilde kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. Bu dönem sanayi ve endüstrinin geliştiği, enerji ihtiyacının olduğu bir zamana denk gelmektedir. Piroliz ve gazlaştırma işlemleri endüstriyel olarak ilk olarak kömür kullanımı ile başlamıştır (Akgül, 2017). Bu işlem temelde 2 yöntemle yapılır bunlardan ilki hızlı piroliz ikincisi yavaş pirolizdir (Han vd., 2020).

2.3.1.1. Hızlı Piroliz

Hızlı pirolizin amacı sıvı bir yakıt ürününün ortaya çıkmasıdır ve biyokömür oluşumu yan ürün olarak amaçlanır (Akgül, 2017). Yöntemin uygulanması için bazı şartların sağlanması gerekir. Bunlar; ısıtma hızının yüksek hızda gerçekleşmesi, girdi olarak kullanılacak biyokütlenin ince halde öğütülmüş olması, sıcaklığın kontrolünün sağlanması ve piroliz sonunda oluşan buharın hızlı bir şekilde soğutulmasıdır (Budak, 2017). Hızlı pirolizde yüksek verim almak için hızlı ısıtma, reaktörde oluşan gazın kısa süre beklemesi ve yoğunlaşabilen gazın hızlıca soğutulması gerekir. Bu işlemde hızlı

ısıtma ile kömürleşmenin önüne geçilir. Bunun için ürün olarak kullanılan biyokütlenin tane boyutunun mümkün olduğunca küçük olması gerekir (Tsai, 2007).

Hızlı pirolizin avantajı yüksek ürün verimi ve bekleme süresinin kısa olmasıdır. Hızlı piroliz çalışma prensibi, anaerobik ortamda 500 °C üzerindeki bir sıcaklıkta dakikada 300 °C'den fazla bir hızla ısıtmanın gerçekleştirilmesi işlemidir. Hızlı pirolizin ürün verimi genel olarak %60 biyo yağ, %20 sentetik gaz, %20 biyokömür olarak bildirilmektedir (Buss vd., 2015).

2.3.1.2. Yavaş Piroliz

Biyokömür üretimi için çoğunlukla tercih edilen yöntem bu prosestir. Yavaş pirolizin bilinen en iyi örneği odun kömürü üretimidir. Yavaş piroliz işlemi biyokömür veriminin daha yüksek olması amacıyla oksijensiz ortamda uzun sürede gerçekleşir. Bu işlem biyokütlenin 300-600 ° C arasındaki sıcaklıklarda, ısıtma hızının dakikada 5-7 ° C arttığı konvansiyonel piroliz olarak bilinmektedir. Yavaş piroliz ürünleri %25-35 biyo yağ, %20-30 sentetik gaz ve %35-45 biyokömür üretimi gerçekleştirilebilmekle beraber, biyokömür ana ürün olarak üretilir (Jagdish vd., 2020). Bu yöntemin uygulanmasıyla oluşan biyokömürün avantajı hammaddede bulunan karbonun yaklaşık %50 sinin biyokömürün içinde sabit halde bulunmasıdır (Manya, 2012).

2.4. Biyokömür Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Biyokömürün hızlı ve kolay hazırlanabilir oluşu, çevre dostu olması, yeniden kullanılabilirliği ve ham madde olarak atık organik maddelerin kullanılabilmesi, uygun maliyetli olması biyokömürün avantajları arasındadır (Gayathri vd., 2021; Hemavathy vd., 2020). Biyokütle olarak hayvansal atıklar, tarımsal atıklar veya odunsu atıkların diğer biyokütle ham maddelerine göre daha fazla biyokömür ürettiği tespit edilmiştir (Yaashikaa vd., 2020).

Biyokömür üretiminde prosese ilişkin parametreler biyokömür verimini etkileyen faktörler arasındadır. Bu parametreler arasında sıcaklık, biyokütlenin çeşidi, pirolizde kalma süresi, ısıtma hızı, basınç önemli kriterlerdendir (Babu ve Chaurasia,2003). Biyokömür üretimi çeşitli faktörlere bağlı olduğundan içeriği bu faktörlere göre değişiklik göstermekle birlikte karbon içeriği açısından zengindir.

2.4.1. Biyokömürün Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Pirolizin sıcaklığı ve süresi (hızlı-yavaş) biyokömürden elde edilmesi planlanan verim üzerinde oldukça etkilidir. Bitkisel kaynaklı biyokütlenin içeriği selüloz, lignin ve hemiselülozdan oluşmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte bu ham maddeler pirolize olur. Piroliz işlemine en

dayanıklı bileşen lignindir (Üçgül ve Akgül, 2010). Biyokömürün oluşumu belirli bir sırayı takip eder;

- i) İlk olarak hemiselüloz parçalara ayrılır,
- ii) Hemiselülozun kesin olarak ayrışması ve selülozun parçalanarak ayrışması,
- iii) Selülozun tamamen ayrışması ve ligninin parçalara ayrışma ve yüksek derecede karbonizasyonu ile oluşur (Tan vd., 2015).

Çalışmalarda piroliz sırasında lignin ve selülozun biyokömür verimini artırdığı ortaya koyulmuştur. Özellikle lignin içeriği yüksek biyokütlenin pirolizi, daha zayıf bağların parçalanması ve böylelikle katı yapının oluşmasıyla lignin içeriği daha düşük olan biyokütleye nazaran daha yüksek biyokömür verimi görülmüştür (Bushra vd., 2020).

Odunda bulunan biyokömür içeriğindeki ham maddelerden, hemiselüloz 220–320°C arasında bozunurken, selüloz 250-360°C arasında ve lignin 180–500°C aralığında bozunur (Shafizadeh vd.,1985). Sıcaklığın artışıyla beraber biyokömür veriminde genel olarak düşüş görülürken sabit karbon oranı artar. Bu olay işlem sırasında açığa çıkan uçucu maddelerin (NH₃, CO₂, H₂O, CO gibi) rastgele açığa çıktığı pirolizin farklı aşamalarından oluşur ve biyokömürdeki verimin düşmesine sebep olur (Becidan vd.,2007). Yapılan araştırmalarda, piroliz sıcaklığının 350 °C den 650 °C ye çıkarılması ile yonca bitkisinden elde edilen biyokömürün yüzey alanı ve karbonizasyonunda önemli artışlar görüldüğünden biyokömürün organik kirleticilere karşı adsorpsiyon kapasitesinin arttırdığı belirlenmiştir (Choi vd., 2019).

İlgili çalışmalar, piroliz sıcaklığının biyokömürün fizikokimyasal özelliklerine etki ettiğini göstermiştir. Biyokömür hazırlama aşamasında piroliz sıcaklığının biyokömür içeriğindeki karbon miktarına önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir (Shaaban vd., 2018). Biyokütlenin farklı piroliz sıcaklıklarına maruz bırakılmasıyla farklı derecelerde karbon içeriğine sahip biyokömürler oluşur ve sıcaklık 400 °C'yi aştığında oldukça düzenli aromatik yapı oluşturduğu görülmüştür (Kim vd., 2012). Ayrıca yapılan araştırmalarda farklı piroliz sıcaklıklarından elde edilen biyokömürün, elektrik iletkenliklerinde farklılık gösterdiği ve pH, forfor ve azot içeriklerinde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Chen vd., 2014). Yüksek piroliz sıcaklığında üretilen biyokömür, düşük sıcaklıkta elde edilene kıyasla daha yüksek karbon stabilitesine sahip olduğu, yüksek piroliz sıcaklığında üretilen biyokömürün toprağa uygulandığında daha yüksek karbon tutma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür (Al-Wabel vd., 2013).

2.4.2. Biyokömürün Toprak Üzerindeki Etkileri

Yapılan çalışmalarda biyokütlenin yüksek sıcaklık altında ve oksijensiz ortamda ısıtılması ile üretilen biyokömür, negatif yüzey yükü, dirençli yapısı gibi özelliklerinden dolayı içerisinde

bulunduğu toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısını iyileştirerek bitki üretim verimini yükseltebilecek bir katkı maddesi olarak kullanılabilirdiği düşünülmektedir (Madari vd., 2017). Ancak biyokömür toprağa ilave edildiğinde oluşan etkiler değişiklik gösterebilir. Bunların başlıca sebeplerinden biri eklenen biyokömür miktarıdır. Toprağa ilave edilen biyokömürün miktar arttıkça toprağın fiziksel özelliklerinde değişiklikler artar. Ayrıca toprağın yapısı, agregat büyüklük yapısı biyokömürün toprağın fiziksel özelliklerine etkisinde yine önemli bir etkidir. Yapılan çalışmalarda normal tekstürlü toprak yapısından daha çok kaba tekstürlü toprakta biyokömürün toprağın fiziksel özellikleri üzerinde daha belirgin etkilerinin olduğu görülmüştür (Omondi vd., 2016).

Biyokütleyle kıyasla pirolizle elde edilen biyokömür karbonu (C) toprakta daha uzun süre tutabildiği yapılan araştırmalarda görülmüş olup, biyokömürün üretilip toprakta kullanımıyla; elektriksel iletkenlik (EC), pH, kation değişim kapasitesi (CEC), besin seviyesi, mikrobiyal yapısı, besin içeriği olmak üzere bir takım toprak özelliklerinin değiştiği belirlenmiştir (Sheng ve Zhu, 2018; Blanco-Canqui, 2017). Biyokömürün toprağın verimliliğindeki etkisi, uygulanacağı toprağın yapısına bağlı olarak değişir. Biyokömürün ebatı ve yapısı gözenek yapısını değiştirdiği için toprağın su depolama özelliğini değiştirmede önemli bir etkidir (Liu vd., 2017).

2.5. Tarım ve Hayvancılıkta Biyokömür Uygulamaları

Yapılan bazı çalışmalarda biyokömürün toprağın su kullanım etkinliğini ve mahsul verimini arttırdığı ve toprağı iyileştirdiği belirlenmiştir (Jeffry vd., 2011).

Tablo 2.2. Tarım ve hayvancılıkta biyokömür uygulamaları

Biyokömür kullanım amacı	Uygulama	Sonuçlar	Referans
Zemin ıslahı	Biyokömürün toprağa eklenmesi	Toprağın iyileştirilmiş su tutma kapasitesi ve ürün veriminde artışı sağladı Ekinlerin iyileştirilmiş besin bulması Çalışmaların yaklaşık %77'si, biyokömür ilavesinin, özellikle otsu bitkiler olmak üzere bitki büyümesini desteklediğini buldu	Jeffry vd., 2011
Kompostlama katkı maddesi	Biyokömür %10 oranında (ağırlıkça) uygulandı	*% 10–30 oranlarındaki Biyokömür NH ₃ , N ₂ O ve CH ₄ emisyonlarını azalttı	Huang ve Gu, 2019
Ağır metal immobilizasyonu	Biyokömür, ağır metalle kirlenmiş topraklara (%10 oranına kadar) uygulandı	Etkili ağır metal (Cd, Pb ve Zn) immobilizasyonu	Sanchez vd., 2018; Kim vd., 2015

Biyokömürün toprakta ağırlığının 6 katına kadar su tutma özelliğine sahip olduğu ve besin elementlerinin topraktan daha kolay alınabilmesine fayda sağladığı yapılan çalışmalarda görülmüştür (Glaser vd., 2014). Tablo 2.2.'de biyokömürün zemin ıslahında kullanılmasına ilişkin farklı çalışmalara ait sonuçlar verilmekte olup, yapılan başka bir çalışmada çöl topraklarında biyokömür kullanıldığında, toprağın su tutma kapasitesinin arttırılabildiği belirtilmiştir. Biyokömürün yapısındaki fonksiyonel gruplar, toprak içerisinde katyonik hareketleri arttırarak kalsiyum, magnezyum gibi besinlerin toprak içerisinde kalmasını sağlayarak tarımsal üretime ilişkin verimi arttırdığı da yapılan çalışmada belirlenmiştir (Ippolito vd., 2016).

2.6. Ağır metaller

Farklı bilimsel çalışmalar sonucunda birbirinden farklı ağır metal tanımları yapılmıştır. Bazı tanımlar fiziksel özellikleri bakımından yoğunluğu 5 gr/cm^3 ten yüksek olan metaller 'ağır metaller' olarak tanımlanmaktadır. Bu tanıma uygun ağır metallere; alüminyum (Al), krom (Cr), bakır (Cu), kobalt (Co) örnek olarak verilebilir (Baba vd., 2009). Başka bir çalışmada ise genellikle kontaminasyon, potansiyel kirlilik veya sucul ve karasal ortamın kirliliği ile ilişkilendirilen metaller için grup adı olarak tanımlanmıştır (Duffus 2002). Bu tanıma göre literatürde değerlendirme yapıldığında diğer bazı metallerde (alimünyum, baryum, sezyum, vb) ağır metal kategorisine girdiği görülmüştür (Nassouhi vd., 2018).

Madencilik, ağır sanayi, gübre üretim tesisleri, ilaç üretimi gibi alanlarda faaliyet gösteren tesislerin işlemleri sonucu ortaya çıkabilen ağır metaller doğal ortama karışabilme potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda yer yüzeyinde doğal olarak bulunan ağır metaller doğal olaylar ve insan faaliyetleri sonucunda toprak ve suda belirli eşik değerlerin üzerinde birikerek bitki gelişimini ve ürün verimini etkiler (Mudgal vd., 2023).

Toprağın içerisinde doğal olarak bulunan ağır metaller kayaların aşınması, volkanik patlamalar gibi doğal yollarla yayılabilirken, sanayileşme ve bilinçsiz kaynak tüketimi gibi etkilerle insan faaliyetleri sonucunda da doğada yayılabilmektedirler (Muradoglu vd., 2015). Sanayi devriminden itibaren ortaya çıkmaya başlayan ağır metaller toksik özelliklerini kaybetmedikleri ve organik kirleticiler gibi geri kazanımı olmadığı için büyük çevre problemine yol açmaktadırlar. Ağır metalle kirlenen bir bölge uzun yıllar o bölgede potansiyel bir tehdit olarak durmaya devam etmektedir (Jabeen vd., 2009; Özyiğit, 2021). Ayrıca ağır metaller toprakta bulunan organik kirleticilerin mikroorganizmalar ve enzimler tarafından parçalanma seviyesini düşürerek çevresel kirlilik yükünü arttırır, toprakta biriken ağır metaller dünya örtü tabakası içinde risk oluşturur. Toprağın renk, gözeneklilik, pH ve doğal kimyasını bozar (Muchuweti vd., 2006).

Bitkilerin ağır metalle etkileşiminde ilk savunma bölgesi köklerdeki hücrelerde sızıntı yaparak bitkiye metal alımını sınırlamaktır. Bu sızıntılar, biyosorpsiyonu veya hücre duvarlarına akışı azaltır ve kaçınma mekanizması olarak isimlendirilir (Hossain vd., 2012; Filiz vd., 2019).

2.6.1. Bakır (Cu)

Bakır bütün canlılarda olması gereken bir mikro besin elementidir. Ancak fazla konsantrasyonlarda olması toksik etki yaratır. Toprakta mangan ve demir oksit tarafından adsorbe edilmiş olarak bulunur. Ayrıca silikatlara bağlı şekilde düşük oranda da değişebilir ve çözünebilir şekilde bulunmaktadır (Özbek vd., 1994). Dünya genelinde toprakların ortalama toplam bakır değeri içeriği 20-30 mg/kg arasında değişmektedir (Alloway, 1995).

