



**ERZURUM İLİ KENTSEL ATIKSU ARITMA
ÇAMURUNUN BAZI AĞAÇ TÜRLERİNİN GELİŞİMİ
ÜZERİNE ETKİLERİ VE BU TÜRLERİN ARITMA
ÇAMURLARINA KARŞI TOLERANS SINIRLARININ
BELİRLENMESİ**

Damla MUSTAFAOĞLU

Doktora Tezi

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM İLİ KENTSEL ATIKSU ARITMA ÇAMURUNUN BAZI AĞAÇ
TÜRLERİNİN GELİŞİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ VE BU TÜRLERİN ARITMA
ÇAMURLARINA KARŞI TOLERANS SINIRLARININ BELİRLENMESİ**

(The Effect of Digested Sludge Taken From Erzurum Domestic Wastewater Treatment Plant
on The Growth of Some Tree Species and Determination of Tolerance Limit of These Tree
Species Against Digested Sludge)

DOKTORA TEZİ

Damla MUSTAFAOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

Erzurum
Ocak, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Damla MUSTAFAOĞLU tarafından hazırlanan “Erzurum İli Kentsel Atıksu Arıtma Çamurunun Bazı Ağaç Türlerinin Gelişimi Üzerine Etkileri ve Bu Türlerin Arıtma Çamurlarına Karşı Tolerans Sınırlarının Belirlenmesi” başlıklı çalışması 23/ 01/ 2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çevre Bilimleri Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Handan UCUN ÖZEL <i>Bartın Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Zeynep CEYLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Alper NUHOĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Nalan DEMİRCİOĞLU YILDIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Hilal SURAT <i>Artvin Çoruh Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2022-11128

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Zeynep CEYLAN danışmanlığında sunulan “Erzurum İli Kentsel Atıksu Arıtma Çamurunun Bazı Ağaç Türlerinin Gelişimi Üzerine Etkileri ve Bu Türlerin Arıtma Çamurlarına Karşı Tolerans Sınırlarının Belirlenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	11	30
Kuramsal Temeller	14	30
Materyal ve Yöntem	20	35
Bulgular	3	20
Tartışma	9	20
Tezin Geneli	11	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)
Damla MUSTAFAOĞLU
31.1.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Zeynep CEYLAN
31.1.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☒ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince danışmanlığımı üstlenen, çalışmalarına öncü olan ve karşılaştığım problemlerin çözümünde her zaman yanımda olan ve beni her konuda cesaretlendiren değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Zeynep CEYLAN'a ve tez izleme kurulundaki değerli hocalarım Prof. Dr. Alper NUHOĞLU'na ve Doç. Dr. Nalan DEMİRCİOĞLU YILDIZ'a destekleri için çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sürecinde ilgi ve desteğini gördüğüm, bilgi ve birikimlerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Ökkeş ATICI'ya ve laboratuvar çalışmalarım bana yardımcı olan Dr. Deniz TİRYAKİ'ye teşekkür ederim.

FDK-2022-11128 numaralı projeyle, çalışmama maddi destek sağlayan BAP'a ve 100/2000 burs programına dahil olduğum YÖK'e teşekkür ederim.

Meşakkatli doktora tez sürecim boyunca her zaman yanımda olan kıymetli aileme, deneylerimde, çalışmalarımda yardımcı olan, yükümü paylaşan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen hayat arkadaşım ve sevgili eşim Selçuk MUSTAFAOĞLU'na ve hayata karşı duruşumla, her zaman çalışarak örnek olmaya çalıştığım, hayatımın en değerlileri, canım evlatlarım Kerem MUSTAFAOĞLU ve Nilsu Beren MUSTAFAOĞLU'na bu süreçte bana anlayış gösterdikleri için teşekkür ederim.

Damla MUSTAFAOĞLU

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ERZURUM İLİ KENTSEL ATIKSU ARITMA ÇAMURUNUN BAZI AĞAÇ TÜRLERİNİN GELİŞİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ VE BU TÜRLERİN ARITMA ÇAMURLARINA KARŞI TOLERANS SINIRLARININ BELİRLENMESİ

Damla MUSTAFAOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

Amaç: Çalışmamızın amacı; Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (EBAAT)'nin, biyolojik arıtma ünitesinin atığı olarak yüksek miktarlarda biriken ve ıslah edilmesi gereken biyolojik çamurun (EBIWAS), Erzurum iklim ve toprak şartlarına uygun odunsu bitkilerin; *Betula Pendula* Roth. (huş ağacı), *Ulmus Glabra* Huds. (karaağaç), *Pinus Sylvestris* L. (sarıçam)'ın yetiştirme ortamlarına ve gelişimlerine sağlayacakları katkılarının belirlenmesi suretiyle hem atığın değerli bir ürüne dönüştürülmesi hem de seçilen bitkilerin atık çamurun içeriğinde var olan ağır metallerle karşı gösterdiği tolerans sınırlarının araştırılmasıdır. Araştırmamızda atık çamurun yüksek organik madde içeriği sayesinde sağlayacağı gübre değeri aynı zamanda barındırdığı zararlı kimyasallar ve ağır metallerin farklı atık çamur dozlarında, seçilen bitkilere vereceği zararlar karşılaştırılmalı olarak kar-zarar çerçevesinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışmamız; etüt (kullanılacak toprağın, atık çamurun, bitkilerin belirlenmesi) veri toplama, bitki yetiştirme, analiz ve sonuçların değerlendirilmesi olmak üzere beş temel aşamadan oluşmaktadır. Atık çamur numuneleri ve etüt edilen toprak numunesi farklı oranlarda karıştırılarak (%0-kontrol, %25,%50, %75, %100) Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Seralarında, sabit şartlar altında (gündüz-gece 20-25°C sıcaklıkta ve %25-%30 nem değerleri altında otomasyona bağlı standart koşullar) saksı ortamında (18L) bitkiler (huş, karaağaç, sarıçam) için yaşam alanları oluşturulmuştur. Bitkiler optimal gövde büyüklüğü ve yeşil yaprak sayısına ulaşana dek ve atık çamura gösterdiği maksimum tolerans süresi dikkate alınarak 6 aylık süre sonunda bitkilerin sökümü yapılmış ve kök, gövde, yaprak kısımları ayrıştırılmıştır. Köklerde ve gövdelerde; fiziksel, ağır metal ve nutrient analizleri, yapraklarda ise ağır metal ve nutrient analizlerinin yanı sıra önemli fizyolojik parametreler detaylı olarak incelenmiştir.

Bulgular: Deneylerde elde edilen bulguları 3 ana başlık altında toparlayacak olursak; ilki fizyolojik (yaprakların yaş ve kuru ağırlıkları, klorofil, LPO seviyesi MDA olarak, total karbonhidrat, fenolik madde, ROS (hidrojen peroksit, süperoksit anyonu), çözünebilir protein, anti oksidan enzimler (CAT, APX, SOD, GST) parametre bulguları, ikincisi ağır metal (Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd) bulguları ve son olarak da nutrient madde (organik karbon, toplam azot, magnezyum, fosfor ve potasyum) içeriğine ait bulgulardır. Seçilen deneme bitkileri huş, karaağaç ve sarıçam sıralamasına göre sadece yapraklarda yapılan tüm fizyolojik analiz sonuçları: yaş ve kuru ağırlık analiz sonucu, kontrole göre %50'lik atık çamur dozuna kadar artış, %75 ve %100 atık çamur dozlarında azalış göstermiştir. Klorofil miktarları kontrole kıyasla %75'lik atık çamur dozuna kadar herhangi bir değişiklik göstermezken bu dozun üzerinde azalma seyrindedir. LPO seviyeleri kontrole kıyasla %50 atık çamur dozuna kadar azalış gösterirken %75 ve %100 atık çamur dozlarında artış göstermiştir. Total karbonhidrat miktarları ise kontrole kıyasla artan atık çamur dozlarına paralel olarak artış göstermiştir. Fenolik madde miktarları kontrole kıyasla artan atık çamur dozlarına paralel olarak azalış göstermiştir. Önemli reaktif oksijen türü olan ROS'lardan hidrojenperoksit (H₂O₂) ve süperoksit anyon (O₂⁻) içeriği kontrole kıyasla; %50 doz uygulamalarına kadar azalış %75 ve %100 dozlarında artış göstermiştir. Ancak burada istisnai bir durum olarak süperoksit anyonu sadece huş ağacı için atık çamur dozlarına karşın kayda değer bir değişiklik göstermediği belirlenmiştir. Çözünebilir protein seviyeleri ise kontrole kıyasla %50 atık çamur dozuna kadar artış meylindeyken %75 ten itibaren sabitleşme eğilimine girmiştir. Önemli antioksidan enzimlerden CAT, APX, SOD, GST enzim aktiviteleri kontrole kıyasla %50 atık çamur dozlarına kadar artış meylinde iken %75'ten itibaren azalma göstermiştir. Aynı sıralamaya göre (huş, karaağaç, sarıçam) deneme türlerinin ağır metallerle (Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd) ait analiz sonuçlarına göre; atık çamurun içerisinde bulunan ağır metalleri, genellikle artan uygulama dozlarıyla paralel olarak bünyelerine almışlardır. Fakat kontrole kıyasla %25 ve %50 atık çamur uygulama dozlarına kadar yükseliş ve %75 doz uygulaması ve sonrasında azalma eğilimine girmiş metal alımı sabit bir seyir göstermiştir. Bitkinin temel besin maddeleri (organik karbon, toplam azot, magnezyum, fosfor ve

potasyum) alımı %50 atık çamur oranına kadar artış gösterirken daha yüksek dozlarda azalarak sabitleşmiştir.

Sonuç: Fizyolojik analiz sonuçlarına göre; genel olarak üç bitki türünde de %25-%50 dozluk bir EBIWAS uygulamasının peyzaj alanlarında bitkilerin büyümesini ve gelişimini desteklemede kullanma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Her üç bitkide de atık çamurun düşük dozları hem antioksidan parametreleri hem de fizyolojik parametreleri kontrole göre genelde olumlu yönde etkilemiştir. Ağaçların ağır metalleri bünyelerine alımı genel olarak metallerin atık çamur içerisindeki miktarı ile paralel bir seyirdedir. Fakat çamur içeriğindeki demir miktarının, alüminyum miktarından oldukça fazla olmasına rağmen bitkinin bünyesine daha az alınması ilgi çekicidir. Diğer taraftan arıtma çamurunun içeriğinde var olan temel besin maddelerinin her üç bitkiye de önemli derecede gübre katkısı sunduğu belirlenmiştir. Ancak %50 atık çamur uygulamasından sonra bitkilerde temel besin maddelerinin alımında sabit bir seyir gözlenmektedir. Bu durum; arıtma çamurunun içeriğindeki ağır metallerin bitkinin besin alımına negatif anlamda etki ettiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Atık çamur, *Betula Pendula* Roth. *Ulmus Glabra* Huds, *Pinus Sylvestris*. L.

Ocak 2024, 154 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL THESIS

THE EFFECT OF DIGESTED SLUDGE TAKEN FROM ERZURUM DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANT ON THE GROWTH OF SOME TREE SPECIES AND DETERMINATION OF TOLERANCE LIMIT OF THESE TREE SPECIES AGAINST DIGESTED SLUDGE

Damla MUSTAFAOĞLU

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

Purpose: The aim of our study is to transform the biological sludge (EBIWAS) of Erzurum Biological Wastewater Treatment Plant (EBAAT), which accumulates in high quantities as the waste of the biological treatment unit and needs to be treated, into a valuable product by determining the contributions to the growing environment and development of woody plants (*Betula Pendula* Roth. (birch), *Ulmus Glabra* Huds. (elm), *Pinus Sylvestris* L. (scotch pine)); suitable for Erzurum climate and soil conditions, and to investigate the tolerance limits of the selected plants against heavy metals contained in the waste sludge. In our study, it was aimed to evaluate the fertilizer value of waste sludge thanks to its high organic matter content, as well as the damages of harmful chemicals and heavy metals to the selected plants at different waste sludge doses comparatively within the framework of profit and loss.

Method: Our study consisted of five main stages: etude (determination of the soil, sludge, and plants to be used), data collection, plant cultivation, analysis, and evaluation of the results. The waste sludge samples and the studied soil sample were mixed in different ratios (0%-control, 25%, 25%, 50%, 75%, 100%) and habitats were created for plants (birch, elm, yellow pine) under constant conditions (day-night at 20-25°C temperature and 25%-30% humidity values under automated standard conditions) in a potted environment (18L), in Atatürk University Faculty of Agriculture Greenhouses. When the plants reached the optimum stem size and number of green leaves and after a period of 6 months, taking into account the maximum tolerance period to the sludge, the plants were uprooted and the root, stem and leaf parts were separated. Roots and stems were subjected to physical, heavy metal and nutrient analyses and leaves were subjected to heavy metal and nutrient analyses as well as important physiological parameters.

Findings: The findings obtained in the experiments can be summarised under 3 main headings; Firstly, physiological (wet and dry weights of leaves, chlorophyll, LPO level as MDA, total carbohydrate, phenolic matter, ROS (hydrogen peroxide, superoxide anion), soluble protein, anti oxidant enzymes (CAT, APX, SOD, GST) parameters, secondly, heavy metals (Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd) and finally nutrient (organic carbon, total nitrogen, magnesium, phosphorus and potassium) contents. The results of all physiological analyses performed only on the leaves of the selected experimental plants in the order of birch, elm and yellow pine: the results of wet and dry weight analysis showed an increase up to 50% sludge dose and a decrease at 75% and 100% sludge doses compared to the control. Chlorophyll levels did not show any change compared to the control up to 75% sludge dose but decreased above this dose. Compared to the control, LPO levels decreased up to 50% sludge dose and increased at 75% and 100% sludge doses. Total carbohydrate amounts increased in parallel with increasing sludge doses compared to the control. The amount of phenolic substances decreased in parallel with increasing sludge doses compared to the control. Hydrogen peroxide (H_2O_2) and superoxide anion (O_2^-) contents of ROS, which are important reactive oxygen species, decreased until 50% dose applications and increased at 75% and 100% doses compared to the control. However, as an exceptional case here, superoxide anion did not show a significant change against sludge doses only for birch. Soluble protein levels, on the other hand, tended to increase up to 50% sludge dose compared to the control, while it tended to stabilise after 75%. CAT, APX, SOD, GST enzyme activities, which are important antioxidant enzymes, tended to increase up to 50% sludge doses compared to the control, but decreased after 75%. According to the results of the analyses of heavy metals (Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd) of the experimental species in the same order (birch, elm, yellow pine); the heavy metals in the waste sludge were generally absorbed in parallel with the increasing application doses. However, compared to the control, metal uptake increased up to 25% and 50% waste sludge application doses and

decreased after 75% dose application and showed a constant trend. The uptake of essential nutrients (organic carbon, total nitrogen, magnesium, phosphorus and potassium) of the plant increased up to 50% sludge rate and decreased and stabilised at higher doses.

Results: The results of physiological analyses showed that, in general, a 25-50% dose of EBIWAS application in all three plant species has the potential to be used to support the growth and development of plants in landscape areas. In all three plants, low doses of sludge generally positively affected both antioxidant parameters and physiological parameters compared to the control. The uptake of heavy metals by trees is generally parallel to the amount of metals in waste sludge. However, it is interesting that although the amount of iron in the sludge content is considerably higher than the amount of aluminum, it is less absorbed by the plant. On the other hand, it was determined that the essential nutrients contained in sewage sludge provided significant fertilizer contributions to all three plants. However, after 50% sewage sludge application, a constant course is observed in the uptake of essential nutrients in plants. This situation shows that the heavy metals contained in sewage sludge hurt the nutrient uptake of the plant.

Keywords: Waste sludge, *Betula Pendula* Roth. *Ulmus Glabra* Huds, *Pinus Sylvestris*. L.

January 2024, 154 pages



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	7
Evsel Atıksu Arıtma Çamuru ile İlgili Temel Bilgiler	7
Ağır Metallerin Toprağa ve Bitkilerin Gelişimine Etkileri	12
Atık Çamurun Toprakta Kullanımı	17
Atık Çamurun Tarım Alanlarında Kullanımı	20
Atık Çamurun Bitkilerin Yetiştirilmesinde Kullanımı.....	25
Atık çamurun otsu bitkilerin yetiştirilmesinde kullanımı	25
Atık Çamurun Odunsu Bitkilerin Yetiştirilmesinde Kullanımı.....	29
Atık Çamurun Bitkilerde, Fizyolojik ve Biyokimyasal Parametreler Üzerine Etkisi	32
MATERYAL VE METOT	37
Materyal	37
Erzurum atıksu arıtma tesisi	37
Atık çamur numunesinin denemeler için hazırlanması	41
Toprak numunesinin denemeler için hazırlanması.....	42
Metot	47
Bitkilerde Yapılan Fizyolojik Analizler.....	53
Fotosentetik pigment içeriğinin (klorofil) tespit edilmesi	53
Lipid peroksidasyon (LPO) düzeyinin tespit edilmesi	54
Total karbohidrat içeriğinin tespit edilmesi	55
Fenolik madde içeriğinin tespit edilmesi	55
Hidrojen peroksit (H ₂ O ₂) miktarının tespit edilmesi.....	56
Süperoksit anyonu (O ₂ ⁻) miktarının tespit edilmesi.....	57
Çözünabilir protein miktarının tespit edilmesi	58

Antioksidan enzim aktivitelerinin tespit edilmesi	59
Katalaz (CAT) aktivitesinin tespit edilmesi	59
Peroksidaz (POX) aktivitesinin tespit edilmesi	59
Askorbat peroksidaz (APX) aktivitesinin tespit edilmesi	60
Süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesinin tespit edilmesi	60
Glutathione S-transferaz (GST) aktivitesinin tespit edilmesi	61
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	62
Bitkilerin Fizyolojik Analiz Bulguları	62
Bitki Yapraklarının Yaş/Kuru Ağırlıkları	62
Total Klorofil, Klorofil a, Klorofil b Miktarı Bulguları.....	63
Lipid Peroksidasyon Düzeyine Ait Bulgular (MDA Miktarı).....	65
Total Karbonhidrat Miktarı Bulguları	66
Fenolik Madde Miktarı Bulguları.....	67
Hidrojen Peroksit (H ₂ O ₂) Miktarı Bulguları	68
Süperoksit Anyonu (O ₂ ⁻) Miktarı Bulguları	69
Çözünabilir Protein Miktarı Bulguları	70
Katalaz (CAT) Aktivitesi Bulguları	71
Askorbat Peroksidaz Aktivitesi (APX) Bulguları	72
Süperoksit Dismutaz (SOD) Aktivitesi Bulguları	73
Glutathione S-Transferaz (GST) Aktivitesi Bulguları	74
Bitkilerin Fiziksel Gelişimlerine Ait Bulgular	75
Bitkilerin; Metal, Ağır Metal ve Besin Maddesi İçeriklerinin Analiz Bulguları	79
Bitkilerin; metal ve ağır metal içeriklerinin analiz bulguları.....	79
Bitkilerin alüminyum içeriklerine ait analiz bulguları	79
Bitkilerin mangan içeriklerine ait analiz bulguları.....	81
Bitkilerin demir içeriklerine ait analiz bulguları	83
Bitkilerin bakır içeriklerine ait analiz bulguları	86
Bitkilerin çinko içeriklerine ait analiz bulguları.....	88
Bitkilerin kurşun içeriklerine ait analiz bulguları.....	90
Bitkilerin nikel ve kadminyum içeriklerine ait analiz bulguları.....	92
Bitkilerin; Besin Elementi İçeriklerinin Analiz Bulguları	96
Bitkilerin organik karbon içeriklerine ait analiz bulguları.....	96
Bitkilerin toplam azot içeriklerine ait analiz bulguları	98
Bitkilerin magnezyum içeriklerine ait analiz bulguları.....	100
Bitkilerin toplam fosfor içeriklerine ait analiz bulguları	102

Bitkilerin toplam potasyum içeriklerine ait analiz bulguları	104
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR.....	119
EKLER.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
EK 1. Alka Laboratuvarları Akreditasyon Belgesi ...	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
EK 2. Sargem Laboratuvarları Onay Belgesi	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
EK 3. Dumatherm (Dumas) Cihazı ve Çalışma Prensipleri	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
EK 4. DAYTAM Laboratuvarları Akreditasyon Belgesi	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
EK 5. ICP-MS (Endüktif Eşleşmiş Plazma- Kütle Spektrometresi) Cihazı	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZGEÇMİŞ.....	129

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Türkiye’de Arıtılmadan (Doğrudan) Verildiği Ortamlara Göre Atıksu Miktarları (TÜİK 2020).....	2
Tablo 2. Arıtma Çamuru İşleme ve Bertaraf Yöntemleri (Bay vd 2017)	11
Tablo 3. Stabilize Arıtma Çamurunun, Toprakta Kullanılabileceği, Maksimum Ağır Metal İçerikleri (Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik EK I-B 2010)	19
Tablo 4. Denemelerde Kullanılan Stabilize Atık Çamur Analiz Sonuçları	42
Tablo 5. Uygulamanın Yapılacağı Alandan Temin Edilmiş Denemelerde Kullanılan Toprak Analiz Sonuçları.....	44
Tablo 6. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Yaş/Kuru Ağırlık Değerleri (sonuçlar % ağırlık verim cinsinden verilmiştir)	62
Tablo 7. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Total Klorofil Değerleri (sonuçlar mg/g cinsinden verilmiştir)	63
Tablo 8. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda K _{la} Değerleri (sonuçlar mg/g cinsinden verilmiştir)	64
Tablo 9. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda K _{lb} Değerleri (sonuçlar mg/g cinsinden verilmiştir)	64
Tablo 10. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda MDA Değerleri (sonuçlar nmol/gr cinsinden verilmiştir)	65
Tablo 11. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Karbonhidrat Değerleri (sonuçlar µg cinsinden verilmiştir).....	66
Tablo 12. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Fenolik Madde Değerleri (sonuçlar µg cinsinden verilmiştir)	67
Tablo 13. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda H ₂ O ₂ Değerleri (sonuçlar µg/g cinsinden verilmiştir)	68
Tablo 14. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda O ₂ ⁻ Değerleri (sonuçlar µg/g cinsinden verilmiştir)	69
Tablo 15. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Protein Değerleri (sonuçlar µg/g cinsinden verilmiştir)	70
Tablo 16. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda CAT Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir).	71
Tablo 17. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda APX Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir)	72

Tablo 18. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda SOD Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir)	73
Tablo 19. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda GST Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir)	74
Tablo 20. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Alüminyum Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	80
Tablo 21. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Mangan Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	83
Tablo 22. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Demir Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	85
Tablo 23. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Bakır Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	87
Tablo 24. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Çinko Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	89
Tablo 25. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Kurşun Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	91
Tablo 26. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Organik Karbon Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	97
Tablo 27. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Azot Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	99
Tablo 28. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Magnezyum Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	102
Tablo 29. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Fosfor Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	104
Tablo 30. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Potasyum Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)	106
Tablo 31. Fizyolojik Analiz Bulgularının (Huş Ağacı, Sarıçam ve Karaağaçta) En Yüksek ‘▲’ ve En Düşük ‘▼’ Değerlerinin Gösterimi.....	111
Tablo 32. Ağır Metal Analiz Bulgularının (Huş, Karaağaç ve Sarıçamda) En Yüksek ‘▲’ ve En Düşük ‘▼’ Değerlerinin Gösterimi.....	113
Tablo 33. Nutrient Madde Analiz Bulgularının (Huş, Karaağaç ve Sarıçamda) En Yüksek ‘▲’ ve En Düşük ‘▼’ Değerlerinin Gösterimi.....	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Klasik evsel AAT modeli (Yüksekdağ vd 2020)	7
Şekil 2. Evsel atıksuların bileşenleri (Gül 2018)	10
Şekil 3. Hiperakümülatör bitkilerde ağır metallerin alınımı, kökten gövdeye translokasyonu ve depolanması gibi özelliklerle ilişkili olduğu düşünülen, konstitütif olarak ekspreslenen ve/veya ağır metallere afinitesi yüksek olan taşınım sistemlerini gösteren şema.....	14
Şekil 4. Ülkelerdeki yıllık ortalama atık çamur miktarları (10 ³ kuru t/yıl)	21
Şekil 5. AB ve Türkiye'de kullanılan ve deşarj edilen atık çamuru miktarları	21
Şekil 6. Erzurum Atıksu Arıtma Tesis'i'nin görüntüsü	37
Şekil 7. Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesis'i akım şeması (EBAAT)	39
Şekil 8. Atık çamurun biyolojik arıtma tesisinden alındığı yeri gösteren şema	40
Şekil 9. Çamur çürütücüden (digester) çıkan ve kamyonlara yüklenen stabilize atık çamur ..	41
Şekil 10. Denemelerde kullanılan atık çamur numunesi	41
Şekil 11. Nihai uygulamanın yapılacağı toprak numunesinin alındığı alan	43
Şekil 12. Nihai uygulamanın yapılacağı toprak numunesinin alındığı alan	43
Şekil 13. Uygulamanın yapılacağı alandan alınmış deneyde kullanılan toprak materyali	43
Şekil 14. <i>Betula Pendula</i> Roth. (Huş ağacı)	45
Şekil 15. <i>Ulmus Glabra</i> Hudson. (Karaağaç)	45
Şekil 16. <i>Pinus Sylvestris</i> L. (Sarıçam)	46
Şekil 17. Çalışmanın yöntemsel aşamaları	47
Şekil 18. Toprak ve atık çamur numunelerinin homojenize edilerek hazırlanması	48
Şekil 19. Deneme oranlarına uygun bir şekilde dikime hazır hale getirilmesi	48
Şekil 20. Sırasıyla <i>Pinus sylvestris</i> L. (sarıçam) <i>Betula pendula</i> Roth. (huş) <i>Ulmus glabra</i> Huds. (karaağaç) fidelerinin dikim çalışmaları (28.11.2021)	49
Şekil 21. Dikimden sonra sırasıyla <i>Pinus sylvestris</i> L. (sarıçam) <i>Betula pendula</i> Roth. (huş) <i>Ulmus glabra</i> Huds. (karaağaç) fidelerinin genel görünümü (28.11.2021)	49
Şekil 22. Sırasıyla <i>Pinus sylvestris</i> L. (sarıçam) <i>Betula pendula</i> Roth. (huş) <i>Ulmus glabra</i> Huds. (karaağaç) denemelerinden görünüm (28.02.2022)	49
Şekil 23. Sırasıyla <i>Pinus sylvestris</i> L. (sarıçam) <i>Betula pendula</i> Roth. (huş) <i>Ulmus glabra</i> Huds. (karaağaç) denemelerinden görünüm (28.03.2022)	50
Şekil 24. Sırasıyla <i>Pinus sylvestris</i> L. (sarıçam) <i>Betula pendula</i> Roth. (huş) <i>Ulmus glabra</i> Huds. (karaağaç) yapraklarının fizyolojik analizler için toplanması (30.04.2022) ..	50

Şekil 25. Deneme çalışmalarının 6 aylık süresi sonunda ağaçların söküm çalışmalarından genel görünüm (28.05.2022)	51
Şekil 26. Ağaçların sökümü sonrasında boy-çap ölçümlerinin yapılması (28.05.2022)	51
Şekil 27. Ağaçların gövde ve köklerinin kurutulması	51
Şekil 28. Ağaçların yapraklarının kurutulması	51
Şekil 29. Ağaç yapraklarının öğütülerek analize hazır hale getirilmesi	52
Şekil 30. Ağaçların kök ve gövde numunelerinin öğütülerek analize hazır hale getirilmesi ...	52
Şekil 31. Analizi yapılan metallerin periyodik cetveldeki yerleri	53
Şekil 32. Total karbonhidrat miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik	55
Şekil 33. Fenolik madde miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik	56
Şekil 34. Hidrojen peroksit (H_2O_2) miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik	57
Şekil 35. Süperoksit anyon ($O_2^{\cdot -}$) miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik	57
Şekil 36. Protein miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik	58
Şekil 37. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda yaş/kuru ağırlık değerleri	63
Şekil 38. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda toplam klorofil değerleri	64
Şekil 39. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda K_{la}/K_{lb} değerleri	65
Şekil 40. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda MDA miktarı değerleri	66
Şekil 41. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda karbonhidrat değerleri	67
Şekil 42. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda fenolik madde değerleri	68
Şekil 43. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda H_2O_2 değerleri	69
Şekil 44. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda $O_2^{\cdot -}$ değerleri	70
Şekil 45. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda protein değerleri	71
Şekil 46. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda CAT değerleri	72
Şekil 47. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda APX değerleri	73
Şekil 48. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda SOD değerleri	74
Şekil 49. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda GST değerleri	75
Şekil 50. Farklı atık çamur oranlarına göre huş ağacının çap gelişimi	75
Şekil 51. Farklı atık çamur oranlarına göre huş ağacının boy gelişimi	75
Şekil 52. Farklı atık çamur oranlarına göre karaağacın çap gelişimi	76
Şekil 53. Farklı atık çamur oranlarına göre karaağacın boy gelişimi	76
Şekil 54. Farklı atık çamur oranlarına göre sarıçamın çap gelişimi	77
Şekil 55. Farklı atık çamur oranlarına göre sarıçamın boy gelişimi	77
Şekil 56. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) alüminyum birikimi	79
Şekil 57. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) alüminyum birikimi	79
Şekil 58. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) alüminyum birikimi	80

Şekil 59. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) mangan birikimi.....	81
Şekil 60. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) mangan birikimi	82
Şekil 61. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) mangan birikimi.....	82
Şekil 62. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) demir birikimi	83
Şekil 63. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) demir birikimi	84
Şekil 64. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) demir birikimi	84
Şekil 65. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) bakır birikimi	86
Şekil 66. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) bakır birikimi	86
Şekil 67. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) bakır birikimi	87
Şekil 68. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) çinko birikimi	88
Şekil 69. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) çinko birikimi	88
Şekil 70. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) çinko birikimi	89
Şekil 71. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) kurşun birikimi	90
Şekil 72. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) kurşun birikimi	90
Şekil 73. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) kurşun birikimi	91
Şekil 74. Yüksek atık çamur uygulama dozlarında bitkilerin (huş, karaağaç, sarıçam) yaprak kısımlarında denemelerden 5 ay süre sonra oluşan yanmalar.....	94
Şekil 75. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) organik karbon birikimi	96
Şekil 76. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) organik karbon birikimi	96
Şekil 77. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) organik karbon birikimi	97
Şekil 78. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) toplam azot birikimi	98
Şekil 79. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) toplam azot birikimi	98
Şekil 80. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) toplam azot birikimi	99
Şekil 81. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) magnezyum birikimi	100
Şekil 82. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) magnezyum birikimi	101
Şekil 83. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) magnezyum birikimi	101
Şekil 84. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) fosfor birikimi	102
Şekil 85. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) fosfor birikimi.....	103
Şekil 86. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) fosfor birikimi.....	103
Şekil 87. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) potasyum birikimi.....	104
Şekil 88. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) potasyum birikimi	105
Şekil 89. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) potasyum birikimi.....	105

KISALTMALAR DİZİNİ

μL	: Mikrolitre
μM	: Mikromolar
AAT	: Atıksu Arıtma Tesisi
Al	: Alüminyum
APX	: Askorbat peroksidaz
AsA	: Askorbik asit
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
CAT	: Katalaz
Cd	: Kadmiyum
Cu	: Bakır
d	: yoğunluk
EBAAT	: Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi
EBIWAS	: Erzurum Biyolojik Atık Çamur
EDTA	: Etilendiamin tetra asetik asit
F.mad.	: Fenolik madde
FAO	: Gıda ve Tarım Örgütü
Fe	: Demir
g	: Gram
GSH	: İndirgenmiş glutatyon
GSSG	: İndirgenmiş glutatyon
K	: Potasyum
LPO	: Lipid peroksidasyon
MDA	: Malondialdehid
Mg	: Magnezyum
mM	: Milimolar
mM	: Milimolar
Mn	: Mangan
N	: Azot
Na	: Sodyum
NBT	: Nitroblue tetrazolium klorür
Ni	: Nikel
nmol	: Nano mol

OH ⁻	: Hidroksil radikali
Org. C	: Organik karbon
P	: Fosfat
Pb	: Kurşun
POX	: Peroksidaz
Pro	: Protein
PVP	: Polivinilpirrolidon
ROS	: Reaktif oksijen türleri
ROT	: Reaktif oksijen türleri
rpm	: Devir/dakika
SKA	: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SOD	: Süperoksid dismutaz
TBA	: Tiobarbutirik asit
TCA	: Trikloroasetik asit
Top. Karb	: Toplam karbonhidrat
Top. N	: Toplam azot
Top.K	: Toplam klorofil
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
Y.K.ağ	: Yaş- kuru ağırlık

GİRİŞ

Gezegennemizde var olan canlılar, ekosistem döngüsü içerisinde birbirleriyle doğrudan veya dolaylı bir etkileşim içerisindeyler. Canlıların birbirlerinden ve çevresel etkilerden uzak yaşaması mümkün değildir. Canlılar; ışık, rüzgâr, nem, su ve besin elementleri gibi cansız çevrenin etkisi altında yaşamaktadırlar. Öncelikle suyun canlılar için yaşamsal önemi vardır. Su kaynaklarının kullanılabilir ve temiz olması gerekmektedir (Akın ve Kahraman 2018).

Nüfus artışı, orantısız göç, sanayileşme ve teknolojik ilerlemeler neticesinde meydana gelen insan aktivitelerinin, doğanın taşıyamayacağı oranda limitsiz şekilde artması, kirlilik unsurlarının da aynı şekilde çevreye atılmasını olağan hale getirmiştir. Doğa ile canlılar arasında yüzyıllardır süre gelen etkileşim neticesinde oluşan ekolojik dengenin sürdürülebilirliği, biyolojik çeşitliliğin devamlılığına imkân tanımaktadır. Fakat herhangi bir nedenle bozulan doğal denge, canlılar ile doğanın bu sağlıklı yaşam ilişkisine zarar vermektedir. Doğal kaynakların hızlı bir şekilde azalmasına karşın atık miktarının aynı hızla arttığı dünyamızda, insanoğlunun doğayı ne kadar kirlettiğini idrak etmesiyle beraber atık materyallerin çevreye uygun şekilde bertarafının sağlanması önem kazanmıştır. Son zamanlarda ön planda olan sürdürülebilir kalkınma anlayışının ve doğayı koruma bilincinin artmasıyla, birçok işletmenin çevreye karşı duyarlılığında, önemli bir farkındalık yaşanmaktadır. Çevreye ve doğaya zararlı etkileri bulunan kirleticilerin bu etkilerinin ortadan kaldırılması mevzuu, çevresel kanun ve yönetmeliklerde ele alınarak bu atıkların en uygun şekilde yönetilmesi ve bertarafı sağlanmaktadır (İşgenç ve Kınay 2005).

Nüfusun hızla artması, insanoğlunun sanayi ve teknolojik adımlarına ivme kazandırmış ve bu durum, var olan kaynaklarımızın hızla azalmasına yol açmıştır. Gerek yer altı gerek yerüstü kaynaklarımızın sınırsız olmayışı, bu kaynakların tükenerek biyolojik kapasitenin azalmasına neden olmuştur. Her türden atığın hızla arttığı günümüz dünyasında, çevrenin üç temel kompartmanı olan; hava, toprak ve suyun temiz kalması, canlı hayatı için vazgeçilmez olan bu kaynakların korunarak gelecek nesillere aktarılması için önemlidir. Zira bu üç kompartman arasındaki kirlilik, muazzam bir döngü içerisindeydir. Birinin kirliliği diğerlerini de ciddi olarak etkilemektedir. Örneğin; hava kirliliğini oluşturan gazlar ve pm'ler, yatay ya da dikey olarak değişik meteorolojik faktörlerin etkisiyle kilometrelerce öteye taşınabilmekte ayrıca toprak ve su kaynaklarını olumsuz şekilde etkileyebilmektedirler. Yüzeysel suların ve toprağın kirliliği de yer altı suları içme suları ve gıdaların kirliliği gibi pek çok olumsuz etki

oluşturmaktadır. İnsanlığın düşüncesizce ve hoyratça kullandığı çevrenin, doğal dengesi zamanla bozulmuş ve bu durum geri dönüşü olmayan olumsuz sonuçlar doğurmaya başlamıştır.

Bilindiği gibi atıklar; en genel haliyle katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Her geçen gün büyüyen ve doğal hayat için riskler barındıran ‘çevre kirliliği’ sorununun, önüne geçmek için bu atıkların kontrolü gerekmektedir. Canlı hayatı için vazgeçilmez bir öge olan su kaynaklarının, korunarak gelecek nesillere temiz bir şekilde aktarılması önemlidir. Su kaynaklarının kirlenmesi konusunda evsel atık sular, önemli bir paya sahiptir (Samsunlu 2006).

Artan evsel su tüketimi sonucunda oluşan atıksular, kanalizasyon sistemleriyle toplanıp bay-pas yapılarak kent içerisindeki diğer kurumların da atık sularıyla birleştirilip kentsel atık su adını alır. Daha sonra kentsel atıksu arıtma tesislerinde deşarj limitlerine uygun bir şekilde arıtılarak ya da arıtılmadan doğrudan alıcı ortamlara verilmektedirler. Arıtılmamış bir şekilde alıcı ortama verilen atıksular; yüzey sularına, yeraltı sularına ve içme sularına karışarak hem halk sağlığını olumsuz yönde etkilemekte hem de içinden çıkılmaz pek çok çevre problemini de beraberinde getirmektedirler (Topal ve Topal 2014).

Evsel atıksu; isale hatlarıyla gerek içme gerek kullanma suyu olarak evlere kadar ulaşan suların, mutfak, banyo tuvalet vs çeşitli şekilde kullanıldıktan sonra açığa çıkan ve kanalizasyon sistemiyle uzaklaştırılan gri su olarak tanımlanabilir. Bu evsel atıksuların arıtımında kullanılan evsel atık su arıtma (biyolojik arıtma) tesisleri; nehirlere, göllere, denizlere deşarj edeceğimiz kanalizasyon sularının, yönetmelikteki deşarj sınırlarına uygun olarak arıtılarak, ekolojik yaşamı olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde bu ortamlara verilmesini sağlar. Bu durum çevrenin sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir.

Tablo 1. Türkiye’de Arıtılmadan (Doğrudan) Verildiği Ortamlara Göre Atıksu Miktarları (TÜİK 2020)

Alıcı Ortamlar	2018 (Bin m ³)	2020 (Bin m ³)
Toplam	14 759 458	15 294 155
Deniz	11 430 838	11 722 968
Göl/Gölet	71 531	67 038
Akarsu	2 760 493	2 952 178
Baraj	155 961	167 041
Foseptik	136 144	147 851
Arazi	28 872	29 411
Diğer	175 619	207 668

Tablo 1’de gösterildiği gibi 2018-2020 yıllarında, nüfusun da artmasıyla beraber alıcı ortama verilen atıksu miktarı artmaktadır. Bu durum gelecekte alıcı ortama verilecek atık su

miktarının çok yüksek miktarlara ulaşacağını ve böylece çevre problemlerini de beraberinde getireceğinin bir göstergesidir.

Tün dünyada olduğu gibi ülkemizde de farklı çevresel problemlerin artışına paralel olarak son yıllarda sayıları artmakta olan hem endüstriyel hem de evsel arıtma tesisleri, su kirliliğinin önlenmesinde önemli rol teşkil etmektedirler. İşletilen bu tesislerin yan ürünü olarak ‘atıksu arıtma çamurları’ ortaya çıkmaktadır. Genel olarak atık su arıtma çamurları; ‘Atıksuların arıtılması esnasında, kendiliğinden çökelebilen katı maddeler ile bazı işlemler neticesinde çökebilir veya yüzebilir forma dönüştürülen katı maddeler’ şeklinde ifade edilmektedir. Ayrıca bu katı maddelerin, çöktürülerek veya yüzdürülerek atıksudan ayrılabilceğı ve konsantre olmuş bir halde sudan ayrılan, kirliliğın oluşturduğu arıtma çamurlarının da yeniden çevre kirlenmesine sebep olmaması nedeniyle önlemler alınması gerekmektedir.

Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan ve bertaraf edilmesi yasal olarak zorunlu olan atık çamurlara yönelik çalışmalar önemlidir (Salihoğlu 2007). Evsel atıksuların biyolojik olarak arıtım verimi yüksek olmasına rağmen tesis çıkışında, arıtma çamuru üretiminin yüksek olması en büyük dezavantajlardan biridir. Arıtma çamuru; atıksu arıtma tesislerinin çıkışında oluşan, sıvı ya da yarı katı halde, kokulu, öncesinde uygulanan proseslere göre çeşitlilik gösterebilen, toprak görünümlü katı bir atıktır (Öztürk vd 2020).

Evsel ve endüstriyel birçok aktivite neticesinde oluşan çıktı unsurlarının ‘atık’ olarak tanımlamadan önce başka bir prosesin, girdi unsuru olarak değerlendirilebilirliğinin araştırılması yani endüstriyel simbiyoz mühim bir mevzudur. Bir atığın başka bir işletmenin girdi elemanı olarak kullanılması, hem bu atığın söz konusu işletme için bir hammadde olarak kullanılmasına hem de atığın, atık olmaktan çıkıp sisteme tekrar kazandırılmasına imkan tanır.

Son zamanlarda atıkların değerlendirilmesi mevzusu, üzerinde fazlaca durulan ve her alanda çalışmaların yoğunlaştığı önemli bir kavramdır. Bu husus ile ilgili projeler ve çalışmalar özellikle son dönemlerde daha da artmaktadır. Bunun en önemli sebebi; ekosistem döngüsünün atık maddeleri tolere edebilme limitinin azalmasıdır. Zira 1970’li yıllarda başlayan ekolojik ayak izinin biyolojik kapasitenin üzerine çıkma durumu, ekolojik ayak izinin (gezegen üzerine yapılan baskı) lineer olarak artış göstermesi ve biyolojik kapasite ile olan makasın giderek açılması, global olarak önlenmesi mümkün olmayan problemlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, tüm dünya ülkelerinin çözümler üretebilmek adına, acil önlemlerin alınması gereken bir konu haline gelmiştir. Hatta bu durumla alakalı olarak 1972 yılındaki Stockholm anlaşmasını takiben, pek çok global antlaşmalar (Cop Dünya Taraflar Antlaşması vb.) yapılmıştır. Tüketim çılgınlığının pik yaptığı günümüz dünyasında, arz-talep dengesi

gereğince tüketilen her tür ürünün yerine yenileri üretilerek konulacak, her üretimin ve tüketimin sayısız atıkları ortaya çıkacaktır. Bu atıklar kontrollü bir şekilde yönetilmezlerse ekosistem için ciddi tehditler oluşacaktır.

Ülkemizde, Atık su arıtma tesisleri (AAT) kurulmaya başlandığı dönemlerde, atık çamurla alakalı mevzuatlar ve yönetmelikler şu an ki yürürlükteki olduğu kadar geniş kapsamlı olmamıştır. Sanayi tesislerinin artması, çeşitlenmesi ve teknolojik ilerlemelerle beraber çamur miktarındaki artışlar neticesinde, değişik içerik özelliklerine sahip çamurun oluşması, yeniden kullanımı veya bertarafı hususunda ivmelenen bir tutum gelişmiştir. AB'ye üyelik sürecinde yasa yoluyla gerçekleştirilen iyileştirme üzerine düzenlenen uyum başlıkları (çevre, enerji vb.) vesilesiyle önemli bir ilerleme sağlanmıştır (Aydın 2020).

Atıksuların, arıtma tesisinde arıtılması neticesinde son ürün olarak ortaya çıkan çamurun, alıcı ortama verilebilmesi için stabilize edilmesi gerekmektedir. “27661 sayılı Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik” de; stabilize olmuş atık çamurun, biyolojik olarak ayrıştırılabilir olmasının ve ham haliyle kullanılması sonucu kaynaklanan sağlık tehditlerini önemli oranda azaltmak için; kimyasal, biyolojik veya ısıl işlemler uygulanarak stabilize edilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır. Arıtma çamurlarının bu şekilde zararsız bir hale dönüştürmek için çeşitli stabilizasyon yöntemleri (anaerobik çürütme, aerobik çürütme, kompostlama, kurutma, kireç ile stabilizasyon) bulunmaktadır (Demirkan 2015).

Arıtma tesislerinde; atık çamurun bertaraf edilmesi, işletenlerin en çok sorun yaşadığı mevzudur. Atıksu arıtma tesislerinin işletmesi esnasında açığa çıkan çamur miktarı, atıksu miktarının %1 ile 6'sı gibi düşük bir oranını teşkil etmesine rağmen çamuru arıtan proseslerin yatırım bedeli toplam arıtım sistem maliyetinin %30-40'ı ve işletme maliyet bedeli ise bütün işletme maliyetinin %50'sine yakındır. Genel olarak atıksu arıtma çamurları; stabilizasyon, yoğunlaştırma, çürütme, şartlandırma, dezenfeksiyon, kompostlaştırma, çamur kurutma, düzenli depolama, yakma ve zirai kullanım ile bertaraf edilebilir.

Birçok atık çamur bertaraf metodu arasında, çamurun susuzlaştırılarak hacminin azaltılması ve depolama ünitelerine taşınmasının yanı sıra, özellikle arıtma çamurlarının toprağa verilerek bertaraf edilmesi, önemli tekniklerden birisidir. Ekonomik anlamda da olumlu katkı sağlayan bu bertaraf metodunun uygulama kolaylığı, önemli bir avantajdır. Hem atıksuyun hem de çıktısı olan atık çamurun değerlendirilmesi bu açıdan oldukça önemlidir (Öztürk vd 2020).

Günümüzde diğer bertaraf etme yöntemlerine kıyasla atık çamurun arazi uygulamasından yararlanmaya yönelik eğilim daha yaygındır. Çünkü atık çamur, bitki

büyümesi için yüksek miktarda organik madde ve temel besin maddesi (N, P, K) içermesi sebebiyle toprağın verimliliğini artırmaktadır. Bu durum bitki gelişimine, fizyolojik ve biyokimyasal aktivitelerine olumlu katkılar sağlamaktadır. Fakat atık çamur içerdiği; çinko (Zn), bakır (Cu), cıva (Hg), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), nikel (Ni) ve krom (Cr) gibi ağır metaller sebebiyle belirli bir dozun üzerinde toksik etki yaratabilir (Nahar and Hossen 2020).

Evsel atıksuların, arıtımı sonucunda arıtma çamurlarının, yeniden bir kirlilik yaratmaması ve bu atıkların muhteva ettiği nutrient madde miktarının değerlendirilmesi amacıyla; peyzaj, tarım ve zirai amaçlı kullanılan toprak ortamına verilmesi konusundaki eğilim artmaktadır.

Son yıllarda dünyada sürdürülebilir olmayan doğrusal ekonomiden sürdürülebilir ve ‘yeşil’ olarak nitelendirebileceğimiz döngüsel ekonomiye geçiş hızlanmıştır. Bu doğrultuda her tür atığın hem simbiyotik ilişki içerisinde hem de geri dönüştürülerek ekonomiye yeniden kazandırılması artık bütün dünyanın önemseydiği bir konudur.

Sürdürülebilir kalkınma amaçları (SKA) çerçevesinde; evsel arıtma tesisinin bir çıktısı olan biyolojik arıtma çamurunun, peyzaj ve tarım alanlarında kullanımı, sorumlu üretim ve tüketim hedeflerini destekleyerek, karada yaşam alanlarının oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları doğrultusunda, atık olarak tanımlanan, evsel arıtma çamurlarının; tarım alanlarına; toprak iyileştirme, zirai, peyzaj ve herhangi bir amaçla kullanımı; uygun şartlar sağlanmadan yüksek miktarlarda kontrolsüz bir şekilde doğaya bırakılan bir atığın geri kazanılarak, gübre olarak bitkiye fayda sağlaması ve atığın doğaya verdiği zararın önlenerek, atıktan maksimum fayda sağlanmasını hedeflemektedir. Ayrıca atık çamur, bu kullanımı sayesinde, gübre sanayisine katılım gösterecek ve fazladan başka bir gübre ihtiyacı gerekmeyecektir. Bu amaç doğrultusunda atık çamurun tarımsal kullanım; SKA’ların 12. maddesi (Sorumlu tüketim ve üretim), 1. maddesi (yoksulluğa son) ve 2. maddesi (açlığa son) ile doğrudan ilişkilidir.

Kentsel biyolojik atık çamurun toprak ile buluşturulması; toprağın kalitesinin artırılması ve gübre faydası sağlamasına olanak tanıyacak ve bu yörüngede, bitki yetiştirme konusunda önem arz edecektir. Böylece sorumlu üretim ve tüketim bilinci ile yeşil alanlar artırılacak ve bu sayede doğal alan, park, bahçe gibi alanlarda büyüme sağlanacaktır. Bu alanların genişlemesi ile betonlaşmış binaların arasında, ayakların toprağa basabileceği doğal yaşam alanlarının genişlemesiyle beraber toprağın su tutma kapasitesi artırılmış olacak ve bu durum da; kuraklık, sel, erozyon gibi çevre için ciddi tehdit oluşturan unsurların önüne geçilmiş olacaktır. Bu doğrultuda atık çamurun peyzaj alanlarında kullanımı, otsu ve odunsu bitkilerin

zenginleşmesine neden olacağından SKA'ların 15. maddesiyle (Karasal yaşam) doğrudan ilişkilidir.

Kentsel atık çamurun peyzaj alanlarına uygulanması, tüm çevresel SKA konularıyla (temiz su ve sıhhi koşullar, sanayi, yenilikçilik ve altyapı, erişilebilir ve temiz enerji, sürdürülebilir şehir ve yaşam alanları, sudaki yaşam, iklim eylemi) dolaylı; sorumlu tüketim ve üretim, açlığa son, yoksulluğa son ve karasal yaşam konularıyla doğrudan ilişkilidir.

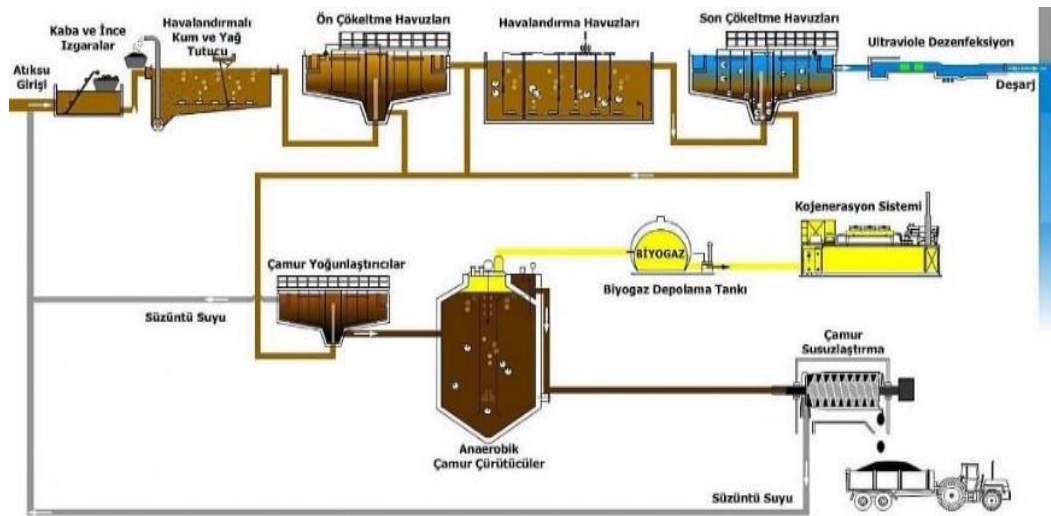


KURAMSAL TEMELLER

Evsal Atıksu Arıtma Çamuru ile İlgili Temel Bilgiler

Evsal karakterli atıksular; evlerimizden açığa çıkan atıksuları, endüstriyel olmayan işyerlerinden oluşan evsel özellikteki atıksuları ve kurumsal işyerlerinden kanalizasyona karışan atıksuları kapsamaktadır. Küçük yerleşim bölgelerinde evsel atıksuların arıtılması amacıyla yapılanmış, merkezi olmayan atıksu arıtma tesisleri (AAT) dışındaki çoğu büyük tesis, evsel atıksularla beraber bir takım ticari ve endüstriyel kaynaklı atıksuyu da arıtmaktadır. Genel olarak, tesise yalnızca evsel atıksu geliyorsa, atıksuyun yapısında fazla bir değişken bulunmamaktadır. Sadece farklı bölgelerdeki evsel atıksu içeriği, bölgenin konumsal, sosyal-ekonomik ve meteorolojik durumlarına göre değişim gösterebilmektedir. Aynı zamanda aynı bölgede bile olsa atıksuyun yapısı ve miktarı, tatil yörelerinde oluşan nüfus değişkenliği gibi nedenlerle, dönemsel olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir (Öztürk vd 2016).

Atıksulara, belirli arıtma işlemleri uygulanması neticesinde çökebilir veya yüzebilir forma dönüştürülebilen katı maddeler çamur olarak tanımlanabilir. Atık çamur, su ve atıksuların arıtımı ile oluşan ve özellikleri sebebiyle kendilerinin de arıtılması gereken, arıtılmadan doğaya bırakıldıklarında çevrede olumsuz etkilere sebep olabilecek, katı ve sıvı karışımından oluşan bir materyaldir. Fazla dozlarda besin maddeleri, organik madde, patojen mikroorganizmalar ve yüksek miktarda su içermesi sebebiyle arıtılmaları gereklidir (Yıldız vd 2009).



Şekil 1. Klasik evsel AAT modeli (Yüksekdağ vd 2020)

Ortalama bir evsel AAT tesisi Şekil 1’ de görüldüğü gibidir. Atıksu ilk olarak içerdiği kaba ve ince atıkları uzaklaştırmak için ızgaralardan geçirilir ve havalandırma yağ ve kum

tutucu üniteye ulaşır. Burada su içerisinde basınçlı havanın eklenmesiyle suyun içerdiği yağ molekülleri ve katı partiküller, suyun yüzeyine çıkarılır ve sıyrılarak sudan uzaklaştırılır. Bir sonraki havuz ön çökeltim işlemi yapmak için tasarlanmıştır. Bu havuzda fiziksel bir arıtım yapılır ve kendinden çökebilen katı maddeler ünitenin dibinde toplanır. Havuzun dibinden alınan ön çökeltim çamuru, yoğunlaştırıcılara gönderilir. Üst kısımdaki su havalandırma havuzuna aktarılır. Burada biyolojik arıtım başlar. Biyolojik arıtım, atıksu içindeki askıda veya çözünmüş halde bulunan organik bileşenlerin, bakterilerin faaliyetleri sonucunda parçalanması ve çökelebilen biyolojik floklar ile sıvının içerisinde hapsolarak atmosfere kaçan stabil inorganik bileşik haline dönüşmesidir. Biyolojik olarak gerçekleşen arıtım sonrası organik maddeyi tüketen bakteri formlarının, stabil hale gelerek havuzun dibine yığılması sonucunda biyolojik çamur oluşur. Oluşan bu çamur da, çamur yoğunlaştırma ünitesine gönderilir. Atıksular, arıtım sonrası denizlere, göllere, nehirlerle deşarj edilirken çamur yoğunlaştırma havuzunda biriken çamurlar, anaerobik çamur çürüten tanklarda arıtılırlar. Anaerobik arıtımı tanımlarsak; inorganik ve organik maddelerin oksijenin bulunmadığı bir ortamda mikro canlılar sayesinde parçalanarak H_2S , CH_4 ve NH_3 gibi son ürünlere dönüştürülmesidir. Nihai olarak çamur susuzlaştırma ünitesinde çamur, katı bir halde uzaklaştırılır.

Arıtımın türüne ve amacına uygun olarak, arıtma çamurlarının içerikleri farklılık gösterir. Bunları gruplandıracak olursak;

- Çökebilir katı partiküllerin oluşturduğu ön çökeltim çamurları,
- Kimyasal arıtım ve koagülasyon neticesinde meydana gelen kimyasal çamurlar,
- Biyolojik arıtım faaliyetleri neticesinde meydana gelen biyolojik (son çökeltim) çamurlar,
- İçme suyu arıtımı neticesinde meydana gelen inorganik çamurlar (Öztürk vd 2005) şeklindedir.

Ön çökeltim çamurları; AAT' lerinin ızgaralarından ve ön çökeltim havuzlarından tutulan inorganik ve organik içerikli çamurlardır. Farklı boyutlarda ve ebatlarda olan, çökebilen veya yüzebilen katı cisimlerin, çözünmüş halde bulunan organik/inorganik maddelerin ve gazların atıksudan uzaklaştırılması şartıyla atıksuya uygulanan işlemler neticesinde oluşan gri renkli, yapışkan yoğun ve kötü kokulu çamurlardır.

Kimyasal çamurlar; Özellikle içme suyu arıtma tesislerinde olup nadiren AAT'lerde uygulanan koagülasyon, flokülasyon prosesleri neticesinde oluşan çamurlardır.

Biyolojik (son çökeltim) çamurları; Atıksuyun barındırdığı, mikroorganizmaların organik ve kısmen de inorganik kirleticileri enerji ve besin kaynağı olarak kullanımı neticesinde, atıksudan uzaklaştırılan mikrobiyolojik açıdan daha stabil çamurlardır.

AAT'lerin işletilmesinin temel amacı atık suyun uygun standartlarda arıtımının sağlanmasıdır. Fakat bu tesislerin faydalı amaçlarının yanı sıra olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Bu nedenle AAT'lerin; güçlü yönlerini, zayıf yönlerini, fırsatlarını ve tehdit unsurlarını ele alan SWOT analizi yapılmıştır.

AAT'lerin SWOT analizi;

Güçlü yönleri (S):

- AAT'ler; atıksuların deşarj standartlarına uygun olarak arıtımını sağlar. Bu sayede deşarj edilecek noktaların (deniz, göl, baraj vs) kirlenmesini önler.
- Kirli suyun doğaya verilmesini engellediği için ekosistemin her kademesine ve çevrenin sürdürülebilirliğine katkı sağlar.
- AB uyum sürecine önemli faydaları vardır.
- Atıksuyu belli bir düzeye kadar arıtıp tekrar doğaya kazandırılmasına vesile olduğu için atıksuyun geri dönüşümünü sağlar.
- Yapımı ve işletmesi süresinde yeni bir iş alanı oluşturarak iş imkanına katkı sağlar. Bu durum ekonominin canlanmasına olanak tanır.

Zayıf yönleri (W):

- Arıtım esnasında açığa çıkan farklı özellikte; organik veya inorganik içerikli yeni atıklar oluşur (atık çamur).
- Kuruluşu ve işletmesi için mali bir sermaye gerekir.

Fırsat (O) :

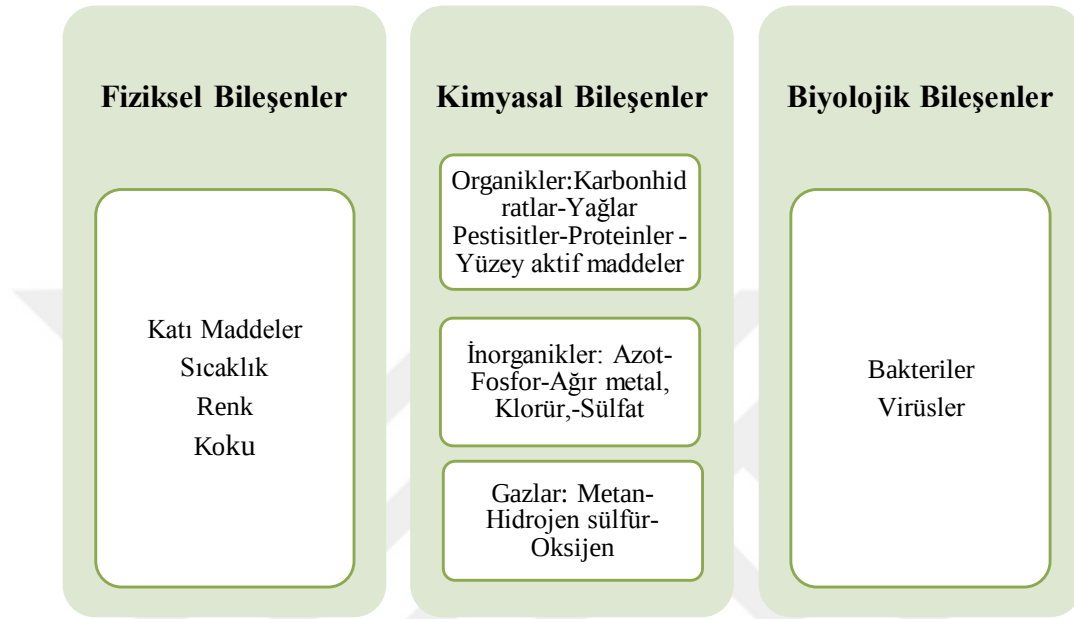
- Atık çamur, içeriğindeki zengin besin elementleri sayesinde gübre olarak kullanılır. Bu sayede her tür bitki yetiştirilebilir. Bu durum ormanlık alanların, meraların, rekreasyon alanlarının artmasını sağlayarak daha yeşil bir çevrenin oluşmasını destekler.
- Atık çamurun belirli miktarlarda kullanımı sayesinde, zirai bitkiler yetiştirilebilir. Böylece arıtma çamuru hem tarım sektörüne hem de gübre sanayine önemli katkılar sağlar.
- İleri arıtım tesislerinin projelendirilmesi için temel bir model oluşturur.

Tehdit (T):

- Arıtma çamurlarının bilinçsiz bir şekilde bertaraf edilmesi durumunda, içerisinde barındırdığı patojen mikroorganizmalar sebebiyle halk sağlığını tehdit eder.

- Arıtma çamurlar, içerisinde var olabilecek yüksek miktarda ağır metaller ve kimyasal maddeler sebebiyle ekosisteme ve çevreye olumsuz etkileri olabilir.

Kentsel atıksuların bileşenleri; insanların hayat standartlarına, mevsimsel şartlara ve kanalizasyon şebekelerine endüstriyel atık suların verilmesi durumuna bağlı olarak değişebilmektedir. Genel olarak evsel atıksuların niteliklerini oluşturan temel bileşenler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Evsel atıksuların bileşenleri (Gül 2018)

Atık çamur, arıtım neticesinde oluşan, uygulanan arıtım metotlarına bağlı olarak %0,25- %12 miktarında katı madde barındıran yapılardır. Atıksu arıtma tesisinden açığa çıkan çamurların da bertaraf edilmeleri gereklidir. Çamurun büyük bölümünün su içermesi, arıtma çamurlarının hacminde artışa neden olur. Açığa çıkan çamurun hacminin fazla oluşu, çamurun işlenmesi, bertarafı ve atıksuların arıtılmasında problem teşkil ettiğinden dolayı çamurun susuzlaştırılması son derece önemlidir.

Önemli bir atık olan çamur yönetiminin karmaşık olmasının sebepleri arasında;

- Herhangi bir işlem görmeyen atıksu da ciddi manada koku problemi oluşturan maddeler,
- Biyolojik arıtım sonucunda oluşan çamurun, işlenmemiş atıksuyun barındırdığı organik maddelerden farklı yapıda olması,
- Çamurun yüksek miktarlarda su barındırması sebebiyle hacimsel olarak fazla olması, sıralanabilir (Arargüç 2018).

Atıksuların fiziksel ve biyolojik arıtmaları neticesinde ortaya çıkan çamurların uygun bir biçimde bertaraf edilmesi için öncelikle nem içeriğinin minimize edilmesi gerekmektedir.

Bunun için temelde kullanılan teknikler arasında; susuzlaştırma, şartlandırma, yoğunlaştırma ve kurutma yöntemleri sıralanabilir. Çamurun daha kararlı bir hale gelmesi için kullanılan teknikler arasında ise yakma, stabilizasyon ve kompostlaştırma bulunmaktadır. Bu metotlara ek olarak, belirli bir orana kadar susuzlaştırılmış arıtma çamurlarının gereken analizlerinin yapılmasından sonra içeriğine uygun bir şekilde düzenli depolama alanlarında depo edilerek nihai bertarafı da mümkündür (Gül 2018).

Arıtma çamurlarının çok farklı şekillerde işlenme ve bertaraf yöntemleri bulunmaktadır (Tablo 2). Atık çamur için uygulanan temel işlemler ve yöntemlerin hedefi, genel olarak; çamurdaki su ve organik maddenin muhtevasını azaltarak nihai bertarafı ve tekrar kullanımını sağlamaktır (Turan 2014).

Tablo 2. Arıtma Çamuru İşleme ve Bertaraf Yöntemleri (Bay vd 2017)

Uygulanan birim işlem	Arıtma yöntemi	Fonksiyonu
Ön arıtma işlemleri	Çamurun öğütülmesi Çamur susuzlaştırması Çamurların karıştırılması Çamur depolama	İrilik azaltma Kum giderme Karıştırma Depolama
Yoğunlaştırma	Graviteli flotasyon, graviteli bant, dönen tambur yoğunlaştırma Santrifüjleme	Hacim azaltma
Stabilizasyon	Klor oksidasyonu, kireç stabilizasyonu, ısıtma işlemi, Anaerobik ya da aerobik çürütme, kompostlaştırma	Stabilizasyon, ürün geri kazanımı
Şartlandırma	Kimyasal şartlandırma, ısıtma işlemi, elutrasyon	Çamur şartlandırma
Dezenfeksiyon	Pastörizasyon, uzun süreli depolama	Dezenfeksiyon
Çamurun suyunu alma	Vakum filtre, santrifüj, pres filtre, yatay bant filtre, kurutma yatakları, lagünler	Hacim azaltma
Kurutma	Flaş kurutucu, püskürtmeli kurutma, döner kurutucu, çok gözlü fırınlar	Ağırlık ve hacim azaltma
Isıtma işlemi	Çok gözlü fırın, akışkan yataklı fırın, katı atıklarla birlikte yakma, yağ oksidasyonu	Hacim azaltma
Nihai bertaraf	Arazi iyileştirme, tarımsal amaçlı kullanım, dağıtım ve pazarlama, kimyasal sabitleme, Arazi doldurma, düzenli depolama, lagünleme	Yararlı kullanım, Nihai bertaraf

Arıtım sonucunda oluşan çamurun azaltılması, meydana çıkan çamurların uygun metotlarla işlenmesi, çamurun arıtım ve uzaklaştırma kısımlarında iyi bir uygulamanın mevcut olması, çamur yönetiminin en önemli kısmını oluşturur (Öztürk vd 2015).

Atıksuların arıtımında, ilerleme kaydedilmiş olmasına rağmen, arıtma çamurunun fazlaca açığa çıkması hala en büyük dezavantajlardandır. Arıtma çamurunun miktarı her geçen

gün artmaya devam etmekte ve bu atıkların arıtılmaları için gerekli maliyet, toplam işletme maliyetlerinin yaklaşık %60'ını kapsamaktadır (Yıldız ve Oran 2019).

İnsanlarda çevre bilincinin gelişmesiyle arıtma tesislerinin kurulması ve arıtım neticesinde açığa çıkan arıtma çamurlarının bertarafı ile ilgili konuların üzerinde çalışılması bir zorunluluk olmuştur. Arıtma çamurlarının içeriği çamurun elde edildiği bölgeye göre değişiklik gösterebilir. İçeriğinde; Cu, Fe, Cd, As, Hg, Al, Pb, Co, Cr, gibi ağır metaller, azot, asitler, metal tuzları, organik fosfor, sülfatlar, alkaliler, boyalar hidrokarbonlar, organik bileşikler, fenoller ve oksitleyiciler içerebilir (Genç 2021).

Kaynakların aşırı tüketimi, atıkların yeniden kullanımını modern toplumun odak konusu haline getirmektedir. Kanalizasyon çamuru olarak bilinen evsel atık çamurlar, yüksek inorganik madde, nitrat ve fosfor içeriği nedeniyle uygun şekilde stabilize edildiğinde biyo-gübre olarak kullanılabilirler. Ayrıca Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ile Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO), bu biyolojik kaynağın kullanımı ve sürdürülebilir yönetim olasılıklarını belirlemek için değerlendirmeye almaktadır (Nunes *et al.* 2021).

Atık çamurun, belirli işlemlerden geçirildikten sonra toprağa verilmek suretiyle bertaraf edilmesi konusundaki en önemli risk faktörü içeriğindeki ağır metallerdir. Ağır metaller toprak aracılığı ile bitki bünyesine geçerek birikime sebep olurlar. Bunun sonucunda bitkide birtakım sorunlara neden olurlar.

Ağır Metallerin Toprağa ve Bitkilerin Gelişimine Etkileri

Ağır metaller, metalik özelliklere sahip, yoğunluğu 5 g/cm^3 'ten büyük, atom numarası 20'nin üzerinde olan metalleri ve metaloidleri ifade eden elementlerdir. Bu metallerden bazıları Zn, Cu, Mn, Ni ve Co gibi bitki gelişimi için gerekli mikro besin maddeleri iken; Cd, Pb ve Hg vb. gibi ağır metaller, biyolojik işlevleri olmayan maddelerdir (Gaur and Adholeya 2004). Ağır metaller doğada yok olmazlar ancak form değiştirirler. Bu yüzden sedimentte, toprakta, temiz su kaynaklarında ve deniz suyunda birikime eğilimleri vardır (Çomaklı vd 2018). Ağır metaller kimyasal ve biyolojik olarak parçalara ayrılamadığı için fiziksel olarak veya toksik olmayan maddelere dönüştürülmek suretiyle uzaklaştırılmalıdır (Gaur and Adholeya 2004).

Tüm dünyada hızlı sanayileşme ve rastgele kentleşme nedeniyle ağır metallerin toprakta birikmesi ciddi bir çevre sorunu haline gelmiştir. Ağır metaller binlerce sene toprakta kalabildikleri için canlı organizmaları tehdit eden bir risk unsuru oluşturmaktadırlar. Bu sebeple, ağır metallerin bitki gelişimi ve toprak mikroflorası üzerinde de olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir (Roy *et al.* 2005). Ağır metaller, toprak ortamında kompleks yapılar meydana getirerek, canlılar için, toksisitenin etkisini arttırırlar. Toprağın mikroorganizma

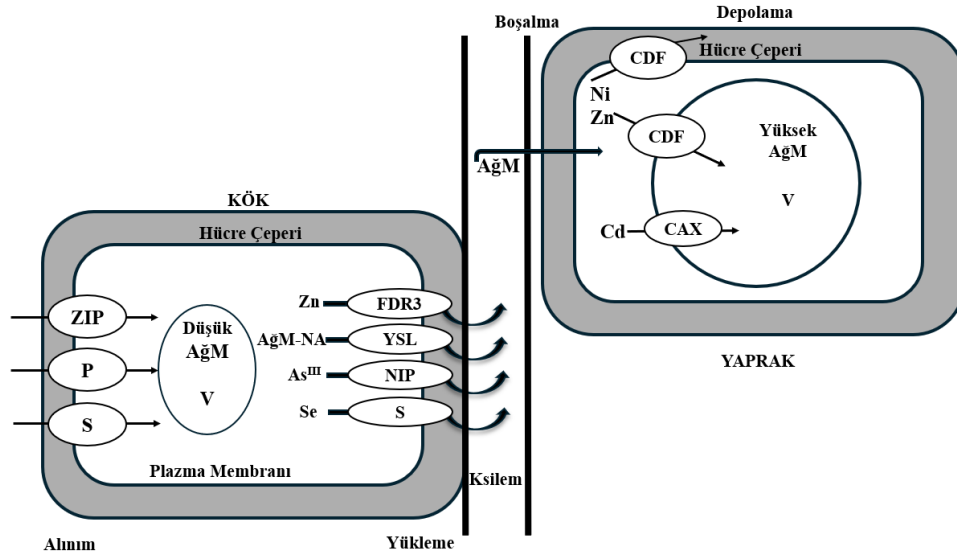
aktivitesini olumsuz yönde etkileyen ağır metaller, toprak faunasına etki ederler. Böylece toprağın biyolojik aktivitesi bozularak; toprak solunumu, nitrifikasyon, organik maddenin mineralizasyonu ve enzim aktivitesi olumsuz yönde etkilenir. Bu nedenlerle, toprak verimsizleşir ve nitelikleri değişir. Bitkilerin su alma aşamasında bitki bünyesine geçen ağır metaller, bitkinin verimi ve kalitesi üzerinde olumsuzluklara sebep olur (Yerli vd 2020).

Toprakta ağır metal birikimi neticesinde, bitkiler gereksinim duydukları besin maddelerini topraktan alamazlar. Başka bir ifadeyle; ağır metaller bitkinin besin maddesi alımını engellemektedirler. Ağır metale maruz kalan bitkilerde, ana besin maddelerinin yoksunluğundan dolayı genellikle, kök ve gövdenin boyları normalden daha kısa, yaprak alanı daha küçük ve yaprak sayısı daha az olmaktadır. Ağır metallerin bitkinin kök uzunluğu üzerindeki negatif etkisi, oksidatif hasar ile hücrelerin membran yapılarının deformasyonu ve kök yüzeyini meydana getiren epidermal hücrelerin hasar görmesi neticesinde, bitkinin kök hücrelerinin bölünmesinin ve çoğalmasının önüne geçmesinden kaynaklanmaktadır (Soudek *et al.* 2010). Ayrıca belirli dozlarda ağır metal alan bitkilerde kök kısmının yüzeylerinde, su miktarını sınırlandırma niteliğinde olan suberin ismi verilen bileşiğin artışıyla, bitki köklerinde; bitki-su dengesinin bozulması, kahverengileşme ve bitki gelişiminde gerilemeler tespit edilmektedir (Mohanpuria *et al.* 2007).

Her bir ağır metal türünün bitkideki etki gösterdiği bölge farklı olabildiğinden bitki üzerinde oluşan toksik etki de ağır metale göre değişebilmekle beraber bitkide ağır metal toksisitesi varlığını gösteren en yaygın belirtisi bitki gelişimindeki inhibisyonudur (Gill 2014). Ayrıca bitki biyokütlesi, tohum çimlenmesi ve klorofil biyosentezinde azalma ve fotosentez reaksiyonlarının sekteye uğraması da gözlemlenen diğer toksik etkilerdir (Shahid vd 2014).

Diğer bitkiler için fazlasıyla toksik olan yüksek ağır metal konsantrasyonlarını tolere edebilen bitki türleri, dışlayıcı (excluder) özelliği ile bilinir. Bu tür bitkilerdeki toleransın sebebi ağır metallerin bitkiye alımının sınırlı olmasıdır. Bu şekilde ağır metallerin fitotoksik etkilere fazlasıyla duyarlı olan yaprak kısımlarına translokasyonu, minimum düzeye indirilir ve kök dokularında detoksifiye edilir. Fakat “hiperakümülatör” adıyla bilinen birçok toleranslı bitkide de bu metaller bitkinin dokularına alınarak diğer dokulara taşınır. Hiperakümülatör terimi, bir veya daha fazla ağır metal türünü topraktan aktif mekanizma sayesinde fazla miktarlarda alabilen bitkiler için kullanılmaktadır. Bu türler ayrıca ağır metalleri toprak üstü organlarına ve yaprak aksamlarına kadar göndererek, hiperakümülatör olmayan bitkilere oranla 100-1000 kat daha yüksek miktarlarda biriktirebilirler. Fakat herhangi bir fitotoksikite belirtisi göstermezler. Hiperakümülatör mekanizması aynı zamanda hipertolerans özelliği de gerektirir. Bunun

nedeni hipertolerans özelliği, ağır metallere en azından hiperakümülatör olmayan bitki türleri kadar duyarlı olan hiperakümülatör türlere savunma ve korunma sağlar (Doğru vd 2021).



Şekil 3. Hiperakümülatör bitkilerde ağır metallerin alınımları, kökten gövdeye translokasyonu ve depolanması gibi özelliklerle ilişkili olduğu düşünülen, konstitütif olarak ekspreslenen ve/veya ağır metallere afinitesi yüksek olan taşıyım sistemlerini gösteren şema (Rascio and Navari-Izzo 2011).

Şekil 3'te gösterilen ifadeler; CAX: Katyon değişiricileri; CDF: Katyon difüzyon kolaylaştırıcıları; FDR3: Multidrug ve toksin atılım ailesine ait bir üye; AgM: Ağır metal; AgMA: Ağır metal taşıyan ATPazlar; NA: Nikotinamin; NIP: Nodulin 26 benzeri intrinsik proteinler; P: Fosfat taşıyıcıları; S: Sülfat taşıyıcıları; V: Vakuol; YSL: Yellow strip 1 benzeri proteinler; ZIP: Çinko ve demirle regüle edilen taşıyıcı proteinler

Bitkiler genellikle bünyelerine aldıkları metallerin büyük bir kısmını, bitkinin diğer organlarını koruma altına almak için kök kısımlarının vakuollerinde kristalize ederek bekletirler. Böylece metaller bitkilerin üst aksamlarına aktarılmadan kök kısımlarında birikirler. Fakat hiperakümülatör bitkilerde bu durum farklıdır. Hiperakümülatör bitkiler, ağır metalleri kökleriyle alıp bütün organlarına aktararak özellikle yapraklarında biriktirme eğilimindedirler. Şekil'3 de hiperakümülatör bir bitkinin ağır metalleri organlarına alımının hücre bazda gösterimi şematize edilmiştir. Ağır metaller bazı protein türleri ve taşıyıcılar vasıtasıyla hiperakümülatör bitkinin kökleriyle alınarak gövdenin yolaklarından ksilem borularına aktarılır. Ksilem borularıyla yapraklara taşınan metaller katyon değişiriciler ve katyon difüzyonun kolaylaştırıcı elemanlar yoluyla yaprakların vakuollerinde kristalize olarak hapsolurlar veya hücre çeperlerinde depolanırlar. Hiperakümülatör bitkiler, ağır metalleri bütün organlarında yüksek miktarlarda depo ederlerken bu metallerin yaşamsal faaliyet süreçlerine olumsuz yönde etki etmesine izin vermezler ve metallerin toksik özelliklerinden etkilenmezler.

Ağır metal toksisitesine maruziyet sonucunda bitkilerde görülen önemli bir etki de hidroksil radikali (OH), hidrojen peroksit (H₂O₂) ve gibi reaktif oksijen türlerindeki (ROS) artıştır. ROS miktarı belirli eşik değerine ulaştığında hücre ölümü yanıtı aktive edilmektedir. Yüksek miktarlarda artan ROS miktarı, hücrelerin genetik yapısına zarar vererek oksidatif strese neden olmaktadır (Ghori vd. 2019).

Ağır metal stresi gibi abiyotik streslere maruziyet sonucunda, ROS oluşumu ve detoksifikasyonu arasındaki denge bozulmaktadır. Bitkiler ROS'un sebep olduğu oksidatif stres ile mücadele edebilmek sebebiyle, enzimatik antioksidanların aktive ederek ve diğer antioksidan bileşiklerini biriktirerek antioksidan savunma sistemlerini geliştirirler. Antioksidan savunma sistemleri vesilesiyle üretilen ROS'lar, düşük miktarlarda tutulabilmektedir (Dutta vd 2018).

Ağır metallerin bitki bünyesinde sınır limitlerin üzerinde var olması, bitkilerde olumsuz etki göstermektedir. Fakat bazı ağır metaller (Al, Mn, Fe, Zn) düşük miktarlarda, bitkiler için mikro besin kaynağı, fotosentezde yardımcı eleman ve enzim aktivatörü olarak kullanılmakta, bu durum bitki gelişimine katkı sağlamaktadır (Çomaklı vd 2018).

Alüminyum; bitkiler üzerinde iki önemli olumsuz etkiye neden olur. İlki köklerin hasar görmesi, ikincisi ise Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ gibi katyonların emiliminde azalmaya sebep olmasıdır. Alüminyum metalinin bitkilerdeki ilk tesiri yan köklerin büyümesinin baskılanması ve köklerin ucundaki zararlar sebebiyle köklerin uzamasını engellemesidir. Bunun sonucunda bitkide, yetersiz beslenmeye sebebiyle beslenme eksiklikleri görülür.

Bakır; bitkiler için mikro besin elementidir ve ATP sentezi ile CO₂ asimilasyonunda önemli rol oynamaktadır. Bitkilerde yüksek miktarlarda birikmesi neticesinde ise toksik etki gösterir. Ayrıca bitki fizyolojik sistemini bozarak, besin maddesi alınımını, protein sentezini, membran dengesini ve solunumu olumsuz yönde etkiler. Kloroplastın yapısına sızarak bu mekanizmanın bozulmasına sebep olan bakır, klorofil miktarını düşürür. Bakır zehirlenmesi neticesinde, bitkinin kökleri niteliklerini yitirir ve bundan dolayı da bitki-su dengesi bozulur (Braz 2005).

Çinko; mikro besin olmasının yanı sıra yüksek miktarlarda bitkilerde büyümenin gecikmesine ve bitkinin daha erken yaşlanmasına sebep olmaktadır. Bitkilerde yaşanan çinko toksisitesinde; klorofil sentezinin negatif etkilenmesi, sürgün kısımların gelişiminde azalma ve köklerde mitoz bölünmenin engellenmesinden kaynaklanan, kök ve gövde gelişiminin azalması gibi sorunlar oluşmaktadır (El-Ghamery *et al.* 2003).

Demir; fotosentez için önemli olan, temel bir elementtir. Bitkilerde klorofil pigmentlerinin sentezinden sorumlu olan demirin eksikliği, fotosentetik mekanizmada duraksamalara neden olur ve bitki yeterince beslenemez. Bitkilerde, sınır dozlarını aşan demir elementinin varlığı ancak bitkilerin toprak pH'ını azaltan, köklerdeki salgılar neticesinde demir alımının artmasıyla gerçekleşir ki bu durum toksisiteye neden olmaktadır. Toksik etkisi gösteren demir, bitkinin yapraklarında yanıklıklara, kök ve gövdede gelişim bozukluklarına sebep olur. Ayrıca demir toksisitesi neticesinde bitkilerde, protein sentezi ve aminoasit bağlanması negatif yönde etkilenmektedir (Pak 2011).

Mangan; Enzimlerin aktivasyonu bakımından hayati öneme sahip olan Mn elementi fotosentezde suyun parçalanmasında önemli bir rol oynamakta ve böylece çimlenme ve tohumun olgunlaşma süresinin hızlanmasını sağlar. Mn elementinin eksikliğinde kloroplast oluşumu bozularak, hücreler büzüşmekte ve sonuç olarak genç yapraklarda sarı noktalar halinde lekeler oluşmaktadır. Mn miktarının toprak ve bitkide üst sınır değerlerini aşması ise toksik etkiye neden olarak bitkide, demir toksisitesinde meydana gelen olumsuzluklara benzer durumlar görülür. Bitkinin yapraklarında; lekeler, yanıklıklar, şekilsel bozukluklar ve buruşukluklara sebep olur. Ayrıca zamanla yapraklarda oluşan mantarlaşmalar, mangan toksisitesinin görünen en bariz özellikleridir. Artan mangan miktarının, azot alımını engellediği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, toprakta var olan yüksek mangan dozunun, azot bakterilerinin faaliyetini indirmesidir (Kacar ve Katkat 2007).

Kurşun; bitki bünyesinde yüksek dozlarda bulunması halinde; bitki biyokütlesinde, yaprak sayısında, gövde boyunda ve protein mevcudiyetinde azalmalar görülmektedir. Bitkilerde kurşun toksisitesi, yaprak alanını, hücre çeperlerinin stabilitesini, hücre turgorunu ve stomaların döngüsünü olumsuz açıdan etkiler. Bu etkiler, bitkinin fotosentez sistemini, besin ve su alımını azaltır. Yeterli miktarda su alamayan ve beslenemeyen bitkide, gelişim bozuklukları baş gösterir (Hussain *et al.* 2013).

Kadmiyum; bitki bünyesine geçmesi ile karbonhidrat ve azot metabolizmasını değiştirerek enzim aktivitesini engeller, stomaların kapanmasına sebep olarak transpirasyonla su kaybına neden olur. Kadmiyum dozunun artışıyla strese giren bitkilerde, nitrat ve potasyum alımı azalmaktadır (Guo *et al.* 2008).

Krom; bitkilerde, stresten kaçma ve savunma amacıyla üretilen reaktif oksijen türleri, DNA'nın oksidatif olarak zarar görmesine neden olur. Ayrıca organlarına, belli bir miktarın üzerinde krom alan bitkilerde, büyüme ve gelişmenin engellenmesi, yapı ve organlarda değişiklikler, membran bozulmaları, kökler vasıtasıyla besin maddesi ve su temin

mekanizmasının blokajı, fotosentez pigmentlerinin deformasyonu ve enzim aktivitesinde anormallikler gözlenmektedir (Ali *et al.* 2011).

Nikel miktarının artışı; bitkiye toksik etki göstererek, bitkinin fizyolojisini ve biyokimyasal süreçlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca yağ metabolizmasının engellenmesi, besin yetersizliği ve beslenme bozuklukları, klorofil sentezinin ve total pigmentlerin, karotenoidlerin, klorofil a ve klorofil b'nin azalması nikel toksisitesinin önemli göstergeleridir (Zengin ve Munzuroğlu 2005).

Evsel atık çamurlar, ağır metal içeriklerinden dolayı toprağa verilerek bertaraf edilirken dikkat edilmelidir. Uygulanan miktar, topraktaki ağır metal sınır değerini aşmamalı, toksik etki değeri aşıldığı durumda, bu metallerin ekosistemin birer parçası olarak çevredeki her ögeye vereceği zararlı etkilerinin katlanarak artacağı unutulmamalıdır.

Atık Çamurun Toprakta Kullanımı

Toprak, temel materyal olan kayaçların ve organik atıkların uzun bir sürede birçok fiziksel- kimyasal- biyolojik etkenler sayesinde parçalanarak ayrışması neticesinde ortaya çıkan ve dinamikleri süregelen doğal bir varlıktır. Toprak; bütün canlıları üzerinde barındıran ayrıca bitki, hayvan ve insanların hayatlarını devam ettirebilecekleri tek yerdir (Esen 2019).

Geçmişten bugüne süregelen çevre kirliliği sorunu; içerisinde bulunduğumuz yüzyılın başlangıcından bu yana gelişmiş ve gelişmekte olan toplumlarda 'toprak-su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve yönetimi' gibi ulusal ve uluslararası çevrenin yönetimine yön veren yepyeni kavramların oluşmasına vesile olmuştur. Toprağın sürdürülebilir olarak kullanımı, tarım ve doğal alanları oluşturan toprak parçasının sahip olduğu özelliklerde, herhangi bir eksilme ya da değer kaybı olmaksızın uzun bir süreçte (geleceğe yönelik) kullanılması olarak tanımlanabilir. Bahsedilen şartları sağlamak sebebiyle, var olan uygulamalar ve alınan önemlerin tamamı ise 'sürdürülebilir toprak yönetimi' diye adlandırılır (Karaca ve Can 2012).

Çevrenin korunması bakımından, atıkların sürdürülebilir olarak çevreyle uyumlu bir biçime getirilebilmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple atıkların başka amaçlarla kullanılması esnasında, farklı kirliliklere ve sorunlara yol açmaması gerekmektedir (Arcak vd 2000).