Türkiye’de Tarım ve Orman Bakanlığı’na yapılan toprak örneğinde toprak verimlilik analizleri ile bazı alanların fiziksel analizleri projesi kapsamında; bakır genellikle iki değerlikli bakır iyonu olarak toprakta bulunur ve bitkilerce küçük miktarlarda Cu^{+2} veya bakır kleyti şeklinde alınır. (Sönmez, 2018). Bakır bitkilerde protein sentezinde, oksidasyon ve hücre duvarı aktivitelerinde, fotosentez yapılmasında ve solunum esnasında görev alır. Bitkilerde bakır içeriği fotosentez, protein ve karbonhidrat metabolizması, hücre duvarı metabolizması gibi birçok hayati önemi olan fonksiyonu etkiler (Kabata ve Pendias, 2001).

Bitkilerde bakır içeriği 4-20 ppm arasındadır. Bitkide bakırın eksikliği öncelikle genç yapraklarda görülmektedir. Yapraklarda solma, grimsi renk, gelişim azlığı bakır eksikliğinde görülen bakır fazlalığında ise; Bakır içerikli fungusitlerin toprağa ve bitkilere uygulanması aşırıya kaçtığına bakır toksitesine sebep olabilir. Bakır fazlalığına bağlı toksitesite de bitkilerde bakır eksikliğinde olduğu gibi bitki gelişmesi ve yapraklarda yanmalar görülür (Sönmez, 2018).

2.6.2. Tarımsal Alanlarda Ağır Metallerin Etkileri

Özellikle tarımsal alanlarda oluşan ağır metal kirliliği bölgedeki yeraltı sularına, bitki verimine ve bitki sağlığına, ekosisteme zarar verir. Ağır metal ve metaloid kirliliği 5 milyon farklı bölgede yaklaşık 500 milyon hektarlık alanda kendini göstermekte, tarımsal alanlardaki bu kirlilik hem çevresel hem de çözümü yüksek finansal değeri olan bir sorun haline gelmiştir (Li vd., 2019).

Yapılan araştırmalarda tarım topraklarındaki ağır metal mevcudiyetinin büyük bölümünün insan faaliyetleri sonucunda oluştuğu ortaya çıkmaktadır (Osma vd., 2014). Ağır metallerin toprakta taşınımı; sıcaklığa, yüzey sularının hızına, hareket yönüne ve hava hareketlerine bağlıken ayrıca kirleticinin moleküler ağırlığına, basınç ve polaritesine de bağlıdır (Briffa vd., 2020). Toprakta doğal olarak bulunan ağır metallerin toksik özellik göstermesi ağır metalin niceliğine ve maruziyet durumuna göre değişiklik gösterirken; çevre açısından ve biyolojik yönden toksik olduğu kabul edilen

ağır metallere; kadminyum (Cd), krom (Cr), bakır (Cu), civa (Hg), nikel (Ni) örnek verilebilir (Ali vd., 2019).

Bazı ağır metaller yaşamsal faaliyetler için lüzumlu olup, düşük konsantrasyonlarda bitkide bulunması faydalıyken, bazı ağır metallerde bitki bünyesinde bulunması toksiktir (Hocaoglu ve Ozyigit, 2020). Bitki gelişiminde kullanılan ve faydalı elementler olarak bilinen demir, bakır, nikel bitkinin gelişiminde, büyümesinde gerekli enzimlerin, klorofilin, hormonların üretilmesini sağlamak için kullanılır (Akguc vd., 2010; Osma vd., 2012; Özyiğit vd., 2018; Ali, Khan ve Ilahi, 2019). Bunun yanı sıra toksik özellik gösteren metallere; kurşun ve kadminyum örnek verilebilir (Karahan vd., 2020). Bir ağır metalin toksik olup olmaması, oksidasyon basamağına bağlıdır. Örneğin; Cr (VI) Cr'nin en zehirli türü olarak bilinmekte ve kimyasal olarak, kromat (CrO_4^{2-}) veya dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) şeklinde oksijenle bağlı halde bulunmaktadır. Doğal ortamlarda yaygın olarak görülen Cr'un (III) ise taşınması ve toksisite özelliği daha düşük seviyelerdedir (Vardhan vd., 2019).

Bitkilerin kullanabildiği ağır metalin belirli değerlerin altında ya da üzerinde olması hastalıklara ya da yetersizlik semptomu denilen beklenmeyen durumlara sebep olabilir. Kullanılabilen temel ağır metallerin toksik özellikleri belirli konsantrasyonları geçtikten sonra başlar. Diğer zararlı ağır metaller ise düşük değerlerde de toksik özellik gösterir (Edelstein ve Ben-Hur, 2018; Osma vd., 2012, Karahan vd., 2020). Bahsedilen bu konsantrasyon değerleri farklı türler için değişkenlik gösterir. Bitki gelişimi için kullanılan gübrelerin içeriğindeki Co, Cu, Mn, Fe gibi elementler büyüme için önemli rol oynasa da toprakta konsantrasyondaki artış tarımsal amaçlı kullanılan topraklarda ve su kaynaklarında kontaminasyona neden olacağı için organizmalar açısından zararlı olmaktadır (Mishra vd., 2019).

Tablo 2.3. Bazı Ağır Metallerin Sınıflandırılması (Yerli vd., 2020).

Element	Özgül Ağırlık (g cm^{-3})	Canlılar İçin Gerekliliği	Kirleticilik Durumu
Kobalt (Co)	8,9	+	+
Krom (Cr)	7,2	Bitkiler - Hayvanlar +	+
Bakır (Cu)	8,9	+	+
Demir (Fe)	7,9	+	+
Cıva (Hg)	13,6	-	+

Tarımsal alanlardaki ağır metaller yalnızca bitki gelişimini etkilemekle kalmaz aynı zamanda o bölgedeki mikrobiyal flora düzenini ve aktiviteleri de etkiler. Bu yüzden topraklarda birinci kirlilik sebebi ağır metal kirliliği olarak belirlenmiştir (Yao vd., 2003).

Ağır metaller genelde toprak taneciklerine bağlı bulunurlar. Bunun yanı sıra minerallere bağlı şekilde ya da bazı organik bileşiklerin yapısına katılabilir. Asit yağmurlarının olduğu bölgelerde pH değerinin düşük olması tarım topraklarında ağır metal hareketliliğine sebep olur, bu sebeple bitkilerin ağır metal alımı artar ve bitki olumsuz olarak etkilenmeye başlar (Seven vd., 2018).

2.6.3. Ağır Metallerin Bitkilerde Etkileri

Ağır metaller bitkiye genel olarak topraktan suyu alırken su ile birlikte girer. Daha az olarakta atmosferde hazır bulunan ağır metaller bitkiye yaprakları aracılığı ile geçer (Özyiğit vd., 2021). Bitki bünyesine geçen ağır metaller birikerek toksik etki göstermeye başlar ve bitki verimini de etkileyerek ölümüne sebep olabilmektedirler. Toprakta biriken ağır metaller bitkiye girdiklerinde bitkinin ihtiyaç duyduğu yararlı besini almasının önüne geçerek temel besin eksikliklerinden ötürü bitkinin boyunun kısa kalmasına ve yaprakların daha küçük olmasına sebep olabilirler (Mengoni vd., 2007; Jaykumar vd., 2007).

Ağır metaller su seviyesinin sınırlandırılmasında kullanılan suberin isimli bileşiğin artmasına ve bitki köklerinde kahverengileşmeye, bitki-su ilişkisinin bozulmasına sebep olabilirler (Mohanpuria vd., 2007). Ayrıca çimlenmeyi, protein sentezlenmesini, bitki dokusunu ve bitki organlarını olumsuz etkileyerek bitkinin fizyolojik yapısına zarar verir, şeker aktivitelerinin yetersiz kalması sonucu tohumun çimlenmesine engel olabilirler (Yıldız vd., 2011). Bitkide biriken ağır metaller fotosentez işleminin gerçekleştiği kloroplastın yapısının değişmesine sebep olduğundan genellikle klorofil ölçümünde düşük bir değer ölçülür. Yapılan bazı çalışmalarda ise ağır metalin özelliğine ve bitkideki konsantrasyonuna bağlı olarak klorofil miktarının bazı bitkilerde azalmasına bazı bitkilerde strese bağlı olarak artabildiği görülmüştür (Özyiğit vd., 2021).

2.7. Ağır Metalle Kirlenmiş Toprağı İyileştirme Yöntemleri

Artan sanayi faaliyetleri çevreye yayılan ağır metallerin toprağa karışmasını hızlandırmıştır. Doğal ortamda biriken bu kirlilik ve etkilerinin en aza indirilmesi için bazı bilimsel yöntemler kullanılmaktadır. Ağır metalle kirlenmiş toprağın iyileştirme yöntemlerine; izolasyon immobilizasyon yöntemleri, mekanik ayırma yöntemi, in-situ temizleme (toprağı yerinde temizleme) yöntemleri ve biyoremediasyon yöntemi örnek verilebilir (Gedik, 2022).

Bu yöntemler kabaca fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler olarak tarif edilebilir. Örneğin aktif karbon, grafen yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip nanomalzemelerdir ayrıca biyokömür, pirinç kabuğu gibi maddelerde biyolojik yöntemlere örnek verilebilir. Kirliliğin yayılmasını önlemede bazı prensipler uygulanır, bunlar kirlenmiş toprağın kullanımını engellemek ve alanı karantinaya almak, kirli toprağı bölge içinde veya dışında temizlemek ancak bu yöntem yüksek iş gücü ve maliyet gerektirdiği için kullanımı sınırlıdır, izolasyon ve immobilizasyon yöntemiyle hareketi sınırlamak (Liu vd., 2018). Biyolojik yöntemler uygulanırken canlı mikroorganizmalardan yararlanılırken fitoremediasyon bu uygulamalar arasında en çevreci ve uygun maliyetli olarak kabul edilir (Tan vd., 2023).

Yine yapılan çalışmalarda, ağır metalle kirlenmiş toprakta biyokömür kullanımının ağır metallerin hareket edebilirliğini ve bitki tarafından alınımını azalttığı görülmüştür (He, 2019). Son yıllarda mikroorganizmaların ve bitkilerin ağır metal gideriminde kullanılması daha çevre dostu ve düşük maliyetli olması sebebiyle tercih edilmektedir (Yerli vd., 2020).

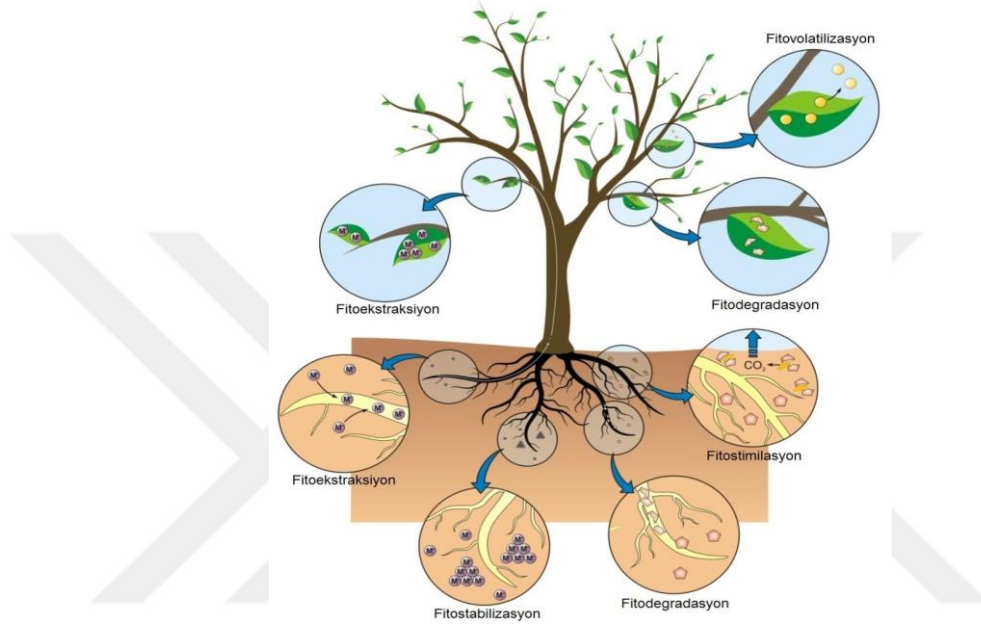
2.7.1. Fitoremediasyon

Fitoremediasyon, kirlenmiş alanlarda bulunan çeşitli organik ve inorganik kirleticilerin bitkiler vasıtasıyla uzaklaştırıldığı biyoremediasyon işlemidir. Fitoremediasyonun verimliliği bitkinin türüne, ortam şartlarına ve çevresel şartlara bağlıdır (Tan vd., 2023). Fitoremediasyon yöntemi kirliliğin türüne göre ve nerede uygulanacağına bağlı olarak farklı teknikler içerir. Bu tekniklere; eğer kirliliğin uygulama alanı uçucu kirleticilerse fitovolatilizasyon, madencilikten kaynaklanan bir kirletici mevcutsa fitostabilizasyon, kirlilik atık sudaysa rizofiltrasyon uygulamaları örnek verilebilir (Bian vd., 2018).

Fitoremediasyonda kullanılan bitkiler ağır metal toksisitesini tolere edebilir bitkilerdir. Hiperakümülatör bitkiler denilen bu canlılar ağır metalin çevreye sızmasını ve zarar vermesini önüne geçer (Liu vd., 2020a; Liu vd., 2020b). Bu bitkiler toprak içerisindeki metal içeriğinden 50-500 kat arasında daha fazla metali yaprak, dal ve gövde kısımlarında biriktirme potansiyeline sahiptir (Clemens, 2006). Yapılan çalışmalarda fitoremediasyonla ağır metal giderimi için kullanılan bazı tarla bitkilerine örnek olarak; *Allium schoenoprasum* (Cd, Co ve Ni), *Pisum sativum*, (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb ve Zn) *Brassica oleracea* (Cd), *Cajanus cajan* (As ve Cd) *Cicer aeritinum* (Cd, Cr, Cu ve Pb), *Brassica juncea* ve *B. napus* (Cd, Cu, Pb ve Zn), *Helianthus annuus* (Cd, Cr ve Ni), *Lactuca sativa* (As, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn), *Lantana camara* ve *Lens culinaris* (Pb), *Spinacia oleracea* (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb ve Zn), *Lepidium sativum* (As, Cd, Fe, Hg ve Pb), *Medicago sativa* (Cd), *Jatropha curcas* (Al, As, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn ve Zn), *Oryza sativa* (Cu ve Cd), *Raphanus sativus* (As, Cd, Cu, Fe ve Pb), *Solanum nigrum* ve *S. photeinocarpum* (Cd), *Sorghum bicolor* (Cd, Cu, Fe ve Zn) ve *Zea mays* (Cd, Cu, Pb ve Zn) sayılabilmektedir (Ozyigit ve Dogan, 2014).

Uygun bitki kullanımı ve doğru teknik uygulamasıyla fitoremediasyon yöntemi çevreci ve maliyeti düşük bir yöntemdir. Fitoremediasyon yöntemleri bitkinin türüne, toprağın cinsine, çevre koşullarına ve kirleticinin özelliklerine göre farklılık gösterir. Uygun pH değerinin ayarlanması, gübre kullanımı gibi etkilerle fitoremediasyonun etkisini arttırmak için bazı uygulamalar da yapılabilmektedir. Örneğin bitkinin Kurşun (Pb) emilimini arttırmak için toprağın pH değerinin kireç kullanarak 6,5-7 arasında tutulması ağır metal emilimini arttırdığı gözlemlenmiştir (Traunfeld vd., 2001). pH'ın toprakta en önemli etkisi mikro besin elementlerinden; bakır, mangan, demir, çinkonun çözünürlüğünün azalmasına sebep olmasıdır (Donahue vd., 1977).

Bir fitoremediasyon çalışmasında; deneysel saksılar kullanılarak İran'ın Hamedan şehrinde yapılmış olan testlerde, bazı ağır metalleri içeren maden sahasında yetiştirilen bitkilerin ağır metali bünyelerine alma kapasitelerini araştırmak için, *Conium maculatum*, *Stachys inflata* ve *Reseda lutea* üç baskın bitkinin vejetatif kısmında Cu, Pb, Zn, Cd ve Ni konsantrasyonlarına atomik absorpsiyon spektrometresi ile ölçülmüştür. *C. maculatum* Pb ve Zn'nin giderilmesinde, *S. inflata* Ni'nin azaltılmasında ve *R. lutea* Cu'nun azaltılmasında faydalı olabileceği saptanmıştır (Mohsenzadeh ve Mohammadzadeh, 2018).



Şekil 2.2. Fitoremediasyon Tiplerinin Şematik Gösterimi (Favas vd., 2014)

Fitoremediasyon tiplerinin belirtildiği Şekil 2.2.'de fitoakümülyasyon; topraktaki metal kirliticilerin bitkilerin kök bölgeleri yardımıyla alınması yöntemidir. Bitkiler bu kirliticileri bünyelerine alırken birbirlerinden farklı özellikler gösterir. Fitoremediasyon yöntemi kirliliğin türüne göre ve nerede uygulanacağına bağlı olarak farklı teknikler içerir. Bu tekniklere; eğer kirliliğin uygulama alanı uçucu kirliticilerse fitovolatilizasyon, madencilikten kaynaklanan bir kirlitici mevcutsa fitostabilizasyon, kirlilik atık sudaysa rizofiltrasyon uygulamaları örnek verilebilir.

Kirlilik oranı yüksek alanlarda absorpsiyon oranı yüksek olan hiperakümülyatör bitkiler tercih edilerek kirlilik oranı istenilen seviyelere inene kadar fitoakümülyasyon yöntemi tekrar edilir. Bakır, çinko ve demir gibi metaller bitki kökleri vasıtasıyla topraktan alınır ve diğer vejetatif organlara dağıtımı sağlanır (Aybar vd., 2015). Daha sonra bitki biyokütlesi yakma ve gazlaştırma aşamalarından sonra yenilenebilir enerjiye dönüştürülerek elektrik üretilmesi ile hacimsel olarak bir azalma sağlanabilmektedir (Shen vd., 2022).

Yang vd. (2014), yaptıkları çalışmada, Timsah otu (*Alternanthera philoxeroides*), Japon pelinotu (*Artemisia princeps*), Yaprak su keteni (*Bidens frondosa*), Köpek dişi otu (*Cynodon*

dactylon), Çatal otu (*Digitaria sanguinalis*) bitki çeşitlerinde Cd, Mn, Pb ve Zn ağır metallerinin biyokonsantrasyonları hakkında çalışma yapmıştır. Cd, Mn, Pb ve Zn içeren topraklardan, biyokonsantrasyon faktörleri gövde ve köklerde, biyokonsantrasyon faktörü <1 olarak bulunmuştur. Belirgin olarak mangan (Mn) fitostabilizasyonu için, tüm bitki çeşitlerinde, fitostabilizasyona uygun olduğu ve kullanılan ağır metallere karşı toleransın fazla olduğu görülmüştür.

Zhai vd. (2018), tarafından yapılan bir diğer çalışmada, siyah karbon, biyokömür ve kireç uygulanarak toprak yıkama ve yerinde kalarak hareketsizleştirme işlemi çalışılmış, FeC ile toprak yıkama işlemi yapılmış, Cd, Pb, Zn ve Cu metallerinde sırasıyla %62,9-%52,1-%30 ve %16,7 azalma görülmüştür. Kirecin eklenmesi ile Cd, Cu, Pb ve Zn'nin biyoyararlanımında %36,5-%73,6-%70,9 ve %53,4 azalma görülmüş ve toprakta mikrobiyolojik iyileşmeyi pozitif yönde etkilediği belirlenmiştir.

Salam vd. (2019), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bakır (Cu) ve çinko (Zn) kirliliği görülen maden sahasında, dört *Salix* çeşidinin bitki gelişimi, bakır, çinko alımı ve fitoekstraksiyon kabiliyetleri değerlendirilmiştir. Bitki çeşitlerinde sürgünler, yapraklar ve köklerdeki toplam bakır konsantrasyonları 163-474 mg/kg ve çinko değeri ise 776-1823 mg/kg arasında bulunmuştur. Bu işlem ile *Salix* çeşitlerinin istenilen miktarlarda Cu ve Zn biriktirme potansiyelinin olduğu saptanmıştır.

2.7.1.2. Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Ağır Metal Giderimine Etkisi

Yapılan çalışmalar bitkilerin toprakta bulunan ağır metalleri genellikle kökleri vasıtasıyla aldığını ancak bazı durumlarda atmosferde bulunan ağır metallerin yapraklar aracılığıyla da bitkiye girdiğini göstermiştir (Sheeta vd., 2006). Bitkinin kuru ağırlığı alındıktan sonraki kritik ağır metal konsantrasyonları; manganda 300-500 ppm, bakırda 20-100 ppm, (Kabata-Pendias ve Pendias, 1991) ve nikelde 1 mg (McGrath ve Smith, 1990) olduğu belirtilmiştir.

Tıbbi ve aromatik bitkilerin ağır metallere karşı tepkilerini anlayabilmek amacıyla Bulgaristan'da yapılan bir çalışmada; ağır metal kirliliğine maruz bırakılmış alan ile bu kirlilikten 400 m uzaktaki bir alanda nane ve lavanta yetiştiriciliği yapılmış ve kirlilikten uzak bölgedeki nanenin yaprak veriminde %9 -16 oranında azalma görüldüğü, lavantada ise uçucu yağ ve taze herba oranlarında bir azalma görülmediği tespit edilerek ağır metalle kirlenmiş topraklarda nane yetiştirmenin başarılı olduğu anlaşılmıştır (Zhejazkov vd., 1993). Doğada yetişen bitkilerin çoğunluğu yaklaşık 100 ppm'lik Çinko (Zn) birikim yaparken, hiperakümülatör bitkilerden yaygın olarak kullanılan *Thlapsi caerulea*'in 26000 ppm'e yakın birikim yaptığı belirtilmiştir (Lasat, 2000).

2.8. Adaçayı (*Salvia Officinalis*)

Günümüzde dünyanın her bölgesinde kültürü yapılmakta olan Adaçayı aslında kökeni Akdeniz bölgesine ait çok yıllık çalı bitkisi Lamiaceae familyasına ait önemli tıbbi bitkilerdendir

(Aslani vd., 2023). Adaçayı sıcaklığı seven, gelişim dönemlerinde nemli ortamlara ihtiyaç duyan bir bitkidir ayrıca antioksidan, antimikrobiyal, hipoglisemik, vb. olmak üzere çeşitli terapötik etkilere sahiptir (Ghorbani ve Esmailizadeh, 2017). Büyüme dönemlerinde ise kurak şartlara dayanıklı hale gelir. Gelişimi için Azot (N) içeren gübreler daha çok tercih edilebilir.

Ağır metallerle kirlenmiş alanların temizlenmesi için tıbbi ve aromatik bitkilerden faydalanılmaktadır. Bunlar; genelde Poaceae, Asteraceae, Lamiaceae And Geraniaceae familya üyelerinden fesleğen, nane, lavanta, kekik, biberiye, papatya, adaçayı, karahindiba, sardunya gibi bitkilerdir (Pandey vd. 2019).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada materyal olarak torf, biyokömür, bakır, adaçayı ve nitrik asit kullanılmıştır. Biyokömür elde etmek için Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü içerisinde bulunan belirlenmiş tek bir palmye ağacının kın kısmı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan aynı ekim döneminde yetişmiş olan 48 adet *Salvia officinalis* Uludağ Agro firmasından temin edilmiş olup, ağır metal olarak kullanılan bakır (Riedel-De Haenag Seelze, Hannover, Almanya) ve nitrik asit (HNO₃, %65, Merck, Almanya) kullanılmıştır.

3.1. Atık Temini

Mersin İlinde yıllık oluşan dal budak atık miktarı 2022 yılında 5354 ton civarındadır (Çevre Durum Raporu, 2022). Atıkların yaklaşık 1/4 ü palmye atıklarından oluştuğu tahmin edilmektedir. Hacimsel olarak da fazla yer kaplayan palmye atıkları halihazırda düzenli depolama tesislerine götürülmektedir. Bu çalışmada biyokömür elde etmek için kullanılan palmye ağacı *Arecaceae* familyasından *Washingtonia* cinsi olan *Washingtonia robusta* türüdür. Palmiyelerin kın kısmı kullanılmıştır.

3.2. Piroliz İşlemi ve Biyokömür Eldesi

Palmiyenin kın bölgesi kullanılarak elde edilen odunsu kısımla piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Yavaş piroliz yöntemi tercih edilmiş olup, piroliz işlemi Mersin Üniversitesi Çevre Mühendisliği laboratuvarında paslanmaz çelik/titanyum malzemesinden üretilen, 220 V, 50 Hz gücü, sıcaklık aralığı 50-800°C olan (Uniterm, Ankara, Türkiye) piroliz cihazı kullanılarak 600°C'de yapılmıştır. Ağaçtan alınan odunsu kısımlar 3-5 cm aralığında küçültülerek piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Piroliz işlemi 3 saat sürdürülmüş olup, yanma işlemi gerçekleşirken sisteme azot (N) gazı verilmiştir. Bu işlem 20 kere tekrarlanmış olup her bir piroliz işleminde ortalama 70-75 gr biyokütle ağırlığına karşılık yaklaşık 20 gram biyokömür verimi elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Palmye kınından elde edilen biyokömür

Piroliz kabına konulan odunsu ağırlığın yaklaşık 1/3 ağırlığı kadar biyokömür çıkmıştır. (Şekil 3.1.) Üretilen biyokömürler 2 litrelik plastik kaplarda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.2. Öğütülerek toz haline getirilmiş biyokömür

Üretilen biyokömürler Üniversite laboratuvarında bulunan 0,9 kW güce sahip toz fraksiyonu 30-300 mikron arasında olan minipress laboratuvar değirmeni ile öğütülerek toz haline getirilmiştir (Şekil 3.2.).

3.3. Biyokömürün pH ve Elektriksel İletkenlik Ölçümü

Üretilen biyokömürün pH değeri Avrupa Biyokömür Sertifikası (The European Biochar Certificate-EBC) yönergesinde yer alan DIN ISO 10390 metoduna göre belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik (EC) değeri ise yine aynı yönergede yer alan metod uygulanarak belirlenmiştir. Buna göre pH analizi için 0,01 M CaCl₂ çözeltisi hazırlanmıştır. 1 g biyokömür 5 mL suda çözüldükten sonra üzerine 25 mL CaCl₂ çözeltisi eklenmiş ve 1 saat çalkalanmıştır. Elde edilen süspansiyonun pH değeri pH metre (Thermo Scientific, Orion Star-A111) ile ölçülmüştür. EC ölçümü için ise 200 ml ultra saf suya 20 g biyokömür numunesi ilave edildikten sonra (w/v: 1/10) 1 saat boyunca çalkalanmış ve ardından çözelti filtrelenmiştir. Filtrelenmiş sulu malzemenin iletkenlik değeri multiparametre (Hach, HQ440d) kullanılarak ölçülmüştür.

3.4. Biyokömür Karakterizasyonu

Üretilen biyokömürlerin elemental içerikleri elemental analiz cihazı (Eurovector, EA3000-Single) ile, biyokömürün kristallografik özellikleri ve içerdikleri fazların belirlenmesi X-ışını difraksiyonu (XRD) ile, biyokömür moleküllerinin yapısındaki bağların tanımlanabilmesi Fourier

dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ile ve morfolojik yapısı SEM (Oregon, Quanta 650 FE-SEM, ABD) analizi ile belirlenmiştir.

3.5. Saksı Denemesi

Hassas terazide (tartım kapasitesi 310 g, Adventurer marka) toz halindeki biyokömürün; saksı denemesinde kullanılmak üzere tartım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her birinden 9'ar adet olmak üzere 2,5 - 5 - 10 ve 20 g olarak tartım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Toplam 337,5 g biyokömür kullanılmış olup tartılan biyokömrler kaplara alınarak etiketlenmiştir. Üniversiteden tedarik edilen 48 adet 2 litrelik saksılara içeriği bilinen (Tablo 3.1.) 1 kg tartımı yapılan torf eklenmiştir (Şekil 3.3).

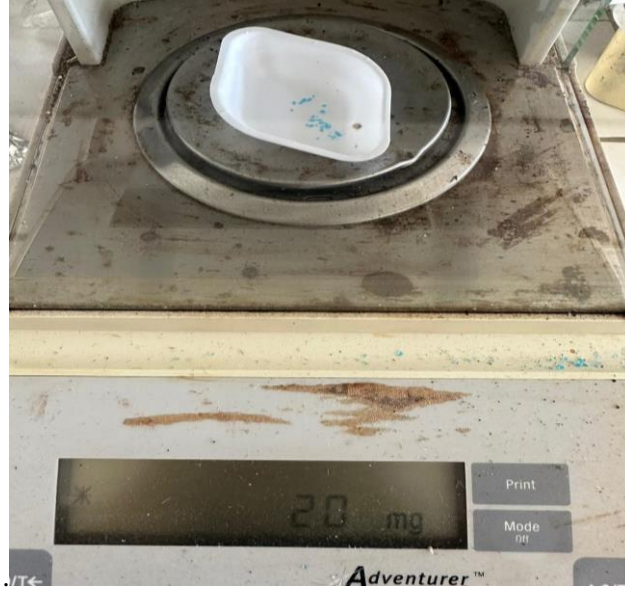
Tablo 3.1. Saksı denemesinde kullanılan torf özellikleri

pH (1:5 H ₂ O)	CaCO ₃ (%10HCl)	Elektriksel İletkenlik Micromhos/cm (1:5 H ₂ O)	Organik Madde (%)	Nem Ekivalanı (%)	Saflık Oranı
6-7	Yok	Yok	76,4	107,7	% 95



Şekil 3.3. Denemede kullanılan saksılar

Tartım yapılarak hazırlanan saksılara, Mersin Üniversitesi laboratuvarından alınan %99 saflığındaki bakırdan 10 - 20 ve 40 mg tartılarak her birinden 9 örnek hazırlanmıştır. Toplam 630 g Cu kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.4. Tartılan bakır (Cu) örneği

Bitkiyi toprağa ekmeden önce saksılara etiketleme işlemi yapılmıştır. 48 adet saksı kullanılmıştır.