Ülkemizde ve birçok ülkede, atık suların arıtılmadan doğaya bırakılması, yasalar ve yönetmeliklerce kısıtlanmıştır. Bu sebeple, AAT'lerin kurulması mecburi hale gelmiştir. Atıksuların arıtımı ile beraber, tesisin son ürünü olarak açığa çıkan arıtma çamurlarının miktarları da, arıtma tesislerine paralel olarak, her geçen gün artmaktadır. AAT'lerin yan ürünü

olan arıtma çamuru, artan hacmi ve etkileri nedeniyle, önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir (Oden vd 2019).

AAT proseslerinde, mikrobiyal besin zincirinin son ürünü olan arıtma çamuru, çevresel risk oluşturan atık maddeler arasındadır. Arıtma çamurunun ikincil kirletici olması, bu atığın işlem gördükten sonra uygun metotlarla bertaraf edilmesini veya uzaklaştırılmasını zorunlu hale getirmektedir. Atık çamurun bertarafı için birçok yöntem bulunmakla beraber son zamanlarda bu çamurların, sürdürülebilir bir şekilde bertarafını hedef alan yaklaşımların hem ekolojik hem de ekonomik yönden çekici olduğu gözlenmektedir. Güncel yaklaşım çerçevesinde atık çamurlar, atık bir malzeme olarak düşünülmemekle beraber, geri dönüşümü veya yeniden kullanım imkanı olan bir kaynak niteliğinde değerlendirilmektedirler (Topaç ve Uçaroğlu 2020).

Çevre dostu arıtma çamuru bertaraf yöntemleri, çok maliyetli ve zaman alıcıdır. Aynı zamanda uzman bilgisi gerektirir. Atık çamurun diğer bertaraf yöntemlerine kıyasla arazi uygulamasına yönelik kullanımı, son zamanlarda çok yaygındır. Çünkü atık çamur, bitki büyümesi için yüksek miktarda organik madde ve besin maddeleri (N, K, P) içerir ve bu içerik dolayısıyla uygulanan arazide bitki verimini artırmaktadır (Nahar and Hossen 2020).

Atık çamurlar, neredeyse %50-70 miktarında organik madde ve bitkinin gereksinim duyduğu besin içeriklerinden dolayı, son zamanlarda önemli boyutlarda, toprak organik maddesi ve organik gübre kaynağı olarak görülmektedirler. Bu durum atık çamurun, toprağa verilerek bertaraf edilmesi için teşvik edici bir unsur oluşturmaktadır (Topcuoğlu vd 2003).

Atık çamur, güneş ışığı yardımıyla bünyesinde var olan patojen mikroorganizmaların birçoğundan arınarak; tarım alanları, kullanılamayacak durumdaki bozulmuş alanların ıslahı ve yapay orman alanlarını iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Alyanak 2014).

Tarım alanları, bozulan park-bahçeler, ormanlık alanlar ve çim alanlarda kullanılmak suretiyle bertaraf edilebilen arıtma çamurları; son zamanlarda şehir peyzajı ve arazi rekreasyonu, fidancılık gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır (Tolay vd 2000; Yıldız vd 2009; Ünal vd 2011; Yalçın vd 2011).

Arıtma çamurunun içeriği her ne kadar bölgeden bölgeye, o bölgenin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterse dahi, temel olarak organik madde, azot ve fosforca zengin mineraller barındırır. Bununla beraber içeriğinde bulunabilecek patojenler toksik bileşenler ve ağır metaller sebebiyle, atık çamurun toprağa kontrollü bir biçimde verilebilmesi birçok araştırmacı tarafından da bildirilmektedir (Anaç vd 1993; Kyle and McClintock 1995; Bozkurt vd 2000; Arcak vd 2000).

Aritma çamurlarının toprakta oluşturduğu olumlu sonuçlarının yanında, çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen neticelerinin de var olması, atık çamurun tarım alanlarında kontrolsüz bir halde kullanılmasını engellemektedir. En baştaki olumsuz etkileri; mangan, krom, nikel, kobalt, bakır, kurşun, çinko, kadmiyum vb. ağır metaller, patojenik mikroorganizmalar, tuzlar ve toksik organik kimyasallar sayılabilir. Diğer yandan arıtma çamurlarının sürekli ya da düzenli olarak homojen bir şekilde elde edilememesi nedeniyle, doğrudan kullanılması ya da ticari madde haline dönüştürülerek bir ürün oluşturulması engellenmektedir. Kısacası farklı tesislerden elde edilen çamurların özelliklerinin farklı olması, çamurun verime olan katkısını ve kullanım imkanlarını da değiştirebilir. Bu nedenle atık çamurları toprak ortamına vermeden önce muhakkak olarak analiz edilerek içerik özellikleri tespit edilmeli ve bu doğrultuda farklı özellikteki arıtma çamurları, farklı topraklara uygulanarak en uygun dozlarının tespit edilmesi gerekmektedir (Çakır ve Çimrin 2018). Ayrıca organik madde muhteviyatı bakımından zengin olan arıtma çamurunun toprak ortamına verildiğinde hızlanan mikrobiyolojik aktiviteden dolayı kök kısmının pH'sını azaltarak ortamdaki ağır metallerin çözünürlüğünü de artırmaktadır. Fakat pH' ısı yüksek ve kireç oranı fazla olan ülkemizin topraklarında bu durum daha da ümit vericidir (Çimrin vd 2000).

Atık çamurun toksik ve kanserojen kimyasallar açısından uygunluğu, tarım alanlarında kullanılmasına yönelik bilinçli kararların alınması için oldukça önemlidir (Yakamercan vd 2021).

Ülkemizde ve AB üyesi ülkelerde çamur içeriğinde ve toprakta kabul edilebilir kriterler belirlenmiş olup bu anlamda yasal çerçeve oluşturulmuştur. Atık çamurun içeriğinde bulunan en temel ağır metaller; Cd, Zn ,Ni ,Cr, Fe, Cu, Hg'dir (Anonim 2005).

Tablo 3. Stabilize Arıtma Çamurunun, Toprakta Kullanılabileceği, Maksimum Ağır Metal İçerikleri (Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik EK I-B 2010)

Ağır Metal	Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (sınır değerler mg/kg)	Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (sınır değerler mg/kg)
Cd (Kadmiyum)	40	10
Cr (Krom)	1200	1000
Cu (Bakır)	1750	1000
Pb (Kurşun)	1200	280
Ni (Nikel)	400	300
Zn (Çinko)	4000	2500

Tablo 3’de atık çamurun, toprakta olması gereken sınır değerleri verilmiştir. Bu sınırlama ile atık çamurun içeriğindeki ağır metaller nedeniyle, toprağa verilmesi konusunda dikkatli olunması gerekliliği gündeme gelmiştir (Eid *et al.* 2017).

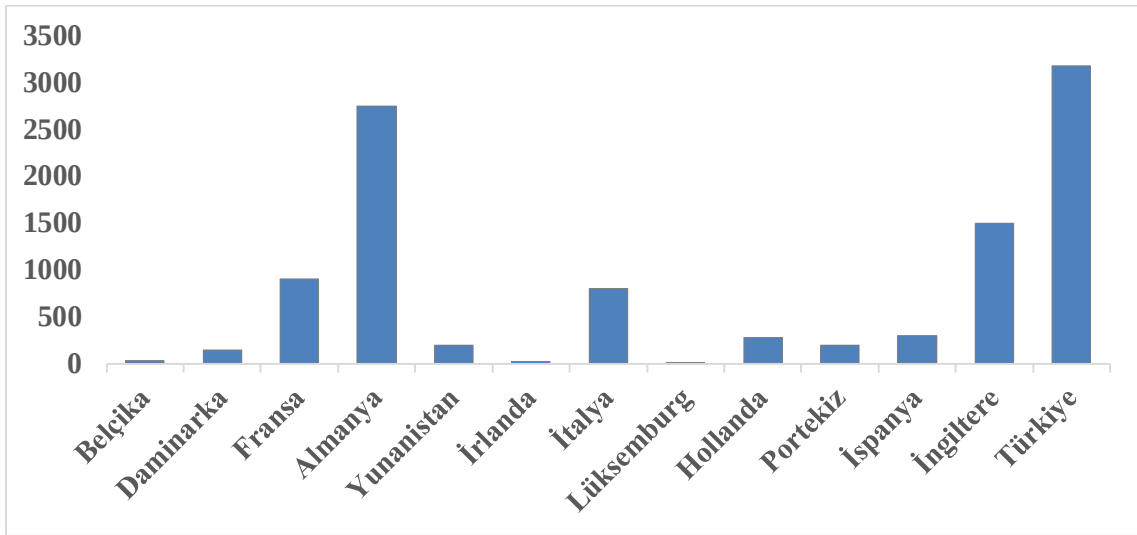
Aritma çamurların, yasal olarak sınır değerlerine uygunluk tespitinden sonra bu çamur, verimsiz topraklar ve bitki yetiştiriciliği için organik gübre olarak kullanılmaktadır. Bu konuyla alakalı gerçekleştirilen birçok çalışma ile arıtma çamurlarının kullanımının doğaya olan yükünün azaltılmasında ayrıca bir mali fayda sağlaması hususunda ortak bir fikir bulunmaktadır (Demirkan 2018).

Atık Çamurun Tarım Alanlarında Kullanımı

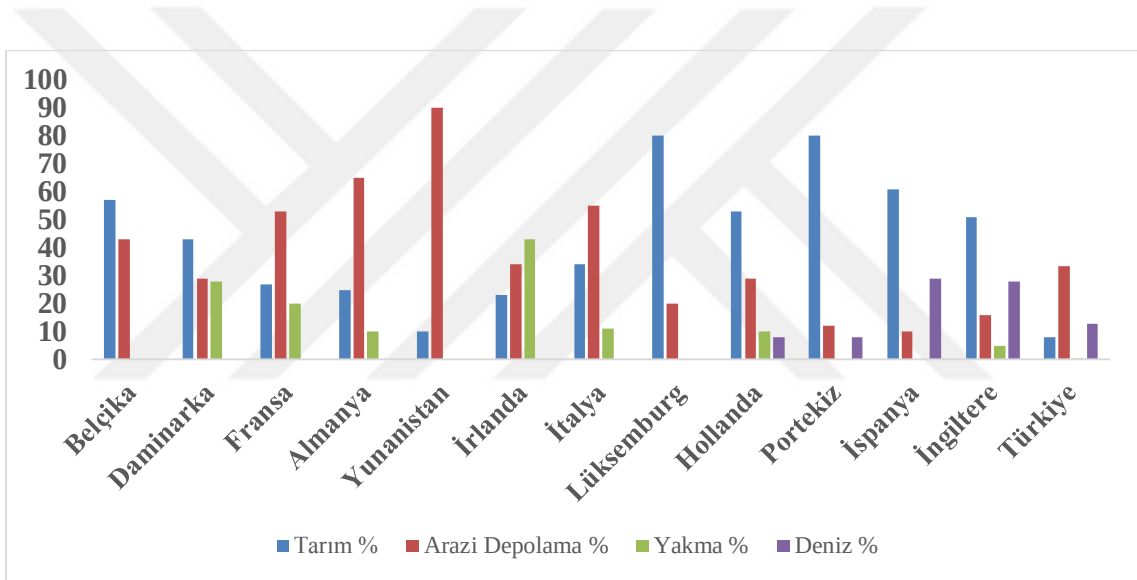
Tarım; nüfusun beslenmesi amacıyla gereksinim duyulan gıdaları üreten, sanayi sektörü için hammadde girdisi sağlayan, insanlar için istihdam oluşturan, ülke ihracatına katkıda bulunan ve milli gelirin mühim kısmını oluşturan bir sektördür (Karakuş vd 2019).

Ülkemiz mevsim çeşitliliği ve coğrafi yapısı sebebiyle, tarımsal faaliyetler bakımından önemli zenginlikleri temelinde barındırmaktadır. Yetiştirilen ürün türü ve miktarı bakımından dünya sıralamasında önemli bir yere sahip olan ülkemizin ekonomik anlamda en önemli paya sahip sektörü tarımdır.

Türkiye genelindeki tarımsal alanların %99’u organik madde içeriği açısından yetersizdir. Tarım topraklarındaki bu besin maddesi yetersizliği, toprak verimliliğinin sürdürülebilirliği için risk teşkil eden önemli bir faktördür. Toprağın verimliliği, toprağın barındırdığı bitkiler için elverişli olan besinlerin miktarını ifade etmektedir. Besin elementleri miktarı ve niteliği bakımından zengin olan biyolojik atık çamurların, agronomik oranlarda gübre olarak tarım alanlarına uygulanması, bu sorunun çözülmesi açısından son derece mühimdir (Demir ve Topaç 2019). Kentsel atık çamurun içeriğinde, çoğu insan dışkısından kaynaklanan P ve N gibi tarımsal kullanım için birçok besin maddesi bulunmaktadır (Lin *et al.* 2021). Bu nutrientlerden; fosfor, azot ve potasyum arıtma çamurunun gübre maksatlı kullanılmasını sağlayan, temel nutrientlerdir (Soumare vd 2003). Ayrıca atık çamurların toprağa uygulanması, organik madde içeriğinde zenginleşmenin yanı sıra, toprağın emme kapasitesinde ve fiziksel özelliklerinde genel olarak iyileştirici bir etkiye sahiptir.



Şekil 4. Ülkelerdeki yıllık ortalama atık çamur miktarları (10³ kuru t/yıl) (Günay ve Dursun 2018)



Şekil 5. AB ve Türkiye'de kullanılan ve deşarj edilen atık çamuru miktarları (Günay ve Dursun 2018)

Avrupa Birliği, atık çamurların tarım arazilerinde kullanılmasını desteklemektedir. AB uyum süreci; atıkların çevresel açıdan olumsuz etkilerinin, en az olduğu bir bertaraf yöntemi kullanılarak uzaklaştırılmasını öngörmektedir. Bunun yanı sıra, arıtma çamurunun bertaraf maliyetleri de göz önüne alındığında, en uygun geri kazanım metotlarından birinin atık çamurun tarım alanlarında kullanılması yönünde olduğu kanısı kuvvetlenmektedir. Avrupa Birliğinde ve Türkiye’de kullanılan ve deşarj edilen atık çamur miktarları Şekil 5’de gösterildiği gibidir. Şekilde, AB ülkelerinin, atık çamuru tarım alanlarında kullanım yüzdelerinin yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye’de bu oran %8.2 civarlarında olup yükselen ve ivmelenen bir değerdir.

AAT’lerin önemli bir çıktısı olan arıtma çamurlarının, tarımsal açıdan döngüsel ekonomiye kazandırılması düşünüldüğünde, bu çamurların öncelikli olarak; bitki besin

elementi içeriği, pH tuzluluk, ve ağır metal içerikleri bakımından detaylı olarak araştırmalarının yapılması önem arz eder. Ayrıca hem toprak yapısına hem de bitki gelişimi üzerine olan etkileri göz önünde bulundurularak toprağın biyolojik etkinliği, kimyasal ve fiziksel etkinlik sınırları önemsenmeli, bu sınırlar kesinlikle aşılmamalıdır (Aşık ve Katkat 2004). Çamurun toprak uygulamalarında, sıhhi ve epidemiyolojik güvenliği esastır ve bu nedenle biyoatıkların, besinlerin biyoyararlılığını artırmak amaçlı toprağa girmeden önce, ikincil bir kirliliğe neden olmayacakları öngörülerek, tehlikeleri azaltmayı amaçlayan teknolojilere göre belirli işlemlerden geçirilmeleri gerekmektedir (Izydorczyk *et al.* 2021; Angın 2016).

Organik gübre maksadıyla toprağa uygulanan arıtma çamurlarının, tarım alanlarında kullanımları sayesinde hem nihai olarak bertaraf edilebilecek hem de çamurun içeriğindeki temel besin elementleri, toprak ortamındaki doğal döngülerine kazandırılacaktır. Günümüzde arıtma çamurlarının tarım alanlarına verilmesi, oldukça yaygın bir uygulamadır. Arıtma çamurlarının tarıma uygun bir şekilde belirli miktar ve aralıklarla toprağa uygulanması sonucunda çiftlik gübresiyle karşılaştırıldığında, azot ve fosfor içeriği bakımından tarımsal anlamda değerli olduğu fakat potasyum değerinin çiftlik gübresine göre genellikle daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir (Uzun ve Bilgili 2011).

Arıtma çamurları; azot, fosfor, organik madde ve esansiyel eser elementler gibi değerli besinlerin yanı sıra, toprak-bitki sistemine zarar veren ve başta ağır metaller olmak üzere çeşitli toksin maddeleri de içerir. Atık çamurların bu içeriği nedeniyle, araziye uygulanmasından kaynaklanan avantajlarının yanında dezavantajlarının varlığı, çevre otoritelerinin dikkatini çeken önemli bir konudur (Wang *et al.* 2008).

Ağır metallerin oluşturduğu kirlilik, organik kirleticilerin aksine; kalıcı, örtülü ve aynı zamanda geri döndürülemez özellikte olup, sadece atmosferin, su kütlelerinin ve toprağın kalitesini bozmakla kalmaz, aynı zamanda besin zinciri yoluyla insanların ve diğer canlıların sağlığını tehdit eder (Turksoy vd 2021). Ağır metaller, aynı zamanda organik kirletici maddelerin biyo-bozunurluğuna etki ederek, onları daha az parçalanabilir bir şekle dönüştürür ve böylece çevreye olumsuz etkilerinin daha da artmasına neden olur. Ağır metaller, biyosferin tamamı için genel bir risk unsurudur ve toprağın, renk pH, gözeneklilik ve yapısını değiştirerek toprağın kalitesini olumsuz yönde etkiler (Özyiğit 2021).

Çevrede kalıcı olmaları ve ciddi sağlık sonuçları için belgelenmiş potansiyelleri nedeniyle, endişeler ortaya koyan ve insan metabolizmasında olumsuz etkilere sahip olan ağır metallerin, (bakır (Cu) kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg), çinko (Zn) , arsenik (As), , nikel (Ni), ve krom (Cr)) bütün ekosisteme önemli zararları vardır (Şimşek vd 2021).

Evsel arıtım çamurunun kışlık arpa bitkisinde azot kaynağı maksadıyla kullanımını konu alan bir çalışmada, arıtma çamuru ile inorganik azotlu gübre karşılaştırılmış ve uygulamaların hepsinde, bitki numunelerinde kontrole kıyasla azot miktarı ve azot alınımının arttığı, bu artışın atık çamur uygulanan bitkilerde daha fazla olduğu ayrıca arıtma çamuru uygulanan bitkilerde P, Mn, Fe ve Cu miktarlarının arttığı ancak toprakta sadece Cu ve Zn miktarlarında artış olduğunu ve toksik seviyenin altında kaldığı belirtilmiştir (Bozkurt vd 2000).

Singh and Agrawal (2008) yaptıkları bir çalışmada atık çamurunu artan dozlarda (0- % 20 ve % 40) saksı toprağına ilave ederek *Beta vulgaris* (pancar) türüne etkilerini araştırmışlardır. Atık çamur denemelerinde, toprak ortamının pH'nın kontrole kıyasla azaldığı, elektriksel iletkenlik, toplam N, organik C, alınabilir P ve değişebilir N, K ve Ca seviyelerinin ise artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca atık çamuru uygulamalarının topraktaki Cu, Cr, Pb, Cd, Ni, Zn miktarında farklı bir artışa sebep olduğunu bildirmişlerdir.

Atık çamurun, sebze ve meyveler üzerindeki etkisine ilişkin değerlendirmeleri ele alan bir çalışmada, sterilize edilmiş iki tür atık çamurunun, serada yetiştirilen biber bitkisinin (*Capsicum annuum* L. cv.Piquillo) büyümesi, verimi ve meyve kalitesi üzerine etkisi araştırılmıştır. Farklı üç doz (%15, %30 ve %45) uygulanan denemelerde, çamurun; yaprak, sürgün ve kök kuru maddesinin yanı sıra meyve verimini de artırdığı fakat meyve büyüklüğü (meyve başına kuru madde ve çap) üzerinde herhangi bir etki oluşturmadığı gözlenmiştir. Ayrıca meyvelerdeki Zn ve Cu konsantrasyonları arttığı gözlenmiştir (Pascual *et al.* 2010).

Pirinç yetiştirmek için evsel atık çamurun, farklı miktarlarda (3, 4.5, 6, 9, 12 kg/m²) araziye uygulandığı bir çalışmada, çamurun topraktaki fiziko-kimyasal özelliklerini iyileştirdiği fakat topraktaki ağır metallerin miktarını arttırdığı ve sonuç olarak bitkinin organlarında, yüksek oranlarda ağır metal birikimi olduğu tespit edilmiştir. Hindistan'da yapılan bu çalışmada artan oranlarda uygulanan atık çamur, kök uzunluğunu azalırken; sürgün uzunluğu, yaprak sayısı, yaprak alanı ve bitkinin toplam biyokütlesinde önemli ölçüde artışa neden olmuştur. Pirinç verimi, kontrol toprakta yetiştirilenlerle karşılaştırıldığında 3, 4,5, 6, 9 ve 12 kg/m² çamur uygulamaları sırasıyla; %60, %111, %125, %134 ve %137 oranında artmıştır. Artan atık çamur dozları pirinç verimini artırmıştır. Fakat, atık çamur oranının 4,5 kg/m²'nin üzerinde olması pirinç tanelerindeki Ni ve Cd konsantrasyonlarının 4,5 kg/m²'nin üzerindeki dozlarında insan tüketimine ilişkin Hindistan'ın güvenli sınırlarının (1,5 mg/kg) üzerinde bulunması nedeniyle besin zinciri kirlenmesi riskine neden olabileceği öngörülmüştür. 6 kg/m² üzerinde atık çamur uygulamasının Pb, Ni, Cu'nun izin verilen düzeylerinden daha yüksek konsantrasyonlara ulaştığından dolayı kullanılamayacağı tespit edilmiştir. Sonuç olarak atık

çamurun pirinç üretiminde oldukça dikkatli ve düşük dozlarda uygulanabilirliği ortaya koyulmuştur (Singh and Agrawal 2010).

Son yıllarda yapılan bir çalışmada, artan arıtma çamuru oranlarının (%0, %2,5, %5, %7,5, %10) uygulamaları sonrası mısır bitkisinin gelişimine ilişkin; kök ve kök üstü kısımları ile bitkinin boy ve çapında gelişen değişimler incelenmiştir. Uygulamalar mısırın, yaş kök- kuru kök ve analizleri, bitki boyu ve bitki çapını kontrol numuneye göre bütün uygulamalarda istatistiksel anlamda önemli düzeyde arttırdığını göstermiştir. Hatay şehri İskenderun ilçesindeki biyolojik arıtım tesisinden taze olarak temin edilen arıtma çamurunun, değişen oranlarda toprak ortamına uygulaması ile her ne kadar bazı bitki ve toprak niteliklerine olumlu etkileri olsa da, bu çamurda bulunan yüksek miktarda tuz sebebiyle, bu şekliyle tarımsal topraklarda kullanılmasının uygun olmadığı tespit edilmiştir (Çakır ve Çimrin 2020).

Yine güncel bir çalışmada, stabilize hale getirilmiş arıtma çamuru kurutularak, değişen oranlarda (%0, %1, %2, %3, %4, %5 ve kimyasal gübre uygulaması) domates bitkisinin gelişimine ve nutrient maddelerin alımına olan etkisinin tespit edilmesi hedeflenmiştir. En yüksek verim, en fazla atık çamur uygulamasında (%5) bulunmuştur. %5 arıtma çamurunun uygulanması domates bitkisinin kök, gövde ve yeşil aksam kuru ağırlığında kör numuneye kıyasla sırayla yaklaşık olarak %187- %254 ve %132'lik artış olduğu belirlenmiştir. Kimyasal gübre uygulaması neticesinde yetiştirilen bitkilerin verimi yaklaşık olarak %1'lik arıtma çamuru uygulamasına yakındır (Öztürk vd 2020).

Güncel bir çalışmada saksı ortamında atık çamur ile farklı bir toprak türünün değişik oranlarda havuç bitkisinin büyüme ortamına verilerek bitkinin gelişimi ve ağır metal alımı gözlenmiştir. Sonuçlar, arıtma çamuru uygulamasının, toprak pH'ını, organik maddeyi (OM), elektriksel iletkenliği (EC), potasyum (K) ve mevcut fosforu (P) önemli ölçüde etkilemiştir. Arıtma çamuru uygulaması nedeniyle toprakta ve bitkide; kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), krom (Cr) ve nikel (Ni) gibi ağır metallerin içeriği artmıştır. Havuç gelişimi arıtma çamuru uygulaması ile olumlu etkilenmiştir. %30 atık çamur uygulamasında maksimum taze ağırlık (66.3 g/bitki) ve %50 atık çamur uygulamasında maksimum kuru ağırlık (5.61 g/bitki) olarak kaydedilmiştir (Nahar and Hossen 2020).

Atık çamur uygulamasının, belirli oranlarda domates bitkisinin yaşam ortamına (saksı) verildiği bir çalışmada; meyve kütlesi, tüm uygulamalara kıyasla %20 oranında çamur uygulanmış saksılarda, en yüksek seviyede tespit edilmiştir. Domates meyvesinin verimi sırayla; kontrol<%10<%30<%20 olarak belirlenmiştir. Kontrol ve %10 oranında çamur olan saksılarda yeterli besin maddesinin bulunmayışı domatesin gelişimini geriletirken, %30 oranında çamur uygulanmış saksıda, oranın yükselmesiyle artış gösteren toksisite domatesin

gelişimini baskılamıştır. %20 oranında çamur uygulanmış saksının gelişimi optimum seyretmiştir (Elmi *et al.* 2020).

Romanya’da yapılan bir çalışmada; arıtma çamurunun, soya fasulyesi ve buğdayın gelişimi üzerine etkileri incelenmiştir. Ekim yapılan tarım topraklarına 15 t/ha ve 25 t/ha arıtma çamuru dozları uygulanan çalışmada, soya fasulyesi ve buğday mahsullerinin kökleri, gövdeleri ve tanelerindeki azot, amonyum, potasyum ve çinko gibi bitkiler için önemli besin maddeleri ve organik madde içeriğinin makul ölçülerde arttığı, ayrıca çamurun toprağın verimliliğini, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini geliştirdiği bariz bir şekilde ortaya koyulmuştur. Arıtma çamurunun içeriğindeki ağır metal konsantrasyonunun ise izin verilen maksimum standart limitleri aşmadığı kanıtlanmıştır (Marin and Rusănescu 2023).

Evsel kaynaklı atık çamurun bitkilere, tarım alanlarına ve zirai uygulamalara, içeriği dolayısıyla fayda sağladığı çok açıktır. Literatür çalışmalar da atık çamurun, bitkiye gübre etkisi sağladığını kanıtlamıştır. Fakat atık çamurun içeriğindeki kimyasallar, ağır metaller ve patojen mikroorganizmalar nedeniyle, uygulanan doz çok önemlidir. Atık çamur dozu, gereğinden az uygulandığında bitkiye herhangi bir fayda sağlamayacağı gibi gereğinden fazla uygulandığında ise toprağa ve bitkiye zararlı etkiler yaratacağı çalışmalarla sabittir. Bahsedilen çalışmalar mikro düzeyde atık çamurun, optimum dozunu belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda tespit edilen atık çamurun kullanılabilir optimum dozu, makro düzeyde tarımsal ve zirai alanlar için güvenle uygulanabilmektedir (Mustafaoğlu vd 2022).

Atık Çamurun Bitkilerin Yetiştirilmesinde Kullanımı

Atık çamurun otsu bitkilerin yetiştirilmesinde kullanımı

Otsu bitkilerin ve özellikle de süs bitkilerinin yetiştiriciliğinde, atık çamurlardan yararlanma fırsatının gün be gün giderek arttığı bir gerçektir. Arıtma çamurunun bitkilerde, potansiyel bir risk oluşturmaması, bazı otsu (çiçekli, çiçeksiz) ve süs bitkilerinde tercih edilmeleri, ekonomik ve mantıklı bir tercih olarak görülmektedir. Bunun yanı sıra; bu durum, arıtma çamurunun tarımsal ürünler için zararlı olabilecek bileşenlerine karşı otsu bitki türlerinin arıtma çamuruna daha toleranslı olduğunu göstermektedir. Bu durum atık çamurun bitkilerde daha yaygın kullanılabilirliğine zemin hazırlamaktadır (Jones *et al.* 1979).

Arıtma çamurlarının, canlılar için risk teşkil eden ağır metal içeriği sebebiyle; otsu bitkilerin yetiştirilmesinde kullanımı, zirai ürün yetiştiriciliğinde kullanımı kadar risk oluşturmamaktadır. Buna rağmen, bitkilerde atık çamurun gübre maksatlı kullanılması durumunda, her türlü bitkisel ürünlerde ağır metalden kaynaklanabilecek risk faktörlerinin de unutulmaması gerekmektedir (Chaney 1990).

Atık çamurunun otsu bitkilere uygulanmasına dair literatürde çok fazla araştırma yapılmış ve her bir araştırmada farklı kazanımlar edinilmiştir. Bu çalışmalara değinecek olursak;

Diplotaxiserucoides üretiminde, atık çamur ve mineral gübre uygulamasının bitkinin gelişimine yönelik etkilerinin araştırıldığı bir denemede, atık çamur uygulanan bitkilerin biyokütlelerinde artış olduğunu ve bitkinin çok daha büyük kök sistemi oluşturduğunu ancak çiçeklenmenin geciktiği tespit edilmiştir (Korboulewsky *et al.* 2002).

Yapılan bir çalışmada; *Festuca rubra* var. *rubra* (%30), *Lolium perenne* (%40), *Festuca rubra* var. *comutata* (% 15), *Poa pratensis* (%15) birleşimleriyle oluşturulan karışımlar bitkilerinin ekildiği çim alanlarına farklı dozlarda verilmiştir (4, 8, 12 ton kuru madde/dekar). 2 yıllık bir süreçte, denemeler sonucunda elde edilen veriler, atık çamurun; çim alanının rengini, bitki verimliliği (yaş ağırlık) olumlu anlamda değiştirdiği yönündedir. Atık çamurun çiftlik gübresine oranla, bitkilerde; bitki yaş ağırlığını ortalama 2/2.6 kat arttırdığı belirtilmiştir (Küçükhemek vd 2005).

Arıtma çamurlarının *Poa annua* ve *Zoysia japonica* çim türlerinde; çim alan kalitesi, bitkinin büyümesi ve gelişmesi üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada; bitkilere, değişik dozlarda (0, 15, 30, 60, 120 ve 150 ton/ha) çamur uygulanmıştır. Denemeler neticesinde, topraktaki besin değerlerinde (mineral içerik ve organik madde) artış olduğu ve çim bitkilerinde ise bu artışa paralel olarak, biyokütlesel artış olduğu ifade edilmiştir. Çalışmanın sonunda, arıtma çamurunun topraktaki ağır metal konsantrasyonunu arttırdığı gözlenmiştir. Cu, Zn ve Pb konsantrasyonları, sınır değerleri aşmazken, Cd konsantrasyonunun sınır değerlerin üzerinde olması; bu çamurun tarım alanlarında kullanılmasının uygun olmadığını ancak orman ve çimenlik alanlarda kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Wang *et al.* 2008).

Yapılan bir çalışmada; eşit oranlarda arıtma çamuru eklenmesiyle (1:1) değişik yaşam ortamlarında [çam kabuğu (O₁)-cüruf (O₂)-torf (O₃)-çakıl (O₄) ve toprak (O₅)] çiçek üretiminin yapıldığı bu çalışmada arıtma çamurunun, '*Limoniumsnuatum Compindi White*' türünde bitki verimi ve gelişimine katkıları araştırılmıştır. Yetiştirme ortamlarına ilave edilen arıtma çamuru; bitki başına düşen kök uzunlukları ve çiçek sayısı üzerinde %95; yaprak sayısı, çiçek sapı uzunluğu bitki üst aksamın yaş ağırlığı üzerinde ise %99 oranında önemli bir değişiklik yaratmıştır. Bitkinin gelişimi, verimi ve çiçekteki kalite gibi sonuçlar için yaşam ortamlarından bir genel çıkarım yapılırsa; verim bakımından torfa arıtma çamuru eklenmesi ile oluşturulan ortamda (O₃+AÇ); çiçek kalınlığı ve sapı uzunluğu parametrelerinde, cürufa arıtma çamuru eklenmesi ile oluşturulan ortamda (O₂+AÇ); bitki üst aksam yaş – kuru ağırlıklarında ve yaprak sayısı kök yaş - kuru ağırlıklarında ve kök uzunluğu gibi parametrelerinde, en yüksek bulgular

çam kabuğuna arıtma çamurunun ilave edildiği ortamda ($O_1+AÇ$) alınırken, gözlenen tüm parametrelere göre en düşük verimin ise beklendiği gibi toprağa arıtma çamuru eklenerek oluşturulan ortamda ($O_5+AÇ$) ulaşılmıştır (Akat vd 2015).

Akın (2018) Bir araştırmada; süs lahanası bitkisinin arıtma çamurunda yetiştirme olanaklarını tespit etmek amacıyla, açık alanda 2015 yılı Kasım ile Şubat 2016 ayları arasında yapılmıştır. Yetiştirme ortamı olarak; %0 arıtma çamuru + %100 toprak ortamı karışımı (S_1), %25 arıtma çamuru + %75 toprak ortamı karışımı (S_2), %50 arıtma çamuru + %50 toprak ortamı karışımı (S_3), %75 arıtma çamuru + %25 toprak ortamı karışımı (S_4) ve %100 arıtma çamuru + %0 toprak ortamı karışımı (S_5) oranları uygulanmış ve bitkiler saksıda açık bir alanda yetiştirilmiştir. Denemelerde, pH, EC, kök uzunluğu, kök ağırlığı bitki çapı, bitki boyu, gövde çapı baş ağırlığı, yaprak adedi ve toplam yaprak adedi gibi parametreler araştırılmıştır. En fazla toplam yaprak adedi ve baş ağırlığı S_2 (40.42 adet, 103.99 g) ve S_5 (38.42 adet, 90.53 g) oranları ile oluşturulan yaşam ortamlarından elde edilmiştir.

Lolium perenne var. ovation (İngiliz çimi) türüne arıtma çamurunun 3-6-9 ve 12 kg/da dozlarında uygulandığı başka bir çalışmada; kontrol olarak standart bir çiftlik gübresi kullanılmıştır. Denemelerde, ilk dönemlerde hesaplanan; yeşil ot verimi, bitki boyu ve bitkiyle kaplanan alan değerleri düşük bulunurken, denemelerin süregelen daha ileriki dönemlerinde, atık çamurun yüksek orandaki dozlarının uygulandığı alanlarda, daha yüksek değerler tespit edilmiştir. Renk ve çim kalitesi parametrelerinin ise, atık su arıtma çamurunun yüksek doz uygulamalarında olumlu sonuçlar vererek en yüksek değerlere ulaştığı, ayrıca atık su arıtma çamurunun, yaz aylarında diğer aylara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği ortaya koyulmuştur (Çelebi vd 2010).

Arıtma çamurunun bazı süs bitkisi çeşitlerinde (*Prosopis juliflora*, *Dendrocalamus strictus*, *Populus alba*, *Terminalia arjuna* ve *Eucalyptus tereticornis*) büyümesine olan katkısının ve bitki bünyelerinde ağır metal biriktirebilme kapasitesinin araştırıldığı bir çalışmada, bitkilerde; büyüme performansı, gövde çapı, toplam ağırlık, ve taç alanı ölçümleri yapılmıştır. Araştırmalar neticesinde, bitki dokularında toksik kimyasalların ve ağır metallerin biriktiği gözlenmiştir. *E. tereticornis* türünde, daha yüksek Fe, Mn, Zn ve Cu metallerinin biriktiği gözlenirken, *T. arjuna* türünde ise Ni ve Cd metallerinin biriktiği görülmüştür. Çalışmadan bir yıl sonra ağır metallerin farklı oranlarda (Mn %30.95, Zn % 22.80, Cd %58.4, Pb %14.05, Ni %59.21, Fe %49.75, Cr %70.22, Cu % 20.46) yaşam ortamından uzaklaştığı görülmüştür (Shukla et al. 2011).

Kesme çiçek türü olan *Freesia spp* (Arpa Zambağı) türünün yetiştirme ortamı olan saksılara farklı dozlarda uygulanan arıtma çamuru uygulamalarında, toprakta artış gösteren

organik madde ile birlikte çiçek ve başak sapı uzunluğunda artış olduğu belirlenmiştir. *Freesia spp.* bitkisine farklı oranlarda arıtma çamuru uygulamasıyla beraber, yumruların çapında 90 t/ha, yumrulardan elde edilen yavru adedinde 90 t/ha ve bitki başına elde edilen çiçek miktarında 60 t/ha uygulamaları daha etkili bulunmuştur (Ünal vd 2011).

Çelebi vd (2011) *Festuca rubra var. rubra* türünün arıtma çamuru uygulamalarının farklı doz (0, 3, 6, 9 ve 12 t/da) kullanımlarının, çiftlik gübresiyle kıyaslandığı bir araştırmada; birinci yıl ilk dönemdeki bulgulara, yeşil ot verimi, bitki boyu, ve bitki kaplı alansal değerleri, atık çamurun yüksek oranlarının kullanıldığı uygulamalarda sonraki dönemlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çim kalitesi ve rengi gibi parametreler, çiftlik gübresi uygulamalarına göre genelde her gözlemlenen dönemde daha iyi neticeler vermiştir. Atık su arıtma çamurunun otsu bir bitki türü olan *Festuca rubra var. rubra* türünde, çim performansını artırması nedeniyle çiftlik gübresine mühim bir alternatif teşkil edebileceği öngörülmüştür.

Atık çamurun süs bitkilerine uygulanmasına örnek teşkil eden başka bir çalışmada; *Clarkia amoena* (Toprak açelyası)'nın yaşam ortamına artan dozlarda arıtma çamuru uygulanmıştır. Atıksu arıtma çamurunun uygulanmasıyla beraber bitki başına çiçek sayısı, sürgün uzunluğu %1 önemlilik düzeyinde ve kök uzunluğu %5 önemlilik düzeyinde artmıştır. Ayrıca kök uzunluğu (19,25 cm) ve sürgün uzunluğu (36,90 cm) açısından en yüksek bulgular, toprak materyali + %75 atık çamur karışımında yetişen bitkilerde gözlenirken, çiçeklenme bakımından en yüksek bulgu (253 adet/bitki) toprak materyali + %25 arıtma çamurunda yetişen bitkilerde belirlenmiştir. Çiçek sayısında 133 adet/bitki, sürgün uzunluğu 32,44 cm ve kök uzunluğu 16,25 cm değerleri ile beklendiği üzere en düşük değerler, hiç atık çamur içermeyen (kontrol) yaşam ortamında yetişen bitkilerde tespit edilmiştir (Demirkan 2015).

Güncel bir çalışmada; atık çamurun *corchorus* bitkisinin büyüme parametrelerine etkileri araştırılmış ve olumlu etkileri gözlenmiştir. Atık çamur uygulamaları süresince aynı zamanda bitki hasatından sonra topraktaki etkileri de araştırılmış ve organik madde miktarında artışın yanı sıra ph değerinde ise 8,33 'den 7,61'e kadar düşüş olduğu belirlenmiştir. Bitkilerdeki biriken toksik ve ağır metal miktarlarının ise sınır değerlerin çok altında olduğu tespit edilmesi, atık çamurun *corchorus* bitkisine, güvenle uygulanabileceğini göstermiştir (Eid et al. 2020).

Yapılan araştırmaların bir çoğunda, arıtma çamurunun otsu bitki uygulamalarının bitkiyi olumlu yönde etkilediği, ayrıca çiçekli bitkilerin çiçek sayısını arttırdığı, çiçeklenme zamanını kısalttığı tespit edilmiştir. Fakat bu uygulamalarda arıtma tesisinin türü (evsel ya da endüstriyel), uygulanacak olan atık çamurun içeriği (besin maddeleri, tuzluluk, pH, toksik etki oluşturabilecek bileşenler) ve uygulama dozu önem arz etmektedir. Bu sebeple öncelikle bu

uygulamaların mikro alanda yapılması ve doğabilecek risklerin önceden tespit edilerek daha sonra makro uygulamalara geçilmesi gerekmektedir.

Tüm bu veriler ışığında; arıtma çamurlarının, otsu bitkilerinde yetiştirme ortamına katkı veren bir unsur ve organik gübre sağlayıcı olarak, doğaya zarar vermeyecek bir biçimde, yönetmelikte belirtilen sınır değerler çerçevesinde kullanımının yaygınlaştırılması, ekolojik ve ekonomik anlamda ülkemizin yararına olacaktır. Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, atık çamurların tarım alanlarında kullanılabilirliğinin yanı sıra, buna alternatif bir bertaraf sahası olarak otsu bitkilerin yetiştiriciliğinde de kullanım olanakları bulunmaktadır. Tüm üretim sektörlerinde, ekonomik uygulamaların sürdürülebilirlik ilkesine olumlu katkısı göz önünde bulundurulursa, önemli bir çevre sorunu olan atık çamurların bertarafının faydalı bir hale getirilmesi olasıdır. Sonuç olarak; atık su arıtma çamurlarının toksik olmayan dozlarda otsu bitkilerde kullanımı, çağdaş geri dönüşüm anlayışına uygun ve ekonomik metotlardan biridir (Akat ve Yokaş 2013).

Atık Çamurun Odunsu Bitkilerin Yetiştirilmesinde Kullanımı

Bitki örtüsünün seyrek oluşu, erozyon nedeniyle üst toprağın kaybı, düşük organik madde içeriği ve zayıf hidrolojik nitelikler, arazi yapısının bozulmasına neden olur. Son yıllarda sıvı veya katı halde bulunan arıtma çamurlarının, ormanlarda ve bozulmuş arazilerde kullanılması konusu kapsamlı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, uygun miktarlarda kullanılan arıtma çamurlarının bozulmuş arazileri; fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak rehabilite edebildiği açıkça görülmektedir.

Arıtma çamuru, odunsu bitkilerin (Orman, bitki, çalılık) gelişimi için gerekli olan makro ve mikro besin elementlerini barındırmaktadır. Arıtma çamurları, gözenekli ve geçirgen toprak yüzeyi oluşumunu destekleyerek, toprağın su tutma kapasitesini artırır. Bu sayede toprağın filtreleme özelliği, katyon değişim kapasitesi artar ve muhtemel yüzeyel akışı azalır. Bunun sonucunda, kurak alanlarda sulama sıklığı ve erozyon riski azalır (Almaz 2017). Fakat arıtma çamurlarının bileşenlerinden yüzeye geçebilecek ağır metaller toprağın üst kısmına doğrudan zarar verebilmekte ve toprakta birikerek ağaçların büyüme sürecini kritik bir şekilde etkilemektedir (Zaitsev *et al.* 2020). Bu savlar doğrultusunda kullanılacak atık çamurun türü ve miktarı literatürde önem teşkil etmektedir. Bunun yanı sıra atık çamurun uygulanacağı odunsu bitkilerin, çamurun içindeki ağır metalleri ve kimyasal maddeleri tolere edebilmesi de önem arz eder. Biyoakümülatör diye adlandırılan bitkiler; bünyelerinde biriktirdikleri yabancı maddelerin, olumsuz özelliklerine yüksek direnç göstererek farklı organlarına depo ederler. Her tür bitkinin; atık çamurda bulunan ağır metal elementlerini bünyesine alabilme, biriktirebilme ve tolere edebilme kabiliyeti farklılık göstermektedir. Bu bitkiler her bir ağır metali ve kimyasal

atık maddeleri; kök, gövde ve yaprak kısımlarında farklı şekillerde ve miktarlarda stoklar. Bu nedenle, bitkilerin türleri de atık çamur uygulamaları için önem arz eder.