Tablo 3.2. Deney Seti

Biyokömür (BK) içeriği	Cu içeriği		
2,5 g Bk	10 mg Cu	20 mg Cu	40 mg Cu
5 g Bk	10 mg Cu	20 mg Cu	40 mg Cu
10 g Bk	10 mg Cu	20 mg Cu	40 mg Cu
20 g Bk	10 mg Cu	20 mg Cu	40 mg Cu
Biyokömür Kontrol Uygulaması (0 BK)	10 mg Cu	20 mg Cu	40 mg Cu
Kontrol Uygulaması (0 BK)	0	0	0

Çalışma esnasında Uludağ Agro firmasından 48'li viyol içinde alınmış olan her biri aynı ekim döneminde dikildiği bilinen *Salvia officinalis* bitkisi kullanılmıştır (yaklaşık 1 aylık bitkiler). Deney seti üç (3) tekerrürlü yapılmıştır (n=3). Daha önce tartımları yapıp etiketlemeleri yapılarak hazır hale getirilen biyokömür ve bakır örnekleri *Salvia officinalis* bitkisini toprağa dikme aşamasında hazır hale getirilmiştir. Bitki dikme işlemi öncesinde saksılardaki torf içerisine tartılan biyokömür ve bakır miktarları (Şekil 3.4) ilave edildikten sonra harmanlanmış (Şekil 3.5) ve daha sonrasında adaçayları viyolden çıkartılarak saksılara ekimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Ekimler tamamlandıktan sonra bitkilere can suyu verilerek yetiştirme evresi başlatılmıştır.



Şekil 3.5. Biyokömür ve bakırın saksıya eklenmesi



Şekil 3.6. Ekimi tamamlanan saksılar

3.6. Klorofil Ölçümü

Ekimi yapılan saksılar toprak kuruma durumu göz önüne alınarak hemen hemen her gün sulanmış ve güneş ışığı alan bir noktada tutulmuştur. Klorofil ölçümü Konica-Minolta SPAD 500 Klorofil metre ile gerçekleştirilmiştir. Ekilen bitkilerin klorofil ölçümleri ilk hafta ve son hafta (hasattan önce) olmak üzere klorofil metre ile gerçekleştirilmiştir.

3.7. Bitki Büyüme Parametreleri

Bitkiler hasat (ekimden 8 hafta sonra) edilmeden önce boyları ölçülmüş, fotoğraflanmış ve toprak yüzeyinin yaklaşık 1 cm yukarisından hasat edilmiştir. Hasat edilen bitkilerin yaş ağırlıkları alındıktan sonra kurutma kâğıdı içerisinde 70 °C de 48 saat kurutmaya bırakılmıştır. Sabit tartıma gelen bitkiler oda ısısına geldikten sonra kuru ağırlıkları alınmış ve yaklaşık 5 mL 12 M nitrik asit içerisinde koyularak hot-plate üzerinde çözünürleştirilmiştir. Çözünürleştirmek üzere cam şişelere konulan bitkiler Şekil 3.8.'de gösterilmektedir. Çözünen *Salvia officinalis* bitki örnekleri siyah bant

filtre kağıdından süzildükten sonra 25 mL'ye seyreltilmiş ve indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) ile bakır içerikleri belirlenmiştir. Çözünürleştirilen *Salvia officinalis* bitkilerine ait görseller Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.7. Çözünürleştirilmek üzere cam şişelere koyulan bitkiler



Şekil 3.8. Çözünürleştirilen bitkiler

3.8. İstatistiksel Analiz

Analizler R language 4.0 (4.3 versiyonu) programlama dili kullanılmıştır. Çalışmanın istatistik analizlerinde, gruplar arası anlamlı farkı belirlemek adına tek yönlü varyans analizi (ANOVA), bonferroni posthoc testleri ile kullanılmıştır. Tekrarlı ölçümlerde ise iki yönlü tekrarlı ölçümlü varyans analizi (two way repeated measurements anova) kullanılmıştır. Tüm analizler için istatistik anlamlılık düzeyi (p) 0,05 olarak alınmıştır.

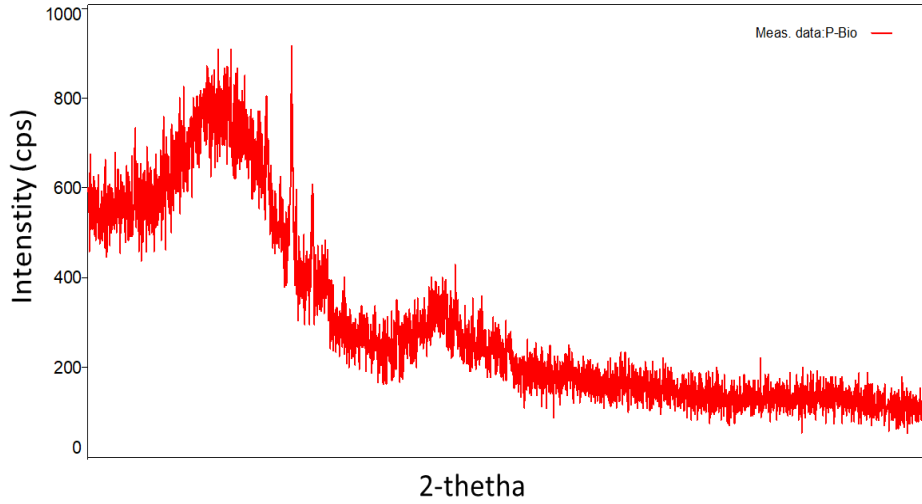
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Biyokömür karakterizasyonu

Üretilen palmiye atığı biyokömürünün pH değeri hafif alkali düzeyde 3 örnekte ölçülerek 8,52 olarak belirlenmiştir. Alghamdi vd. (2021) göre, piroliz sıcaklığı arttığında, biyokömürün pH'ı artar. Yazarlar, piroliz sıcaklığı 300 °C'den 500 °C'ye yükseldiğinde zeytin ağacı biyokömürünün pH'ının 8,37'den 9,29'a yükseldiğini belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada yazarlar yavaş piroliz yöntemiyle zeytin ağacından 600 °C'den 2 saate kadar biyokömür ürettiklerini ve biyokömürün pH değerinin 11,1 olduğunu belirtmişlerdir. Biyokütlenin biyokömüre dönüştürülmesi sürecinde yer alan bazı mekanizmalar, biyokömür pH'ının biyokütle pH'ından daha yüksek olduğu gerçeğini açıklamaktadır. Bu mekanizmalar (Ahmad vd. 2019) tarafından açıklanmıştır. Yazarlar, piroliz işlemi ile biyokütlerdeki uçucuların çoğunun uzaklaştırıldığını ve böylece inatçı kationların oluşumunun ve değiştirilebilir kationların yoğunlaşmasının biyokömürde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bu şekilde, biyokömürdeki bazik fonksiyonel grupların artırılması, organik bileşiklerden alkali tuza ayrılması ve asidik fonksiyonel gruplarda azalma ile pH değerinde bir artış gözlenmiştir. Palmiye atığı biyokömürünün elektriksel iletkenliği 3 örnekte ölçülerek 525 µS/cm olarak tespit edilmiştir. Biyokömürdeki C, H, N yüzdesi elementel analiz ile belirlenmiştir. Sonuçlar, palmiye biyokömürünün C, H ve N içeriğinin ağırlıkça sırasıyla %65, %0,78 ve %0,43 olarak belirlenmiştir (Sánchez-García vd.2019), iki farklı sıcaklık (400 ve 600 °C) üzerinde çalışmışlar ve EC'nin piroliz sıcaklığı ile arttığını belirtmişlerdir.

Jindo vd. (2014) organik atıklardan (pirinç kabuğu, elma ağacı talaşı, pirinç samanı, meşe ağacı) elde edilen biyokömürün üretimi %39,3, (Xu vd. 2014), çeltik sapından ürettikleri biyokömürün üretim verimini %34,3 olarak tespit etmişlerdir. Bu farklı sonuçların kullanılan materyallerin aynı olmaması ve uygulanan piroliz şartlarının farklı olmasından ileri geldiği belirlenmiştir (Uzun vd., 2006; Demirbaş ve Arin, 2002; Tsai vd., 2007).

X-ışını kırınımı, biyokütlerdeki selülozun kristallliğini ve biyokömürün yapısını analiz etmek için uygulanabilir bir yöntemdir. Elde edilen biyokömürün XRD difraktometre sonuçlarına bakıldığında 20-30° aralığında var olan geniş pik, örneklerde zayıf bir kristal yapının ve karbon bakımından zengin bir fazın varlığını göstermektedir. Bu tür kömürler genellikle düzensiz grafitik kristalitlerin hâkim olduğu turbostratik kömürler olarak bilinir (Zhang vd. 2017). Biyokömürün XRD difraktogramında (Şekil 4.1.) gözlenen yaklaşık 25° 'deki geniş tepe noktası amorf karbon fazını göstermektedir. Bu zirve, piroliz nedeniyle daha az düzenli bir yapıya sahip karbonlu bir malzemenin tipik örneği olarak belirtilmektedir (Magioglou vd. 2019).

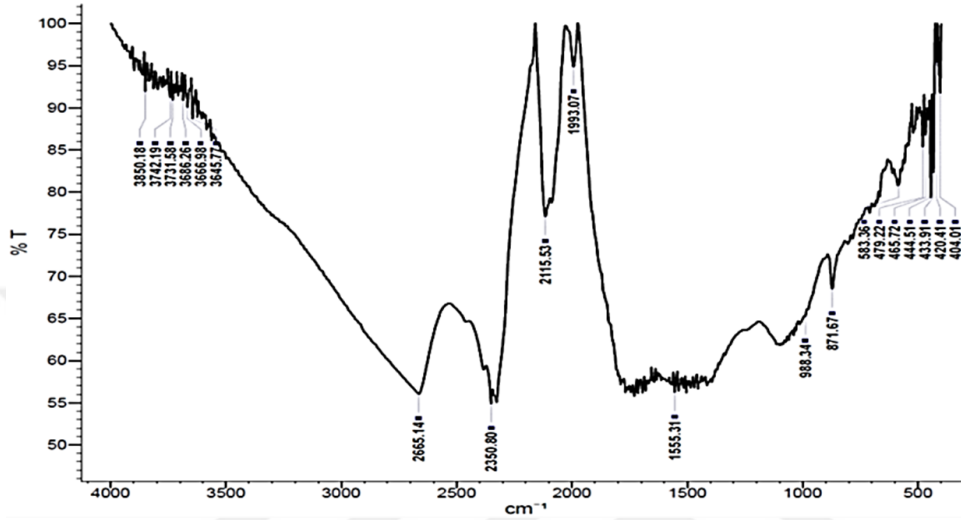


Şekil 4.1. Palmiye atıklarından elde edilen biyokömürün XRD difraktometresi.

Fourier Dönüştürümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) organik yapılu bileşiklerin fonksiyonel grupları ve moleküler yapısı hakkında önemli bilgiler sağlar. Elde edilen spektrum verileri, farklı moleküler bağlara sahip farklı titreşim kaynaklarından ileri gelir (Büyüksırt ve Kuleaşan, 2014). Bu tez kapsamında kullanılan palmiye atıklarından elde edilen biyokömürün yüzeyindeki fonksiyonel grupların tanımlanması için FTIR analizi gerçekleştirilmiş ve FTIR spektrumu Şekil 4.2’de verilmiştir. Biyokömürler aktif yüzeyler ile iyonik ve kovalent bağları içeren güçlü etkileşim mekanizmasına sahiptirler (Liang vd.,2010). Bu özellikleri ile ağır metalleri fonksiyonel gruplarına bağlarlar (Cao vd., 2009; Liu vd., 2009; Mohammed vd., 2011, Regmi vd., 2012) ve ağır metallerin toksik etkilerini engellerler. Ayrıca biyokömürlerde iç küre yüzeylerinde kovalent ve iyonik bağların bulunduğu güçlü etkileşim mekanizmaları (Liang vd.,2010) ve ağır metallerin biyokömüre bağlanabileceği fonksiyonel grupları barındırmaktadır (Cao vd., 2009, Liu vd., 2009, Mohammed vd., 2011, Regmi vd., 2012).

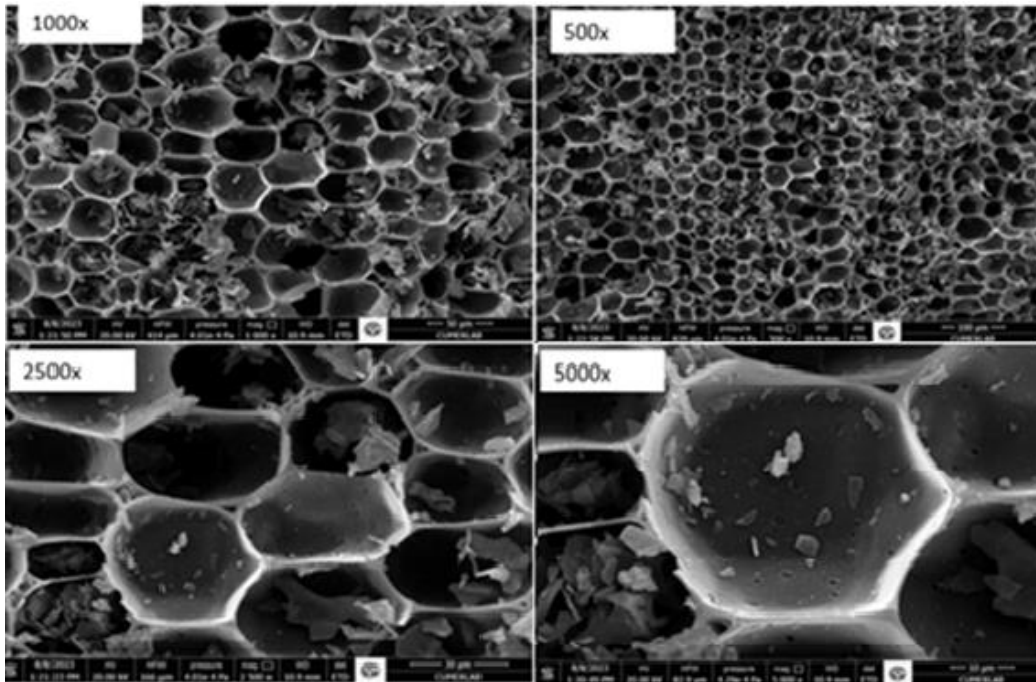
Bu çalışmada tespit edilen 3950 ve 3645 cm^{-1} deki bantlar O – H titreşimlerini temsil etmektedir. 2665 cm^{-1} dalga boyunda gözlenen keskin pik ise aldehite ait C-H germe pikidir. 1993 cm^{-1} de gözlenen zayıf küçük dip aromatik bileşiklere ait C-H bağının bükülmesini göstermektedir. Palmiye atığı biyokömüründe gözlenen 1700 - 1400 cm^{-1} arasındaki pikler amin (N-H) ve karbonil (C = O) gruplarını temsil etmekte olup ayrıca 1555 cm^{-1} titreşim piki nitro bileşiklere ait N-O germe bandı olarak gözlenmiştir. 988 ve 871 cm^{-1} dalgaboyunda gözlenen pikler ise C=C bükülme piklerini (Eleryan vd., 2022) ve aromatik C-H atomları tarafından üretilen düzlem dışı deformasyonu temsil etmektedir (Behazin vd., 2016). Karboksil grupları gibi fonksiyonel grupların mevcudiyeti, matris polimer ile uyumluluğu geliştirmek için spesifik polimerlerin fonksiyonel grupları veya bağdaştırıcıları ile reaksiyona girmek için daha fazla kullanılabilir (Behazin vd., 2016). Daha önce yapılan çalışmalarda Cu metali eklenmiş biyokömürlerdeki metal iyonlarının, OH (H-bağı) gruplarının 3428 cm^{-1} germe titreşimlerindeki piklerin yoğunluğunu azalttığı ve bu değişiklik ile O-H gruplarının buğday samanı biyokömür yüzeyindeki Cu (II) kompleksinde yer aldığı doğrulanmıştır (Medynska-

Juraszek vd., 2020). Araştırmacılar, C=O karboksilik grubu için karakteristik olan pik 1624 cm^{-1} 'in dalga boyundaki azalmayı, biyokömür yüzeyindeki serbest karboksil grupları ile ve Cu (II) iyonlarının etkileşimi ve karboksillara dönüşmesi ile açıklamışlardır. Bu da biyokömür yüzeyindeki karboksil gruplarının metal bağlanmasındaki önemli rolünü gösterir. 465 cm^{-1} 'lik çok güçlü zirve, kompleks veya Cu–O–H deformasyonlarında H_2O ligandlardan biri olduğunda ortaya çıkabilmektedir (Medynska-Juraszek vd., 2020).



Şekil 4.2. Palmiye atığı biyokömürüne ait FTIR spektrumu

Üretilen biyokömüre ait SEM görüntüleri Şekil 4.3.'te verilmiş olup, peteğimsi bir yapı gözlenmiştir. SEM görüntüleri 500x, 1000x, 2500x, 5000x büyütmeleri göstermektedir.



Şekil 4.3. Biyokömüre ait SEM analizi

Genel olarak biyokömür spesifik yüzey alanı, piroliz sıcaklığında artış olmasıyla birlikte artış gösterir, bunun sebebi ise biyokömür içerisindeki organik hammaddenin ayrışması ve mikro gözenekli yapının oluşmaya başlamasıdır (Üstündağ, 2022).

4.2. Saksı denemeleri

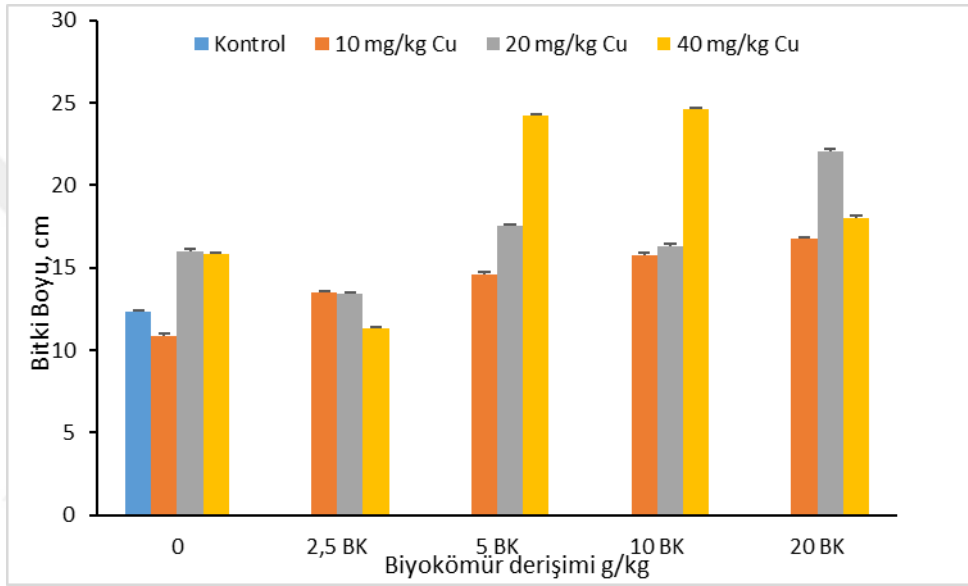
4.2.1. Bitki büyüme parametreleri

Bitki büyüme parametreleri incelendiğinde öncelikle yapılan ölçümler bitki boyu, klorofil içeriği ve bitki yaş-kuru kütle değerleridir. Şekil 4.4.'te 40 mg/kg Cu derişimi ve kontrol grubunun olduğu saksılara ait hasattan hemen önceki görüntü verilmiştir. Şekil 4.5'te bitki boylarının dikim işleminden 8 hafta geçtikten sonraki ölçümüne ilişkin grafik gösterilmiştir. Bitki boylarının ölçümü dikim işleminden hemen sonra ve hasattan hemen önce gerçekleştirilmiştir. Ekimden 7 gün geçtikten sonra ve ekimden 2 ay geçtikten sonra yapılan adaçayı bitkisi boy uzamalarında 40 mg/kg Cu derişiminde 5, 10 ve 20 g/kg biyokömür uygulamasında en iyi uzama verimi gözlenmiş olup tüm biyokömür uygulamalarında ölçülen boy uzunlukları istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Maksimum uzama yüzdesi 40 mg/kg Cu derişiminde 5 g/kg ve 10 g/kg biyokömür uygulamasında sırasıyla %24,2 ve %24,6 olarak belirlenmiştir. Bunun yanında adaçayı bitkisinin boy uzaması ilk hafta ve son hafta arasında 20 mg/kg Cu derişiminde ve 20 g/kg biyokömür uygulamasında %22,1 olarak belirlenmiştir ancak bu uzama değerleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$) (Şekil 4.5). Haftalar arasındaki uzama değerleri anlamlı bir değişiklik göstermemiş olsa da biyokömür derişimine bağlı olarak son hafta ölçülen boy uzunlukları arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Biyokömür kontrol grubu arasında ise en az boy uzamasına sahip deneme seti 10 mg/kg Cu derişiminde %10,9 olurken, 20 mg/kg Cu (%16) ve 40 mg/kg Cu (%15,8) boy uzama veriminin hemen hemen eşit olduğu belirlenmiştir. İlk ve son haftalar arasında yapılan ölçümlerki değişimler 10 ve 40 mg/kg Cu derişimlerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$).

Toprağın biyolojik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, domates ve muz kullanılarak elde edilen iki farklı biyokömür çeşidinin bitki verimini önemli ölçüde etkilemediği tespit edilirken bitkinin boy uzamasına (%15.2 ve %10.2 oranında) katkıda bulunduğu tespit edilmiştir (Aziz, 2020).

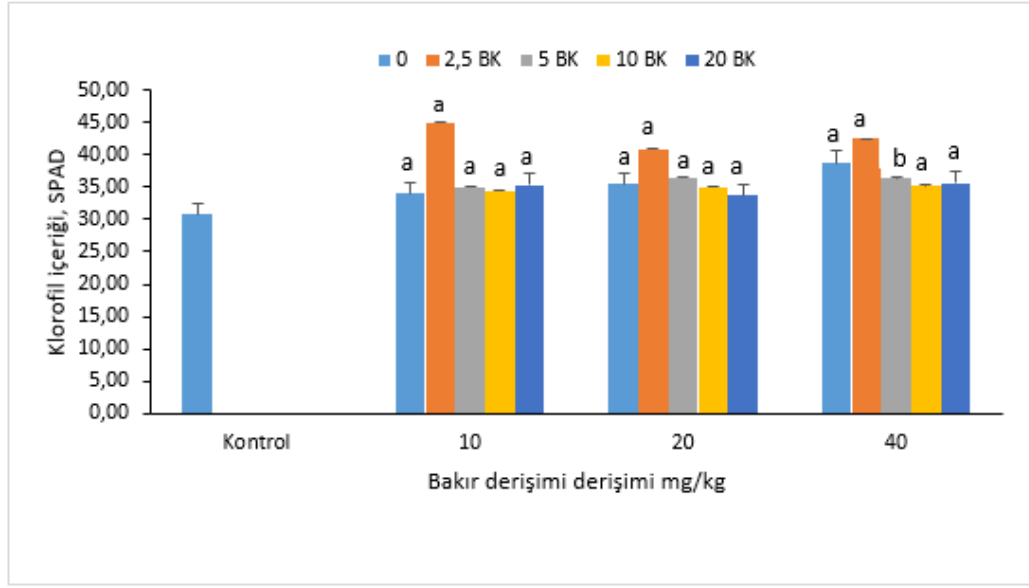


Şekil 4.4. Kontrol grubu ve 40mg/kg Cu örneği içeren saksılar



Şekil 4.5. Dikim işleminden 8 hafta sonra ölçülen bitki boyları

Dikimden 8 hafta sonra ölçülen ölçülen klorofil değerleri Şekil 4.6.'da verilmiştir. Son hafta yapılan klorofil ölçümlerinde ilk haftaya kıyasla, kontrol grubu ve biyokömür kontrol uygulaması (10 mg/kg Cu, 20 mg/kg Cu ve 40 mg/kg Cu) klorofil değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. 10, 20 ve 40 mg/kg Cu derişiminde 2,5, 5, 10 ve 20 g/kg biyokömür uygulamasında ölçülen klorofil değerleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Klorofil içeriğindeki maksimum artış 20 mg/kg Cu derişiminde 2,5 g/kg biyokömür uygulamasında %39 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.6) ($p < 0,05$). Klorofil değerlerindeki minimum artış ise 40 mg/kg Cu derişiminde 5 g/kg biyokömür uygulamasında %1,3 olarak belirlenmiştir olup istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0,05$). Diğer biyokömür ve bakır derişimlerindeki artış oranlarının yaklaşık olarak eşit oldukları belirlenmiştir.

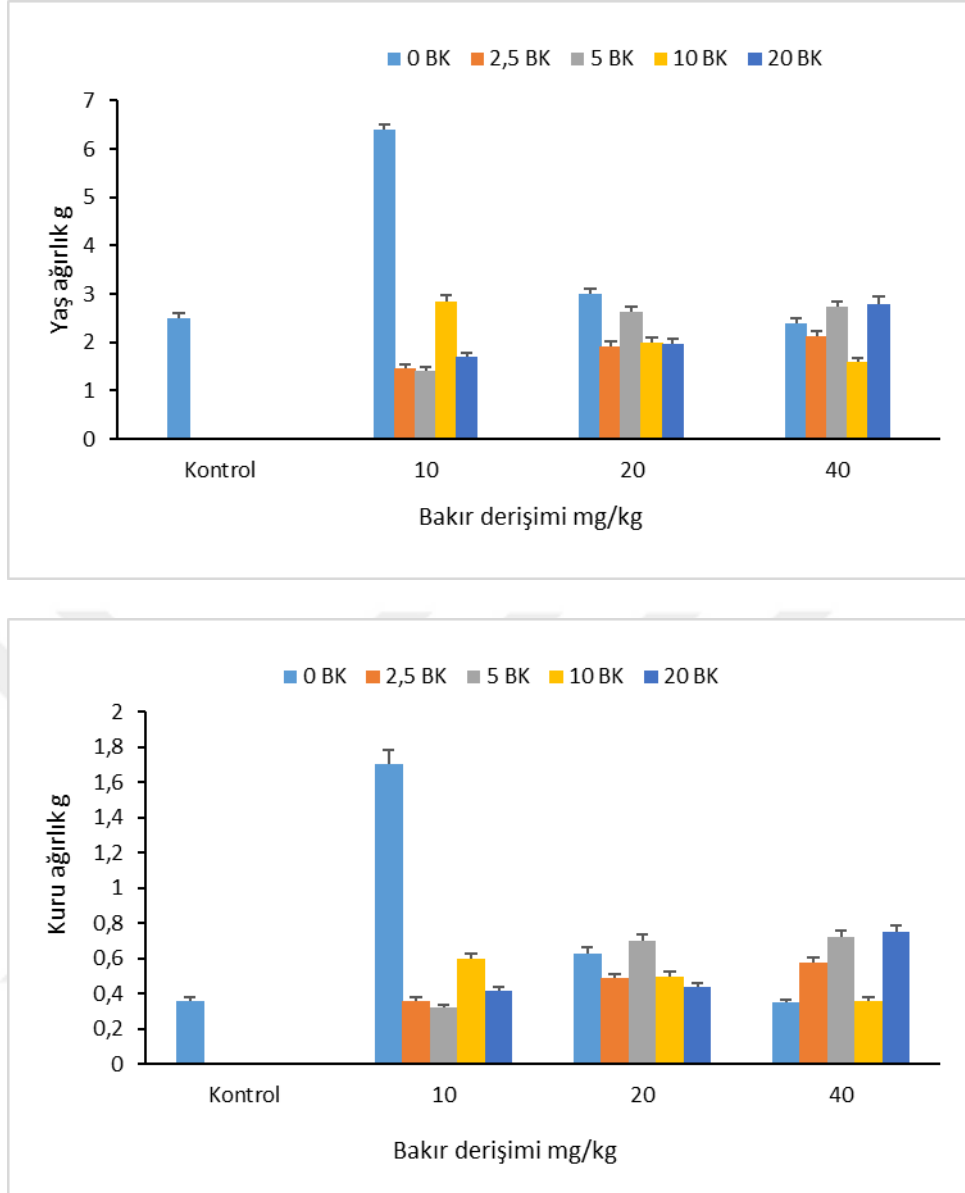


Şekil 4.6. Dikim işleminden 8 hafta sonra ölçülen klorofil değeri(a-b: Ortak bir üst simge harfi olmayan bir satırdaki ortalamalar farklıdır ($P < 0,05$)).

Dikim işleminden 8 hafta sonra ölçülen klorofil değerlerinde tüm deney setlerinin klorofil değerlerinde artış görülmüştür.