Brezilya’da yapılan bir çalışmada; Saõ Paulo metropol bölgesinde yer alan Barueri, Saõ Miguel ve Parque Novo Mundo şehirlerinin kentsel atıksu arıtma tesisinden alınan 3 tip biyolojik atık çamur ve mineral gübre, *Eucalyptus grandis* (okaliptüs) plantasyonlarına uygulanarak; toprak verimliliği, mineral beslenmesi ve ağaç gelişiminin değerlendirilmesi bakımından kıyaslanmıştır. Kullanılan tasarım, rastgele parsellere sahip bloklardan, dört tekrardan ve beş uygulamadan oluşmuştur. Çalışmalar neticesinde; arıtma çamurları, mineral gübreyle kıyasla toprağın, 0-5 cm derinliğindeki katmanda, azot ve fosforun yanı sıra okaliptüs yapraklarındaki azot, fosfor, bakır ve çinko konsantrasyonlarını ve topraktaki pH’ı ve kalsiyum konsantrasyonlarını da artırdığı gözlenmiştir. Arıtma çamuru türleri, yapraklarda daha yüksek Ca:Mg ve Ca:K oranlarına neden olmuş ve bu sayede odun üretimi ve kereste hacminde %50-90 oranında bir artış sağlamıştır (Ferraz *et al.* 2016).

Mangifera persiciforma bitkisinde arıtma çamurunun uygulandığı başka bir çalışmada, çamurun bitki üzerindeki etkilerini tespit etmek ve ağır metal içeriklerini belirlemek amacıyla artan çamur dozları denenmiştir (%0-%15-%30-%60-%100). Beklendiği üzere, ağaçtaki substrat artışı ve ağır metal miktarları (Cu, Zn, Pb, Cd) atık çamur dozuna paralel olarak, önemli ölçüde artmıştır. Bitki boyu ile çapı, biyokütle ve N, K, P alımı bakımından en iyi verim %30 atık çamur oranının uygulandığı bitkide tespit edilerek, belirli miktarlarda uygulanan çamurun bitkinin büyümesine olumlu fayda sağladığı görülmüştür. Arıtma çamuru uygulamasının makul miktarların üzerinde, bitkinin ağır metal artışını tolere edemediği ve toksik etki gösterdiği tespit edilmiştir (Chu *et al.* 2017).

Atık çamurun, gübreleme özelliklerini değerlendirmeyi amaçlayan bir çalışmada; Tiaret’in (Cezayir) kentsel atık su arıtma çamuru, *Eucalyptus camaldulensis* fidanları üzerinde kullanılmıştır. bir yaşındaki fideler çamur/toprak karışımı, çamur içeriği %20, %40 ve %60 olan saksılara nakledilmiştir. Ekimden sonraki altı ay boyunca biyometrik ölçümleri (yükseklik, taban çapı, orta yükseklikteki çap ve yaprak sayısı) yapılan fidelerde çamurun olumlu etkileri gözlenmiş, kontrol ve çamurla muamele edilen bitkiler arasında boy artışı ve yaprak sayısında önemli bir fark tespit edilmiştir. Tüm çamur karışımlarının biyometrik değerleri kontrol bitkilerininkinden (%100 toprak) daha yüksek olduğu, sap çapı dışında %60 oranında çamur içeren karışımların en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir. Çamur/toprak karışımı üzerinde yetişen bitkilerin ortalama yüksekliği $49,4 \pm 24,1$ cm ve ortalama yaprak sayısı $68,8 \pm 6,2$ adet, toprakta yetişen bitkilerde ortalama boy $34,3 \pm 12,8$ cm ve ortalama yaprak sayısı $40 \pm 3,8$ adet olarak

bulunmuştur. Bulgular neticesinde, çamur uygulamasının toprağın iyileştirilmesini ve gelişimini desteklediği sonucuna ulaşılmıştır (Leila *et al.* 2017).

Muğla Gökova-Akyaka Atık Su Arıtma Tesisinden açığa çıkan arıtma çamurunun, *Platanus orientalis* L. (Çınar) ağaç türünde, toprağa serilerek kullanımının, bitkinin gelişimi üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada; arıtma çamuru bitkiye 2 yıl boyunca 20 kg/m² miktarında 4 ayda bir olmak üzere verilmiştir. 3 tekrarlı olacak şekilde tesadüf parselleri ayrılmış ve deneme desenine göre oluşturulmuştur. Deneme süresince bitki numunelerinde; boy, çap ve yaprak rengi gibi parametreler incelenmiştir. Denemenin birinci ve ikinci seneleri sonunda yapraklarda birtakım besin elementleri ile ağır metal analizleri yapılmıştır. Araştırmanın sonunda *P. Orientalis* türünün artan miktarlarda arıtma çamuruna olumlu tepki gösterdiği, verilen dozların toksik bir etkiye neden olmadığı ve yıllık 60 kg/m² miktarı, optimum doz olarak belirlenmiştir. *Platanus orientalis*.L. bitkisinin yaprak kısımlarında arıtma çamuru uygulamalarının hepsi kör numuneye göre toplam N ve Fe'in artmasına sebep olmuştur. Mn ve Cu bitkide uygun miktarlarda, Cd iz miktarlarda, Zn tüm numunelerde normal değerlerin altındadır. Bitki bünyesinde en çok birikim yapan metaller, Ni ve Pb olarak tespit edilmiştir. Ni elementi ilk sene kör numunede ve 20 kg/m² yıl dozluk uygulamada normal sınır aralığında gözlenirken, 40 kg/m² yıl ve 60 kg/m² yıl dozlarında ise bu değerlerin üzerine çıkmış fakat toksik etki sınırını aşmamıştır. İkinci sene kör numune dahil, tüm parsellerdeki bitkilerin yaprak kısımlarında toksik değerlerin alt limitini aşmıştır. Pb elementi ise ilk sene iz miktarlarda, ikinci sene ise kör numune dahil, bitkilerde bu değer toksik değerlerin alt limitini geçmiştir. Bu veriler ışığında arıtma çamuru uygulamasının yanında kör numunelerde ikinci sene meydana çıkan birikimlerin de olması nedeniyle özellikle Ni ve Pb'un çalışma alanındaki toprakta da var olduğu düşünülmektedir. Araştırmanın her süresince meydana çıkan analiz verileri istatistiksel açıdan SPSS 15.0 paket programı kullanılarak yapılmış; önem düzeyleri "One Way Anova"da "Duncan" testine uyarlanarak belirlenmiştir (Demirkan 2018).

Arıtma çamurunun geri dönüşümünü sağlayarak, toprak iyileştirici etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla gerçekleştirilen bir denemede; bitkilerin, birlikte ekiminin potansiyel rolleri araştırılmıştır. Üç ağaç; (*Mangifera persiciforma*, *Bischofia javanica* ve *Neolamarckia cadamba*) ve üç yer örtücü bitki; (*Dianella ensifolia*, *Syngonium podophyllum* ve *Schefflera odorata*) için ortak ekim alanı seçilmiştir. Ortak ekim uygulamalarında türler, büyüme, kök morfolojisi, ağır metal alımı ve ağır metal birikimi üzerinde farklı etkiler sergilemişlerdir. Yapısal eşitlik modelleme analizine göre; ortak ekim alanlarında türler, ağır metalleri biriktirmek için aktif, pasif veya kaçınma stratejisi geliştirmeye yönlendiği ve bunun da ağır metal alımında çeşitlilik sağladığı ortaya koyulmuştur. Denemeler neticesinde; *Neolamarckia*

cadamba ile *Schefflera odorata* bitkilerinin birlikte ekimi, ağır metal birikimlerinin paylaşımını sağlayarak toksik etkiyi tolere etmiştir. Böylece ağır metal içeriğinde tek tür olarak ekildiklerinde alacakları ağır metal seviyelerinde düşüş (Cd için %48,0, Cu için %24,9, Zn için %33,8 ve Ni için %27,2) gözlenmesi sebebiyle, potansiyel ekolojik riskin azaldığı kanısına varılmıştır. Bu çalışma sonucunda ağaçların ve yer örtücü bitkilerin aktif bir stratejiyle birlikte dikilmesi ile atık çamur uygulanan topraklarda, her bir bitki için ağır metallerin sebep olduğu toksik etkinin azalacağı görülmüştür (Wu *et al.* 2021).

Literatür araştırmaları sonucu; kentsel arıtma çamurlarının, odunsu bitkilerde belli bir dozu geçmemek suretiyle güvenle kullanılabileceği kanaatine varılmıştır. Odunsu bitkiler yapıları gereği diğer bitkilere göre, ağır metalleri kolaylıkla bünyesine alabilme ve biriktirebilme potansiyeline sahip oldukları için daha dirençli ve daha dayanıklıdır. Bu özellikleri nedeniyle, atık çamur uygulamaları odunsu bitkilerin bulundukları ormanlık alanlara, peyzaj alanlarına ve mesire yerlerine; çevreye zarar vermeyecek optimum dozlarda güvenle kullanılabilecek; organik içeriği yüksek, ekonomik, kolay bulunabilir önemli bir gübre kaynağıdır.

Atık Çamurun Bitkilerde, Fizyolojik ve Biyokimyasal Parametreler Üzerine Etkisi

Bitkiler, hayatlarının her aşamasında birtakım nedenlerle, büyüme ve gelişmelerini kısıtlayıcı çokça olumsuz durumlara maruz kalarak strese girebilirler. Bitkinin bünyesinde ifade etmenin zor olduğu kavramlardan biri olan stres; bitkilerde zarar oluşturabilen potansiyel bir güç olarak tanımlanmaktadır. Bu zarar metabolik bozulma neticesinde meydana çıkar ve sonuç olarak; bitkinin veya bitki organlarının büyüme sürecine ve verimliliğine etki eder. Bitkiler stres oluşturan unsurlara karşı birçok mekanizmanın yanı sıra, fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmalarını kullanarak cevap verirler. Fakat bahsedilen mekanizmaların tepkilerinin sınırlı olması sebebiyle, bitkiler olumsuz şartlar karşısında kısıtlı bir geri dönüş kapasitesine sahiptirler. Bitkilerde yaşanan stresin önemli bir nedeni, bünyelerinde mineral maddelerin olması gerektiğinden eksik veya fazla olmasıdır. Bitki gelişimi için gerekli olan 16 tane element, doğanın temel elementleridir. Bunların bir bölümü bitki dokularında fazla miktarda var olan makro elementlerken (C, K, Mg, N, P, H, S, Ca, O), bir kısmı ise daha az miktarlarda var olan mikro elementlerdir (B, Mo, Fe, Cl, Mn, Zn, Cu). Bu elementlerin eksikliği durumunda yetersiz beslenme nedeniyle ya da fazla olması halinde ise toksik etki nedeniyle stres oluşmaktadır. Bitkilerde strese sebep olan elementler genelde topraktan aldıkları elementlerdir (Tiryaki 2009).

Bitki gelişimi için gerekli olmayan bazı elementler de bitki bünyesinde belirli bir düzeyin üzerinde toksik etki yaratmaktadırlar. Bu elementlerin suda ve toprakta birikmeleri,

önemli çevre problemlerine neden olmakla kalmaz, bitki gelişimi ve verimliliğinde olumsuz etkilere ve strese neden olurlar. Bunların arasında en önemli toksik ağır metaller Al, Cd ve Pb olarak sıralanabilir (Gratao *et al.* 2005).

Çevresel streslerin bitki bünyesinde meydana çıkardığı en önemli problemlerden birisi ‘Reaktif Oksijen Türlerinin’ (ROS) oluşmasına neden olmalarıdır. ROS; bir veya birden fazla eşleşmemiş elektron barındıran, kararsız, kısa ömürlü, molekül ağırlığı düşük ve reaktivite derecesi yüksek moleküller olarak ifade edilebilir. Bu serbest radikaller arasında, süperoksit anyonu ($O_2^{\cdot-}$), hidrojen peroksit (H_2O_2), ve hidroksil radikalleri (OH) yer alır. Hidrojen peroksit bitki bünyesinde, çok çeşitli biyokimyasal ve fizyolojik süreçlere aracılık etmekle görevlidir (Bright *et al.* 2006; McInnis *et al.* 2006). ROS’lar yüksek derecede reaktif olmaları sebebiyle bitkiler için toksiktirler. Ayrıca lipitler, proteinler ve karbohidratlara zarar vererek, DNA yapısının bozulmasına hatta hücre ölümüne sebep olabilirler (Banu *et al.* 2009).

Süperoksit gruplarından daha hızlı bir şekilde meydana gelen singlet oksijen (O_2), hücre zarlarının fosfolipit, glikolipit, gliserit ve sterol gibi elemanların yapısında bulunan doymamış yağ asitleri ile reaksiyona girerek; aldehitler peroksitler, pentan, hidroksi yağ asitleri gibi çeşitli lipid peroksidasyon ürünlerini meydana getirirler. Oldukça aktif olan ve hücre yapısında zarara sebep olan, süperoksit grubu ($O_2^{\cdot-}$), süperoksit dismutaz enzimiyle beraber oksijen ve H_2O_2 ya dönüşür (Slesak *et al.* 2007).

Oksijen radikalleri içerisinde en aktif ve aynı zamanda en toksik olanı hidroksil radikali (‘OH’)dir. Hidroksil radikali, iyonlaştırıcı radyasyon (x-ışınları) etkisi ile, su moleküllerinin kırılması neticesinde veya hidrojen peroksit molekülünün metaller ile verdiği reaksiyonun neticesinde eksik indirgenmesi ile ortaya çıkabilir. Biyolojik metabolizmaların tanıdığı en reaktif tür olan hidroksil radikali, su dahil rastladığı bütün moleküllerle tepkimeye girebilme potansiyeline sahiptir. Bütün bu reaksiyonlar, ‘OH’ ın paylaşılmamış elektron barındıran dış orbitaline, elektron almak istemesinden kaynaklanır. Serbest radikallerin uyardığı ve hücrenin yıkımında önem teşkil eden bir sistem de, doymamış yağ asitlerinin oksidatif yıkımına neden olan LPO’lar, membran bütünlüğünün bozulmasına sebep olur. Özellikle kalsiyum ve sodyum gibi iyonların, hücreye kontrolsüz olarak alınması, hücredeki enerji oluşturan sistemlerini etkileyebilir. İntrasellüler kalsiyum iyonlarının artışı; protein ve yağlarda daha fazla zarara sebep olabilecek fosfolipaz ve proteazı aktive eder. Bu durum ayrıca DNA’nın yapısında bozulmalara ve hücre ölümüne sebep olabilecek enzim inaktivasyonuna sebep olabilir (Halliwell 1994). Lipid hidroperoksitlerinin yıkımı ile meydana gelen ve biyolojik bakımdan reaktif olan aldehitler, hücre seviyesinde metabolize edilebilirken başlangıçtaki etki alanlarından difüze olarak hücrenin farklı kısımlarına zarar verirler. Üç veya daha çok çift bağ

olan (poliansature) yağ asitlerinin peroksidasyonunda, malondialdehid (MDA) oluşur. Bu nedenle, hücre bünyesinde oluşan LPO seviyesini tespit etmek için MDA düzeyinin ölçümü çokça kullanılan bir yöntemdir.

Bitkisel dokular, ROT artışını kontrol altında tutmak ve stres durumunda artış görülen LPO'den korumak amacıyla farklı antiokasidanlar barındırmaktadırlar. Antioksidanlar, enzimatik olan ve enzimatik olmayan (nonenzimatik) olmak üzere iki türdür. Antioksidan enzimler denilen enzimatik tür, ROT'ları aşamalı olarak daha az toksik bileşiklere ayırarak etkilerini elimine ederler yahut yok ederler. Bu enzimlerin başlıcaları; katalaz, süperoksit dismutaz, askorbat peroksidaz ve glutatyon redüktazdır (Genç 2017).

Bitkiler, ROS'un seviyesini stabil tutan ve bunların standart yapılarının dönüşümünü katalizleyen, antioksidan enzimlere sahiptirler. Savunma sisteminde kullanılan antioksidan enzimler, genellikle moleküllerin oksidasyonunu düşürebilme veya önleme kapasitelerine sahiptirler. Aynı zamanda bu enzim molekülleri, serbest radikallerin ortaya çıkardığı ara ürünleri temizleyerek zincir reaksiyonları sonlandırabilirler. Ayrıca kendileri de okside olarak diğer oksidasyon reaksiyonlarının inhibisyonu sağlarlar. Böylece antioksidan savunma sistemi toksik radikallerin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak ve dengelemek için kullanılırlar (Gupta *et al.* 2014).

Antioksidan bir enzim olan katalaz (CAT), yüksek konsantrasyonda bulunan H_2O_2 'nin 2 elektronunu kullanmak suretiyle, oksijen ve suya indirgenmesini kataliz eden demir porfirin içeren tetramerik ve molekül ağırlığı yüksek olan bir enzimdir (Chaudiere and Ferrari 1999).

Bir diğer antioksidan enzim, peroksidaz (POX) enzimidir. Apoplastik peroksidazlar hücre çeperinde, duvar sertleşmesinin düzenlenmesinde etkilidir (De Pinto and De Gara 2004). POX enzimi elverişsiz çevresel koşullar altında üretilen hasarlı oksijen radikallerinin seviyesini düzenleyerek bitki hücrelerini korur.

Bitki hücrelerinde var olan bir diğer önemli antioksidan süperoksit dismutaz (SOD) enzimi; süperoksit radikalini, hidrojen peroksit ve moleküler oksijene dönüştürebilmektedir (Minibaeva and Gordon 2003). SOD bitkide yüksek konsantrasyonlarda oldukça aktif olarak bulunur. Çünkü hücre mitokondrisinde sarf edilen oksijenin %1-5 civarı süperoksit çevrilmekte ve ancak fazla bir SOD aktivitesi ile bertaraf edilebilmektedir.

Atık çamurun içeriğindeki besin elementi içerikleri, toprak mikroorganizmalarının aktivitesini ve büyümesini destekleyerek mikrobiyal aktiviteyi etkinleştirir (Pascual *et al.* 2007; Singh and Agrawal 2008). Ayrıca atık çamur uygulamalarının, bitkilerde antioksidan sistem üzerinde de etkili olabildiği kanıtlanmıştır (Lakhdar *et al.* 2010; Wyrwicka and Urbaniak 2016).

Çünkü çamur içindeki ağır metaller belirli konsantrasyonların üzerinde, stres etkeni olarak hareket etme potansiyeline sahip olurlar. Bu durum, bitki canlılığını azaltan ve bitki büyümesi üzerinde olumsuz etkiler yaratan fizyolojik düzensizliklere yol açarak ürün verimini etkileyen sonuçlar doğurur. Bu olumsuz sonuçlar sıklıkla serbest radikallerin tetiklenmesi ve ROS üretimindeki artışla ortaya çıkan oksidatif stresle ilişkilidir. Ancak bitkide antioksidan sistem oksidatif stres koşullarında bitkileri korumaktadır. Antioksidan sistemin önemli bir kısmı, SOD, CAT, glutatyon redüktaz (GR), ve proksidazlar (GPX ve APX) gibi enzimlerden oluşur. SOD, süperoksit radikallerini H_2O_2 'ye dönüştürür ve H_2O_2 birikimi APX ve CAT tarafından düzenlenir. SOD'un çeşitli hücre bölmelerinde farklı izoformları vardır. H_2O_2 , askorbat-glutatyon döngüsünde APX tarafından veya farklı hücre bölmelerinde glutatyon peroksidaz (GPX) ve CAT tarafından elimine edilir. GR, askorbat-glutatyon döngüsünde rol oynar ve GSSG'yi GSH'ye dönüştürerek GSH/GSSG oranını korumaktadır. Glutatyon S tranferaz (GST) toksinlerin detoksifikasyonunda, ağır metal toleransında ve bitki savunmasında önemli bir işleve sahiptir. Toksinlerin detoksifikasyonunda, ağır metal toleransında ve bitki savunmasında önemli bir işleve sahiptirler (Mittler *et al.* 2004). Antioksidan enzimlerin önemi, ROS'u temizleme ve dolayısıyla oksidatif hasarı önleme yeteneklerine dayandırılır (Lakhdar *et al.* 2010).

Yonca bitkilerine, (*Medicago sativa* L. cv. *Aragón*) arıtma çamurunun uygulandığı bir çalışmada, saksı ortamında bitkilere hacimce %10 atık çamur uygulanmıştır. Çamur ilave edilmeyen aşılınmış bitkiler kontrol olarak kullanılmıştır. Atık çamur uygulaması bitkinin fotosentez yeteneğini geliştirerek daha yüksek bitki büyümesi ve nodül metabolizması için gerekli fotosentetik ürünlerin (çözünür şekerler) oluşmasını sağlamıştır. Askorbat ve katalaz gibi bazı antioksidan enzim aktivitelerinin atık çamurun uygulanmadığı (kontrol) bitkilere göre daha yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, döngüsel kuraklığa maruz kalan yumrulu yonca bitkileri için kanalizasyon çamuru uygulamasının faydalı etkisine dair kanıt sağlamaktadır (Antolin *et al.* 2010).

Atık çamur uygulamasının, (40 t.ha^{-1}) salatalık ve kabak bitkilerine uygulandığı bir diğer çalışmada; çamurun belirli dozlarda antioksidan enzimlerin aktivitelerini etkilemediği, ancak daha yüksek dozlarda belirgin bir şekilde uyurabildiği belirlenmiştir. Kabak bitkisinde atık çamurun doz artışına bağlı olarak APX ve POX aktiviteleri artarken, salatalıkta düşmüştür. Buna karşılık CAT aktivitesi her iki bitkide atık çamur miktarının artışıyla düşerken, GST aktivitesi artmıştır (Wyrwicka and Urbaniak 2016).

Saksı ortamında serada yapılan bir çalışmada C0 (%100 toprak), C15 (%15 çamur gübresi ve %85 toprak), C30 (%30 çamur gübresi ve %70 toprak), C45 (%45 çamur gübresi ve

%55 toprak), C60 (%60 çamur gübresi ve %40 toprak) ve C75 (%75 çamur gübresi ve %25 toprak) oranları kullanılarak şakayık bitkisi için yaşam ortamları hazırlanmıştır. Bu süreçte toprağın tüm kimyasal, mikrobiyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin analizleri yapılmıştır. Ayrıca şakayık ağacının, büyüme parametreleri; bitki boyu, bitki başına çiçek sayısı, çiçek çapı, hastalıklı bitki oranı tespit edilmiştir. Atık çamur uygulamasının, toprağın kimyasal, mikrobiyolojik ve biyokimyasal özelliklerini ve şakayık ağacının, biyolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Artan çamur dozu ile toprakta toplam azot, toplam karbon ve toplam fosforun önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Fakat, bitkinin mikrobiyal biyokütlesi, mikrobiyal aktivitesi, enzim aktivitesi ve biyolojik özellikleri artan çamur oranına paralel olarak önce artan daha sonra azalan bir grafik sergilemiştir. Bu sonuçlar toprak ekosisteminde ve şakayık bitkisinde, atık çamur uygulamasının olumlu etkilerinin yanı sıra olumsuz etkilerinin de olduğunu göstermiştir. Bir taraftan çamur kompostu uygulanması, toprağın mikrobiyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin iyileşmesine destekleyerek şakayık ağacının büyümesine yardımcı olurken diğer taraftan çamur kompostunun yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması ve ağır metal içeriği sebebiyle, mikrobiyal biyokütle ve aktivitenin azalmasına neden olarak şakayık ağacının büyümesini engellediği görülmüştür. Denemelerin sonunda; Şakayıkların büyümesi ve toprak özellikleri üzerindeki olumlu etkisinden yararlanmak ve olası zararlı etkilerden kaçınmak için arıtma çamurlarının akılcı kullanımının önemli olduğunu sonucuna varılmıştır. Bu deneme için Ağaç şakayık-toprak ekosistemleri açısından faydalı ve optimum atık çamur uygulama dozu %45 olarak tespit edilmiştir (Xue and Xiangdong 2013).

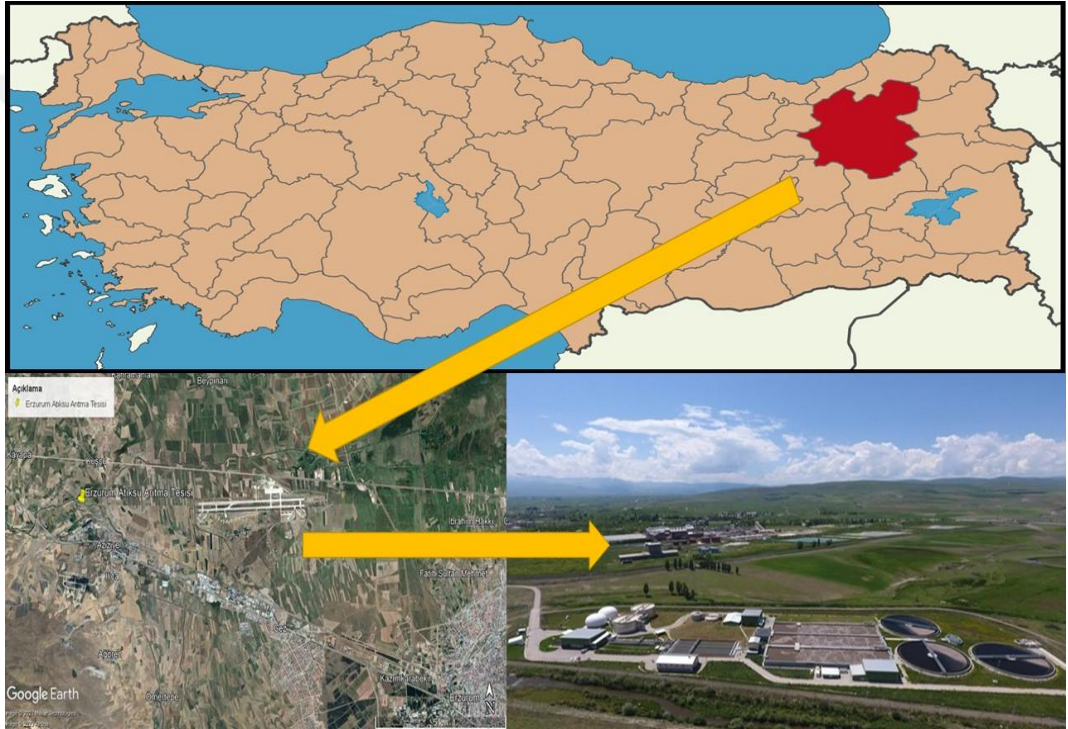
Literatür çalışmalarında biyolojik atık çamurun, bitki ortamlarına farklı şekillerde (Açık arazide senelik dozlama ile, serada saksı ortamına belirli oranlarda) ilave edilmesi sonucunda bitkilerin gelişimine (gövde çapı, gövde boyu, yaprak ağırlığı, kök ağırlığı, çiçeklenme durumu) ve fizyolojik enzim aktivitelerine olumlu katkılarının olduğu barizdir. Farklı oranlarda uygulanan atık çamur, belirli dozların üzerine çıktıkça içerdiği ağır metaller ve kimyasal maddeler nedeniyle bitkiye toksik etki yaptığı gözlenmektedir. Her bitkinin atık çamur türlerine ve dozlama oranlarına verdiği tepki farklı olmaktadır. Bu durum ise literatürde geniş bir yelpazede dağılım göstermektedir. Erzurum İli Evsel Atık Çamurunun, denemelerimizde kullanılan türlere (huş ağacı, karaağaç ve sarıçam) uygulandığı tez çalışmamız, spesifik oluşu sebebiyle bu haliyle literatürde ilk defa var olacaktır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Erzurum atıksu arıtma tesisi

Erzurum şehrinin batısında, Aziziye ilçesinin yakınlarında bulunan tesis, Kuşçu Köyü mevkiinde-Ferah mahallesinde; Pulur çayı ve Karasu nehrinin kuzeyinde yer almaktadır. Şehir merkezine yaklaşık 20 km mesafede konumlanan tesiste, arıtılan suyunun deşarj edilen noktası, Fırat Nehri'nin en büyük kollarından biri olan Karasu Nehri'dir.

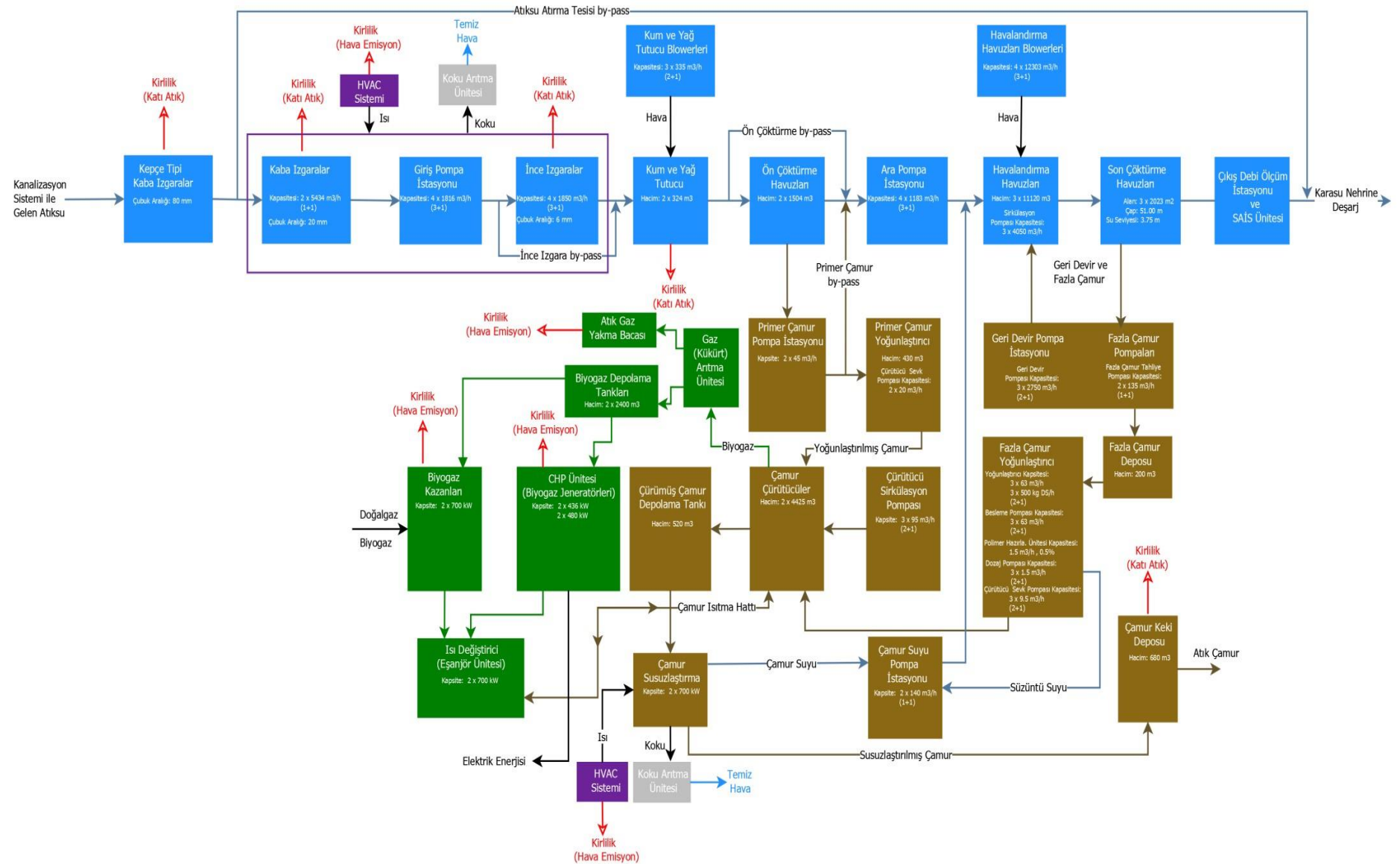


Şekil 6. Erzurum Atıksu Arıtma Tesis'i'nin görüntüsü (Aydın 2020)

Kanalizasyon sistemi vasıtasıyla EBAAT'a ulaşan atıksu, öncelikle 8 cm aralıklara sahip kepçe tipi kaba giriş ızgarasından geçmektedir. Sonrasında 2 cm aralıklı mekanik temizlemeli kaba ızgaradan geçerek atıksuda bulunan 2 cm ve daha büyük ebatlardaki katı atıklar tutulmaktadır. Atıksu, içerisinde bulunan daha küçük ebattaki katı maddelerin tutulabilmesi için 6 mm aralığında olan mekanik temizlemeli ince ızgaradan geçirilir. Izzaralardan geçen atıksu, iki bölmeden oluşan havalandırmalı yağ ve kum tutucuya girer ve bu sayede içeriğindeki inorganik atıklar, havuzun dibine çökerek sudan ayrılır. Atıksuyun yüzeyinde bulunan maddeler ise (yağ, köpük, vb.) havuzun yüzeyinde birikerek sudan ayrıştırılmaktadır. Atıksu daha sonra ön çökteltme havuzlarına gelir burada debi miktarına bağlı olarak belirli bir süre dinlendirilir. Üst kısımlardan savaklanan atıksu, ara terfi merkezine giriş

yapar ve buradan da biyolojik arıtımın gerçekleştiği, biyolojik proses tanklarına gönderilir. Havalandırma havuzlarına gönderilen atıksuda, nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleri gerçekleşir. Bu prosesler ile atıksuda bulunan; N, P, C ve diğer kirletici unsurların giderimi sağlanmaktadır. Havalandırma havuzlarından çıkış yapan atıksu, son çökeltme havuzuna geçer ve burada da bir süre dinlendirildikten sonra savaklara gönderilir ve önce Pulur ayına ve sonra da 50-100 m yakınında bulunan Karasu nehrine deşarj edilir. Havuzun dibine çöken çamur ise, cazibe hareketiyle ara terfi pompa istasyonuna ve buradan da çamur binasına gönderilmektedir.

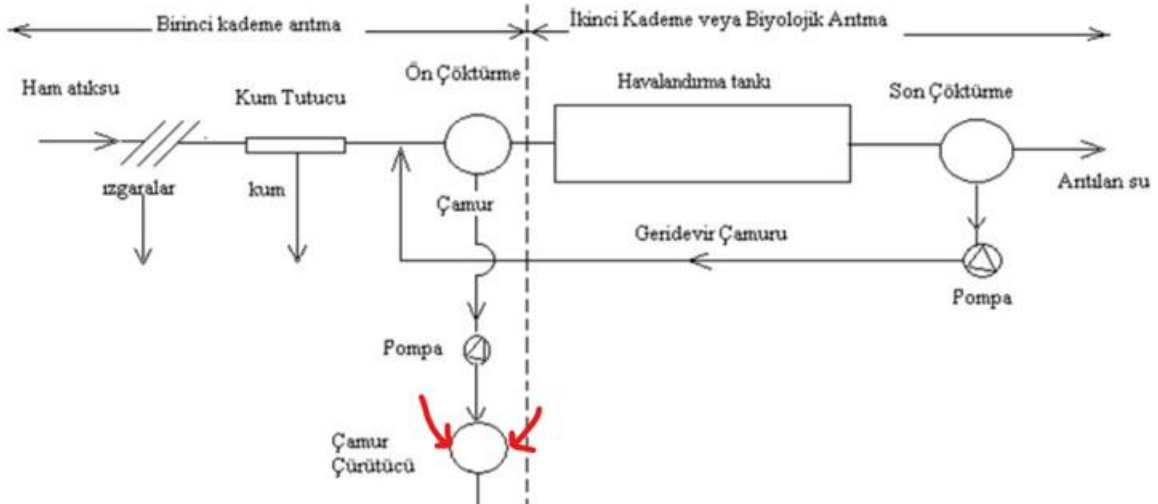




Şekil 7. Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi akım şeması (EBAAT) (Aydın 2020)

Çamur çürütme ve susuzlaştırma aşamasında; Atıksu, ön çökeltme havuzunda dinlendirilir ve havuz dibine çöken ham çamur, sıyırıcılar ile çamur hunilerine ittirilir. Burada biriken ön çökeltme çamurunu, katı madde muhtevasını artırmak için ön yoğunlaştırma tankına pompalarla gönderilir. Dinlendirilen çamur, havuzun dibinden alınarak pompalarla çürütme tankına basılmaktadır. İlk ham çamur, çürütme tankına verilirken mekanik yoğunlaştırıcılardan gelen fazla çamur, çürümüş çamur ile karıştırılır ve ısı eşanjörlerinde 36- 40°C sıcaklığa kadar ısıtılır. Çürütücü tanklar içerisine gelen çamurun homojen bir dağılımda olması için sürekli olarak doğrusal milli karıştırıcı ile 24 saat karıştırılır. 15-20 gün arasında olan bekletme süresi sonunda çürütülerek stabil hale gelmiş çamur, çamur depolama tanklarına gönderilmektedir. Depoda toplanan çamur, santrifüj dekantörlere basılarak çamur susuzlaştırmaya yardımcı olan seyreltilmiş polimerle karıştırılarak çamur yoğunluğu %22-25 katı madde muhtevasına getirilmektedir.

Şekil 7’de EBAAT akım şemasında da görüleceği üzere tesisten; ön çökürme ünitesindeki fiziksel arıtım sonucunda açığa çıkan fiziksel atık çamur ile son çöktürme ünitesinden biyolojik arıtım sonucunda açığa çıkan biyolojik atık çamur olmak üzere İki farklı çamur türü ortaya çıkmaktadır. Denemelerimizde; ön çöktürme ve son çöktürme ünitesinden açığa çıkan ve digester (anaerobik çamur çürütücüler) gönderilen biyolojik atık çamur kullanılmıştır (Şekil 8). Bu çamurun tercih edilme nedeni, olabildiğince patojen yükünden arınmış stabilize bir çamur olmasıdır.



Şekil 8. Atık çamurun biyolojik arıtma tesisinden alındığı yeri gösteren şema



Şekil 9. Çamur çürütücünden (digester) çıkan ve kamyonlara yüklenen stabilize atık çamur

Atık çamur numunesinin denemeler için hazırlanması

EBAAT'ın çıkışından alınan nihai ve stabilize biyolojik atık çamur örnekleri, ortalama 4 gün süreyle açık havada ve temiz bir alanda, güneş ışığı altında kurutulurken, UV ışınlarının etkisiyle patojen mikroorganizmalarından kısmen arındırılarak ve homojenize edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 10. Denemelerde kullanılan atık çamur numunesi

Tablo 4. Denemelerde Kullanılan Stabilize Atık Çamur Analiz Sonuçları

PARAMETRELER	BİRİM	ANALİZ SONUCU	ANALİZ METODU
Toplam Alüminyum	mg/kg	7087,4	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Azot	mg/kg	7971,63	TS 8337 ISO 11261
Toplam Bakır	mg/kg	99,717	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Çinko	mg/kg	496,993	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Demir	mg/kg	12809,233	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Fosfor	mg/kg	31,147	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Kadmiyum	mg/kg	<0,15	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Kalsiyum	mg/kg	21396,907	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Karbon	mg/kg	376478	EN 13137
Toplam Kurşun	mg/kg	17,249	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Magnezyum	mg/kg	6529,965	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Mangan	mg/kg	607,853	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Nikel	mg/kg	29,001	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Organik Madde	%	1,44	TS 8336
Toplam pH	-	7,04	TS ISO 12072
Toplam Potasyum	mg/kg	3543,654	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Sodyum	mg/kg	334,199	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Organik Karbon	%	33,5513	BS EN 13137
Tuzluluk	%	0,133	TS EN 12457-4, SM 2520 B

Tablo 4’de verilen atık çamur analizleri TURKAK’tan akredite olan Alka laboratuvarlarında yapılmıştır.EK1

Toprak numunesinin denemeler için hazırlanması

Toprak numunesini almak için belirlenen alan (Atatürk Üniversitesi Teknokent kavşağı) 9 parselde ayrılmak suretiyle (P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9) ve her bir parselde belirlenen üç noktadan; yerin yaklaşık 60 cm altından burgu makinesi kullanmak suretiyle alınan toprak numuneleri, homojen olarak karıştırılmıştır. Böylece peyzaj çalışması yapacağımız toprağın kimliğini doğru temsil edecek nitelikte numuneler hazırlanmıştır. Toprak numuneleri kaba malzemelerinden ayrılmış, açık alanda kurutulmuş ve 4mm mesh aralığındaki eleklerden geçirilerek hazır hale getirilmiştir. Toprak materyalinin tekstür analizi, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bölümü’nde yapılmıştır. Tekstür analizi Bouyoucos Hidrometre Yöntemi ile (Bouyoucos 1962) kireç tayini ise Scheiber Kalsimetre Yöntemi ile yapılmıştır (Şenlikçi vd 2015).



Şekil 11. Nihai uygulamanın yapılacağı toprak numunesinin alındığı alan (Uydu görüntüsü)



Şekil 12. Nihai uygulamanın yapılacağı toprak numunesinin alındığı alan (Dron görüntüsü)



Şekil 13. Uygulamanın yapılacağı alandan alınmış deneyde kullanılan toprak materyali

Tablo 5. Uygulamanın Yapılacağı Alandan Temin Edilmiş Denemelerde Kullanılan Toprak Analiz Sonuçları

PARAMETRELER	BİRİM	ANALİZ SONUCU	ANALİZ METODU
Kireç miktarı	%	7,12	SCHIBLER KALSİMETRE
Toplam Azot	mg/kg	294,49	TS 8337 ISO 11261
Toplam Bakır	mg/kg	0,510	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Çinko	mg/kg	0,973	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Demir	mg/kg	13633,834	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Fosfor	mg/kg	843,071	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Kalsiyum	mg/kg	5101,094	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Magnezyum	mg/kg	6956,037	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Tekstür	-	Tınlı kum	BOUYOUCOS HİDROMETRE
Kil	%	12	BOUYOUCOS HİDROMETRE
Silt	%	17	BOUYOUCOS HİDROMETRE
Kum	%	71	BOUYOUCOS HİDROMETRE
Toplam mineral materyal	%	48,02	BOUYOUCOS HİDROMETRE
Toplam Organik Madde	%	0,58	TS 8336
Toplam pH	-	7,59	TS ISO 12072
Toplam Potasyum	mg/kg	907,994	EPA 3051 A, EPA 6010 D
Toplam Sodyum	mg/kg	221,202	EPA 3051 A, EPA 6010 D

Tablo 5’de verilen toprak analizleri TURKAK’tan akredite olan Alka laboratuvarlarında yapılmıştır. EK1

Denemelerimizde Erzurum iklim şartları ile uyumlu ve her mevsim sunduğu görsel güzelliği bakımından değerli odunsu türden bitkiler kullanılmıştır. Ayrıca bu odunsu türler ağır metalleri, bünyesinde (kök, gövde ve yapraklarda) biriktirebilen biyoakümülatör (fito) özelliğe sahip türler olarak bilinmektedir.

Denemelerimizde; huş, karaağaç, sarıçam fideleri kullanılmıştır. Ağaç fideleri; Erzurum Orman Bölge Müdürlüğü tarafından temin edilmiştir. Sarıçam 4-5, Karaçam ve Huş Ağacı ise 2-3 yaşları civarında alınmıştır. Deneme çalışmaları, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Seralarında yürütülmüştür.