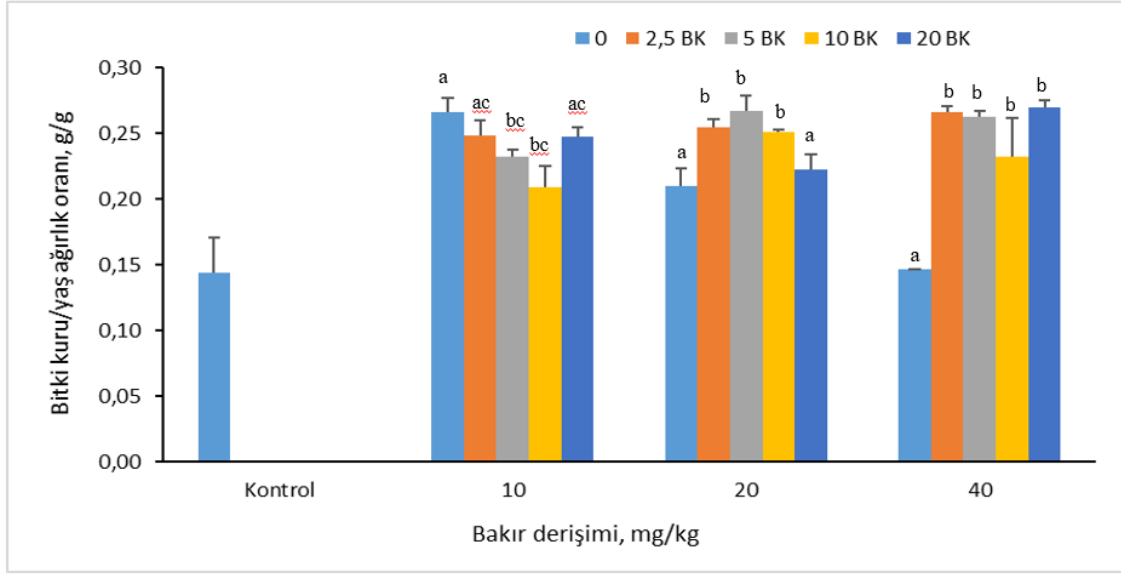
Bakır bitkiler için bir mikrobesein elementi olmakla birlikte düşük konsantrasyonlarda bile tarımsal ürünler için toksisiteye sebep olabilecek potansiyele sahiptir. Ancak bitkilerin büyüme ve gelişmesi için hayati öneme de sahiptirler. Bakır elementi kloroplastlarda bulunan ve fotosentez sırasında elektron taşınımında ve metabolik olaylarda görev alır (Kul vd. 2021). Ayrıca kloroplastın işlevsel yapısının bozulmasına sebep olabilen bakır elementinin fazlalığı klorofil miktarında azalmaya sebep olmaktadır. Ancak yapılan bu çalışmada bakır uygulamaları ile adaçayı bitkisinin fotosentez ve dolayısı ile klorofil içeriklerinde artışa sebep olduğu görülmektedir. Dolayısı ile büyüme ortamına eklenen biyokömür varlığı bakırın bitki gelişimi ve fotosentezdeki olumsuz etkisini inhibe ettiği ve klorofil miktarlarında artışlar belirlenmiştir (Sönmez vd.,2006). Bir diğer çalışmada ise bakır dozu artışının yaşlı yapraklarda %52, genç yapraklarda ise %27 oranlarında fotosentezde azalmaya yol açtığı bildirilmiştir (Dunand vd., 2002).

Bitki hasat edildikten hemen sonra yapılan yaş ağırlık ölçümü ve hasat edilip etüvde 48 saat durduktan sonra ölçülen kuru ağırlık değerlerine ilişkin değerler Şekil 4.7.'de ayrı ayrı grafikte verilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı derişimlerde bakır ve biyokömür içeren saksılarda yetiştirilmiş adaçayı bitkisinin ölçümleri

Kuru ağırlığın yaş ağırlığa oranına ilişkin sonuçlar Şekil 4.8.'de gösterilmiş olup, grafikten de görüldüğü üzere biyokömür kontrol uygulamasında (10 mg/kg Cu, 20 mg/40 Cu ve 40 mg/kg Cu) artan Cu derişiminin kuru/yaş biyokütle oranında azalmaya sebep olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, ortamda biyokömür varlığının yüksek bakır derişiminde dahi kuru/yaş biyokütle oranında önemli bir değişikliğe sebep olmadığı gözlenmiştir. Dolayısı ile bakırla kirlenmiş topraklara biyokömür uygulamasının bitki biyokütlesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltabileceği gözlenmiştir.



Şekil 4.8. Kuru ağırlığın yaş ağırlığa oranı (*a-c*: Ortak bir üst simge harfi olmayan bir satırdaki ortalamalar farklıdır ($P < 0,05$)).

Adaçayı bitkisinin maksimum kuru/yaş biyokütle oranı 20 mg/kg Cu derişimi 5 g/kg biyokömür uygulamasında belirlenmiş olsa da istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0,05$). Minimum oran ise 10 mg/kg Cu derişiminde 10 g/kg biyokömür uygulamasında gözlenmiştir yapılan istatistik analizinde sonuç anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$) ve biyokömür grupları arasında 10 mg/kg, 20 mg/kg ve 40 mg/kg Cu alımı değerleri istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p < 0,05$). 10 mg/kg bakır uygulaması biyokütle artışını destekleyen derişim olarak belirlense de biyokömür uygulaması biyokütle artışını azaltmıştır. Buradaki temel sebebin bitki tarafından alınacak bakırın faydalı miktarının biyokömür tarafından azaltıldığı söylenebilmektedir (Şekil 4.8). Dolayısı ile bitki büyüme parametrelerinden kuru ağırlığın yaş ağırlığa oranı göz önüne alındığında adaçayı bitkisinin, toksik sınırlar içerisindeki Cu içeren topraklara biyokömür ilavesinin bitki toleransını arttırdığı belirlenmiştir.

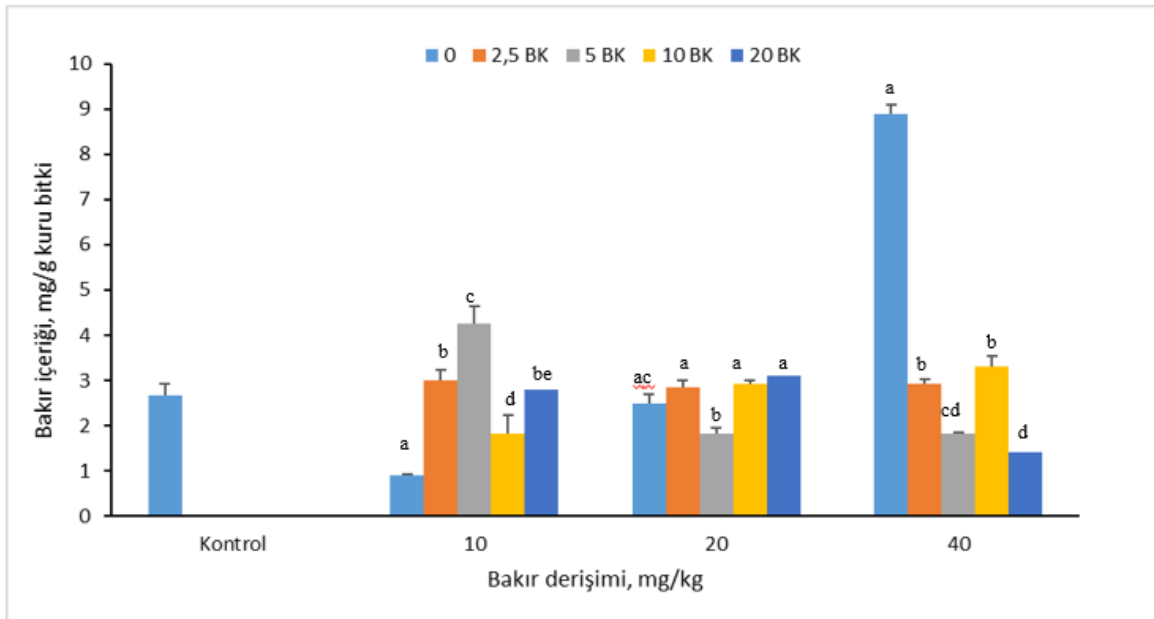
Ağır metaller ayrıca bitkinin köklerden su alımını da etkileyerek kuru/yaş oranında bir farklılık gösterebilirler. Ağır metallerle etkileşimde olan bitki köklerinde suberin adı verilen, su miktarını sınırlamaya yarayan bileşiğin artışıyla bitki-su ilişkisi bozulur ve bitkinin gelişmesini etkiler (Yerli vd.,2020)

Literatürde yapılan diğer bir çalışmada zeytinyağı küspesi, arıtma çamuru ve tavuk gübresi kullanılarak pirolitik ve hidrotermal yöntem kullanılarak elde edilen biyokömürlerin, bitki kuru ağırlıklarına etkisi incelendiğinde, arıtma çamurunun piroliz ve hidrotermal karbonizasyon yöntemleri kullanılarak üretilen biyokömür uygulamasının doz artışıyla birlikte bitkinin kuru ağırlığında bir artış gözlemlenirken, hidrotermal karbonizasyonla üretilen zeytinyağı küspesine ait biyokömür uygulamasında dozun artırılmasıyla bitki kuru ağırlığının azaldığı tespit edilmiştir (Sevilir, 2019).

4.2.2. Bakır İçeriği

Yapılan bu çalışmada bakır analizi sonucunda elde edilen bitkideki bakır içerikleri incelendiğinde 40 mg/kg Cu derişiminde biyokömürlü kontrol grupları örneğinde maksimum bakır içeriği belirlenmiştir ($p < 0,05$) (Şekil 4.9). Biyokömür kontrol uygulamaları arasında 10 mg/kg, 20 mg/kg ve 40 mg/kg Cu derişimlerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Minimum bakır içeriği 10 mg/kg Cu derişiminde (biyokömür kontrol uygulaması) belirlenmiştir ($p < 0,05$). Elde edilen sonuçlar bitki biyokütlesi ve diğer büyüme parametreleri ile desteklenmektedir.

Literatürde yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde farklı bitkiler üzerinde uygulanan farklı kaynaklardan üretilen biyokömür ve farklı ağır metal uygulamasının ağır metal alımı ve birikimi üzerinde değişik sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan bir diğer çalışmada tavuk gübresi ve yeşil atıklardan elde edilen biyokömürün Hint Hardalı bitkisinde Pb, Cd ve Cu ağır metal immobilizasyonunu azalttığı, artan biyokömür uygulamasının Cu üzerinde etkisi olmadığı belirtilmiştir (Park vd., 2011).



Şekil 4.9. Farklı biyokömür ve farklı bakır oranlarına göre bitkideki Cu derişimi (*a-e*: Ortak bir üst simge harfi olmayan bir satırdaki ortalamalar farklıdır $P < 0,05$).

Jun vd. (2019), tarafından yapılan bir çalışmada, Lychee biyokömürü ilavesinin ayçiçeği bitkisinin biyokütlesi ve Pb, Cd ve As birikimini analiz etmek ve karşılaştırmak amacıyla farklı oranlarda biyokömür (%2,5, %5, %10) toprağa eklenmiştir. Yapılan ilk ölçümde ayçiçeği biyokütlesinin arttığı, %5 ilave edildiğinde ise maksimum seviyede artış olduğu görülmüştür. Ancak biyokömürün daha fazla ilavesinin bitki büyümesini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Ancak biyokömürün eklenmesiyle ayçiçeğinin ağır metalle kirlenmiş toprağı onardığı; kirlenmiş toprağı %

2,5, 5 ve 10 biyokömür ilavesi ile ayçiçeğinin yapraklarında Pb, Cd ve As miktarının arttığı, artan biyokömür konsantrasyonu %12,4, %11,0, %4,35 ile kök, gövde ve tohumlardaki ağır metal içeriklerinin önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Ayçiçeğinde Pb, Cd ve As içerikleri kontrol grubuna göre sırasıyla %78,13, %46,18 ve %50,23 oranında azaldığı belirtilmiştir.

Salmani vd.(2014), tarafından yapılan çalışmada; Narenciye biyokömürün bakır toksisitesi altındaki ayçiçeği bitkisinde Cu alımına ve ayçiçeği bitkisi verimine etkisi araştırılmıştır. Deney aşamasında farklı üç oranda bakır (0, 50, 200 mg/kg) ve 4 farklı oranda narenciye odunundan elde edilen biyokömür kullanılmıştır (ağırlıkça %0, %1, %2 ve %4). Sonuçlar, orta ve yüksek Cu toksisite seviyelerinde biyokömür uygulamasının kalkerli topraktaki mevcut Cu seviyesini önemli ölçüde azaltabildiğini böylece ayçiçeğinin toprak üstü kısımlarındaki Cu konsantrasyonunu normal seviyelere düşürebileceğini göstermiş, ayçiçeğinin topraktan aldığı Cu miktarını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Sonuçlar yapılan bu çalışma ile uyumluluk göstermiştir.

Biyokömürlerin, toprak içerisinde bulunan başta kadmiyum olmak üzere diğer ağır metaller ile mevcut özellikleri dolayısıyla bağ oluşturarak toprakta ağır metal yarayışlığının azalmasına ve bitkiler tarafından ağır metallerin alınmasına önüne geçtiği, ayrıca ağır metallerin biyokömürlerle beraber çökmesi de ağır metallerin alınımının önüne geçilmesinde faydalı olduğu belirtilmiştir (Tong vd., 2011). Bakır madeninde Cu ve Pb ile kirlenmiş toprakta (600 ve 21.000 mg/kg) 4 ay boyunca çavdar otu yetiştirilmiş, metallerin bitkiye alınımı 3 hasatta ölçülmüş ve Pb içeriğinin kompost eklenerek azaldığı tespit edilirken çavdar filizindeki Cu seviyesinin de azaldığı tespit edilmiştir (Karami vd., 2011).

Zheljazkov vd. Nieslsen (1996), tarafından yapılan çalışmalarda; tıbbi ve aromatik bitkiler tarafından biriktirilen ağır metallerin büyüme, gelişme gibi hayati önem taşıyan faaliyetlerini olumsuz etkilemediği tespit edildiğinden, fitoremediasyon işlemi sonunda hasatı yapılan bitkilerin incelenmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarımsal faaliyetler ve budama faaliyetleri sonucu oluşan organik atıkların bertaraf edilmeden kullanımı çevresel sürdürülebilirlik açısından önem teşkil eder. Bu kapsamda organik atıklardan biyokömür üretimi sürdürülebilir bir karbon kaynağı olmasının yanı sıra maliyeti düşük ve çevre dostu bir kullanım potansiyeline de sahiptir. Yapılan araştırmalarla biyokömürün gelişmesi ve üretimi konusunda ilerlemeler devam etmektedir. Literatüre bakıldığında biyokömürün özellikleri; hammadde türü ve yapısına, biyokömürün üretim aşamalarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu değişkenlik aynı zamanda biyokömürün farklı kullanım alanlarında araştırılacak konuya uygun tasarımının yapılabileceğinin göstergesidir.

Yapılan bu çalışmada ilk olarak sürdürülebilirlik kavramından yola çıkılarak Mersin il genelinde fazla miktarda olduğu bilinen palmye budama atıkları kullanılmıştır. Palmye ağacının kın kısmı denilen odunsu yapısından yavaş piroliz yöntemi uygulanarak 600°C'de biyokömür elde edilmiş ve biyokömürün SEM analizi değerlendirildiğinde peteğimsi bir yapıda olduğu görülmüştür.

Çalışmadan elde edilen sonuçlarda bitki büyüme parametreleri (bitki boyu, klorofil içeriği, kuru/yaş ağırlık oranı) artan biyokömür uygulaması (2,5-5-10-20 g/kg) ile adaçayı bitkisinin artan Cu içeriğine (10-20-40 mg/kg) bağlı toksik etkilerini azalttığı belirlenmiştir. Bitki boyunda 40 mg/kg Cu ve 10 g/kg biyokömür uygulamasında maksimum uzunluk tespit edilmiştir. Bitki biyokütlesi açısından 20 mg/kg Cu ve 5 g/kg biyokömür içeren saksıların optimum değere ulaştığı belirlenmiştir. İlk hafta yapılan klorofil içeriklerinde önemli değişiklikler gözlenmezken, son hafta (hasat öncesi) yapılan klorofil içeriğinde maksimum artış %39 ile 20 mg/kg Cu derişimi ve 2,5 g/kg biyokömür uygulamasında görülmüştür. Biyokömür içeren saksılarda klorofil artış değerlerinin optimum olduğu gözlenmiştir. Bitkilerin kuru kütleleri Cu derişimlerinin bitki büyüme parametreleri sonuçlarını desteklediği belirlenmiştir. Bitkideki Cu derişiminin artan biyokömür içeriğine bağlı olarak azaldığı, dolayısı ile bitkiye Cu alımının engellendiği ve Cu toksisitesinin azaldığı belirlenmiştir. 40 mg/kg Cu derişiminde biyokömür kontrol uygulaması örneğinde maksimum bakır içeriği belirlenirken, minimum bakır içeriği 10 mg/kg Cu derişiminde (biyokömür kontrol uygulaması) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bitki biyokütlesi ve diğer büyüme parametreleri ile desteklenmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile palmye budama atıklarından 600 °C de yavaş piroliz yöntemi ile elde edilen biyokömürün adaçayı bitkisindeki Cu toksisitesini azalttığı, bakır ile kirlenmiş toprakta biyokömür uygulamasının bu çalışmada kullanılan bakır ve biyokömür miktarlarına göre değerlendirildiğinde bakır fitoremediasyonuna katkı sunmadığı, bakırın toprakta biyokömür tarafından absorblanmış olabileceği ve bu şekilde bitkiye alınmasını önlediği görülmüştür. Dolayısı ile fitoremediasyon çalışmalarında farklı biyokömür derişimi ve farklı bitkilerde yeni çalışmaların

yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda toprakta metal hareketliliği-stabilizasyonu açısından detaylı incelemelerin yapılma gerekliliğinin de olduğu belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

Akguc, N., Ozyigit, I., Yasar, U., Leblebici, Z., & Yarci, C. (2010). Use of *Pyracantha coccinea* Roem. as a possible biomonitor for the selected heavy metals. *International Journal of Environmental Science & Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 427-434.

Akgül G., (2017). Biyokömür: Üretimi ve Kullanım Alanları, S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Dergisi, Vol. 5, No. 4, pp. 485-499.

Alghamdi A.G., Aljohani B.H., Aly A.A. (2021). Impacts of olive waste-derived biochar on hydro-physical properties of sandy soil. *Sustainability*, Vol. 13, pp. 5493.

Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, pp. 1-14.

Alloway, B.J. (2013). Topraktaki ağır metallerin ve metaloidlerin kaynakları. Topraktaki ağır metaller: Topraktaki eser metaller ve metaloidler ve bunların biyoyararlanımı, pp. 11-50.

Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Artetxe, M., Barbarias, I., Arregi, A., Olazar, M., (2016). "Characterization of the Bio-Oil Obtained by Fast Pyrolysis of Sewage Sludge in a conical Spouted Bed Reactor", *Fuel Processing Technology*, Vol. 149, pp. 169–175.

Al-Wabel, M. I., Al-Omran, A., El-Naggar, A. H., Nadeem, M., & Usman, A. R. (2013). Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource technology*, Vol. 131, pp. 374-379.

Apaydın A. (2005). Sanayiden Kaynaklanan Toprak Kirliliğinin Araştırılması: Samsun-Tekkeköy Bölgesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, pp. 4-6.

Aslani, Z., Hassani, A., Mandoulakani, B. A., Barin, M., & Maleki, R. (2023). Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*). *Scientia Horticulturae*, Vol. 309, pp. 111610.

Aybar, M., Bilgin, A., & Sağlam, B. (2015). Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, Vol. 1, pp. 1-2, 59-65.

Aziz, A. (2020). “Biyokömürün Toprağın Biyolojik Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 132s. Antalya.

Baba, A., Gündüz, O., Save, D., Gürdal, G., Sülün, S., Bozcu, M., Özcan, H., Madencilik faaliyetlerinin tıbbi jeoloji açısından değerlendirilmesi, 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, (2009). pp. 514-515.

Babu, B. V., & Chaurasia, A. S. (2003). Modeling, simulation and estimation of optimum parameters in pyrolysis of biomass. *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 13, pp. 2135-2158.

Becidan M., Skreiberg Ø., ve Hustad J.E. (2007). NO_x and N₂O precursors (NH₃ and HCN) in pyrolysis of biomass residues. *Energy Fuels*, Vol. 21, pp. 1173–1180.

Behazin, E., Ogunsona, E., Rodriguez-Uribe, A., Mohanty, A. K., Misra, M., & Anyia, A. O. (2016). Mechanical, chemical, and physical properties of wood and perennial grass biochars for possible composite application. *BioResources*, Vol. 11, No. 1, pp. 1334-1348.

Bian, X., Cui, J., Tang, B., & Yang, L. (2018). Chelant-induced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils: a review. *Polish journal of environmental studies*, Vol. 27, No. 6, pp. 2417-2424.

Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 81, No. 4, pp. 687-711.

Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, Vol. 6, No. 9, pp. e04691.

Budak, M. S. (2017). Biyokütleden Hizli Piroлиз Yöntemi ile Biyoyakit Eldesi (Doctoral Dissertation, Sakarya Üniversitesi (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir.

Bushra, B., & Remya, N. (2020). Biochar from pyrolysis of rice husk biomass—characteristics, modification and environmental application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 1-12.

Buss, W., Mašek, O., Graham, M., & Wüst, D. (2015). Inherent organic compounds in biochar—their content, composition and potential toxic effects. *Journal of environmental management*, Vol. 156, pp. 150-157.

Büyüksırt, T. ve Kuleşan, H. (2014). Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ve gıda analizlerinde kullanımı. *Gıda*, Vol. 39, No. 4, pp. 235-241.

Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., Zeng, G. (2015). "Complementary Effects of Torrefaction and Co-Pelletization: Energy Consumption and Characteristics of Pellets", *Bioresource Technology*, Vol. 185, pp. 254–262

Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste management*, Vol. 34, No. 12, pp. 2466-2486.

Choi YK, ve Kan E. (2019). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of alfalfa-derived biochar for the adsorption of bisphenol A and sulfamethoxazole in water. *Chemosphere*, Vol. 218, pp. 741–748.

Clemens S., (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants, *Biochimie*, Vol. 88, No. 11, pp. 1707-1719.

Çağlarırnak N, Hepçimen AZ. Ağır metal toprak kirliliğinin gıda zinciri ve insan sağlığına etkisi. *Akademik Gıda Dergisi*, Vol. (2010). No. 8. Pp. 31-35.

Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy conversion and Management*, Vol. 42, No. 11, pp. 1357-1378.

Demirbaş, A., and G. Arin. 2002. An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources, Energy Technology Network*. (2010). *Biomass for Heat and Power*, Vol. 24, pp. 471–482.

Donahue, R. L., Miller, R. W., & Shickluna, J. C. (1977). *Soils: an introduction to soils and plant growth*. Prentice-Hall Inc.

Duffus, J. H. (2002). " Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and applied chemistry*, Vol. 74, No. 5, pp. 793-807.

Dunand VF, Epron D, Sossé AB, Badot PM. (2002). Effects of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. *Plant Science*, Vol., No. 163, pp. 53-58.

Edelstein, M., & Ben-Hur, M. (2018). Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, Vol. 234, pp. 431-444.

Favas, P. J., Pratas, J., Varun, M., D'Souza, R., & Paul, M. S. (2014). Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora. *Environmental risk assessment of soil contamination*, Vol. 3, pp. 485-516.

Eleryan, A., Aigbe, U. O., Ukhurebor, K. E., Onyancha, R. B., Eldeeb, T. M., El-Nemr, M. A., ... & El Nemr, A. (2022). Copper (II) ion removal by chemically and physically modified sawdust biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 1-38.

Garcia, B., Alves, O., Rijo, B., Lourinho, G., & Nobre, C. (2022). Biochar: production, applications, and market prospects in Portugal. *Environments*, Vol. 9, No. 8, pp. 95.

Gayathri, R., Gopinath, KP ve Kumar, PS (2021). Tarımsal atık biochar kullanılarak su ortamından toksik metallerin adsorptif olarak ayrılması: Endüstriyel atık suyun galvanik kaplanmasında uygulama. *Kimyasfer*, Vol. 262, pp. 128031.

Gedik, H. (2022). Fitoremediasyon yöntemi ile bakır birikiminin giderimi: Soğan (*Allium cepa* L.) örneği (Master's thesis, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi).

Ghorbani, A., & Esmailizadeh, M. (2017). Pharmacological properties of *Salvia officinalis* and its components. *Journal of traditional and complementary medicine*, Vol. 7, No. 4, pp. 433-440.

Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S. (2014). "Biochar Organic Fertilizers from Natural Resources as Substitute for Mineral Fertilizers", *Agron. Sustain. Dev.* Vol. 35, pp. 667–678.

Han, C.; Chen, F.; Lian, C.; Liang, R.; Liang, W.; Chen, M.; Luo, A.; Gao, T. (2020). Development of preparation method and application of biochar. *Int J Emerg Technol Adv Eng*, Vol. 10, pp. 6–132.

Hemavathy, RV, Kumar, PS, Kanmani, K. ve Jahnavi, N. (2020). Cu (II) iyonlarının termal/kimyasal olarak işlenmiş *Cassia fistul* bazlı biochar kullanılarak sulu ortamdan adsorptif olarak ayrılması. *Temiz üretim dergisi*, Vol. 249, pp. 119390.

Hocaoglu-Ozyigit, A., & Genc, B. N. (2020). Cadmium in plants, humans and the environment. *Frontiers in Life Sciences and Related Technologies*, Vol.1, No. 1, pp. 12-21.

Hossain, M. A., Piyatida, P., da Silva, J. A. T., & Fujita, M. (2012). Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *Journal of Botany*, 2012.

Huang, L.; Gu, M. (2019). Effects of Biochar on Pot Surface Properties and Plant Growth- A Review garden plants, Vol. 5, pp. 14

Hunt, J.; DuPont, M.; Sato, D.; Kawabata, A. (2010). The basics of biochar: a natural soil amendment. *Soil and Crop Manag*, pp. 1–6

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). Issues related to mitigation in the long term context. In Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., & Meyer, L. A. (Eds.). *Climate Change 2007: Mitigation*. Cambridge University Press, Cambridge

Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Lentz, R. D. (2016). "Designer, Acidic Biochar Influences Calcareous Soil Characteristics", *Chemosphere*, Vol. 142, pp.184–191.

Jabeen, R., Ahmad, A., & Iqbal, M. (2009). Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms. *The Botanical Review*, Vol. 75, pp. 339-364.

Gabhane, J. W., Bhange, V. P., Patil, P. D., Bankar, S. T., & Kumar, S. (2020). Recent trends in biochar production methods and its application as a soil health conditioner: a review. *SN Applied Sciences*, Vol. 2, pp. 1-21.

Jayakumar K, Jaleel CA, Vijayarengan P. (2007). Changes in growth, biochemical constituents, and antioxidant potentials in radish (*Raphanus sativus* L.) under cobalt stress. *Turkish Journal of Biology*. Vol. 31, No. 3, pp. 127–136.

Jeffery, S., Verheijen, F. G., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, Vol. 144, No. 1, pp. 175-187.

Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. A., & Sonoki, T. (2014). Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*, Vol. 11, No. 23, pp. 6613-6621.

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2011). *Trace elements in soils and plants*, Florida: CRC. Boca Raton, pp. 37-45.

Kabata-Pendias A., Dudka, S., (1991). Trace Metal Contents Of *Taraxacum Officinale* (Dandelion) As A Convenient Environmental Indicator. *Environ. Geochem. And Health*, Vol. 13, No. 2, pp. 108-113.

Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (1991). Trace Elements In Soils And Plants. 2nd Edn. CRC Press, Boca Ratón, FL

Karadayı, T. T., & Coşgun, N. (2021). Betonun yaşam döngüsü sürecinde çevresel etkilerini azaltan yaklaşımlar. *Sürdürülebilir Çevre Dergisi*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-6.

Karahan, F., Ozyigit, I. I., Saracoglu, I. A., Yalcin, I. E., Ozyigit, A. H., & Ilcim, A. (2020). Heavy metal levels and mineral nutrient status in different parts of various medicinal plants collected from eastern Mediterranean region of Turkey. *Biological Trace Element Research*, Vol. 197, No. 1, pp. 316-329.

Karaman F. C. (2019). Palmiye Ağacı Budama Atıklarından Plastik Kompozit Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi.

Karami, N., Clemente, R., Moreno-Jiménez, E., Lepp, N. W., & Beesley, L. (2011). Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *Journal of hazardous materials*, Vol. 191, pp. 1-3, 41-48.

Kim, H. S., Kim, K. R., Kim, H. J., Yoon, J. H., Yang, J. E., Ok, Y. S., ... & Kim, K. H. (2015). Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in agricultural soil. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 74, pp. 1249-1259.

Kim, K. H., Kim, J. Y., Cho, T. S., & Choi, J. W. (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource technology*, Vol. 118, pp. 158-162.

Kul, C., Zhang, L. ve Solangi, YA (2020). Türkiye'de sürdürülebilir kalkınma için yenilenebilir enerji yatırım risk faktörlerinin değerlendirilmesi. *Temiz Üretim Dergisi*, 276 , 124164.

Lasat M.M., (2000). Phytoextraction of metals from contaminated soil: A review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues, *Journal of Hazardous substance Research*, Vol. 2, No. 5, pp. 1-25.

Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., & Han, W. (2019). A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, Vol. 28, No. 4, pp. 380-394.

Liang, B., Lehmann, L., Sohi, S.P., Thies, J.E., O'Neil, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E. and Luizao, F.J. (2010). Black carbon affects the cycling on non-black carbon in soil, *Org. Geochem.*, Vol. 41, pp. 206-213.

Liu, J., Zhu, Y., Li, Z., Zeng, X., Guan, Q., Hu, J., ... & Peng, C. (2019). Effects of applying lychee biochar on the absorption, accumulation of lead, cadmium and arsenic in sunflower plants in heavy metal contaminated soil. *Journal of Ecology and Rural Environment*, Vol. 35, No. 12, pp. 1610-1616.

Liu L, Li W, Song W, Guo M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability. *Science of the Total Environment*, Vol., No. 633, pp. 206-219.

Liu, Q., Zhou, Y., Lu, J., & Zhou, Y. (2020a). Novel cyclodextrin-based adsorbents for removing pollutants from wastewater: A critical review. *Chemosphere*, Vol. 241, pp. 125043.

Liu, Z. and Zhang, F.S. (2009). Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass, *J. Hazard. Mater*, Vol. 167, pp. 933-939.

Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C.A., Gonnermann, H. M. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *Plos One*, Vol. 12, No. 6, pp. e0179079.

Liu, Z., Chen, B., Wang, L. A., Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020b). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 400, pp. 123138.