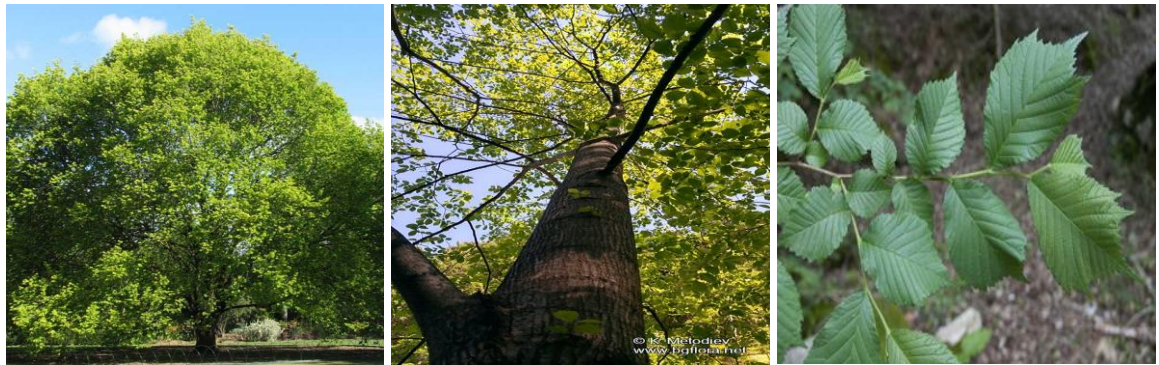
Betula Pendula Roth. (Huş Ağacı): Türkiye’de 5 türü bulunmaktadır. Bunlar: Tüylü Huş, Kızılağaç Yapraklı Huş, Siğili Huş, Betula Browicziana, Betula Recurvata’dır. Doğu ve Kuzeydoğu Anadolu’da yayılım gösterir. Kızılağaç Yapraklı Huş ise lokal yayılım yaparak çalı veya küçük ağaç şeklinde Çoruh civarlarında ve Hatila vadisinde bulunmaktadır. Yüksek kısımlarda tek tür olarak yahut farklı ağaçlarla karışık şekilde bulunan Huş ağaçları 15-20 m’ye kadar uzayabilen farklı türlere sahiptir. Soğuk havaya dayanımı yüksek olup, Genellikle ılıman iklime sahip bölgelerden tabi olarak uzaklaşır. Gövde kısımlarındaki beyaz ince kabuğu en tipik niteliğidir. Zaman içerisinde yataya doğru geniş bantlar şeklinde kavları dökülür ve bu

kısımların yerini sert bir kabuğa bırakır. Işık isteği yüksektir. Serin ve nemli yerleri sever. Hızlı büyüyen değerli bir park bitkisidir.



Şekil 14. *Betula Pendula* Roth. (Huş ağacı)

***Ulmus Glabra* Hudson. (Karaağaç):** Karaağaç göbek odunlu bir ağaçtır. İlkbahar mevsiminde dokusu açık renkte, kaba bir yapısı ve gözenekleri bulunur. Sonbahar dokusu koyu renklidir ve daha küçük çember şeklinde gözenekleri bulunur. Karaağacın iletken dokusunu meydana getiren gözenekleri iridir. İğne yırtığı şeklindedir ve rahatlıkla görünür. Yıllık halkaları belirgindir. Damar kesitte canlı ve belirgin damar süsleri bulunur. Ova türü karaağacı en kıymetli türdür . Ova karaağacı ve dağ karaağacının genel eşdeğerdedir. Hercai karaağacın kalitesi diğer türlerinden daha düşüktür. Ova karaağacın odun kısmı sert, sakı yapılıdır. Uzun liflidir, Meşe gibi dayanıklıdır. İşlenmesi zordur, iyi boyanır ve verniklenir. Genellikle sıcak yerleri severler; sulak yerlerde, dere ve akarsu yakınlarında yetişirler. Karadeniz bölgesinde ormanlıklar şeklinde, diğer bölgelerde dağınık halde yetişir.



Şekil 15. *Ulmus Glabra* Hudson. (Karaağaç)

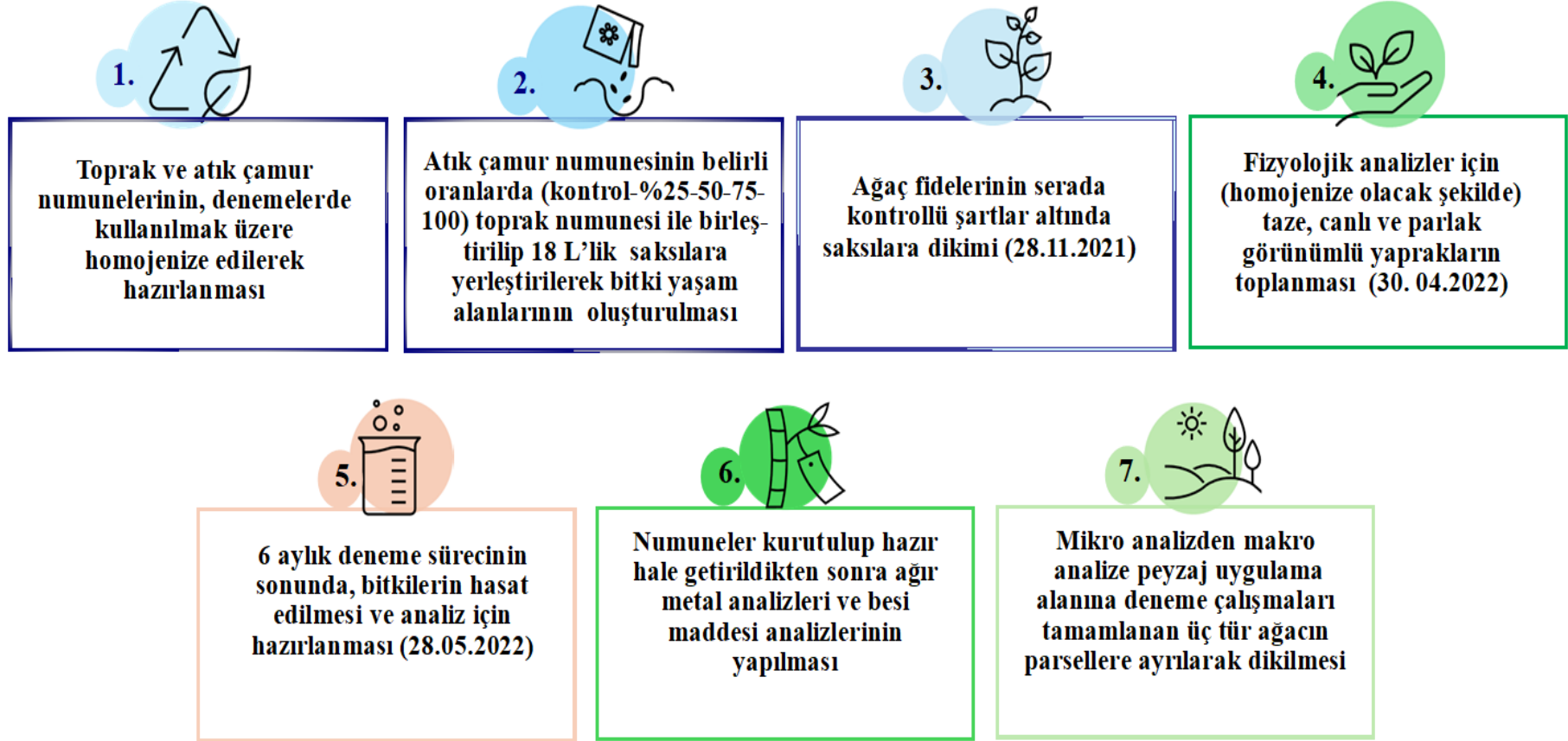
***Pinus Sylvestris* L. (Sarıçam):** Dünyadaki ve Türkiye'deki en güney noktası Kayseri-Pınarbaşı'nda mevcuttur. En büyük yayılımını Kuzey Anadolu'nun iç kısımlarında gösterir ve buradan Orta Anadolu'ya uzanır. Doğu Anadolu Bölgesinde 270m'ye çıkar. Güney bölgelerdeki en uç uzanışı Afyonkarahisar – İhsaniyedir. Sarıçam ülkemizde ortalama 1000-2500 m'lerde yayılırlar. Bunun haricinde Kayseri-Kahramanmaraş yörelerinde ve Pınarbaşı, Göksun arasında yedi küçük odacık şeklinde bulunur. Bu kısımda sadece ülkemizde değil

dünyadaki yayılımının en güney uçlarından birisine ulaşmış olmaktadır. Sivri tepeli, narin gövdeli, her zaman yeşil, ince dallı ya da dolgun ve düzgün gövdeye sahip bir ağaçtır. Yaşadığı bölgenin ekolojik durumuna göre 20-50m civarında boya ulaşabilir. Genç gövdelerde, yaşlı ağaçların üst bölümlerinde, kalın dallarda sararan tonlardaki kabukları ince levhalar şeklinde ayrışır. Genellikle kök sistemi sağlamdır. Sarıçam toprak açısından kanaatkardır ve genellikle gevşek, derin, nemli topraklarda daha iyi bir gelişim gösterir. Donlara ve kuraklığa karşı dayanımı yüksektir.



Şekil 16. *Pinus Sylvestris* L. (Sarıçam)

Metot



Şekil 17. Çalışmanın yöntemsel aşamaları

1. Aşama: Toprak ve atık çamur numuneleri, materyal kısmında da ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı üzere, denemeler için homojenize edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 18. Toprak ve atık çamur numunelerinin homojenize edilerek hazırlanması

2. Aşama: Denemelerde, hazır hale getirilmiş atık çamur numunesi, hacimce %0 (kontrol), %25%, %50, %75 ve %100 oranlarında alınıp toprak numunesi ile homojenize olacak şekilde karıştırılarak bitkilerin yetiştirileceği 18 L hacimli saksı ortamına yerleştirilmiştir. Denemelerimizde, bitkilerin olası kuruma riskine karşın her bir bitki için 5 paralel çalışma yapılmıştır. (sarıçam 4-5 yaşında, karaağaç ve huş ise 2-3 yaşındadır)



Şekil 19. Deneme oranlarına uygun bir şekilde dikime hazır hale getirilmesi

3. Aşama: Sera ortamına getirilen deneme bitkilerinin saksı içerisinde, belirlenen oranlarda hazırlanmış olan toprak/atık ortamına dikimi yapılarak sabit sera şartları (gündüz-gece 20-25°C sıcaklıkta ve %25-%30 nem değerleri altında otomasyona bağlı standart şartlar) altında yetiştirilmeye başlanmıştır. Ağaçların dikimleri (28.11.2021) gerçekleştirildikten sonra, başlangıç gövde çapları ve boyları ölçülerek ağaçların gelişimine dair ilk referans değerler tespit edilmiştir. Her bir deneme bitkisine can suyu verilerek sulamaya haftada 2 gün eşit miktarlarda olacak şekilde devam edilmiştir. Dikim sonrası ağaçların gelişim hızları ve nitelikleri gün be gün takip edilmiş belirli periyotlarda fiziksel ölçümleri yapılmış ve fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 20. Sırasıyla *Pinus sylvestris* L. (sarıçam) *Betula pendula* Roth. (huş) *Ulmus glabra* Huds. (karaağaç) fidelerinin dikim çalışmaları (28.11.2021)



Şekil 21. Dikimden sonra sırasıyla *Pinus sylvestris* L. (sarıçam) *Betula pendula* Roth. (huş) *Ulmus glabra* Huds. (karaağaç) fidelerinin genel görünümü (28.11.2021)



Şekil 22. Sırasıyla *Pinus sylvestris* L. (sarıçam) *Betula pendula* Roth. (huş) *Ulmus glabra* Huds. (karaağaç) denemelerinden görünüm (28.02.2022)



Şekil 23. Sırasıyla *Pinus sylvestris* L. (sarıçam) *Betula pendula* Roth. (huş) *Ulmus glabra* Huds. (karaağaç) denemelerinden görünüm (28.03.2022)

4.Aşama: Her üç deneme türüne ait olacak şekilde; bitkinin tamamında homojen olacak şekilde canlı, parlak yapraklar önemli bazı fizyolojik analizleri yapılabilecek miktarlarda toplanarak özel şartlar altında ivedilikle Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümünde -80°C’de saklanmıştır (30.04.2022).



Şekil 24. Sırasıyla *Pinus sylvestris* L. (sarıçam) *Betula pendula* Roth, (huş) *Ulmus glabra* Huds. (karaağaç) yapraklarının fizyolojik analizler için toplanması (30.04.2022)

5. Aşama: Her bir deneme bitkisi, optimal gövde büyüklüğü ve yeşil yaprak sayısına ulaşana dek ve atık çamura gösterdiği maksimum tolerans süresi de dikkate alınarak 6 aylık süre sonunda deneme bitkilerin sökülmesi yapılarak kök, gövde, yaprak kısımları ayrıştırılmıştır (Leila *et al.* 2017). Hasat edilen bitkilerin fiziksel ölçümleri (gövde boyu-çapı) yapıldıktan sonra; kök, gövde ve yaprakları önce çeşme suyu sonra saf su ile iyice yıkanarak açık hava ortamında kurumaya bırakılmıştır (15-20 gün). Kuruma işlemi tamamlanan numuneler (kök, gövde, yaprak); ilk kez kullanılan her bir ağaç türü ve kısmı için ayrı olmak üzere 9 adet porselen havan içerisinde, sıvı azot ile dondurulup dövülerek olabildiğince ince parçacıklar haline getirilmiştir. Daha sonra Şekil 29-30’da görüldüğü üzere etiketlenmiş kapaklı cam numunelere konularak ağır metal ve besin madde analizleri için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 25. Deneme çalışmalarının 6 aylık süresi sonunda ağaçların söküm çalışmalarından genel görünüm (28.05.2022)



Şekil 26. Ağaçların sökümü sonrasında boy-çap ölçümlerinin yapılması (28.05.2022)



Şekil 27. Ağaçların gövde ve köklerinin kurutulması



Şekil 28. Ağaçların yapraklarının kurutulması



Şekil 29. Ağaç yapraklarının öğütülerek analize hazır hale getirilmesi



Şekil 30. Ağaçların kök ve gövde numunelerinin öğütülerek analize hazır hale getirilmesi

6. Aşama: Bitkiler analize hazır hale getirildikten sonra bünyelerinde toplanan (kök, gövde, yaprak) ağır metallerin (Al, Fe, Cd, Ni, Cu, Mn Zn, Pb) ve besin elementlerinin (magnezyum, fosfor ve potasyum) analizleri için Atatürk Üniversitesi DAYTAM laboratuvarlarında çalışılmıştır (EK 4). Numunelere; 8 ml nitrik asit ve 2 ml hidrojen peroksit ilave edilerek mikrodalga fırında, bir saat boyunca yaş yakma işlemi yapılmıştır. Yakma işleminden sonra numuneler, 50 ml'ye tamamlanacak şekilde saf su ile seyreltilip filtre edilerek analizler; Agilent 7800 ICP-MS (Endüktif Eşleşmiş Plazma- Kütle Spektrometresi) cihazında yapılmıştır (EK 5). (Çomaklı vd 2018). Organik madde içeriği Sargem Laboratuvarlarında (EK 2) Simith-Weldon Metodu ile (Smith and Weldon 1941), toplam azot analizi Dumatherm app metodu ile yapılmıştır (EK 3).

1A	2A											3A	4A	5A	6A	7A	8A
		Metal Yarı Metal															
		3B	4B	5B	6B	7B	8B	8B	8B	1B	2B	13 Al					
						25 Mn	26 Fe		28 Ni	29 Cu	30 Zn						
											48 Cd						
												82 Pb					

$d_{Mn} = 7,43 \text{ gr/cm}^3$

$d_{Cu} = 8,96 \text{ gr/cm}^3$

$d_{Fe} = 7,87 \text{ gr/cm}^3$

$d_{Zn} = 7,14 \text{ gr/cm}^3$

$d_{Ni} = 8,90 \text{ gr/cm}^3$

$d_{Cd} = 8,65 \text{ gr/cm}^3$

$d_{Al} = 2,7 \text{ gr/cm}^3$

$d_{Pb} = 11,3 \text{ gr/cm}^3$

Şekil 31. Analizi yapılan metallerin periyodik cetveldeki yerleri

7. Aşama: Uygulama aşaması olup; Şekil 9- 10'da görselleri sunulan peyzaj uygulama alanına, deneme çalışmaları yapılan üç tür ağacın dikiminin yapılmasıdır. Yapılan detaylı analizler (fizyolojik, ağır metal, besin maddesi) sonucunda her bir tür ağaç için alternatif ve verimli bir gübre kaynağı olarak optimal dozları belirlenmiş olan atık çamur miktarları, uygun oranlarda toprakla birleştirilerek dikim yapılacak noktalar oluşturulacaktır. Böylece seralarda başlanan mikro çalışmalardan, uygulama alanında makro çalışmalara geçmek suretiyle peyzaj çalışmaları tamamlanacaktır. Peyzaj Mimarlığındaki ekip arkadaşlarımızın da bilimsel destekleriyle, deneme türleri olarak kullanılan; huş ağacı için P1, P2, P3 parselleri, karaağaç için; P4, P5, P6 parsellerine, sarıçam için ise P7, P8, P9 parsellerine dikim yapılması tüm detaylarıyla planlanmıştır.

Projemizin makro boyuttaki peyzaj uygulaması için bu alanın özellikle seçilme nedeni; Yıldızkent - üniversitemiz ve hastaneler arasındaki aşırı trafik yoğunluğundan dolayı hava kirliliği ve gürültü kirliliğinin yoğun olması sebebiyledir. Kullanılan ağaçların burada meydana gelen gürültü kirliliği ve hava kirliliğine olumlu katkısı olacağı aşıkardır. Deneme bitkilerimizden olan sarıçam, yaz-kış yaprak dökmeyen, sık ibreli bir ağaç olması sebebiyle hava kirliliğine ve toprak kuraklığına karşı yüksek dayanım gösteren bir ağaç türüdür.

Bitkilerde Yapılan Fizyolojik Analizler

Fotosentetik pigment içeriğinin (klorofil) tespit edilmesi

Numunelerin canlı yaprak dokularında; klorofil a (Kla), klorofil b (Klb), toplam karotenoid ve toplam klorofil (Kla+ Klb) içeriğini belirlemek için (Witham *et al.* 1971) tarafından tavsiye edilen prosedür tatbik edilmiştir. Taze yaprak numunelerinden 0,2 gr alınarak 15 ml %80'lik soğuk aseton ilavesiyle toplam hacim 10 ml olacak bir şekilde homojenize

edilmiştir. Sonrasında filtre kağıdından süzölmek suretiyle oluşturulan ekstrakt 3000 rpm hız ve 5 dk süre ile santrifüjlenip tüplerden örnekler alınarak 450, 645 ve 663 nm dalga boylarında ölçölen absorbans değeri okunmuştur. Örneklerin üç değışik dalga boyunda okunan absorbans değeri, aşağıda gösterilen eşitliklerde kullanılarak bitkilerin yaprak dokusunun 1 g'ının içerdğ klorofil a, klorofil b, karotenoid ve toplam klorofil içeriikleri hesap edilerek bu değeri, mg/doku şeklinde gösterilmiştir.

$$\text{Klorofil a (mg/gr doku)} = ((12,7 \times (D663) - 2,69 \times (D645)) \times (V/1000 \times (W)))$$

$$\text{Klorofil b (mg/g doku)} = ((22,9(D645) - 4,68 \times (D663)) \times (V/1000 \times W))$$

$$\text{Toplam Klorofil (mg/g doku)} = ((20,2 \times (D645) + 8,02(D663)) \times (V/1000 \times W))$$

$$\text{Karotenoid (mg/g doku)} = (4,07 \times D450) - (0,0435 \times K_{la} + 0,367 \times K_{lb})$$

D: Klorofil ekstraktının absorbans değeri,

V: %80'lik asetonun son hacmi,

W: Ekstre edilmiş dokunun yaş ağırlığı (g)

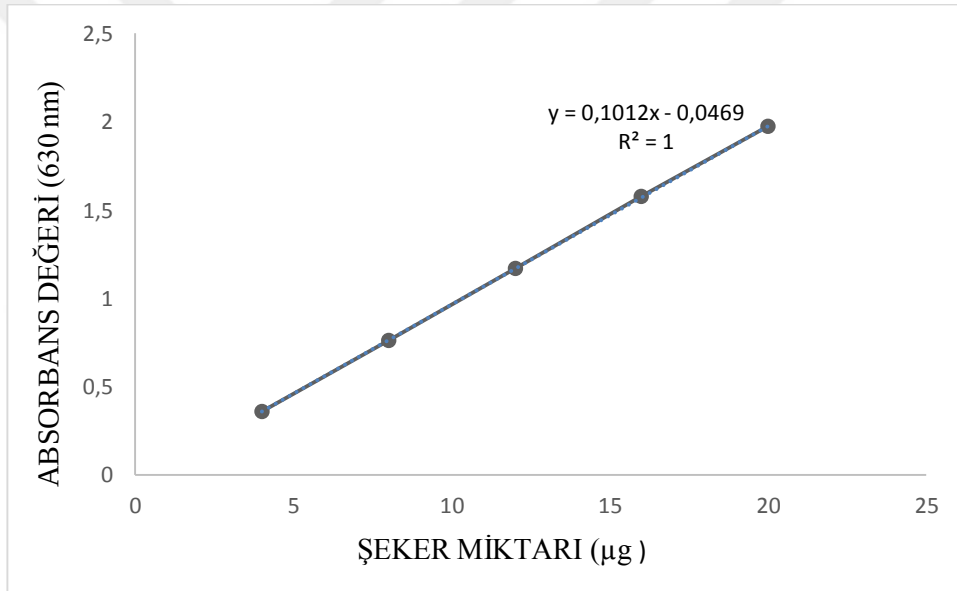
Lipid peroksidasyon (LPO) düzeyinin tespit edilmesi

Hücreler bazı toksik maddelere maruz kaldığında, karşı tepki nedeniyle üretilen Reaktif Oksijen Türleri (ROT), hücre duvarlarındaki doymamış lipidlerin peroksidasyonuna neden olarak hücrelere ve dokulara büyük hasarlar verirler. Hücre zarlarında oluşan bu hasarın miktarı ölçölerek toksinin hücrelerde ve dokularda meydana getirdğ zarar tespit edilmektedir. Lipidler peroksided olduklarında Malondialdehid (MDA) denilen bir bileşik oluşmaktadır. Bu durumda dokularda en çok açığa çıkan bileşik MDA olduğundan, MDA üzerinden, hücrede LPO düzeyi tespit edilebilir.

Lipid peroksidasyonunun MDA düzeyi üzerinden tespiti (Velikova *et al.* 2000) yöntemine göre yapılmıştır. LPO için 0.5 g yaprak sıvı azotta öğütölerek 4 ml %0.1'lik TCA çözeltisi içerisinde homojenize işlemi yapıldıktan sonra homojenat 13.800 rpm hızda ve 30 dakika sürede santrifüjlenmiştir. Süpernatanttan 1 ml miktarında alınarak 1 ml %0.5'lik TBA çözeltisi eklenerek karışım kaynar su içerisinde 30 dakika süre ile inkübe edilmiş ve reaksiyon, tüplerin soğutulmasıyla durdurulmuştur. Numuneler 12.000 rpm hızda 5 dakika süreyle santrifüjlenmiş ve süpernatant alınarak 532 nm ve 600 dalga boyunda absorbans değeri okunmuştur. Sonuçlar; MDA (nmol/μl): [(A532- A600)/155000] X 10⁶ formölü ile hesaplanmıştır. Sonuç MDA (nmol. g⁻¹ doku) şeklinde ifade edilmiştir (Heath and Packer 1968).

Total karbohidrat içeriğinin tespit edilmesi

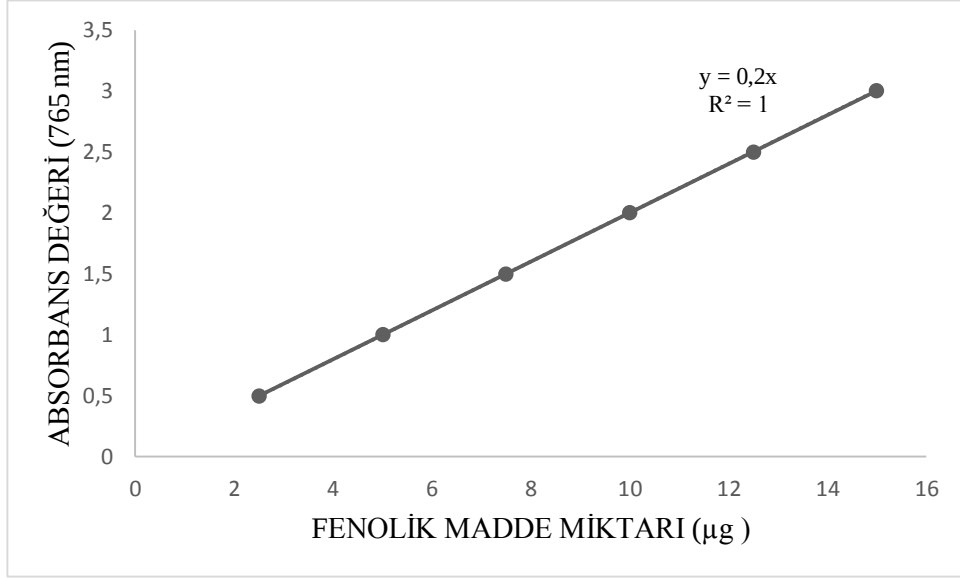
Toplam karbohidrat miktarı Dische (1962) tarafından uygulanan yöntem üzerine biraz değişimler yapılarak belirlenmiştir. Öğütülmüş ağaçların yaprak kısımlarından alınan 0.1 g doku numuneleri 5 ml ve 2,5 N soğuk HCl yardımıyla homojenize hale getirilmiştir. Homojenatlar 3 saat süreyle 100°C sıcaklıktaki suda kaldıktan sonra soğutulmuştur. Reaksiyon duruncaya dek üzerlerine katı Na₂CO₃ eklenip 45 ml saf su ilavesiyle 50 ml'ye tamamlanmıştır. 15.000 rpm hızda ve 15 dk süreyle santrifüjlenen homojenatlardan, 1 ml süpernatant alınarak içerisine antron çözeltisi eklenmiş ve tekrar soğuk su yardımıyla soğutulduktan sonra 630 nm dalga boyunda absorbands değerleri okunmuştur. Toplam karbonhidrat muhtevası üzerinden oluşturulan standart grafikten, karbonhidrat miktarı gram dokudaki µg cinsinden hesap edilmiştir.



Şekil 32. Total karbonhidrat miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik

Fenolik madde içeriğinin tespit edilmesi

Fenolik madde içeriğinin tespit edilebilmesi için (Dewanto *et al.* 2002) tarafından uygulanan metot kullanılmıştır. Sıvı azot ile homojenize edilmiş numune yapraklarından alınan, 0,5 g numune örnekleri 2 ml 0,1 M'lık fosfat tamponu ile homojen hale getirilmiştir. Homojenatlar 15.000 rpm hızda 15 dk süreyle santrifüjlenip süpernatanttan 25 µl alınarak 125 µl folin coicalteu reaktifi eklenmiştir. Hazırlanan tüplere 250 µl %20'lik Na₂ CO₃ eklenerek karışım numuneler 25°C sıcaklıkta yarım saat süreyle inkübe edilmesinin ardından 765 nm dalga boyunda absorbands değerleri okunmuştur. Fenolik madde içeriği ile oluşturulan standart grafik yardımıyla, fenolik madde gram dokudaki µg cinsinden hesaplanmıştır.

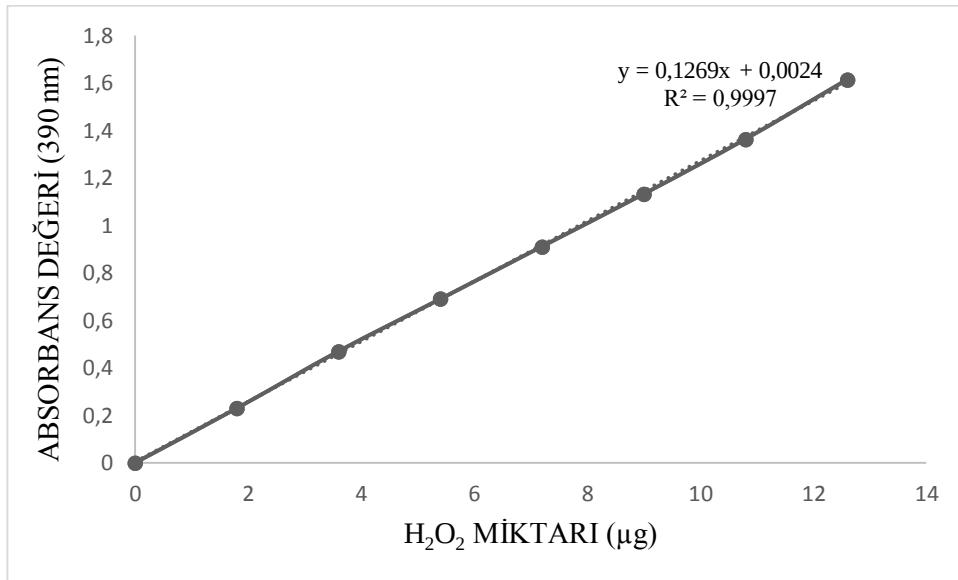


Şekil 33. Fenolik madde miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik

Hidrojen peroksit (H₂O₂) miktarının tespit edilmesi

Analiz yapmak amacıyla, 0,4 gram kadar bitkinin dokusu alınıp 4 ml %0,1 TCA ile homojenize edilmesinin ardından homojenat 13.800 rpm hızda ve yarım saat süreyle santrifüjlenmiştir. Meydana gelen süpernatantın 0,5 ml'sine 0,5 ml kadar 10 mM KH₂PO₄ (pH: 7.0) tampon çözeltisinden ve 1 ml KI çözeltisi ilave edilmiştir. Absorbans değerleri 390 nm dalga boyunda okunarak elde edilen neticeler, 1 gram dokunun başına düşen H₂O₂ miktarı (µg.g⁻¹ doku) şeklinde standart grafik ile oranlanarak hesaplanmıştır (Genç 2017).

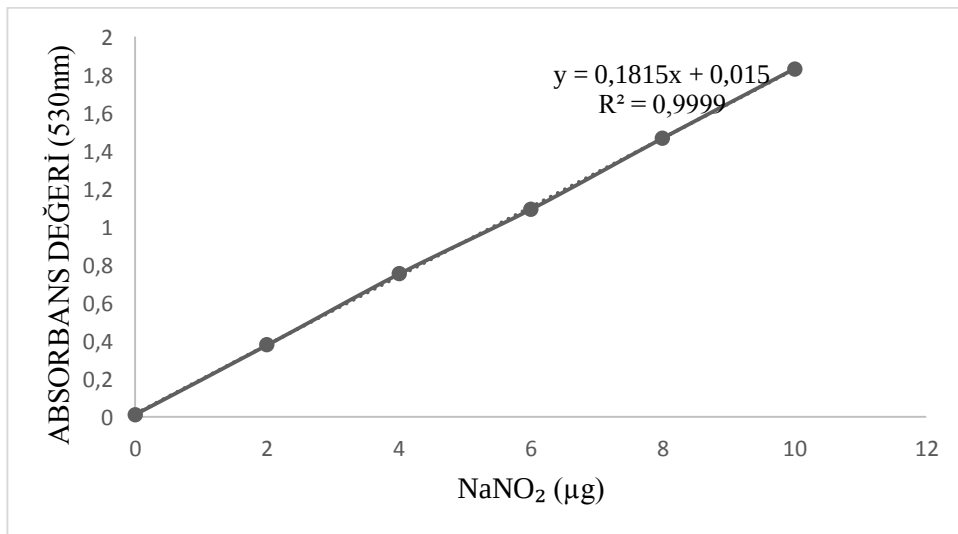
Standart grafik hazırlamak için; ependorf tüplerine sırayla H₂O₂ çözeltisinden; 1.8, 3.6, 5.4, 7.2, 9, 10.8, 12.6, 14.4, 16.2 ve 18 µg H₂O₂ olacak biçimde hesaplanarak eklenmiştir. Tüp hacmi 1 ml olacak bir şekilde 10 mM KH₂PO₄ (pH: 7.0) tampon çözeltisi ile tamamlanarak her bir tüpe 1 ml KI çözeltisi eklenmiştir. Absorbans değerleri 390 nm dalga boyunda kör numuneye karşı okunarak bu değerlerin karşılığına denk gelen mikrogram H₂O₂ değerleri yardımıyla standart grafik oluşturuldu.



Şekil 34. Hidrojen peroksit (H₂O₂) miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik

Süperoksit anyonu (O₂⁻) miktarının tespit edilmesi

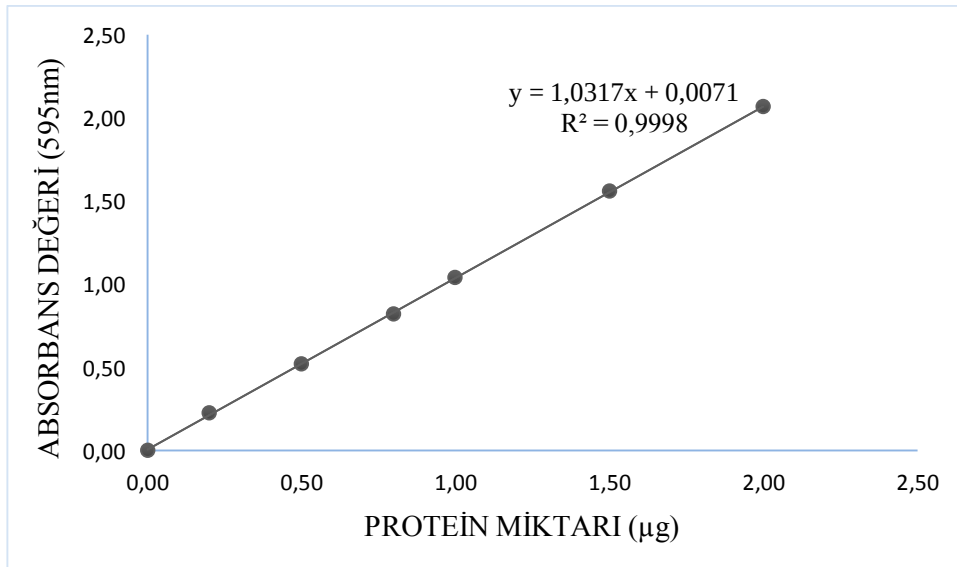
Süperoksit anyonu tespiti (Eltner and Heupel 1976) tarafından tavsiye edilen yöntem uygun olarak yapılmıştır. Bitkilerin yaprak dokularından 0,4 g alınarak 2 ml 60 mM potasyum fosfat tampon çözeltisinde (pH: 7.8) homojenize işlemi yapılmıştır. Homojenatlar 12 dakika süreyle 12500 rpm hızda santrifüjlenerek süpernatant elde edilmiştir. Bu numuneden 0.5 ml alınarak 0.5 ml 60 mM potasyum fosfat (pH: 7.8) çözeltisinden ilave edilerek buna 0.1 ml 10 mM hidroksilamin hidroklorid ilave edilerek karıştırılmıştır. Karışım 60 dakika süre ile 25°C’de inkübe edilmesinin ardından, 1 ml 17 mM sülfonamid ve 1 ml 7 mM α-naftilamin ilave edilerek oda sıcaklığında 20 dakika süre ile inkübe edilmiştir. Elde edilen numunenin 530 nm dalga boyunda, spesifik absorbans değerleri tespit edilerek süperoksit anyonu içeriğinin tespiti için NaNO₂ yardımıyla standart grafik hazırlanmıştır.



Şekil 35. Süperoksit anyon (O₂⁻) miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik

Çözünebilir protein miktarının tespit edilmesi

Yaprak numunelerinden 0,5 g alınarak öncelikle sıvı azot yardımıyla ekstrakte edilerek un formuna gelen ekstraktlar, 4 kat hacimdeki 0,1 M fosfat tampon çözeltisinde (pH: 6.75) havanda ezilmek suretiyle homojenizasyonu yapılmıştır. Homojenat 15.000 rpm hızda 15 dk süre boyunca santrifüjlenerek üst kısımda oluşan berrak süpernatant alınmıştır. Protein miktarı spektrofotometre cihazında tespit edilmiştir. Süpernatantlar öncelikle tampon çözelti ile seyreltildikten sonra seyreltilen özütten, 20 µl alınarak, 200 µl BCA (Bicinchoninic asit+CuSO₄) reaktifi yardımıyla karıştırılarak, kuru blok ısıtıcı içerisinde 60°C sıcaklıkta 15 dk süreyle inkübe edilmiştir. İnkübasyondan sonra oda sıcaklığına gelen numunelerin absorbans değerleri bir mikrolate spektrofotometrede 562 nm dalga boyunda, kör numuneye karşı okunmuştur. Kör numunede, örneğin yerine 20 µl saf su kullanılıp gereken hesaplamalar standart grafik kullanılarak protein değerleri µg protein/g doku şeklinde tayin edilmiştir. Numunelerdeki protein miktarının değerlerini tespit etmek amacıyla gereken standart grafik şöyle hazırlanmıştır; 1 ml' sinde 1 mg saf protein bulunan standart sığır albümin (BSA) reaktifinden; 0-2,5/5/7,5/10 ve 12,5 µg protein miktar içerikli hacimler mikrolatede bulunan boşluklara eklendi ve saf su kullanılarak tüplerin hacimleri 20 µl' ye tamamlanmıştır. Tüplerin her bir tanesine 200 µl BCA çözeltisi eklenerek karıştırılmış ve kör numune için 200 µl kadar BCA çözeltisi ile 20 µl saf su kullanılmıştır. Hazırlanmış plate 60°C sıcaklıkta 15 dk inkübe edilerek platteki numunelerin absorbans değerleri 562 nm dalga boyunda kör numuneye karşı okunmuştur. Spektrofotometrik ölçümler neticesinde, 562 nm dalga boyunda absorbans değerlerine karşı gelen protein miktarları ile bir standart grafik oluşturulmuştur.



Şekil 36. Protein miktarını belirlemek için kullanılan standart grafik

Antioksidan enzim aktivitelerinin tespit edilmesi

Çalışmamızda antioksidan enzimlerden; katalaz (CAT), peroksidaz (POX), askorbat peroksidaz (APX), süperoksit dismutaz (SOD) ve glutatyon S transferaz (GST) aktiviteleri belirlenmiştir. Yaprak numuneleri (0,5 g) öncelikle porselen havan içerisinde sıvı azotta vasıtasıyla pudra haline gelene dek ekstrakte edilmiştir. Ardından ekstrakte edilen örnek, 5 ml 0.1 M KH_2PO_4 çözeltisi (pH: 6.75), %1 PVP ve 1 mM EDTA tampon çözeltisi ile homojen hale getirilerek homojenatlar 15.000 rpm hızda 15 dk süreyle santrifüjlenmiştir. Süpernatant bölüm örnek olarak çalışmalarda kullanılmıştır. Bu işlemler $+4^\circ\text{C}$ ' de yapılmıştır (Angelini and Federico 1989).

Katalaz (CAT) aktivitesinin tespit edilmesi

Katalaz (CAT) aktivitesinin tayini, (Gong *et al.* 2001) tarafından belirlenen yöntem ile yapılmıştır. Bu yöntem ile katalazın ortamda bulunan H_2O_2 'nin suya ve oksijene dönüşümü gerçekleştirilirken, ortaya çıkan absorbans farklılıklarının 240 nm dalga boyunda okunması esasına dayanır. Reaksiyon sırasında azalan H_2O_2 'yi tespit edebilmek amacıyla standart grafik hazırlanmıştır. Bu amaçla, 5 mM olan H_2O_2 çözeltisinden alınarak 3 ml'lik küvete sırayla; 0,15/0,3/0,45/0,6/0,75/0,9/1,05/1,2/1,35 ve 1,5 ml doldurulmuş ve hacimler saf su eklenerek 1,5 ml'ye tamamlanmıştır. Tüplere 1,47 ml kadar 103,5 mM KH_2PO_4 çözeltisi ve 30 μl saf su eklenmiştir. Spektrofotometre cihazında 240 nm dalga boyunda absorbans değerleri kör numuneye karşı ölçülmüş ve absorbans değerlerine tekabül eden μM H_2O_2 değerleri ile standart grafik oluşturulmuştur.

CAT aktivitesini ölçmek için 3 ml'lik küvete, 103 mM 1,475 ml KH_2PO_4 çözeltisinden ve 40 mM'lik H_2O_2 substrat çözeltisinden 1,5 mL kadar ilave edildikten sonra, 25 μl enzim ekstraktı eklenmiştir. Tüplerdeki numunelerin spektrofotometre cihazında 240 nm dalga boyunda 3 dakika süresince 1 dakikalık aralıklarla kör numuneye karşı absorbans değerleri kaydedilmiş ve absorbansın düzenli şekilde azaldığı aralıktan, 1 dakikanın başına absorbans değerlerindeki düşüşü hesap edilmiştir. Ortalama absorbans değerleri, kullanılan standart grafik ile μmol olarak H_2O_2 miktarına dönüştürülmüştür. Hesaplamalar yapılırken 25°C sıcaklık değerinde ve 1 dakikalık süre içerisinde, absorbans değerini 1 μmol düşüren enzim miktarı, bir enzim ünitesi olarak kabul edilerek ve elde edilen değerler g yaprak dokusunun başına düşen enzim ünitesi (EU/mg protein) olarak gösterilmiştir.

Peroksidaz (POX) aktivitesinin tespit edilmesi

Peroksidaz (POX) aktivitesinin tayini, H_2O_2 ve guaikolün substrat olarak kullanıldığı bir reaksiyonun çıktısı olan renk veren bileşiğin oluşturduğu absorbans artışının 470 nm dalga

boyunda takip edilmesi temeline dayanmaktadır. POX enzim aktivitesini ölçmek için küvete; 100 ml (0,1 M), NaH_2PO_4 çözeltisi, (pH: 5,5) 5 mM guaikol ve 5mM H_2O_2 içerikli substrat çözeltisinden 3 mL eklenmesinin ardından, 10 μL enzim ekstraktı eklenmiştir. 1 dakika zaman aralıklarında 5 dakika süre boyunca, 470 nm dalga boyunda ölçülen absorbans değerleri ölçülerek ve absorbansın doğrusal bir biçimde artış gösterdiği bölümdeki absorbansın artışı 1 dakikaya oranlanmıştır. Sonuç olarak; 25°C sıcaklıkta 1 dakika sürede absorbans değerini 0,01 artış sağlayan enzim miktarı 1 enzim ünitesi olarak belirlenmiş ve sonuçlar g yaprağa düşen enzim ünitesi (EU/mg protein) olarak verilmiştir (Yee *et al.* 2002).

Askorbat peroksidaz (APX) aktivitesinin tespit edilmesi

Askorbat peroksidaz aktivitesi (APX) spektrofotometrede; 290 nm dalga boyundaki absorbans değerlerinin azalışına bağlı olarak tespit edilmiştir (Nakano and Asada 1981). Aktivite değeri, 50 mM potasyum fosfat çözeltisi (pH: 7.0), 250 μM askorbik asit ,5 mM H_2O_2 ve 100 μL içerisinde enzim ekstraktı bulunduran 3.1 ml'lik reaksiyon içerisindeki karışımının ölçümüyle tespit edilmiştir. APX, 290 nm dalga boyunda Askorbik asitin $2.8 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ epsilon katsayı değerinin de baz alınmasıyla tespit edilmiştir. Sonuçlar U.mg^{-1} protein cinsinden ifade edilmiştir.

Süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesinin tespit edilmesi

Süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesinin tayini, nitro blue tetrazoliumun (NBT) çözeltisinin, fotokimyasal şekilde indirgenme reaksiyonunun inhibisyonunun, spektrofotometre ile tespiti esasına dayanan yöntemle göre yapılmıştır (Agarwal and Pandey 2004). Reaksiyon karışımında (3 mL); 13 mM metiyonin, 75 μM NBT, 50 mM KH_2PO_4 (pH: 7,8), 2 μM riboflavin, ve 0,1 mM EDTA bulunmaktadır. Ölçüm için 3 mL küvete, riboflavin bulunmayan karışımdan 2,84 mL alınarak üzerine 100 μL kadar enzim ekstraktı pipete alınmıştır. Tüpün üzerine 100 μM kadar riboflavin çözeltisinden 60 μL pipete alınarak karışım haline getirildikten sonra, bir beyaz ışık kaynağı önüne koyularak reaksiyon başlatılmıştır. Reaksiyon tüpü, ışık kaynağına 15 dk maruz bırakılmış ve reaksiyon ışığın kapatılmasıyla durmuştur. 15 dk'lık sürede NBT' nin renginin açılma durumu 560 nm dalga boyunda, kör numuneye kıyasla okunmuştur. Kör numune aynı işlemlerin enzim ilavesiz örneğinden meydana gelmektedir. SOD aktivitesinin 1 ünitesi, 560 nm dalga boyunda gözlemlenen NBT çözeltisinin indirgenmesi sonucunda %50 inhibisyonuna sebep olan enzimin miktarı, 1 enzim ünitesi şeklinde kabul edilerek, sonuçlar enzim ünitesi (EU/mg protein) olarak sunulmuştur.

Glutathione S-transferaz (GST) aktivitesinin tespit edilmesi

Glutasyon S-transferaz (GST) aktivitesi tayini aktivitesi, Habig yöntemi örnek alınarak azaltılmış glutasyon ve l-kloro 2,4-dinitrobenzen (CDNB) konjugasyon hızının tespit edilmesiyle 340 nm dalga boyunda spektrofotometre cihazı kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Bu yöntemle göre; Bitki dokusu (0,25 g) ilk olarak sıvı azotta ve sonrasında 0,05 mM DTT (1,4-Dithioerythritol), 1 mM EDTA ayrıca %3 PVP içeren 0,1 M pH 7,0 olan potasyum fosfat (KH_2PO_4) çözeltisinde homojenize hale getirilmiştir. Oluşan ekstrakt 12000 g'de 20 dk santrifüjlenerek süpernatant tüpe aktarılmış ve enzim tespitinde kullanılmıştır. Reaksiyon karışımı 100 μL CDNB (30 mM) 100 μL GSH (30 mM), ve 2,7 mL Fosfat tamponu (0,1 M pH 6.5) içerir. Enzim aktivite tayini, bu karışım (2,9 mL) üzerine 100 L enzim ekstraktı eklenerek başlatılmıştır. Karışımın absorbansı 340 nm dalga boyunda ve 5 dakika süresince 1 dk dakika arayla kaydedilmiştir. Aktivitenin bir ünitesi, 1 dakikada 1 mol tiyoeter oluşturan enzim miktarı şeklinde ifade edilmiştir (Habig *et al.* 1974).

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bitkilerin Fizyolojik Analiz Bulguları

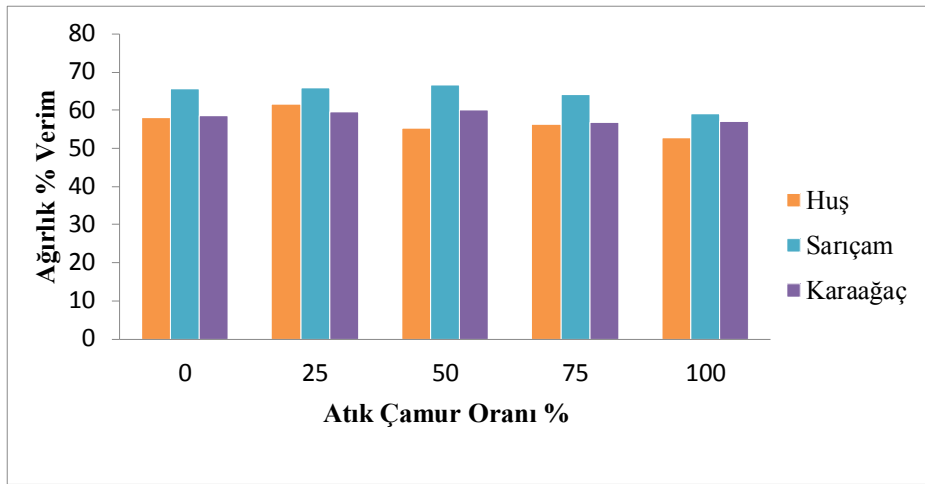
Analizler neticesinde elde edilen veriler SPSS (IBM SPSS Statistic 26) istatistik programında detaylı olarak incelenmiştir. Önem düzeyleri "One Way Anova"da "Duncan" testine uyarlanarak belirlenmiştir istatistiksel çalışmalar sonucunda türlerin ortalama değerleri, standart sapmaları, f değerleri ve p ($P<0.05$ hata) değerleri incelenmiştir.

Bitki Yapraklarının Yaş/Kuru Ağırlıkları

Tablo 6. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Yaş/Kuru Ağırlık Değerleri (sonuçlar % ağırlık verim cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	56,568±3,168 ^c	420,519	0.000*
	Karaağaç	58,345±1,686 ^b		
	Sarıçam	63,926±3,599 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	60,819±3,915 ^b	110,967	0.000*
	25	62,100±3,040 ^a		
	50	60,770±5,354 ^b		
	75	58,802±3,403 ^c		
	100	55,575±2,551 ^d		

Çalışılan bitki türleri için yapraklarda ortalama yaş/kuru ağırlık değerleri arasında anlamlı bir farklılığın olduğu belirlenmiştir (Tablo 6). Bitki yapraklarında yaş/kuru ağırlık oranı değerlendirildiğinde, kontrole göre %25 ve %50 atık çamur uygulamasında istatistik olarak önemli olmasa da ($P>0.05$) genel olarak hafif bir artış eğilimi göstermiş ancak %75 ve %100 atık çamur uygulamalarında düşmüştür. Bu uygulamalardaki belirlenen düşüş huş ve sarıçamda daha belirgin olmuştur. Örneğin %100 atık çamur uygulamasında yaş/kuru ağırlık oranı huş ağacında %9, sarıçamda %8,7 ve karaağaçta %2,58 oranında düşüş göstermiştir. Bu değerler düşük dozlardaki atık çamur uygulamasının bitkilerin biyomasi üzerinde olumlu ancak %75 ve %100 gibi yüksek dozlarda olumsuz etki yaptığını göstermektedir (Şekil 36).



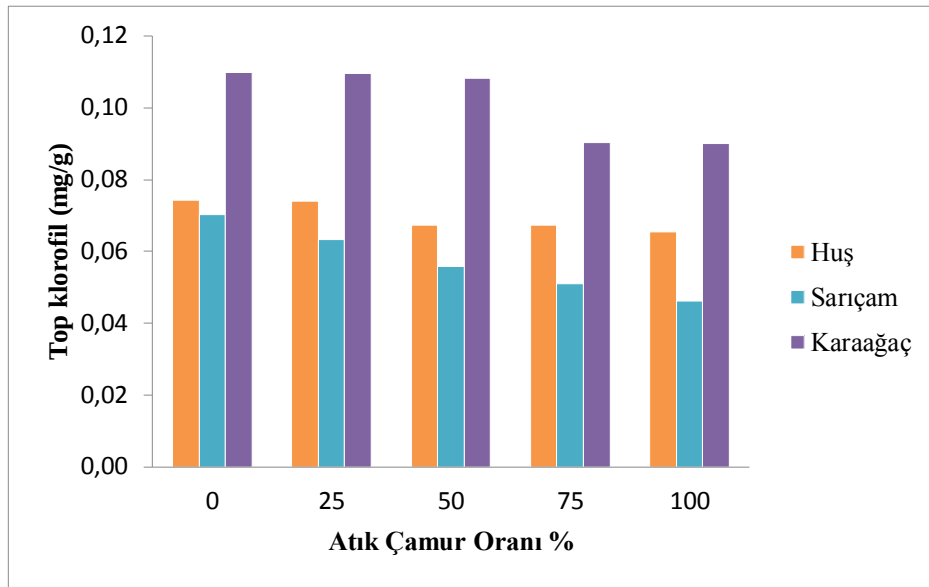
Şekil 37. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda yaş/kuru ağırlık değerleri

Total Klorofil, Klorofil a, Klorofil b Miktarı Bulguları

Tablo 7. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Total Klorofil Değerleri (sonuçlar mg/g cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	0,697±0,00426 ^b	12444,189	0.000*
	Karaağaç	0,1014±0,009 ^a		
	Sarıçam	0,057±0,0086 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	0,0849±0,018 ^a	845,573	0.000*
	25	0,082±0,0209 ^b		
	50	0,077±0,023 ^c		
	75	0,069±0,017 ^d		
	100	0,0672±0,018 ^e		

Çalışmamızda atık çamur uygulamalarına maruz kalan bitkilerde total klorofil değerlendirildiğinde (Tablo 7), kontrole göre genel olarak %25 ve %50 atık çamur uygulamalarında total klorofil miktarı anlamlı seviyede değişmemiştir. Ancak %50 ve %75 atık çamur uygulamalarında kontrole göre genelde bir düşüş olmuştur. Örneğin %100 atık çamur uygulamasında huş, sarıçam ve karaağaçtaki total klorofil içeriği kontrole göre sırasıyla %12,16-%34,28 ve %17,95 oranlarında düşmüştür. Bu bulgular atık çamur uygulamasının düşük dozlarda bitki yapraklarında klorofil içeriğini değiştirmediğini ancak yüksek dozlarda düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 38. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda toplam klorofil değerleri

Tablo 8. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda K_{la} Değerleri (sonuçlar mg/g cinsinden verilmiştir)

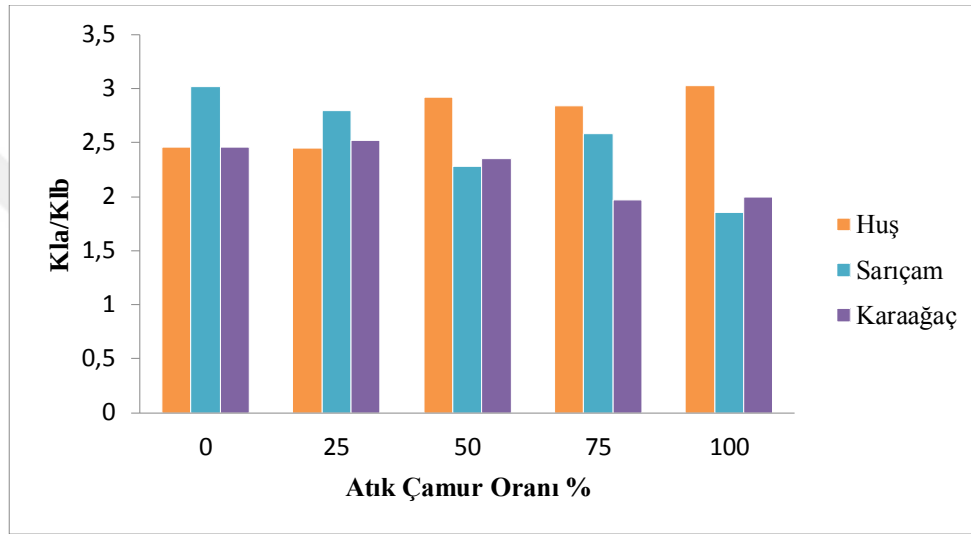
		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	0,050±0,001 ^b	10798,464	0.000*
	Karaağaç	0,070±0,008 ^a		
	Sarıçam	0,040±0,008 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	0,061±0,012 ^a	1174,06	0.000*
	25	0,058±0,014 ^b		
	50	0,054±0,016 ^c		
	75	0,048±0,09 ^d		
	100	0,046±0,013 ^e		

Tablo 9. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda K_{lb} Değerleri (sonuçlar mg/g cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	0,018±0,002 ^b	7638,705	0.000*
	Karaağaç	0,031±0,001 ^a		
	Sarıçam	0,016±0,001 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	0,023±0,006 ^a	114,111	0.000*
	25	0,023±0,006 ^a		
	50	0,022±0,007 ^b		
	75	0,020±0,006 ^c		
	100	0,020±0,029 ^c		

Türler için yapraklarda; K_{la} ve K_{lb} değerleri arasında, anlamlı bir farklılığın olduğu belirlenmiştir (Tablo 8 ve Tablo 9). Farklı atık çamur uygulama dozlarına göre K_{la} değeri için türler arasında anlamlı bir farklılık bulunmazken K_{lb} değeri için %0 ve %25 atık çamur uygulamalarında ve %75 ve %100 atık çamur uygulamalarında farklılık bulunmamakta fakat

%50 atık çamur uygulamalarında farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki Kla ve Klb değerleri için %0'dan %100'e kadar genel olarak azalma gösterdiği görülmektedir. Kla/Klb değerleri; Huş bitkisi için %0 atık çamur uygulamasına göre %25 atık çamur uygulamasında bariz bir artış gözlenmezken %50 ve diğer artan uygulama dozlarında genel olarak artış gözlenmiştir. Karaağaç ve sarıçamda, artan çamur uygulamalarına göre dalgalanmalı değerler gözlemlenirken, karaağaçta en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, sarıçamda ise en yüksek değer %0 atık çamur uygulamasında gözlenmiştir (Şekil 39).



Şekil 39. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda Kla/Klb değerleri

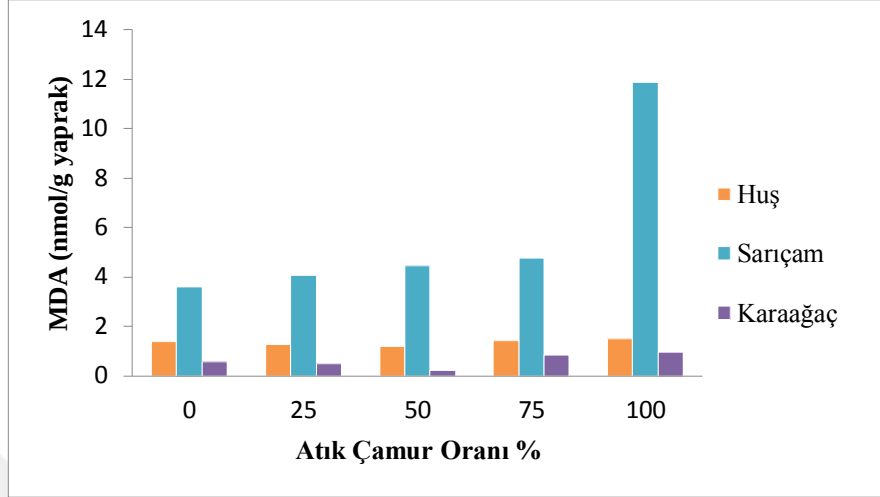
Lipid Peroksidasyon Düzeyine Ait Bulgular (MDA Miktarı)

Tablo 10. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda MDA Değerleri (sonuçlar nmol/gr cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	1,357±0,109 ^b	5650,931	0.000*
	Karaağaç	0,606±0,259 ^c		
	Sarıçam	5,641±2,969 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	1,855±1,377 ^c	619,561	0.000*
	25	1,937±1,612 ^c		
	50	1,958±1,911 ^c		
	75	2,338±1,849 ^b		
	100	4,585±5,059 ^a		

Denemelerde kullanılan ağaç fideleri için yapraklarda; MDA değerleri arasında, anlamlı bir farklılığın olduğu belirlenmiştir (Tablo 10) Farklı atık çamur uygulama dozlarına göre MDA değeri için %0, %25 ve %50 atık çamur uygulamalarında türler arasında anlamlı bir farklılık bulunmazken %75 ve %100 atık çamur uygulamalarında farklılık olduğu belirlenmiştir. Atık

çamur oranının bitkinin yapraklarındaki MDA değerleri Huş ve Karaağaç için %0'dan %50 atık çamur uygulamalarına kadar azalma seyrindeyken diğer artan atık çamur uygulamalarında artış gözlenmektedir. Sarıçam için ise; %0'dan %75 atık çamur uygulamalarında küçük bir miktar artış gözlenirken %100 atık çamur uygulamasında kayda değer bir artış gözlenmiştir (Şekil 40).



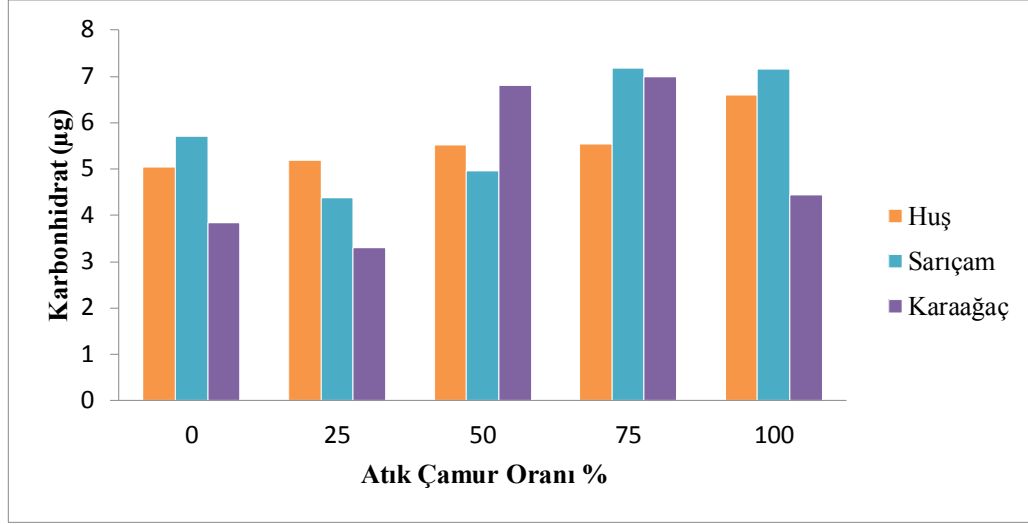
Şekil 40. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda MDA miktarı değerleri

Total Karbonhidrat Miktarı Bulguları

Tablo 11. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Karbonhidrat Değerleri (sonuçlar µg cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	5,582±0,642 ^a	12,675	0.000*
	Karaağaç	5,080±1,634 ^b		
	Sarıçam	5,880±1,233 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	4,876±0,881 ^c	39,318	0.000*
	25	4,294±0,845 ^d		
	50	5,765±0,894 ^b		
	75	6,568±0,912 ^a		
	100	6,068±1,320 ^b		

Türler için karbonhidrat değerleri arasında huş ve sarıçam için anlamlı bir farklılık gözlenmezken karaağaçta farklılık gözlenmiştir. Atık çamur oranlarında genel olarak %50 ile %100 arasında anlamlı bir farklılık gözlenmezken diğer oranlarda anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki karbonhidrat değerleri huş için, %0'dan %75 atık çamur uygulamasına kadar önemli bir değişiklik olmazken %75 atık çamur uygulamasında belirgin bir artış gözlenmiştir %100 atık çamur uygulamasında ise %75'e göre belirgin bir farklılık olmamıştır. Karaağaç için, en büyük yükseliş %50 atık çamur uygulamasında gözlenirken %100 atık çamur uygulamasında ani bir düşüş gözlenmiştir. Sarıçam için, dalgalı bir seyir gözlenirken %75 atık çamur uygulamasında en büyük artış gözlenmiştir ve %100 atık çamur uygulamasında %75'e göre belirgin bir farklılık yoktur.

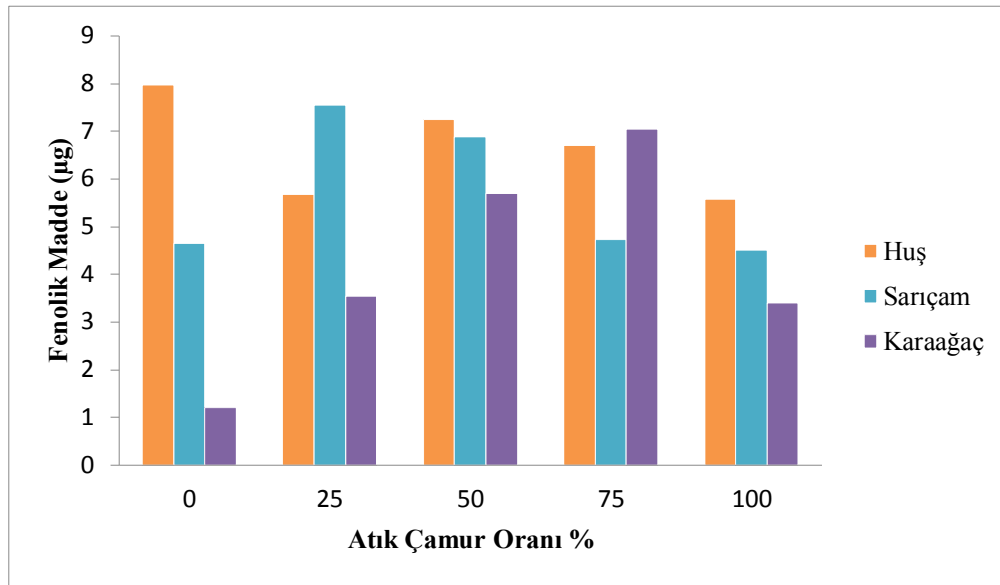


Şekil 41. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda karbonhidrat değerleri

Fenolik Madde Miktarı Bulguları

Tablo 12. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Fenolik Madde Değerleri (sonuçlar µg cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	6,605±0,944 ^a	4779,614	0.000*
	Karaağaç	4,176±2,091 ^c		
	Sarıçam	5,655±1,325 ^b		
Atık Çamur Oranı (%)	0	4,597±2,903 ^d	1660,824	0.000*
	25	5,557±1,701 ^c		
	50	6,603±0,695 ^a		
	75	6,147±1,084 ^b		
	100	4,491±0,941 ^e		



Şekil 42. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda fenolik madde değerleri

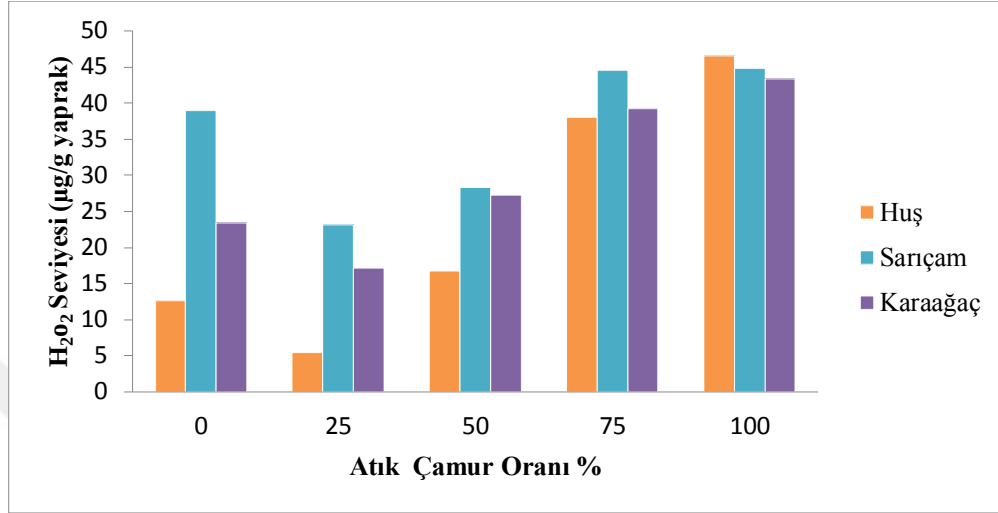
Bitkiler için fenolik madde değerleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranlarında da genel olarak anlamlı bir farklılık bulunmaktadır (Tablo 12). Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki fenolik madde değerleri huş için, %0 dan %25 atık çamur uygulamasına kadar bir artış gözlenirken %50'den %100 atık çamur uygulamasına kadar bir düşüş gözlenmektedir. Karaağaç için, %0'dan %75 atık çamur uygulamasına kadar düzenli bir artış bulunurken %100 atık çamur uygulamasında ani bir düşüş gözlenmiştir. Sarıçam için, dalgalı bir seyir gözlenirken %25 atık çamur uygulamasına kadar artış gözlenirken sonraki artan atık çamur uygulamalarında giderek azalma gözlenmektedir. Genel olarak üç türde de yapraklardaki fenolik madde miktarının %100 atık çamur uygulamasında bariz bir şekilde düştüğü görülmektedir (Şekil 42).

Hidrojen Peroksit (H₂O₂) Miktarı Bulguları

Tablo 13. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda H₂O₂ Değerleri (sonuçlar µg/g cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	23,587±16,040 ^c	2096,266	0.000*
	Karaağaç	30,033±9,958 ^b		
	Sarıçam	35,918±9,175 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	24,584±11,502 ^c	4980,699	0.000*
	25	15,420±7,842 ^e		
	50	24,068±5,466 ^d		
	75	40,440±3,194 ^b		
	100	44,717±1,422 ^a		

Türler için H_2O_2 değerleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranlarında da genel olarak anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki H_2O_2 değerlerinde huş, karaağaç ve sarıçam için, %0'dan %25 atık çamur uygulamasına kadar bir azalma gözlenirken diğer artan atık çamur uygulamalarında belirgin bir artış göze çarpmaktadır. Genel olarak üç türde de aynı seyir gözlenmektedir (Şekil 43).



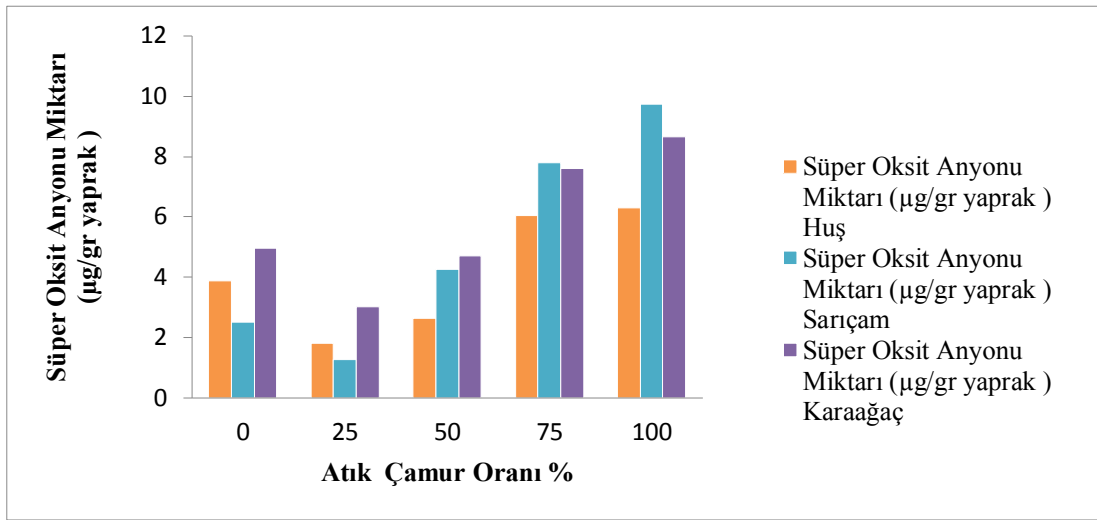
Şekil 43. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda H_2O_2 değerleri

Süperoksit Anyonu (O_2^-) Miktarı Bulguları

Tablo 14. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda O_2^- Değerleri (sonuçlar µg/g cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	4,153±1,867 ^c	869,717	0.000*
	Karaağaç	5,819±2,102 ^a		
	Sarıçam	5,056±3,197 ^b		
Atık Çamur Oranı (%)	0	3,780±1,053 ^d	4840,028	0.000*
	25	2,072±0,809 ^e		
	50	3,886±0,958 ^c		
	75	7,184±0,823 ^b		
	100	8,123±1,393 ^a		

Türler için O_2^- değerleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmaktadır (Tablo 14). Atık çamur oranlarında da genel olarak anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki O_2^- değerlerinde huş, karaağaç ve sarıçam için, %0'dan %25 atık çamur uygulamasına kadar bir azalma gözlenirken diğer artan atık çamur uygulamalarında belirgin bir artış bulunmaktadır. Genel olarak üç türde de aynı seyir gözlenmektedir (Şekil 44).



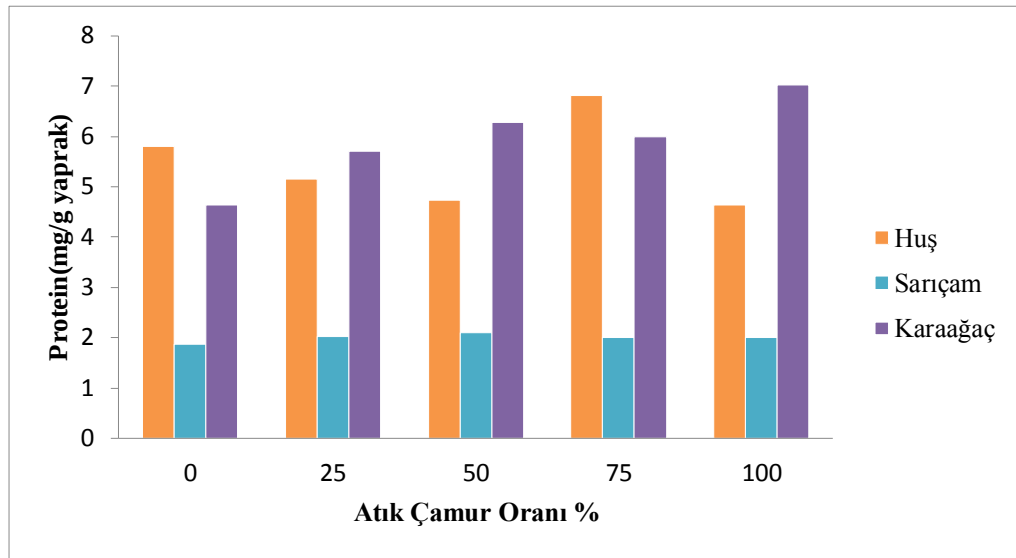
Şekil 44. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda O_2^- değerleri

Çözünebilir Protein Miktarı Bulguları

Tablo 15. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda Protein Değerleri (sonuçlar µg/g cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	5,421±0,845 ^b	3815,571	0.000*
	Karaağaç	5,907±0,80 ^a		
	Sarıçam	2,010±0,085 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	4,100±1,751 ^d	52,328	0.000*
	25	4,284±1,717 ^c		
	50	4,366±1,827 ^c		
	75	4,949±2,218 ^a		
	100	4,446±1,873 ^b		

Bitki türlerinde protein içerikleri bakımından, atık çamur oranlarında %25 ve %50 atık çamur uygulamalarında anlamlı bir farklılık görülmezken diğer oranlarda farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki protein değerlerinde sarıçam için bariz bir değişiklik yoktur. Huş için en yüksek değer %75 atık çamur uygulama dozunda gözlenirken %100 atık çamur uygulamasında belirgin bir düşüş vardır. Karaağaç için ise dalgalı bir seyir gözlenirken en yüksek değer %100 atık çamur uygulamasında gözlenmektedir (Şekil 45).



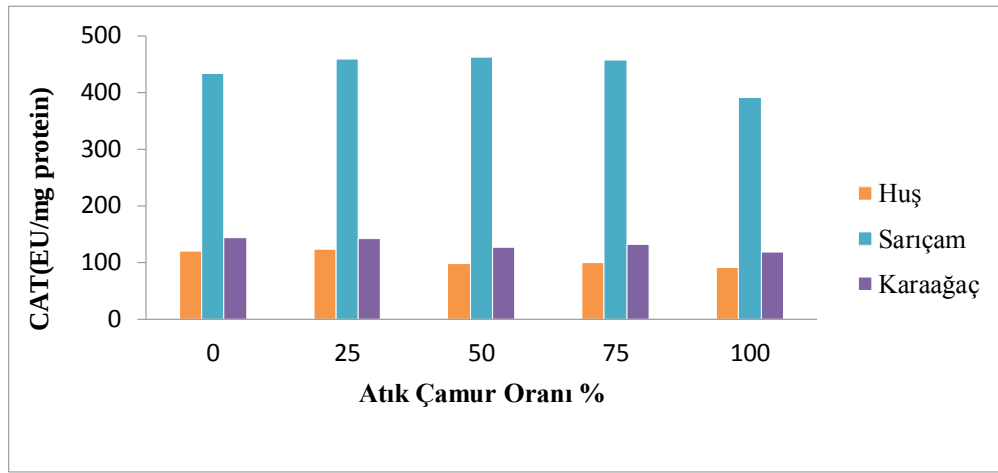
Şekil 45. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda protein değerleri

Katalaz (CAT) Aktivitesi Bulguları

Tablo 16. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda CAT Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir).

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	106,632±12,815 ^c	170700,774	0.000*
	Karaağaç	133,11±10,278 ^b		
	Sarıçam	440,277±27,526 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	232,245±151,421 ^b	721,347	0.000*
	25	241,852±162,884 ^a		
	50	229,029±175,183 ^c		
	75	229,882±170,102 ^c		
	100	200,374±143,538 ^d		

Tablo 16’da görüldüğü gibi; huş, karaağaç ve sarıçam için CAT değerleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranlarında %50 ve %75 atık çamur uygulamalarında anlamlı bir farklılık görülmezken diğer oranlarda anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki CAT değerlerinde genel olarak her bir tür için artan atık çamur uygulama dozlarında hafif dalgalanmalar gözlenmekle birlikte üç türde de %100 atık çamur uygulamalarında bariz bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 46).



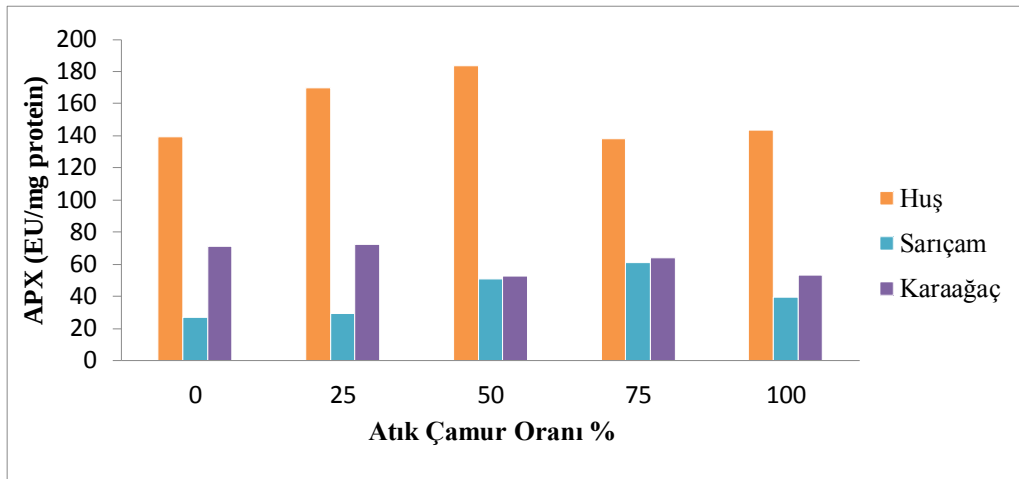
Şekil 46. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda CAT değerleri

Askorbat Peroksidaz Aktivitesi (APX) Bulguları

Tablo 17. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda APX Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	154,588±19,021 ^a	37753,013	0.000*
	Karaağaç	62,707±8,659 ^b		
	Sarıçam	41,772±13,681 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	78,625±49,086 ^d	351,469	0.000*
	25	90,410±61,792 ^b		
	50	95,762±65,704 ^a		
	75	88,0424±37,713 ^c		
	100	78,910±48,769 ^d		

Türler için APX değerleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmaktadır (Tablo 17). Atık çamur oranlarında %0 ve %100 atık çamur uygulamalarında anlamlı bir farklılık görülmezken diğer oranlarda anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki APX değerlerinde huş için %50 atık çamur uygulamasına kadar bir artış gözlenirken artan atık çamur uygulamalarında bu durum tersine dönerek azalma eğilimi gözlenmektedir. Sarıçamda %75 atık çamur uygulamasına kadar artış gözlenirken %100 atık çamur uygulamasında azalma barizdir. Karaağaç için, baştan itibaren bir artış olurken %50 atık çamur uygulamasında ani bir düşüş gözlenmiş ve devam eden atık çamur uygulamalarında %75 atık çamur uygulamasında yeniden ani bir artış ve nihai olarak %100 atık çamur uygulamasında düşüş gözlenmiştir (Şekil 47).



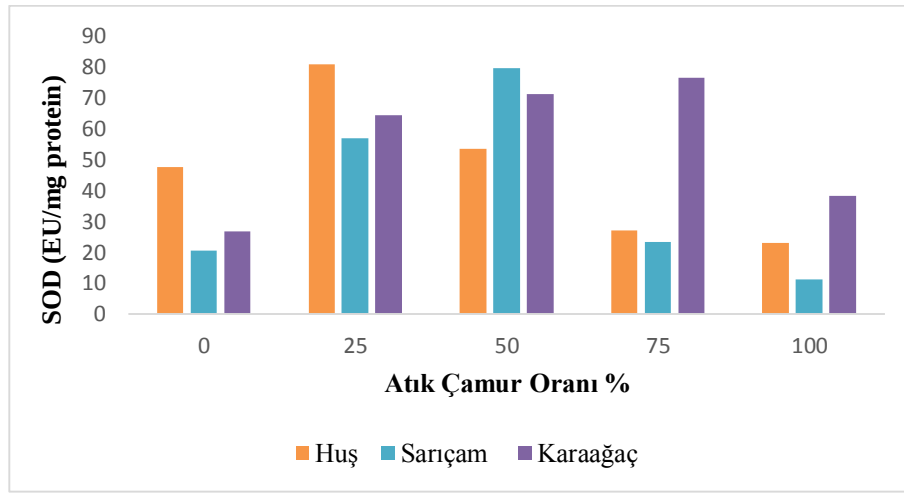
Şekil 47. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda APX değerleri

Süperoksit Dismutaz (SOD) Aktivitesi Bulguları

Tablo 18. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda SOD Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	46,231±21,425 ^b	1629,820	0.000*
	Karaağaç	55,403±20,143 ^a		
	Sarıçam	38,290±25,966 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	31,924±11,854 ^c	5291,066	0.000*
	25	67,102±10,694 ^a		
	50	67,578±11,248 ^a		
	75	42,184±25,908 ^b		
	100	24,419±11,401 ^d		

SOD aktivitesi için farklı ağaç türleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranlarında %25 ve %50 atık çamur uygulamalarında anlamlı bir farklılık görülmezken diğer oranlarda anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Atık çamur oranının bitkinin yapraklarındaki SOD değerlerinde huş için %25 atık çamur uygulamasına kadar bir artış gözlenirken artan atık çamur uygulamalarında bu durum tersine dönerek azalma eğilimi göstermektedir. Sarıçamda %50 atık çamur uygulamasına kadar artış gözlenirken %100 atık çamur uygulamasında azalma barizdir. Karaağaç için, %75 atık çamur uygulamasına kadar artış gözlenirken %100 atık çamur uygulama dozunda düşüş gözlenmektedir (Şekil 48).



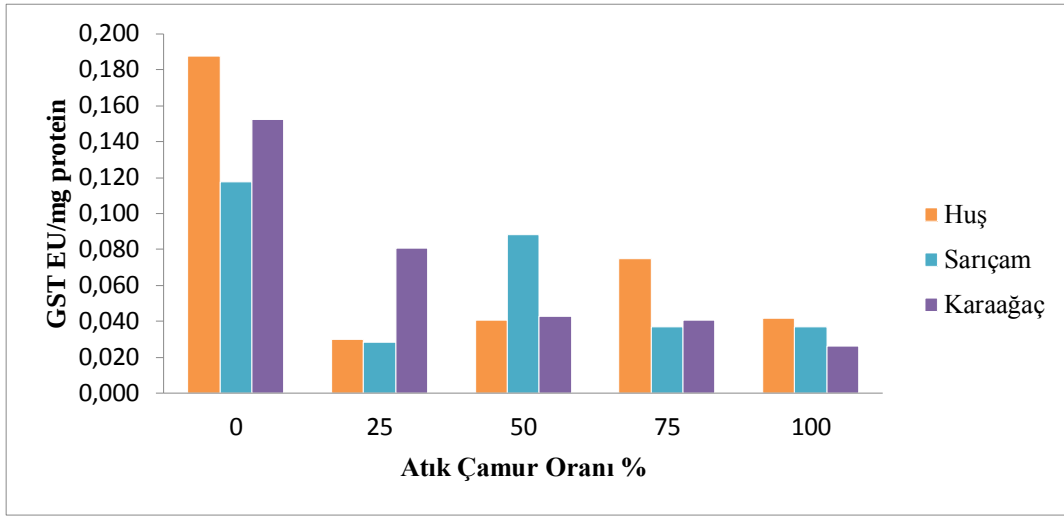
Şekil 48. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda SOD değerleri

Glutathione S-Transferaz (GST) Aktivitesi Bulguları

Tablo 19. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Yapraklarda GST Değerleri (sonuçlar EU/mg protein cinsinden verilmiştir)

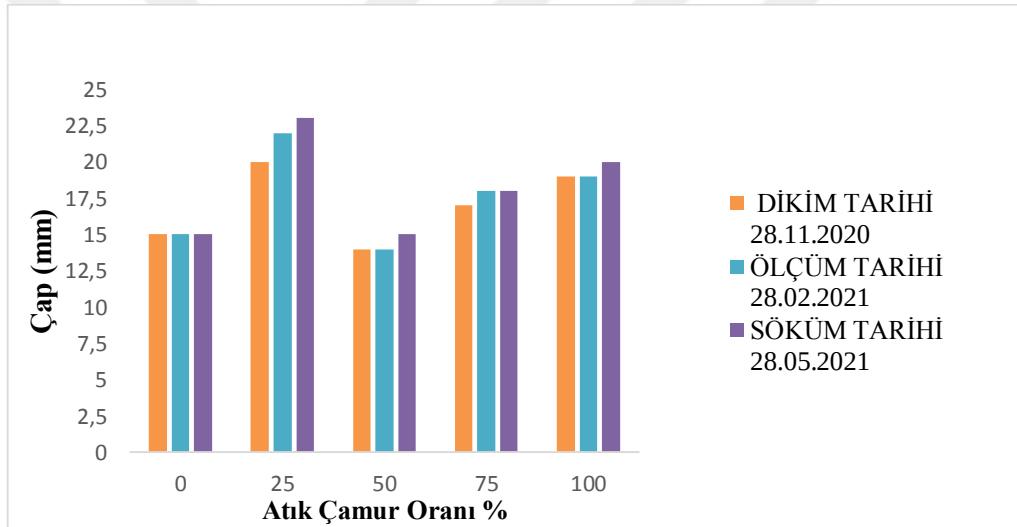
		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	0,0742±0,566 ^a	108,015	0.000*
	Karaağaç	0,694±0,479 ^b		
	Sarıçam	0,0598±0,037 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	0,151±0,027 ^a	2661,240	0.000*
	25	0,047±0,027 ^d		
	50	0,058±0,021 ^b		
	75	0,0505±0,0175 ^c		
	100	0,032±0,007 ^e		

Atık çamur oranları arasında ve türler arasında anlamlı bir farklılık gösteren GST aktivitesinde çamur oranlarına göre %0 dan %25 atık çamur uygulamasına kadar ani bir düşüş gözlenirken %50 ve %75 atık çamur uygulamalarında değerler gittikçe artmıştır ve %100 atık çamur uygulamasında bariz bir düşüş bulunmaktadır. Sarıçam için, yine %0 dan %25 atık çamur uygulamasına kadar ani bir düşüş gözlenirken %50 atık çamur uygulamasında artış gözlenmektedir ve artan atık çamur uygulamalarında düşüş barizdir. Karaağaç için, yine %0 dan %25 atık çamur uygulamasına kadar ani bir düşüş gözlenirken bu düşüş artan atık çamur uygulamalarında devam etmektedir (Şekil 49).