Madari, B. E., Silva, M. A., Carvalho, M. T., Maia, A. H., Petter, F. A., Santos, J. L., ... & Zeviani, W. M. (2017). Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment. *Geoderma*, Vol. 305, pp. 100-112.

Magioglou, E., Frontistis, Z., Vakros, J., Manariotis, I. D., Mantzavinos, D. (2019). "Activation of persulfate by biochars from valorized olive stones for the degradation of sulfamethoxazole." *Catalysts*, Vol. 9, pp. 419. doi:10.3390/catal9050419.

Mahamane. G. M. (2020). Biochar'ın Toprak Verimlilik Özellikleri ile Marul Gelişimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi.

Manios, T., Stentiford, E.I., Millner, P.A., (2003). The effect of heavy metals accumulation on the chlorophyll concentration of *Typha Latifolia* L. plants, growing in a substrate containing sewage

sludge compost and watered with metaliferus water. *Ecological Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp: 65-74,

Manyà, J. J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental science & technology*, Vol. 46, No. 15, pp. 7939-7954.

McGrath, S.P., Smith, S., (1990). Chromium And Nickel In Heavy Metals In Soils. In B.J. Alloway (Ed.), Blackie, Glasgow, pp.125

Medyńska-Juraszek, A., Cwielağ-Piasecka, I., Jerzykiewicz, M., & Trynda, J. (2020). Wheat straw biochar as a specific sorbent of cobalt in soil. *Materials*, Vol. 13, No. 11, pp. 2462.

Mengoni, A., Gonnelli, C., Galardi, F., Gabbrielli, R., & Bazzicalupo, M. (2000). Genetic diversity and heavy metal tolerance in populations of *Silene paradoxa* L.(Caryophyllaceae): a random amplified polymorphic DNA analysis. *Molecular ecology*, Vol. 9, No. 9, pp. 1319-1324.

Mishra, S., Bharagava, R. N., More, N., Yadav, A., Zainith, S., Mani, S., & Chowdhary, P. (2019). Heavy metal contamination: an alarming threat to environment and human health. In *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future* (pp. 103-125). Springer, Singapore.

Mohammed, F.M., Roberts, E.P., Hill, A., Campen, A.K. and Brown, N.W. (2011). Continuous water treatment by adsorption and electrochemical regeneration, *Water Res.*, Vol. 45, pp. 3065-3074.

Mohanpuria P, Rana NK, Yadav SK. (2007). Cadmium induced oxidative stres influence on glutathione metabolic genes of *Camellia sinensis* (L.). *Environmental Toxicology*; Vol. 22, pp. 368-374.

Mohsenzadeh F and Mohammadzadeh R (2018). Phytoremediation ability of the new heavy metal accumulator plants. *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. 24, No, 4, pp. 441-450.

Mohsin M, Kaipainen E, Villa A, Kuittinen S, Pulkkinen P and Pappinen A (2019). Biomass growth variation and phytoextraction potential of four *Salix* varieties grown in contaminated soil amended with lime and wood ash. *International journal of phytoremediation*, Vol. 21, No. 13, pp. 1329-1340.

Muchuweti, M., Birkett, J. W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M. D., & Lester, J. N. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in

Zimbabwe: implications for human health. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 112, No. 1, pp. 41-48.

Mudgal, V., Raninga, M., Patel, D., Ankoliya, D., & Mudgal, A. (2023). A review on Phytoremediation: Sustainable method for removal of heavy metals. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 77, pp. 201-208.

Muradoglu, F., Gundogdu, M., Ercisli, S., Encu, T., Balta, F., Jaafar, H. Z., & Zia-Ul-Haq, M. (2015). Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b content, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry. *Biological Research*, Vol. 48, pp. 1-7

Nassouhi, D., Ergönül, M. B., Fikirdeşici, Ş., Karacakaya, P., & Atasağun, S. (2018). Ağır metal kirliliğinin biyoremediasyonunda sucul makrofitlerin kullanımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, Vol. 14, No. 2, pp. 148-165.

Omondi MO, Xia X, Nahayo A, Liu X, Korai PK, Pan G, (2016). Quantification of Biochar Effects on Soil Hydrological Properties using Meta-Analysis of Data. *Geoderma*, Vol. 274, pp. 28–34

Osma, E., Ozyigit, I. I., Demir, G., & Yasar, U. (2014). Assessment of some heavy metals in wild type and cultivated purslane (*Portulaca oleracea* L.) and soils in Istanbul, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 23, No. 9, pp. 2181-2189.

Osma, E., Ozyigit, I. I., Leblebici, Z., Demir, G., & Serin, M. (2012). Determination of heavy metal concentrations in tomato (*Lycopersicon esculentum* Miller) grown in different station types. *Romanian Biotechnological Letters*, 17(1), 6963.

Özyiğit, II, Can, H. ve Doğan, I. (2021). Metalleri uzaklaştırmak için genetiği değiştirilmiş bitkileri kullanan fitoremediasyon: bir inceleme. *Çevre Kimyası Mektupları*, 19 (1), 669-698.

Ozyigit, I. I., Can, H., & Dogan, I. (2021a). “Phytoremediation using genetically engineered plants to remove metals: a review.” *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 19, No. 1, pp. 669-698.

Ozyigit, I. I., Yalcin, B., Turan, S., Saracoglu, I. A., Karadeniz, S., Yalcin, I. E., & Demir, G. (2018). “Investigation of heavy metal level and mineral nutrient status in widely used medicinal plants’ leaves in Turkey Insights into health implications.” *Biological Trace Element Research*, Vol. 182, No. 2, pp. 387-406.

Özbek, H., Kaya, Z., Gök, M. ve Kaptan, H. (1994). Toprak Bilimi. Ç.Ü. Ziraat Fak. Ders Kitapları Vol. 73, Ders Kitapları Yayın No: A16, Adana, pp. 816.

Özdemir M., Ekolojik İlkelere Göre Sürdürülebilir Toprak Yönetimi, Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Konya, (2013)

Özyurtkan, M. H. (2006). Melez kavağın karbonizasyonu (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).

Pandey, J., Verma, R. K., & Singh, S. (2019). "Suitability of aromatic plants for phytoremediation of heavy metal contaminated areas: a review." International journal of phytoremediation, Vol. 21, No. 5, pp. 405-418.

Park, J. H., Choppala, G. K., Bolan, N. S., Chung, J. W., & Chuasavathi, T. (2011). "Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals." Plant and soil, Vol. 348, pp. 439-451.

Regmi, P., Moscoso, J.L.G., Kumar, S., Cao, X., Mao, J. and Schafran, G. (2012). "Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process." J. Environ. Manage., Vol. 109, pp. 61-69.

Salmani, M. S., Khorsandi, F., Yasrebi, J., & Karimian, N. (2014). "Biochar effects on copper availability and uptake by sunflower in a copper contaminated calcareous soil." International journal of plant, Animal and Environmental Sciences, Vol. 4, No. 3, pp. 389-394.

Sanchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., Roig, A., Jindo, K., Mondini, C., & Bolan, N. J. B. T. (2018). "Role of biochar as an additive in organic waste composting." Bioresource Technology, Vol. 247, pp. 1155-1164.

Seven, T., Darende, B. N., & Sevda, O. C. A. K. (2018). "Hava ve toprakta ağır metal kirliliği." Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, Vol. 1, No. 2, pp. 91-103.

Sevilir, B. (2019). Çeşitli organik atıklardan elde edilen biyokömür ve hidrokömürlerin mısır bitkisi yetiştirilen sera koşullarında toprak bakteriyel çeşitliliği üzerindeki etkilerinin belirlenmesi.

Shaaban, M., Van Zwieten, L., Bashir, S., Younas, A., Núñez-Delgado, A., Chhajro, M. A., ... & Hu, R. (2018). "A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution." Journal of environmental management, Vol. 228, pp. 429-440.

Shafizadeh, F. (1985) Pyrolytic Reactions and Products of Biomass, in: R.P. Overend, T.A. Milne, L.K. Mudge (Eds.), *Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion*, Elsevier, London, pp. 183-217.

Shehata, M. H., & Thomas, M. D. (2006). "Alkali release characteristics of blended cements." *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 6, pp. 1166-1175.

Shen, X., Dai, M., Yang, J., Sun, L., Tan, X., Peng, C., ... & Naz, I. (2022). "A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges." *Chemosphere*, Vol. 291, No. 132979.

Sheng, Y., & Zhu, L. (2018). "Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH." *Science of the Total Environment*, Vol. 622, pp. 1391-1399.

Sönmez S, Kaplan M, Sönmez NK, Kaya H, Uz İ. (2006). High level of copper application to soil and leaves reduce the growth and yield of tomato plants. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*; Vol. 63 No. 3 pp.213-218.

Strehler, A. ve Stuetzle, W. (1987). "Biomass reduce. DO Hall'da (Ed.), *Biomass*" pp 75-97. New York, NY: Wiley.

Sönmez, B., "Türkiye Topraklarının Bazı Verimlilik ve Organik Karbon (Tok) İçeriğinin Coğrafi Veritabanının Oluşturulması" T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018, TAGEM/TSKAD/11/A13/P03

Sümer, S. K., Kavdir, Y., & Çiçek, G. (2016). "Türkiye'de tarımsal ve hayvansal atıklardan biyokömür üretim potansiyelinin belirlenmesi." *Tarım ve Doga Dergisi*, Vol. 19, No. 4, pp. 379.

Şahin, Ö. (2009). "Farklı Asma Anaçları Üzerine Aşılı Sultani Çekirdeksiz (*Vitis vinifera* L.) Üzüm Çeşidinin Bor ve Tuz Stresine Tolerans Mekanizmalarının Stresle İlgili Fizyolojik Parametreler ve Antioksidan Enzimlerle Belirlenmesi." Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 161s, Ankara.

Tan X., Liu Y., Zeng G. Wang X., Hu X., Gu Y., ve Yang Z. (2015). "Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions." *Chemosphere*, Vol. 125, pp. 70–85.

Tan, H. W., Pang, Y. L., Lim, S., & Chong, W. C. (2023). "A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery." *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 30, pp. 103043.

Traunfeld, J. H., & Clement, D. L. (2001). "Lead in Garden Soils. Home and Garden." Maryland Cooperative Extension, University of Maryland, pp. 333-336.

Tsai, W. T., Mi, H. H., Chang, Y. M., Yang, S. Y., & Chang, J. H. (2007). "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bio-crudes from induction-heating pyrolysis of biomass wastes." *Bioresource technology*, Vol. 98, No. 5, pp. 1133-1137.

Tong, X., Li, J., Yuan, J. and Xu, R. (2011). "Adsorption of Cu (II) by biochars generated from three crop straws." *Chem. Eng. J.*, Vol. 172, pp. 828-834.

Tunc T, Sahin U. The changes in the physical and hydraulic properties of a loamy soil under irrigation with simpler-reclaimed wastewaters. *Agricultural Water Management*. (2015) Vol. 158 pp. 213-224.

Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, On Birinci Kalkınma Planı, 2019-2023, (2019) 6 Haziran 2023 tarihinde https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/On_Birinci_Kalkinma_Plani-2019-2023.pdf adresinden erişildi.

Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevre Durum Raporu, (2022). 6 Haziran 2023 tarihinde <https://ced.csb.gov.tr/2022-yili-il-cevre-durum-raporlari-i-109391> adresinden erişildi.

Türkiye Cumhuriyeti İklim Değişikliği ve Şehircilik Dairei Başkanlığı *Evsel Katı Atık Tarifelerinin Belirlenmesine Yönelik Kılavuz* Öztürk M., (2018).

Türkiye Topraklarının Bazı Verimlilik Ve Organik Karbon (Tok) İçeriğinin Coğrafi Veri tabanının Oluşturulması Proje Sonuç Raporu,(2018). 12 Haziran 2023 tarihinde <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/toprakgubre/Belgeler/2018> adresinden erişilmiştir.

Uzun, B. B., M. Kılıç, N. Özbay, A. E. Pütün, and E. Pütün. (2012). "Biodiesel production from waste frying oils: Optimization of reaction parameters and determination of fuel properties." *Energy* Vol. 44 pp. 347–351.

Üçgül, İ., ve Akgül, G., (2010). *Biyokütle teknolojisi*, Yekarum Dergi, Vol. 1, No. 1, pp. 3-11.

Üstündağ, Ö. (2022). Biyokömürün biyogaz tesisi atıksularının arıtımında adsorban özelliğinin ve tarımda kullanım olanaklarının araştırılması.

Xu, D., Zhao, Y., Sun, K., Gao, B., Wang, Z., Jin, J., ... & Wu, F. (2014). Cadmium adsorption on plant-and manure-derived biochar and biochar-amended sandy soils: impact of bulk and surface properties. *Chemosphere*, Vol. 111 , pp. 320-326.

Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 290, pp. 111197.

Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). "A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy." *Biotechnology Reports*, Vol. 28, No. e00570.

Yang S, Liang S, Yi L, Xu B, Cao J, Guo Y and Zhou Y (2014). "Heavy metal accumulation and phytostabilization potential of dominant plant species growing on manganese mine tailings." *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 394-404.

Yao, H., Xu, J., & Huang, C. (2003). "Substrate utilization pattern, biomass and activity of microbial communities in a sequence of heavy metal-polluted paddy soils." *Geoderma*, Vol.115(1-2), pp. 139-148.32.

Yerli, C., Çakmakçı, T., Sahin, U., & Tüfenkçi, Ş. (2020). "Ağır Metallerin Toprak, Bitki, Su ve İnsan Sağlığına Etkileri." *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, Vol. 9, pp.103-114.

Yıldız M, Terzi H, Uruşak B. (2011). "Bitkilerde krom toksisitesi ve hücrel cevaplar." *Erciyes Üni. Fen Bilimleri Ens. Fen B. Dergisi.*; Vol. 27, No. 2 pp.163-176.

Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2011). "The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource technology*, 102(3), 3488-3497. IEA, "Bioenergy, A Sustainable and Reliable Energy Source: A Review of Status and Prospects", IEA Bioenergy ExCo:2099:5, pp. 3.

Zhai X, Li Z, Huang B, Luo N, Huang M, Zhang Q and Zeng G (2018). "Remediation of multiple heavy metalcontaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization." *Science of the Total Environment*, Vol. 635: pp. 92-99

Zhang, J., Huang, B., Chen, L., Du, J., Li, W., Luo, Z. (2017). "Pyrolysis kinetics of hullless barley straw using the distributed activation energy model (DAEM) by the TG/DTA technique and SEM/XRD characterizations for hullless barley straw derived biochar." *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 35, No. 03, pp. 1039-1050.

Zheljazkov, V.D., Nielsen, N. E. (1993). Studies On The Effect Of Heavy Metals (Cd, Pb, Cu, Mn, Zn And Fe) Upon The Growth, Productivity And Quality Of Lavander (*Lavandula Vera D. C.*) Production. A Paper Presented At The 24 th International Symposium On Essential Oils, July 20-23, Berlin.J. Essential Oil Res.

Zheljazkov, V.D., Nielsen, N. E. (1996). Effect Of Heavy Metals On Peppermint And Cornmint. *Plant And Soil*. Vol. 178: pp. 59-66,1996.

Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). "Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China". *Environmental pollution*, Vol. 252, pp. 846-855.