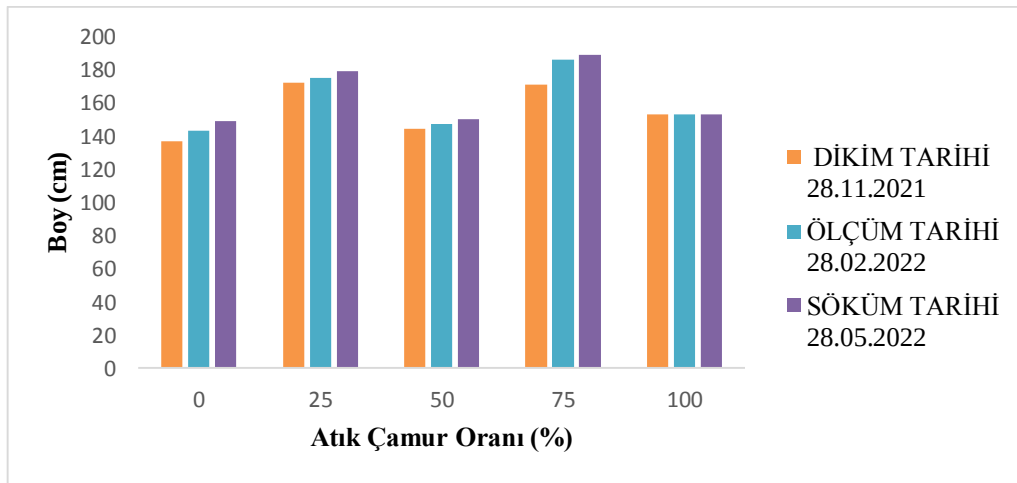


Şekil 49. Farklı atık çamur oranlarına göre yapraklarda GST değerleri

Bitkilerin Fiziksel Gelişimlerine Ait Bulgular

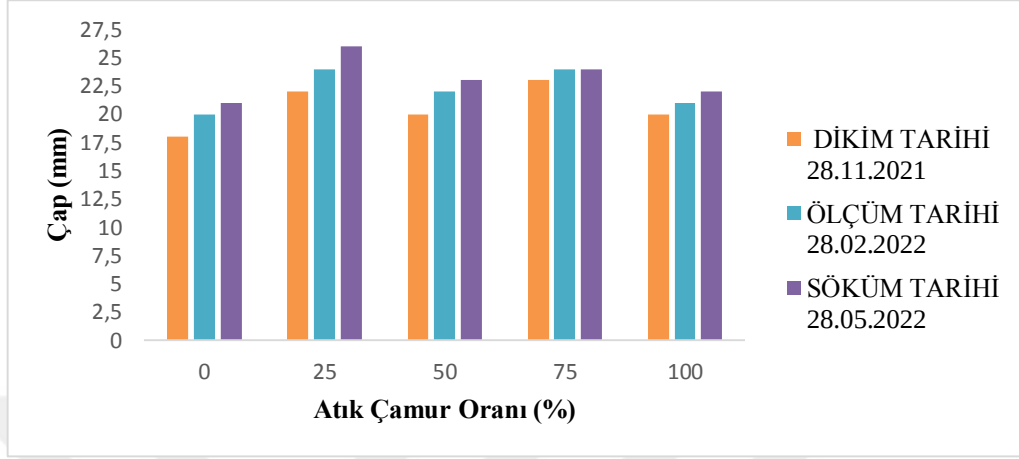


Şekil 50. Farklı atık çamur oranlarına göre huş ağacının çap gelişimi

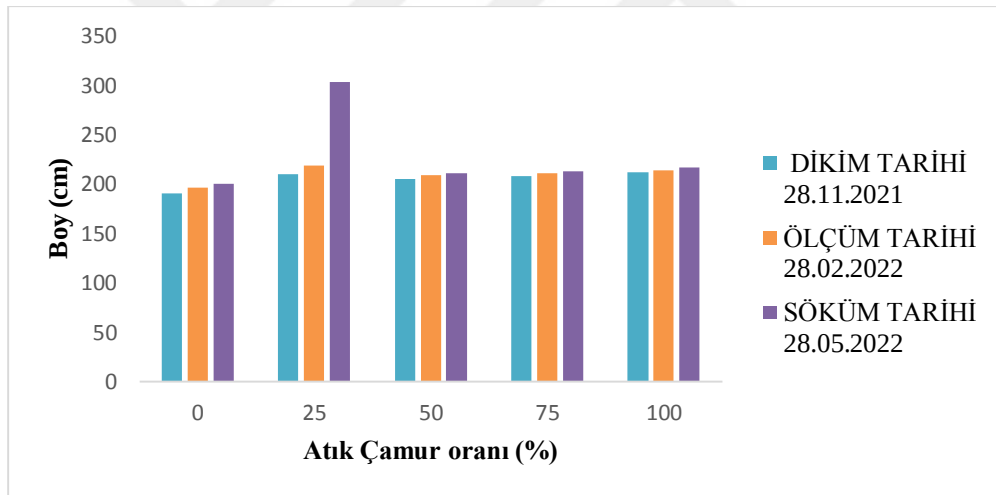


Şekil 51. Farklı atık çamur oranlarına göre huş ağacının boy gelişimi

Huş ağacının fiziksel gelişimi, uygulanan atık çamur dozlarına olumlu tepkiler vermiştir. Fakat %100 atık çamur uygulama dozunun ağacın gelişimine önemli bir katkı sağlamadığı gözlenmiştir. Bu durum atık çamurun belirli dozlarında bitkinin gelişimine katkı sağladığı, yüksek dozlarında ise gelişimini gerilettiğinin göstergesidir (Şekil 50,51).

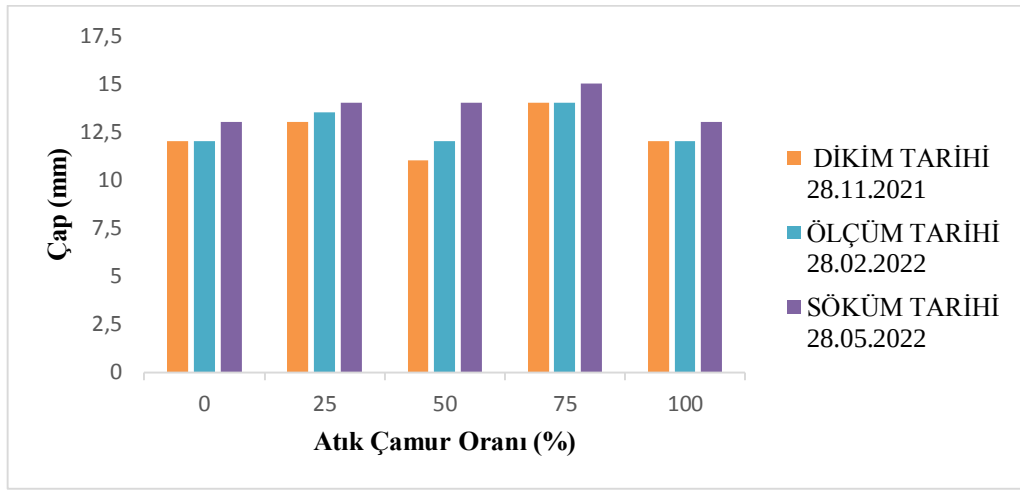


Şekil 52. Farklı atık çamur oranlarına göre karaağacın çap gelişimi

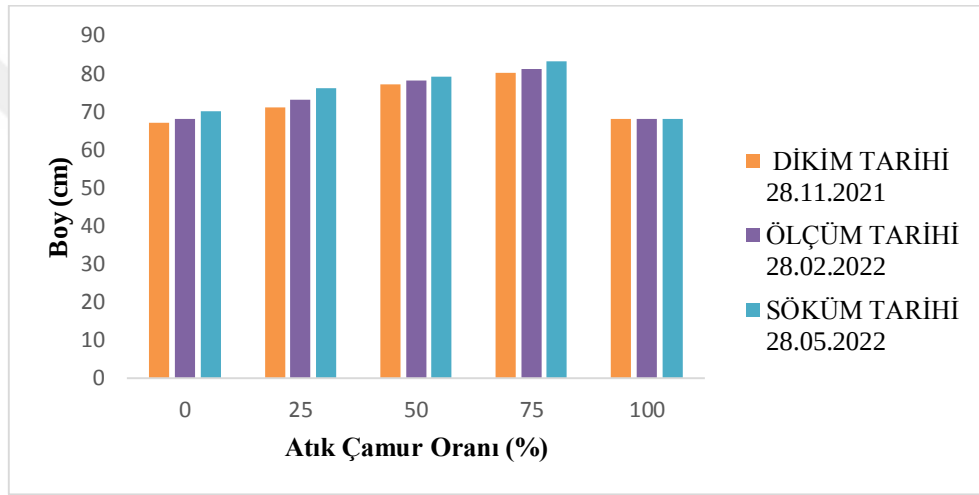


Şekil 53. Farklı atık çamur oranlarına göre karaağacın boy gelişimi

Karaağacın çap ve boy gelişim grafikleri incelendiğinde; %25 atık çamur uygulamasının, en faydalı gübre etkisi yaptığı gözlenmektedir. Diğer artan çamur uygulamalarında gelişimin gerilediği gözlenmektedir (Şekil 52,53).



Şekil 54. Farklı atık çamur oranlarına göre sarıçamın çap gelişimi



Şekil 55. Farklı atık çamur oranlarına göre sarıçamın boy gelişimi

Sarıçamın boy ve çap gelişim grafiklerinden gözlenen; %50 çamur uygulamasına kadar gelişiminin olumlu yönde ilerlediği fakat yüksek dozlarda arıtma çamurunun ağaç gelişimine herhangi bir katkı sağlamadığıdır (Şekil 54, 55).

Atık çamur uygulamasının, toprağın kimyasal, mikrobiyolojik ve biyokimyasal özelliklerini ve denemelerde kullanılan huş ağacı, karaağaç ve sarıçamın biyolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Deneysel bulgular neticesinde her üç ağaç türünün; mikrobiyal biyokütlesi, mikrobiyal aktivitesi, enzim aktivitesi ve biyolojik özellikleri artan çamur oranına paralel olarak önce artan daha sonra azalan bir grafik sergilemiştir. Bu sonuçlar toprak ekosisteminde deneme bitkileri için atık çamur uygulamasının olumlu etkilerinin yanı sıra olumsuz etkilerinin de olduğunu göstermiştir. Bir taraftan arıtma çamuru uygulanması, toprağın mikrobiyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin iyileşmesine destekleyerek deneme ağaçlarının büyümesine yardımcı olurken diğer taraftan çamurun yüksek elektriksel

kondüktiviteye sahip olması ve ağır metal içeriği sebebiyle, mikrobiyal biyokütle ve aktivitenin azalmasına neden olarak bitki büyümesini engellediği görülmüştür (Xue and Xiangdong 2013).

Fizyolojik analiz bulgularına göre; ağaçların büyümesi ve toprak özellikleri üzerindeki olumlu etkisinden yararlanmak ve olası zararlı etkilerden kaçınmak için arıtma çamurlarının akılcı kullanımının önemli olduğunu sonucuna varılmıştır. Özellikle enzim aktivitesi seviyeleri baz alındığında, huş ve karaağaç için %25'lik, sarıçam için %50 atık çamur uygulamasının optimum doz olduğu tespit edilmiştir. Atık çamur uygulamaları sonucunda, bitkilerde toksisiteye tolerans sağlamada belirtilen bazı önemli metabolik olayları gerçekleştiren antioksidan enzimlerin ekspresyonu ve aktivasyonu ile oksidatif stresin ortaya çıkması sonucunda oluşan sekonder hasarları önlemeye hatta düzeltmeye yönelik savunma sistemleri geliştirmektedirler. Yüksek atık çamur dozlarında bitkilerde enzimatik aktivitelerde azalma gözlenirken bitkinin savunma mekanizmalarının (ROS) seviyelerinde yükselme gözlenmiştir (Wyrwicka *et al.* 2016). Ayrıca yüksek atık çamur uygulamalarıyla birlikte bitkilerde MDA düzeyindeki artış; oksidatif stres sonucunda, reaktif oksijen türlerinin, hücre zarındaki lipidlerden elektronları uzaklaştırarak lipid peroksidasyonuna yol açması sonucunda fazla miktarda lipid peroksidasyonunun açığa çıkmasıyla açıklanır (Sevgi ve Leblebici 2022).

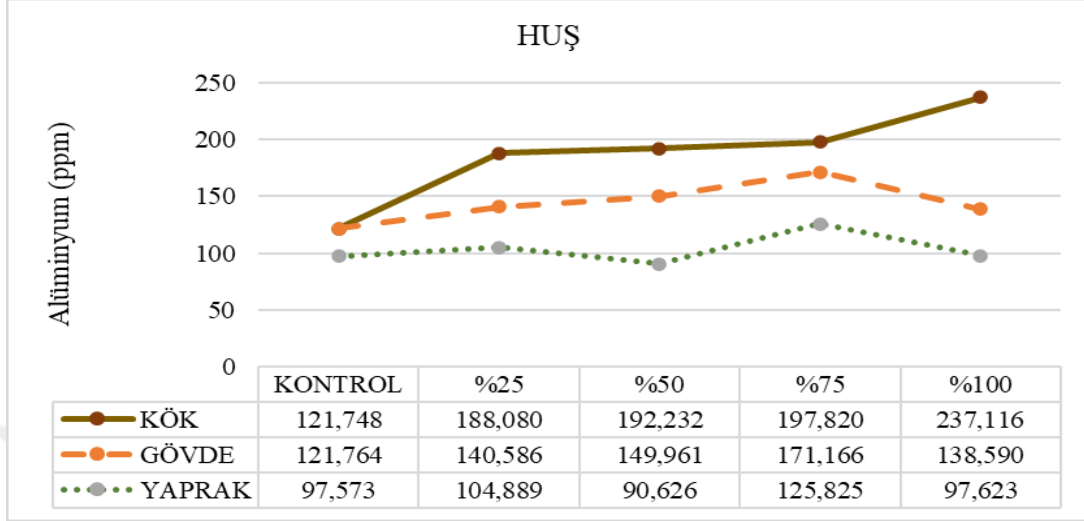
Fizyolojik analiz bulguları neticesince, belirli bir düzeye kadar artan atık çamur uygulamasına karşın bitkilerin metabolik faaliyetlerinde önemli rol üstlenen antioksidan enzimlerin artış göstermesi, bitkilerin fizyolojisine önemli bir katkı sağladığının kanıtıdır. Bu çerçevede bulgularımız literatür çalışmalarıyla uyumlu seyir göstermektedir. Fakat yapılan bir çalışmada salatalık bitkisine artan dozlarla uygulanan atık çamur uygulamasının APX, POX ve GST aktiviteleri artırdığı gözlenirken CAT aktivitesini düşürdüğü gözlenmiştir (Wyrwicka and Urbaniak 2016).

Yapılan bir diğer çalışmada; düşük kaliteli toprakta yetişen bitkiler için arıtma çamuru yönetimi, oksidatif hasara karşı koruma, antioksidan sistemin etkin işleyişi ve toprak ortamı arasındaki ozmotik dengenin korunması ile ilişkili olarak bitki büyümesi için iyi koşullar oluşturmak amacıyla açık arazide uygulanan atık çamur dozlarının, söğüt ağacının (*Salix viminalis* L.) biyokütlesinde büyük bir artışa neden olduğu ve CAT aktivitesinin kontrol ağaçlara kıyasla oldukça arttığı gözlenmiştir (Wyrwicka and Urbaniak 2018).

Bitkilerin; Metal, Ağır Metal ve Besin Maddesi İçeriklerinin Analiz Bulguları

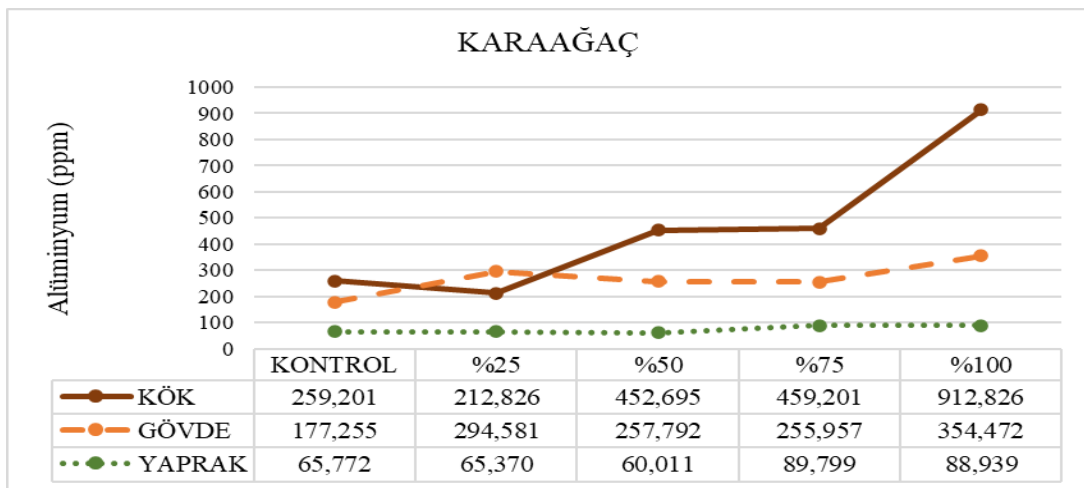
Bitkilerin; metal ve ağır metal içeriklerinin analiz bulguları

Bitkilerin alüminyum içeriklerine ait analiz bulguları



Şekil 56. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) alüminyum birikimi

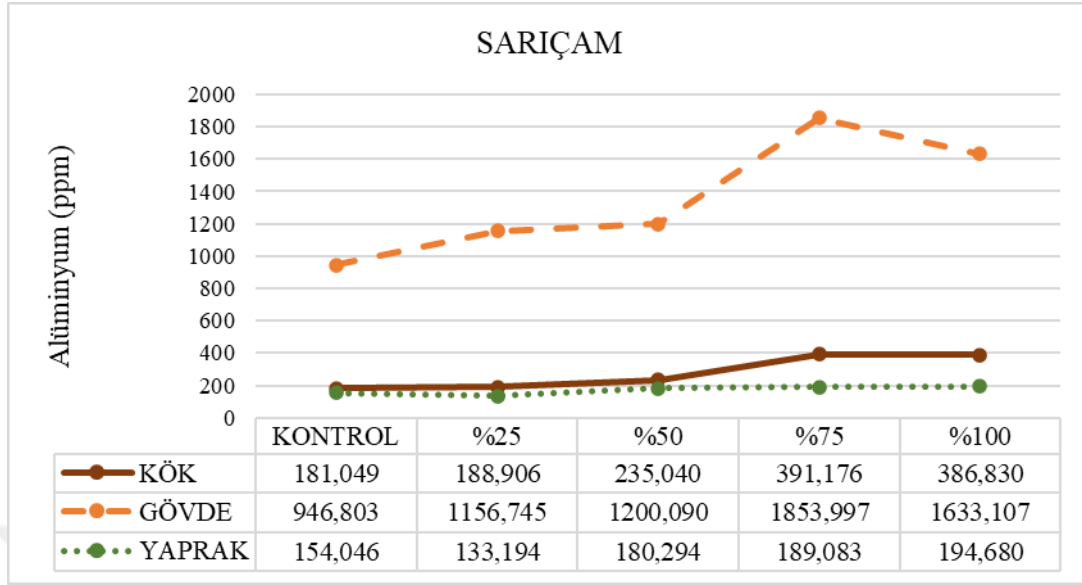
Huş ağacına ait analiz bulguları doğrultusunda, alüminyum birikiminin, bitkinin kısımlarında kök>gövde>yaprak şeklinde olduğu görülmektedir. Alüminyumun, kök kısmında daha fazla birikim yaptığı ve gövde ile yapraklara aktarımının yavaş olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak bitkinin organlarında atık çamur oranı arttıkça alüminyum birikiminde artış olduğu gözlenmiştir. Kök kısmında en önemli alüminyum birikimi %100 atık çamur oranında olurken gövde ile yapraklarda en yüksek birikiminin %75 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 56).



Şekil 57. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) alüminyum birikimi

Karaağacın artan atık çamur uygulamalarına karşın bünyesinde alüminyum birikimini gösteren grafik incelendiğinde, birikim sıralamasının kök>gövde>yaprak olduğu

görülmektedir. Bu durum alüminyumun, ağacın kök kısmında kaldığı ve diğer organlara yeterince iletilemediğini göstermektedir (Şekil 57).



Şekil 58. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) alüminyum birikimi

Alüminyum elementinin sarıçamın organlarında birikimi; gövde>kök>yaprak şeklinde olup gövde kısmında diğer organlara göre çok fazla bir birikim söz konusudur. Alüminyum, kök ve gövde kısmında atık çamur uygulama dozlarına paralel şekilde artış göstermiş fakat gövde kısmında olduğu kadar birikememiştir (Şekil 58).

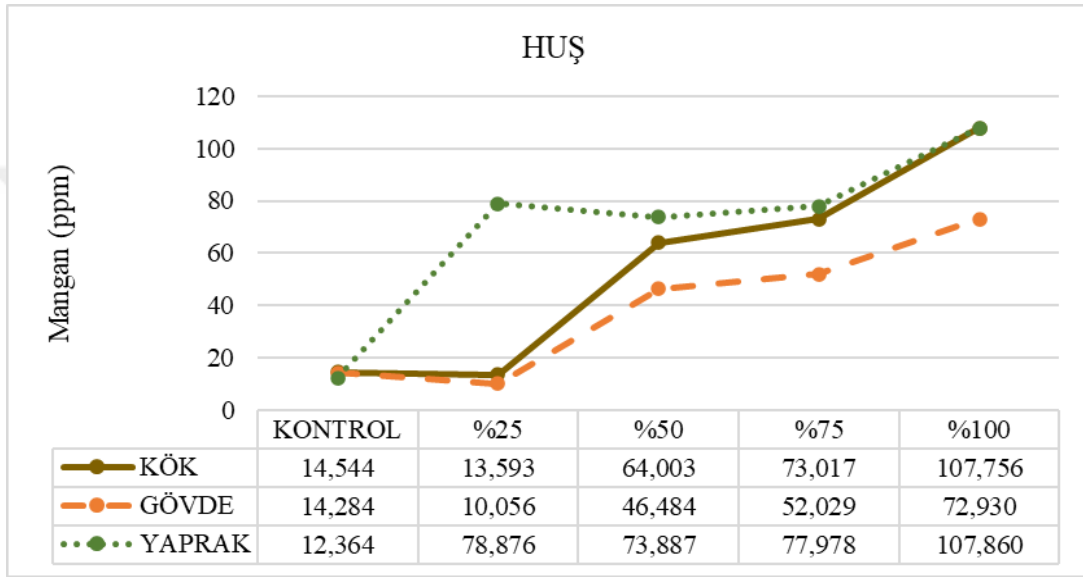
Tablo 20. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Alüminyum Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	146,298±42,420 ^c	9967,334	0.000*
	Karaağaç	267,804±218,478 ^a		
	Sarıçam	220,143±79,382 ^b		
Ağaç Bölüm	Kök	308,735±194,110 ^a	24726,207	0.000*
	Gövde	209,601±69,443 ^b		
	Yaprak	115,909±44,508 ^c		
Atık Çamur Oranı (%)	0	153,560±56,800 ^e	5734,185	0.000*
	25	163,949±63,627 ^d		
	50	198,469±109,023 ^c		
	75	242,144±117,634 ^b		
	100	298,953±243,999 ^a		

Genel olarak denemelerde kullanılan ağaçlar, alüminyum birikimi konusunda değerlendirildiğinde; huş ve karaağaçta kök kısmında sarıçamda ise gövdede daha fazla birikim olduğu gözlenmiştir. Alüminyum toprakta genellikle tampon vazifesi görerek ph seviyesini dengeler. +3 değerlikli formları genellikle $Al(OH)_3$ formuna çevrilir ve bu formuyla çökme

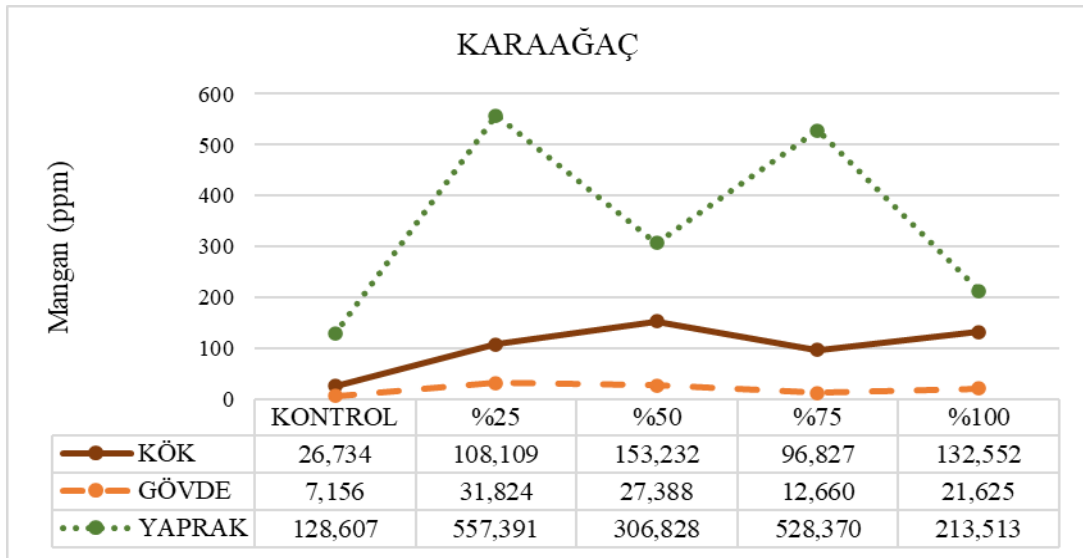
eğilimindedir. Alüminyumun bitkinin genellikle köklerinde depolanması ve diğer organlarına yayılamamasının nedeni budur. Ayrıca bitkinin kök kısmındaki vakuolleri, bitkiyi alüminyumun olumsuz etkilerinden korumak için alüminyum köklerde tutma eğilimindedir. Ağaçların alüminyum bünyelerine alma kapasiteleri sarıçam>karaağaç>huş şeklinde sıralanabilir. Huş ağacı alüminyum, diğer ağaçlar göre neredeyse 10 kat daha düşük miktarlarda bünyesine alabilmiştir. Bu durum alüminyum için en iyi biyoakümülatör bitkinin sarıçam ve karaağaç olduğunu göstermektedir.

Bitkilerin mangan içeriklerine ait analiz bulguları



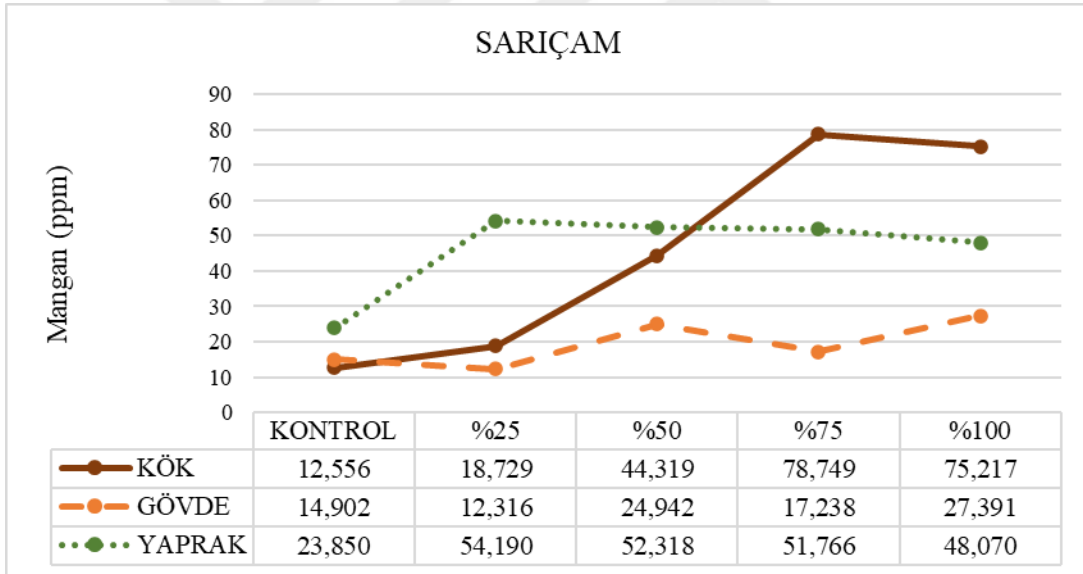
Şekil 59. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) mangan birikimi

Huş bitkisinin bünyesinde mangan metalini biriktirme kapasitesi yaprak>kök>gövde olarak gözlenmiştir. Bu sıralamaya göre, bitkinin yetiştirme ortamından aldığı manganın en çok kök ve yaprak kısımlarında kümeleştiği ve gövdenin mangan için aktarım görevi yaptığı söylenebilir. Kök ve gövde kısımlarında %50'lik atık çamur dozu ile önemli bir artış gösteren mangan, yaprak kısmında ise %25 atık çamur uygulamasında önemli bir artış yakalamıştır. Genel olarak atık çamur oranının artmasıyla beraber mangan miktarının arttığı ve her üç organ için de en yüksek birikimin %100 atık çamur uygulamasında olduğu görülmektedir (Şekil 59).



Şekil 60. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) mangan birikimi

Karaağacın mangan biriktirme kapasitesi; yaprak>kök>gövde şeklindedir. Genel olarak üç organda da atık çamur uygulama dozlarına karşın dalgalı bir ilerleme gösteren manganın gövde kısmında düşük miktarlarda birikim yaptığı görülmektedir (Şekil 60).



Şekil 61. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) mangan birikimi

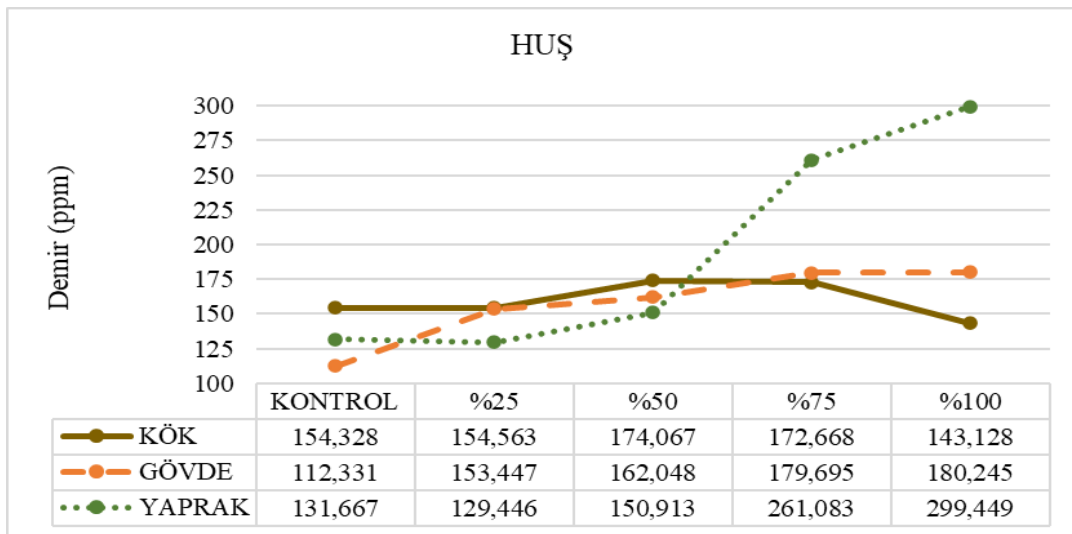
Sarıçamda atık çamur uygulama dozlarının artışına bağlı olarak, kök ve gövdede artış gösteren mangan miktarı, yaprak kısmında %50 doz uygulamasından sonra sabit bir seyir izlemiştir. Bu durum %50'in üzerindeki atık çamur doz uygulamalarında, manganın yaprak dokularda birikemediğinin göstergesidir.

Tablo 21. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Mangan Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	54,992±33,711 ^b	27962,191	0.000*
	Karaağaç	157,634±173,367 ^a		
	Sarıçam	38,222±22,592 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	68,871±45,127 ^b	28841,218	0.000*
	Gövde	26,587±18,264 ^c		
	Yaprak	155,391±170,662 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	29,011±37,297 ^e	4036,939	0.000*
	25	99,376±168,616 ^b		
	50	88,701±85,517 ^d		
	75	110,412±153,355 ^a		
	100	90,580±57,231 ^c		

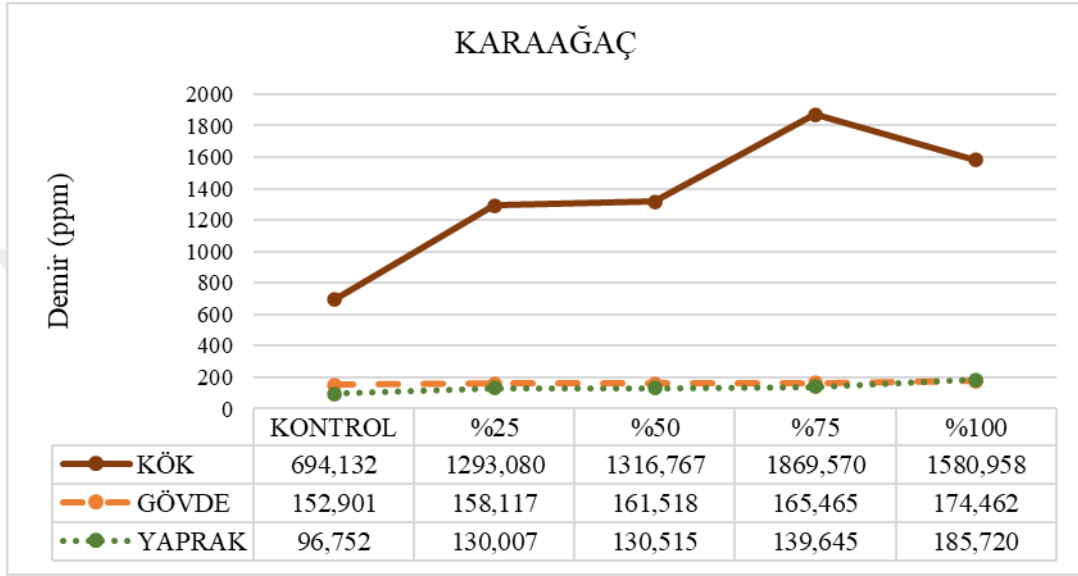
Genel olarak; huş, karaağaç için manganın yaprakta daha yoğun biriktiği gözlenirken sarıçamda bu durum %50 çamur doz uygulamasından daha yüksek dozlarda farklılık göstererek kök kısmında daha fazla birikim yaptığı görülmektedir. Mangan doğada +2 ve +4 değerlikli formlarda bulunmaktadır. Mn^{+2} bitki bünyesine daha kolay alınabilir ve yaprak kısımlarına daha kolay ilerleme eğilimindedir. Mn^{+3} ise toprakta kolaylıkla çözünemediğinden bitkinin köklerinden girişi zordur. Köklere alınma durumunda ise bitkinin üst aksamlarına çıkamaz ve çökme eğilimindedir. Mangan birikimi denemelerde kullanılan bitkilerde; karaağaç>huş>sarıçam şeklindedir. Karaağacın mangan elementini diğer ağaçlara göre büyük bir farkla yaprak dokularında biriktiği çok açıktır.

Bitkilerin demir içeriklerine ait analiz bulguları



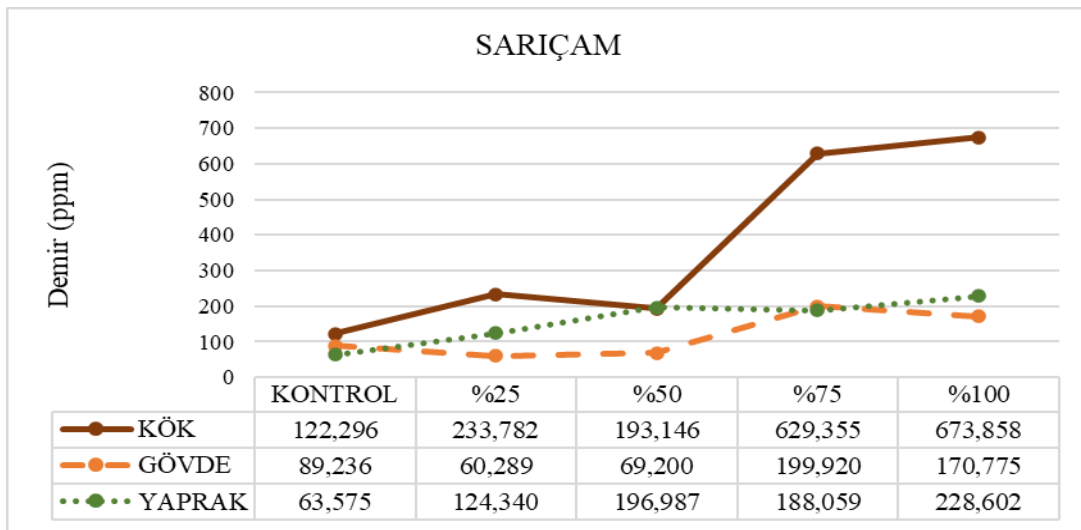
Şekil 62. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) demir birikimi

Şekil 62’de görüldüğü gibi huş bitkisinin organlarının, demir elementini biriktirme kapasitesinin atık çamur uygulama dozlarına göre değişim gösterdiği barizdir. Genellikle çamur dozuna paralel bir artış gösteren demir miktarı, yaprak kısmında %75 atık çamur uygulaması ile birlikte yüksek bir ivme göstermiştir. Gövde kısmında, atık çamur dozuna paralel normal bir seyirde ilerleyen demir miktarı kök kısmında %75’lik çamur dozu uygulamasıyla azalma eğilimi göstermektedir. Bu bilgiler ışığında %75 atık çamur uygulamasında kök kısımdan yapraklara doğru hızlı bir aktarım olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 63. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) demir birikimi

Karaağaçta demir miktarının bariz bir farkla kök bölgesinde yoğunlaştığı ve atık çamur oranının artan dozlarında dahi diğer organlarına iletilemediği görülmektedir. Genel olarak atık çamurun artan dozlarına karşın çamurun içeriğindeki yüksek demir miktarının arttığı fakat demirin gövde ve yaprak kısımlarına yeteri kadar iletilemediği görülmüştür (Şekil 63).



Şekil 64. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) demir birikimi

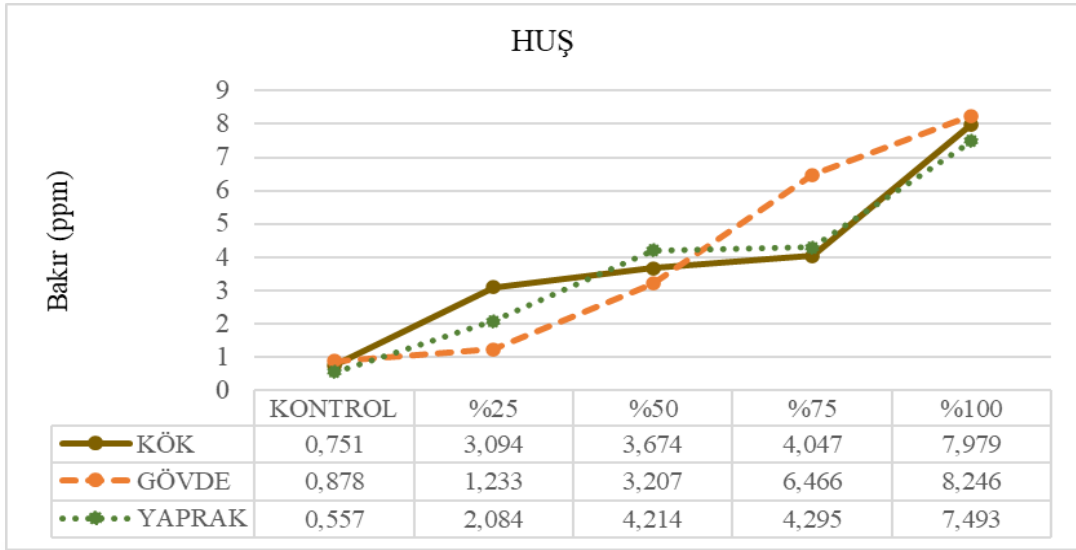
Sarıçamda demir birikiminin, bariz bir farkla kök bölgesinde daha fazla olduğu söylenebilir. Bu durum karaağaçta olduğu gibi demir elementinin kök kısımdan gövdeye ve yapraklara yeterince iletilemediğinin göstergesidir. Beklendiği gibi artan çamur dozlarına karşın demir miktarının organlarda arttığı görülmektedir. Bu artışın %75'lik doz uygulamasından sonra daha düşük seyrettiği görülmektedir (Şekil 64).

Tablo 22. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Demir Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	171,0216±47,829 ^c	27962,191	0.000*
	Karaağaç	549,915±616,170 ^a		
	Sarıçam	216,306±180,698 ^b		
Ağaç Bölüm	Kök	627,469±586,727 ^a	28841,218	0.000*
	Gövde	146,434±41,615 ^c		
	Yaprak	163,338±61,591 ^b		
Atık Çamur Oranı (%)	0	180,147±187,565 ^e	4036,939	0.000*
	25	271,871±369,580 ^d		
	50	284,295±370,900 ^c		
	75	423,226±541,381 ^a		
	100	402,549±453,361 ^b		

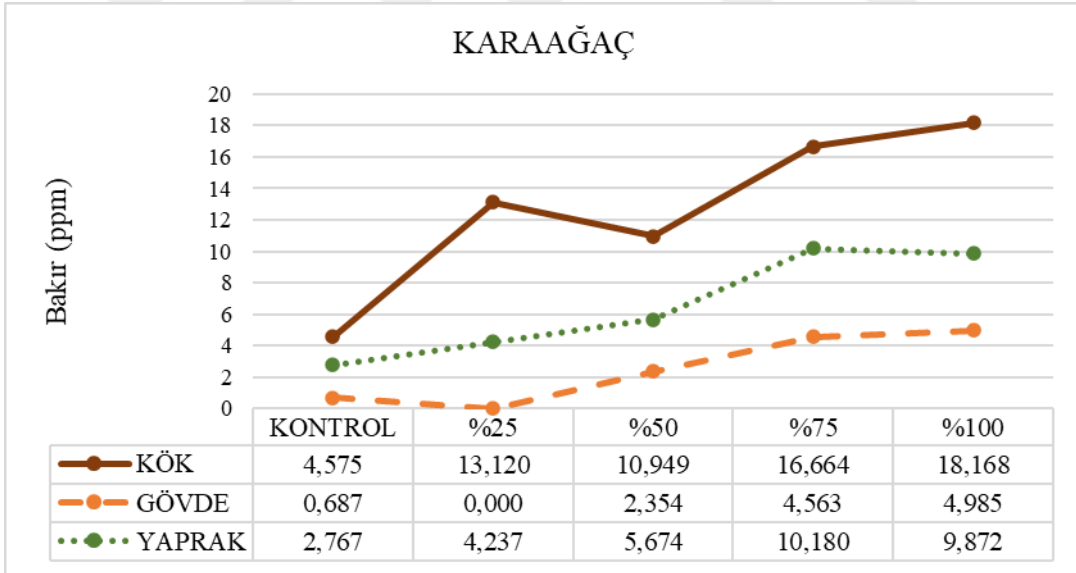
Toprak ortamında ve atık çamur içeriğinde yüksek miktarlarda bulunan demir elementinin, denemelerde kullanılan ağaçların genel olarak kök bölgesinde toplandığı ve üst akşamlara yeterince iletilemediği görülmektedir. Bu durumun muhtemel nedeni; kök bölgesinde biriken demirin yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle üst kısımlara taşınamamasıdır. Genel olarak bitkilerin bünyesinde demir birikimi karaağaç>sarıçam>huş olarak sıralanmaktadır. Karaağacın demir elementini diğer ağaçlara göre bariz bir farkla kök bölgesinde daha fazla depoladığı görülmektedir.

Bitkilerin bakır içeriklerine ait analiz bulguları



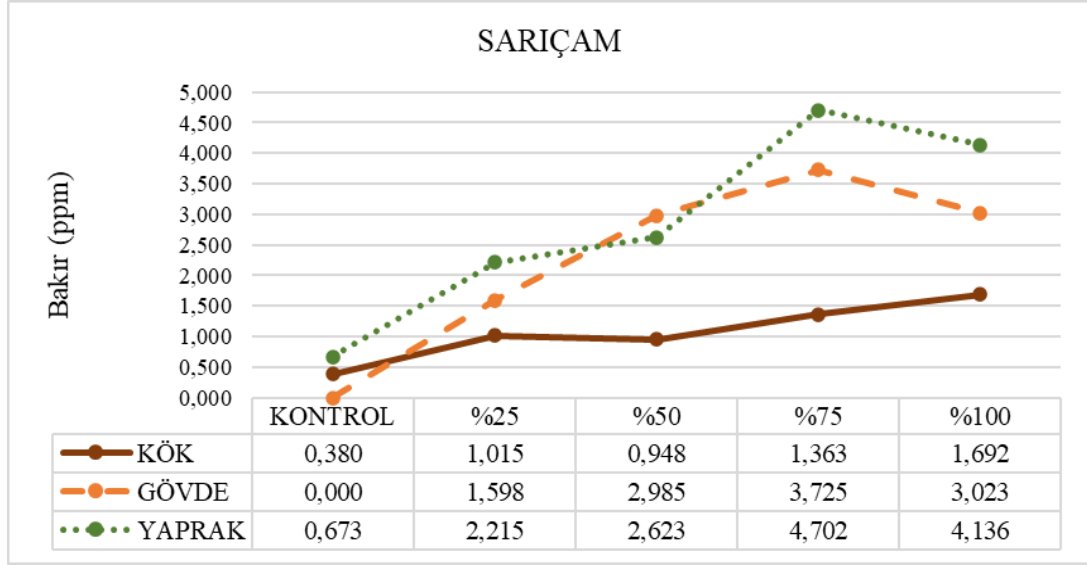
Şekil 65. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) bakır birikimi

Genel olarak huş bitkisinde, atık çamur uygulama dozuna paralel bir artış gösteren bakır konsantrasyonu, kök, gövde ve yaprak için en yüksek artışını %100 atık çamur uygulamasında göstermiştir (Şekil 65).



Şekil 66. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) bakır birikimi

Karaağaçta bakır birikiminin kök>yaprak>gövde şeklinde sıralandığı görülmektedir. Artan çamur dozlarına paralel birikim miktarında da artış gözlemlenen bakır elementi, karaağacın diğer organlarına göre gövdesinde düşük miktarda birikmiştir. Bu durum gövdenin kök ile yaprak arasında bakır elementini taşıma görevi yaptığını ve gövde kanallarında birikmediğini göstermektedir (Şekil 66).



Şekil 67. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) bakır birikimi

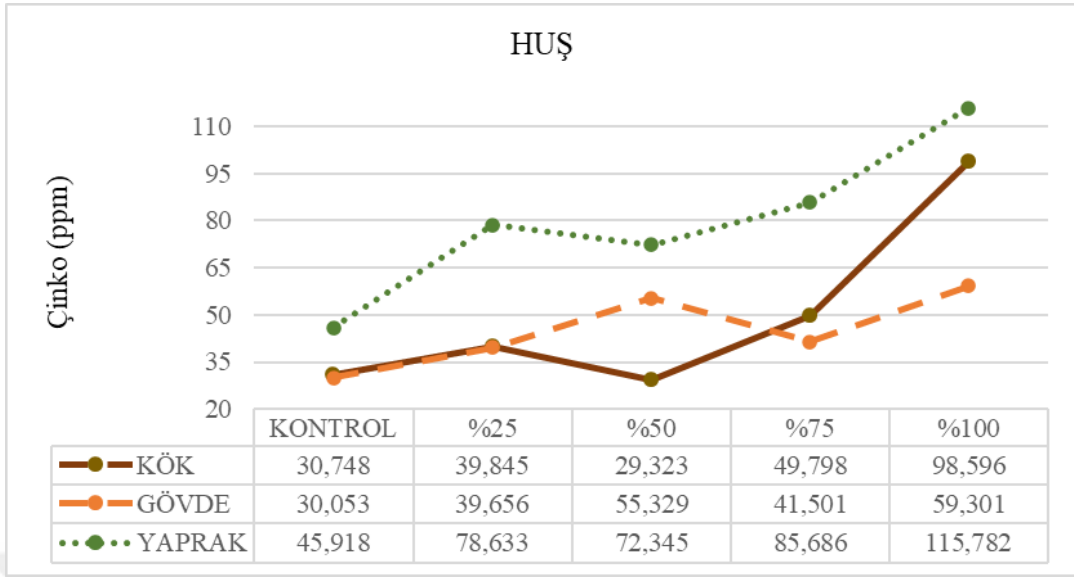
Sarıçamda, diğer deneme ağaçlarından farklı olarak yaprak kısmında yoğunlaşan bakır miktarı, en az birikimini kök bölgesinde yapmıştır. Artan atık çamur miktarına karşın bakır elementinin genel olarak miktarının arttığı fakat gövde ve yaprak kısmında %75’lik çamur uygulamasından sonra azalmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu durumun, bitkinin gövde ve yaprak kısmında bakır kapasitesinin üst limitini aşmasından kaynaklandığı öngörülmektedir (Şekil 67).

Tablo 23. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Bakır Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	3,962±2,637 ^b	2494,539	0.000*
	Karaağaç	7,467±5,630 ^a		
	Sarıçam	2,085±1,392 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	6,003±6,049 ^a	772,338	0.000*
	Gövde	2,964±2,408 ^c		
	Yaprak	4,548±2,957 ^b		
Atık Çamur Oranı (%)	0	1,340±1,559 ^e	1183,556	0.000*
	25	3,273±3,852 ^d		
	50	4,110±2,746 ^c		
	75	6,432±4,685 ^b		
	100	7,369±4,822 ^a		

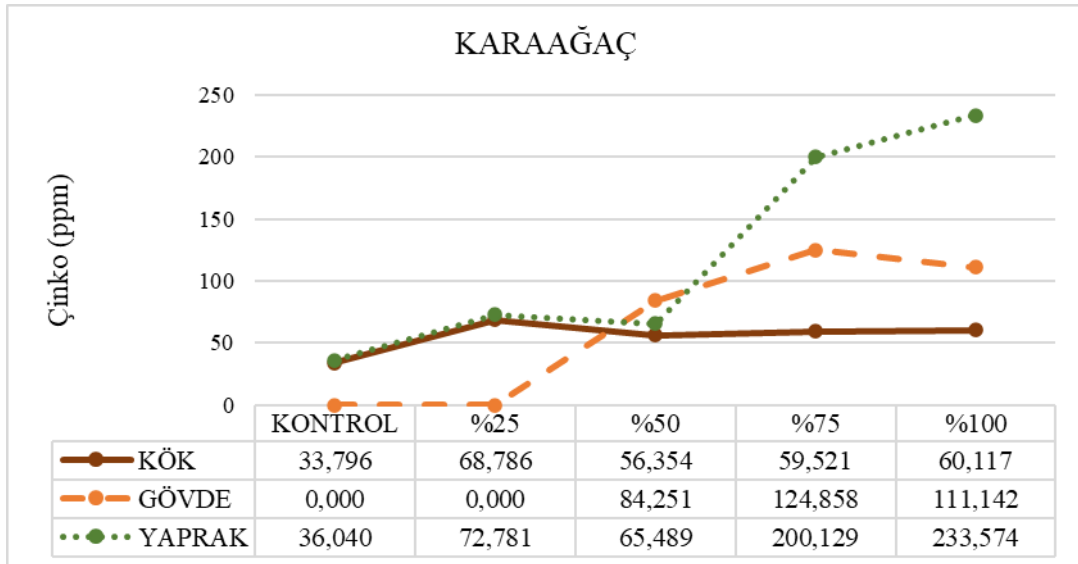
Karaağaç>huş>sarıçam sıralaması ile bitkilerin bünyesinde biriken bakır her üç ağacın bünyesinde farklı organlarda birikmiştir. Karaağacın bakır için uygun bir biyoakümülatör bitki olduğu söylenebilir.

Bitkilerin çinko içeriklerine ait analiz bulguları



Şekil 68. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) çinko birikimi

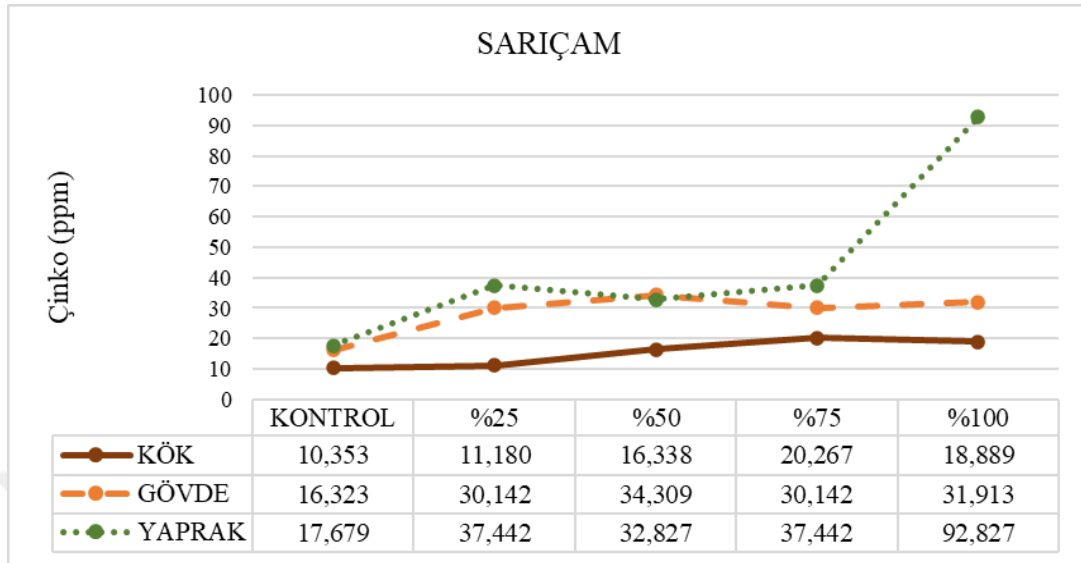
Çinko elementinin, huş bitkisinin organlarında önemli farklılıklarla biriktiği gözlenmiştir. Yaprak kısmında diğer organlara göre daha yüksek bir birikim gösteren çinko, bitkinin kök ve gövde kısımlarında dalgalı bir seyir izlemiştir. %25 atık çamur uygulamasına kadar aynı seyrde ilerlediği fakat %50 atık çamur uygulamasında kök kısmında azalma gövdede ise artma eğilimi gösteren çinko miktarı, gövdede %75 atık çamur uygulamasında azalma göstermiştir ve kök kısmında ivmelenerek artmıştır (Şekil 68).



Şekil 69. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) çinko birikimi

Atık çamurun artan uygulama dozlarına göre, karaağacın kök bölgesinde daha az miktarlarda artış gösteren çinko, bitkinin gövde kısmında %50 atık çamur miktarından sonra ivme kazanarak artmıştır. En yüksek birikimini yaprak kısmında %100 atık çamur

uygulamasıyla gösteren çinkonun genel olarak bitkinin bütün organlarında birikim yapmıştır (Şekil 69).



Şekil 70. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) çinko birikimi

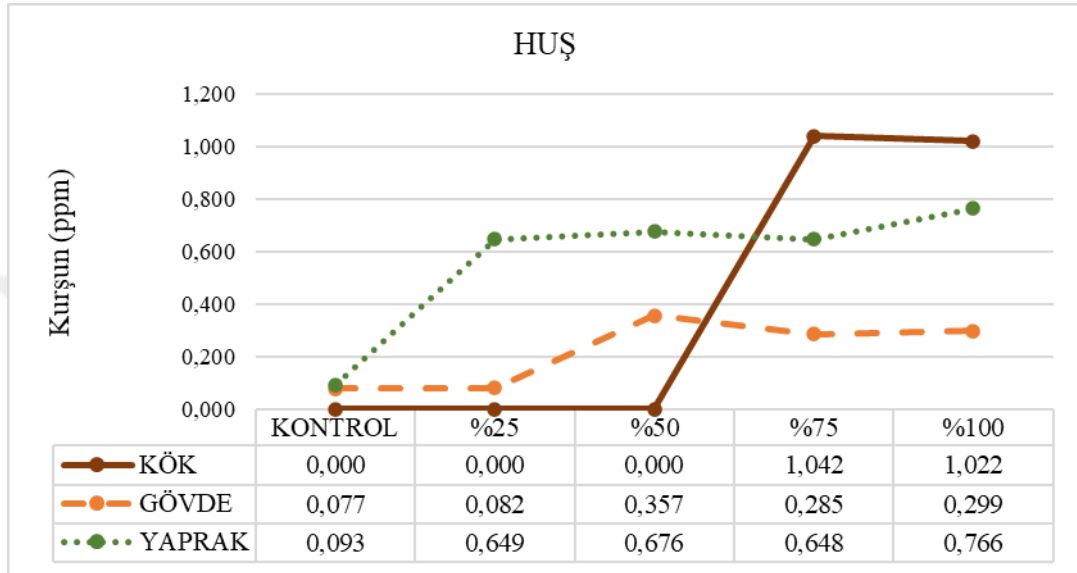
Çinko miktarının birikiminin sarıçamın bünyesinde yaprak>gövde>kök şeklinde sıralandığı görülmektedir. Bu durum bitkinin kökleri vasıtasıyla alınan çinkonun gövdeye ve oradan da yapraklara düzenli bir şekilde aktarıldığını göstermektedir. Yalnızca toprak ortamında yetiştirilen kör numunelerde de aynı şekilde topraktan alınan çinko kökten yapraklara düzenli bir şekilde aktarılmış ve yine en fazla birikimini yaprak dokularında yapmıştır (Şekil 70).

Tablo 24. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Çinko Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	58,372±25,790 ^b	5951,340	0.000*
	Karaağaç	81,117±65,164 ^a		
	Sarıçam	29,204±18,878 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	40,228±23,946 ^c	4460,627	0.000*
	Gövde	46,471±36,129 ^b		
	Yaprak	81,995±61,124 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	24,061±13,636 ^e	3722,053	0.000*
	25	42,422±26,21 ^d		
	50	49,963±21,897 ^c		
	75	72,512±55,998 ^b		
	100	92,197±61,956 ^a		

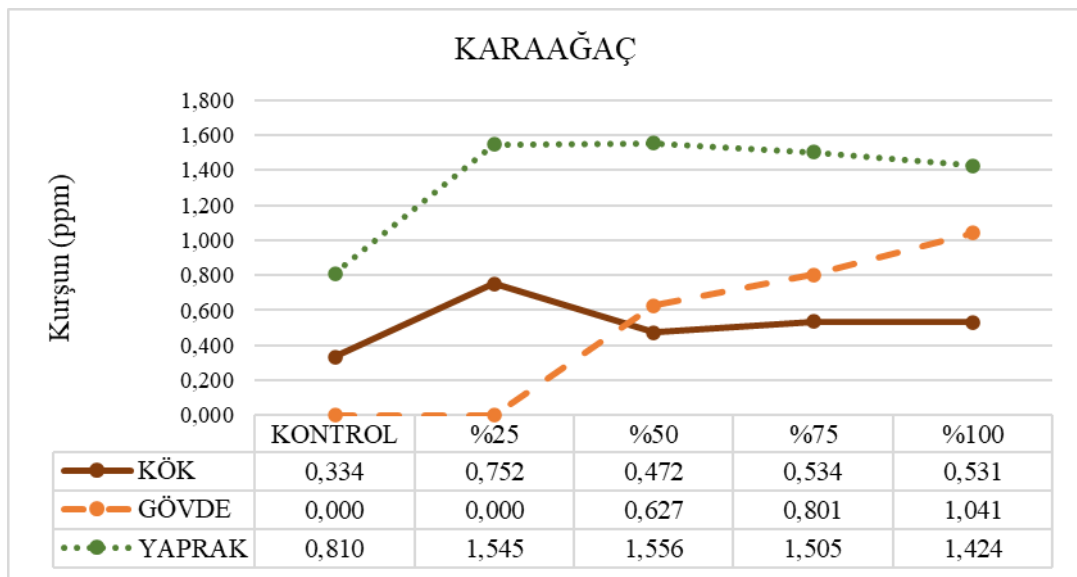
Denemelerde kullanılan bitkilerde, çinko birikimi için genel bir değerlendirme yapılacak olursa; Her üç ağaçta da yaprak kısmında çinko metalinin daha fazla birikim yaptığı açıktır. Çinkoyu en fazla bünyesine alan bitki çoğunlukla diğer metallerde görüldüğü gibi karaağaçtır. Bunu huş ve sarıçam takip etmektedir.

Bitkilerin kurşun içeriklerine ait analiz bulguları



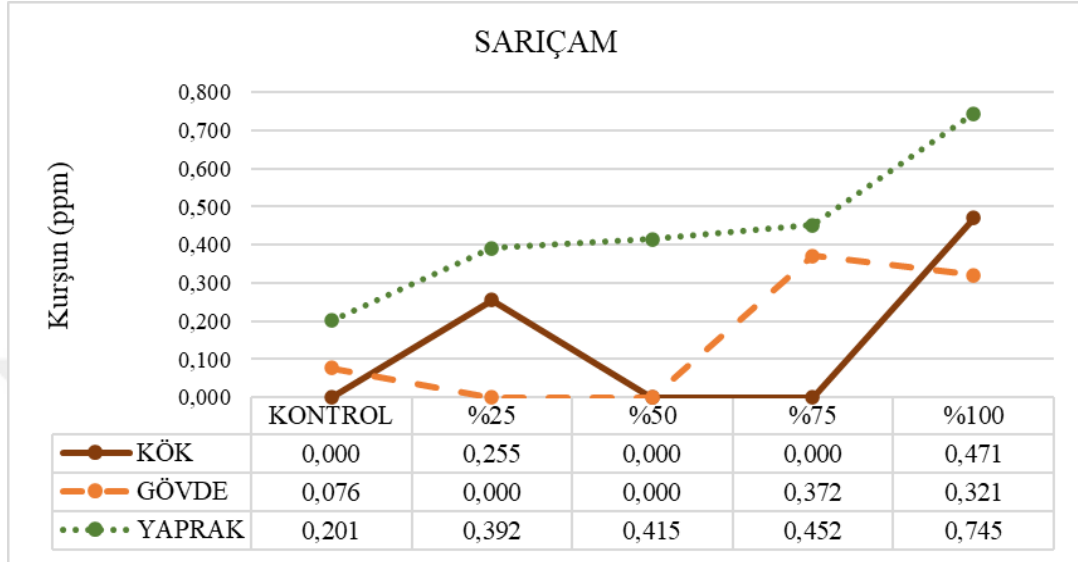
Şekil 71. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) kurşun birikimi

Huş ağacının organların kurşun birikimi %50 atık çamur uygulamasına kadar yaprak>gövde>kök şeklinde sıralanabilir. Fakat %75 ve %100 atık çamur uygulamasında kökte biriken çinko miktarı, hızlı bir yükseliş göstererek 1,022 ppm değerine ulaşmıştır (Şekil 71).



Şekil 72. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) kurşun birikimi

Şekil 72’de görüldüğü gibi karaağacın yapraklarında kurşun miktarı diğer organlarına göre daha yüksek bir birikim yapmıştır. Atık çamur uygulama dozlarına göre, kök ile yaprak grafiklerinin arasında uyumlu bir gidişat olduğu gözlenmektedir. Bu durum kök kısımdaki kurşun miktarının artan çamur dozlarıyla orantılı bir şekilde yapraklara iletilişinin göstergesidir.



Şekil 73. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) kurşun birikimi

Sarıçam bitkisinde, kurşunun en yüksek birikimi yaprak kısmında ve %100 atık çamur uygulamasında yaptığı görülmektedir. Kökte ve gövdede bazı dozlarda tutulamayan dalgalı bir seyir izleyen kurşun miktarı, %50 çamur uygulamasından sonra yükselişe geçmiştir (Şekil 73).

Tablo 25. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Kurşun Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	0,408±0,402 ^b	746,136	0.000*
	Karaağaç	0,801±0,512 ^a		
	Sarıçam	0,262±0,237 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	0,374±0,395 ^b	685,114	0.000*
	Gövde	0,301±0,325 ^c		
	Yaprak	0,796±0,479 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	0,198±0,269 ^e	260,647	0.000*
	25	0,406±0,491 ^d		
	50	0,453±0,481 ^c		
	75	0,662±0,465 ^b		
	100	0,731±0,364 ^a		

En yüksek birikimini karaağaç bitkisinde yapan kurşun metali, huş ağacının köklerinde de atık çamur oranının arttığı uygulamalarda oldukça fazla miktarda birikme imkânı bulmuştur.

Her üç ağacın gövdesinde, diğer organlara göre düşük miktarlarda biriken kurşun, karaağaç ve sarıçamda %50 atık çamur uygulamasına kadar bitki bünyesinde tutunamamıştır.

Bitkilerin nikel ve kadminyum içeriklerine ait analiz bulguları

Bitkilerin organlarında yapılan analizler neticesinde, nikel ve kadminyum elementlerine rastlanmamıştır. Atık çamurun içeriğinde 0,15 ppm'den daha düşük seviyelerde bulunan kadminyumun, bitki bünyesinde bulunmayışı beklenen bir sonuçtur. Nikel atık çamur içeriğinde 29 ppm gibi düşük bir değerde bulunmaktadır ve bu elementte bitki bünyesine alınamamıştır.

Elementlerin bitki bünyesine alımını etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bunlar;

Ph: Ortamda bulunan Düşük pH değerlerinde ortamda var olan H^+ iyonları, Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarını uzaklaştırarak tutunamamalarına ek olarak K^+ iyonunun da hareketlilik kazanmasına ve kolaylıkla bitki bünyesine alınmasına neden olur. Ayrıca Al^{3+} iyonlarının okside olmasına neden olur. Ortamda bulunan Fe ve Al oksitler fosfat iyonlarını kendilerine çekerek Fe ve Al- P formunda çökmesine neden olur. Makro besinler pH 6-7 arasında kullanışlı olurken mikro besinlerin çoğu düşük pH'larda daha iyi kullanılır (Torun 2003). Çalışmamızda yaşam alanına uygulanan atık çamurun ve toprak materyalinin ph değeri nötr seviyede olduğundan metallerinin çözünürlüğünde herhangi bir etkisi olmamıştır.

Toprak yapısı: Toprağın nemliliği, topraktaki elementlerin bulunma biçimini etkiler. Nemli topraklar, mikro elementlere hareketlilik kazandırırken kurak topraklar, başta 2 değerlikli katyonlar olmak üzere mikro elementleri hareketliliğini olumsuz yönde etkiler (Fırat 1998).

Bitkinin kök özellikleri: Elementlerin bitki tarafından alımını etkileyen bir diğer etken de kök morfolojisidir. Yapılan çalışmalara göre bir çok ince köklere sahip olan bitkinin, kalın ve az kökleri bulunan bitkiye oranla daha çok elementi bünyesine alabildiği tespit edilmiştir (Das et al. 1997).

Mikroorganizmaların etkisi: Bitki köklerinde simbiyotik olarak yaşayan bazı mikroorganizmaların ortama verdikleri organik bileşikler, Mn^{2+} ve Fe^{3+} gibi majör elementlerin ya da Cd^{2+} gibi minör olmayan elementlerin toprakta bulunabilirliğini artırma özelliği bulunmaktadır. Bu durum köklerden elementlerin alımını kolaylaştırır.

Metallerin, belli bir miktarın üzerinde gösterdikleri toksisitenin bitki üzerindeki etkisi ve bunun belirtileri bitkinin türüne, metal türüne, metalin konsantrasyonuna ve formuna göre farklılık gösterir. Genel olarak metallerin bitki üzerindeki etkileri hücre içi ve hücresel düzeyde

olmak üzere iki bölümde incelenmektedir. Hücre içi etkileri bazında; klorofil sentezi, fotosentez, enzim aktivitesi mineral alımı, solunum ve taşınma mekanizmasıdır. Hücresel düzeydeki etkileri ise; kök, gövde büyümesinin ve yaprak gelişiminin yavaşlaması ve hücre duvarında görülen bir takım hasarlardır. Ayrıca metal toksisitesinin, bitkilerde bariz belirtileri ise zayıf kök gelişimi ve kökün bodur kalması, yapraklarda renksizleşme ve bölgesel doku ölümleridir (Morrey 1995).

Bitkilerin toksik metal stresine maruz kaldıklarında hayatta kalabilmek için bir çok yöntemle bu durumun üstesinden gelmeye çalışırlar. Özel biyolojik mekanizmalar sayesinde bitki, toksik metalleri tolere ederek normal yaşamını sürdürebilir. Bu mekanizmalar genetik olabildiği gibi, metallerin bazı proteinlerle bağlanması şeklinde ya da organlarının vakuollerinde biriktirerek gerçekleştirilir. Örneğin bazı odunsu bitkiler alüminyumun toksik etkisini bertaraf edebilmek için alüminyumu sitrik asit ile kristalize ederek vakuollerde biriktirebilir (Giaveno and Filho 2000).

Aritma çamurunun içerdiği ağır metalleri bünyesinde en fazla depolayabilen bitki, açık ara farkla karaağaçtır. Karaağacın diğer deneme ağaçlarına göre 5 kata kadar daha fazla metali bünyesine depolayabildiği ve ağır metale karşı yüksek tolerans gösterdiği gerek gelişimsel süreçleri gerek analiz bulguları neticesinde tespit edilmiştir. Bu anlamda karaağacın metalleri, hücrelerindeki vakuollerinde bağlayabildiği ve güçlü bir biyoakümülatör bitki olduğu söylenebilir (Baker and Brooks 1989; Terzi ve Yıldız 2013).

Çalışmamızda atık çamur içeriğindeki demir miktarının, alüminyum miktarından oldukça fazla olmasına rağmen bitkinin bünyesine daha az alınması ilgi çekicidir. Bu durum, demir elementinin mobilitesinin (organlar arasındaki hareketliliği), alüminyumuna kıyasla daha düşük olması ve dolayısıyla bitkinin organlarına bu sebeple yeterli miktarda taşınamaması ile açıklanabilir. Ayrıca yapılan çalışmalarda, Al elementinin diğer elementlerin bitki bünyesinde birikimini engellediği ispatlanmıştır (Rout *et al.* 2001).

Metaller genel olarak deneme ağaçlarının yaprak bölgelerinde, diğer organlarına kıyasla daha fazla birikim yapmıştır. Bu durum çoğu metalin yaşam ortamından alınarak bitkilerin bütün organlarına ulaşabildiğinin en önemli göstergesidir (Xu *et al.* 2019). Ayrıca bu durum metallerin en fazla yaprak kısımlarının vakuollerinde kristalize olarak tutulduğunun kanıtıdır. Fakat alüminyum ve demir daha çok ağaçların kök kısımlarında depolanarak üst aksamlarına yeterince iletilenmemiştir. Bu durum Al ve Fe metallerinin mobilitesinin düşük olduğunu ve kök kısımlarındaki vakuollerinde kristalize olarak biriktiğini göstermektedir (Tablo 32).

Hiperakümülatör olmayan bitkiler ağır metalleri topraktan aldıktan sonra kök hücrelerinde tutarak sitoplazmalarında şelasyon mekanizmasıyla detoksifiye ederler veya

vakuollerinde depo ederler. Hiperakümülatör bitkiler ise ağır metalleri ksilemle hızlı bir şekilde toprak üstü organlara taşırlar. Bunun için ağır metallerin az miktarda bulundukları vakuollerden hızlıca sitoplazmaya taşınarak ksileme yüklenmesi gerekir ve bu muhtemelen tonoplastların spesifik özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Lasat *et al.* 2000; Doğru vd 2021).

Deneme bitkileri, atık çamurun içerisinde bulunan metalleri, genellikle artan uygulama dozlarıyla uyumlu olarak bünyelerine almışlardır. Fakat kontrole kıyasla %25 ve %50 atık çamur uygulama dozlarına kadar yükselen ivme, genel olarak %75 doz uygulaması ve sonrasında azalma eğilimi göstermiş veya metal alımı durmuştur. Bu durum bitkilerin atık çamurun içeriğinde bulunan metalleri ve ağır metalleri %50 uygulama dozuna kadar tolere edebildiğini fakat %75 ve %100 atık çamur uygulamalarının, bitkide ağır metal toksisite sınırını aştığını ve yüksek miktarlarda alınan ağır metalin, bitki bünyesinde olumsuz etkiye dönüştüğünün göstergesidir (Şekil 74).



Şekil 74. Yüksek atık çamur uygulama dozlarında bitkilerin (huş, karaağaç, sarıçam) yaprak kısımlarında denemelerden 5 ay süre sonra oluşan yanmalar

Çalışmamıza paralel olarak yapılan bir araştırmada; Sarıçam (*Pinus Sylvestris* L.) ağacının bünyesinde (kök, gövde, yaprak) topraktan alınan ağır metalin, bitkilerde birikebilme kapasitesi incelenmiş ve ağır metallerin miktar olarak değerlendirildiğinde çalışmamızda olduğu gibi en çok bitkinin ibrelerinde biriktiği belirlenmiştir. Metal konsantrasyonlarının ortalama değerleri, toprakta $Mn > Zn > Ni > Cu > Pb$ sırasını takip etmiştir. Bitki dokularındaki metalleri biriktirebilme sıralaması İğne>Dal>Kabuk>Kök>Gövde olarak sıralanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda; sarıçam iğnelerinin, kentsel ortamlarda ağır metal konsantrasyonlarındaki değişiklikleri kontrol etmek için uygun bir biyoizleme bitkisi olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Çomaklı ve Bingöl 2021a).

Yapılan bir diğer çalışmada; Beyaz huş ağacının ağır metal miktarlarını belirlemek için ağaçlandırma çalışmaları yapılmış ve kobalt (Co), krom (Cr), arsenik (As) kadmiyum (Cd) mangan (Mn), çinko (Zn), nikel (Ni) ve (Pb) elementlerinin konsantrasyonları analiz edilmiştir. Toprak ortamında en yüksek değer Mn de tespit edilmiş ve onu Zn takip etmiştir ($Mn > Zn > Cr > Ni > Co > Pb > As > Cd$). Bitki kısımlarındaki ortalama konsantrasyonlar bizim

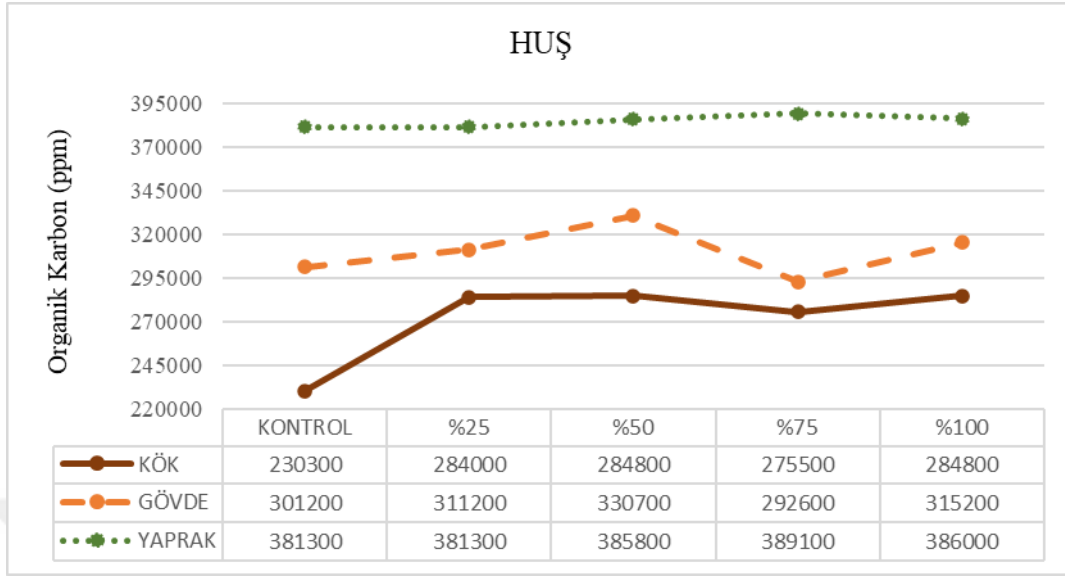
çalışmamızın aksine dal>kabuk>yaprak olup, Mn en yüksek konsantrasyona dal kısmında birikmiştir. Genel olarak bitkinin organlarındaki element sıralaması Cd>Pb>Zn>As>Ni>Mn>Cr>Co şeklindedir. Araştırmanın sonucu; Beyaz Huş ağacının kentsel alanlarda Zn ,Pb ve Cd biriktirme potansiyeline yüksek oranda sahip olabileceğini göstermektedir (Çomaklı ve Bingöl 2021b).

Kentsel arıtma çamurlarının yerine endüstriyel arıtma çamurlarının çalışmamızdaki deneme ağaçlarımızdan; *Betula Pendula* Roth. (huş ağacı) ve *Pinus Sylvestris* L. (sarıçam)’a ormanlık alanında uygulandığı bir çalışmada, iki ağacın metal biriktirme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Mn ve Cu metalini en fazla sarıçamın köklerinde; Pb metalini ise her iki ağaç türünün de aynı miktarlarda yapraklarında biriktirebildikleri ortaya koyulmuştur (Butkus and Baltrėnaitė 2007). Bizim çalışmamızda ise sarıçamın bu çalışma ile benzer şekilde Mn’yi köklerinde, fakat Cu metalini yapraklarında daha çok biriktirdiği tespit edilmiştir. Endüstriyel arıtma çamurları kentsel arıtma çamurlarına kıyasla çok daha yoğun toksik organik madde ve ağır metal içerdiği bilinmektedir. Dolayısı ile bu yoğun toksik madde miktarından (toksik organikler ve ağır metal konsantrasyonu yüksekliği) dolayı bakır metalinin köklerde biriktirilip yapraklara kadar iletilememesini etkileyebileceğini söyleyebiliriz. Çalışmamızda sarıçam ile huş ağacının Pb metalini bünyelerine alabilme özelliği yakın olup bu çalışma ile benzerlik göstermektedir.

Tüm bu sonuçlardan hareketle şunu söyleyebiliriz; kentsel atıksu arıtma tesislerinin digesterinde biriken stabilize çamurun (ön çöktürme ve büyük oranda son çöktürmeden gelen stabilize çamurun endüstriyel atıksu arıtma çamurlarına göre gerek ağır metal gerekse nutrient miktarı açısından bitkilere yararışlı ve bitkilerin büyümesinde olumlu katkılarda bulunabilecek oranlardadır. Yani endüstriyel arıtma çamurlarına göre kentsel arıtma çamurlarının içerik olarak bitki büyümelerini destekleyici bir materyal olarak kullanılabileceğini rahatlıkla vurgulayabiliriz.

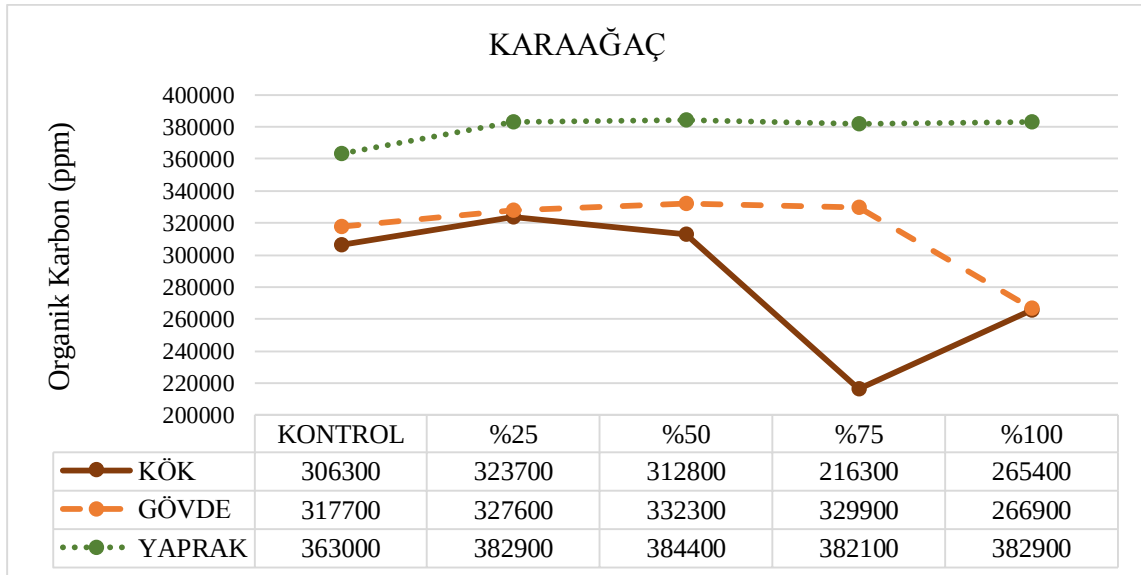
Bitkilerin; Besin Elementi İçeriklerinin Analiz Bulguları

Bitkilerin organik karbon içeriklerine ait analiz bulguları



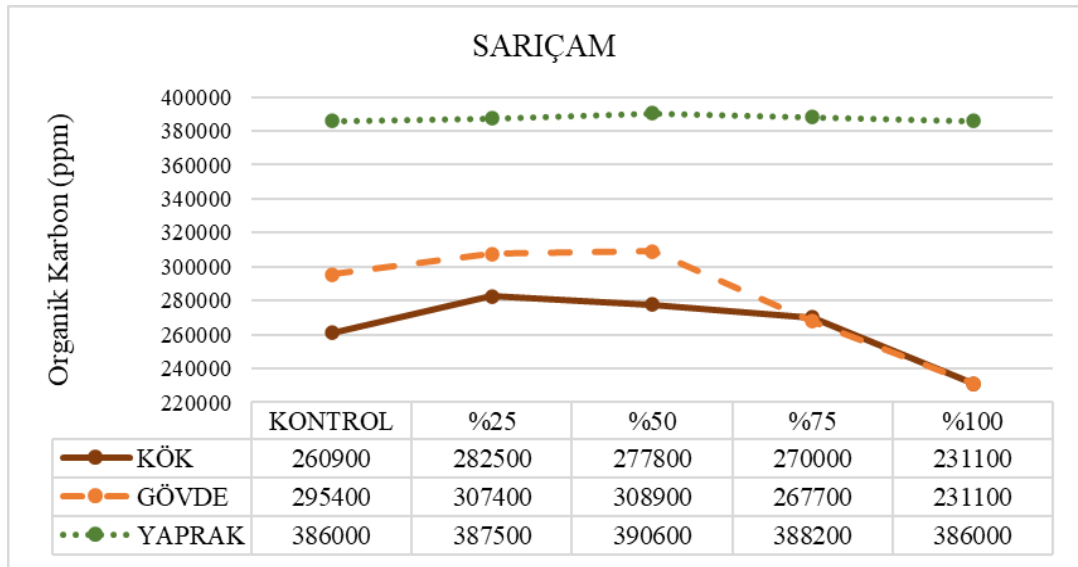
Şekil 75. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) organik karbon birikimi

Huş bitkisi için genel olarak; atık çamur oranı arttıkça bünyesindeki organik karbon miktarının da artış gösterdiği söylenebilir. Organik karbon, huş bünyesinde yaprak>gövde>kök şeklinde sıralanmıştır. Bu durum arıtma çamurunun, huş ağacının bünyesine kökünden başlayarak etkisini gösterdiği ve ağacın gelişimiyle beraber bütün organlarına dağılarak gübre etkisini gösterdiğinin kanıtıdır (Şekil 75).



Şekil 76. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) organik karbon birikimi

Karaağacın yetiştirme ortamında fazlasıyla bulunan organik karbonu organlarına alabilme kapasitesi yaprak>gövde>kök şeklindedir. Bu sıralamaya göre kökte tutulan organik karbonun büyük bir kısmının gövdeye ve oradan da yapraklara aktarıldığı gözlenmektedir (Şekil 76).



Şekil 77. Sariçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) organik karbon birikimi

Sarıçam organik karbonu bünyesinde yaprak>gövde>kök sıralamasına göre tutmuş ve şekli.. da görüldüğü gibi büyük bir kısmını yapraklara aktarmıştır. Bu durum karbonun önemli bir kısmının bitkinin bünyesine kademeli olarak aktarıldığını ve bitkinin her organına dağıldığını göstermektedir (Şekil 77).

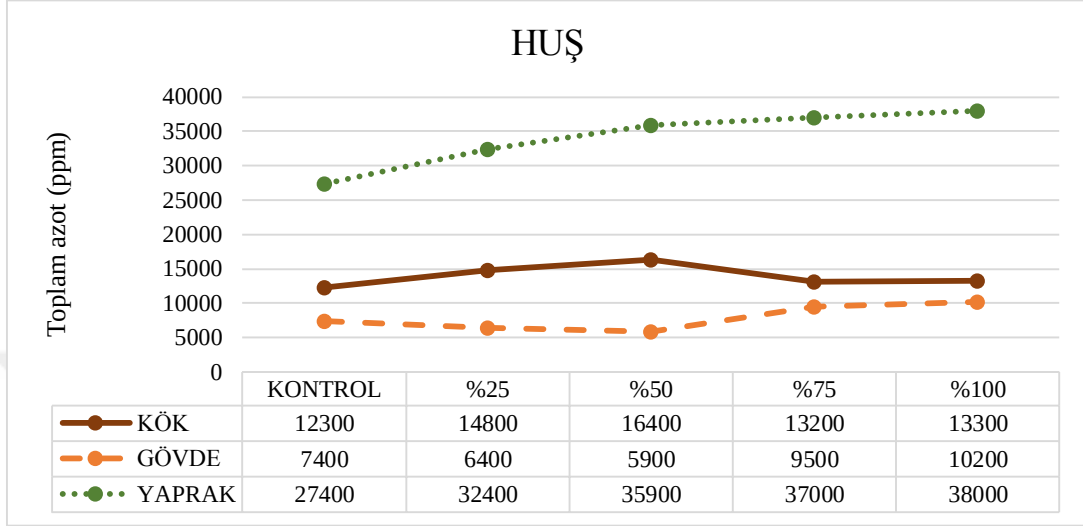
Tablo 26. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Organik Karbon Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	323328,888±50217,660 ^b	156,137	0.000*
	Karaağaç	327460±46947,763 ^a		
	Sarıçam	311091,111±58652,163 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	274151,111±29276,756 ^c	6999,853	0.000*
	Gövde	303508,888±27527,687 ^b		
	Yaprak	384220±7384,307 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	315318,518±50847,789 ^b	191,683	0.000*
	25	332651,851±39778,012 ^a		
	50	334674,074±42178,463 ^a		
	75	312162,963±60428,089 ^c		
	100	308325,9259±62096,337 ^d		

Organik karbon bitkinin bünyesinde var olan ve bitkinin gelişimi için de yaşam ortamından alması gereken önemli bir nutrient maddedir. Bitkinin gelişimine katkıda bulunacağı öngörüsü ile toprak ile belirli dozlarda birleştirilen atık çamur, organik karbon muhtevası bakımından oldukça zengindir. Genel olarak denemelerde kullanılan her ağaç, atık çamurun artan uygulama dozuyla beraber artacak şekilde ve yakın miktarlarda organik karbonu bünyesine almıştır. Fakat bitkilerde genel olarak %50 atık çamur dozundan sonraki artan dozlarda, kök, gövde ve yaprak kısımlarında karbon miktarı düşme eğilimindedir. Bu durum,

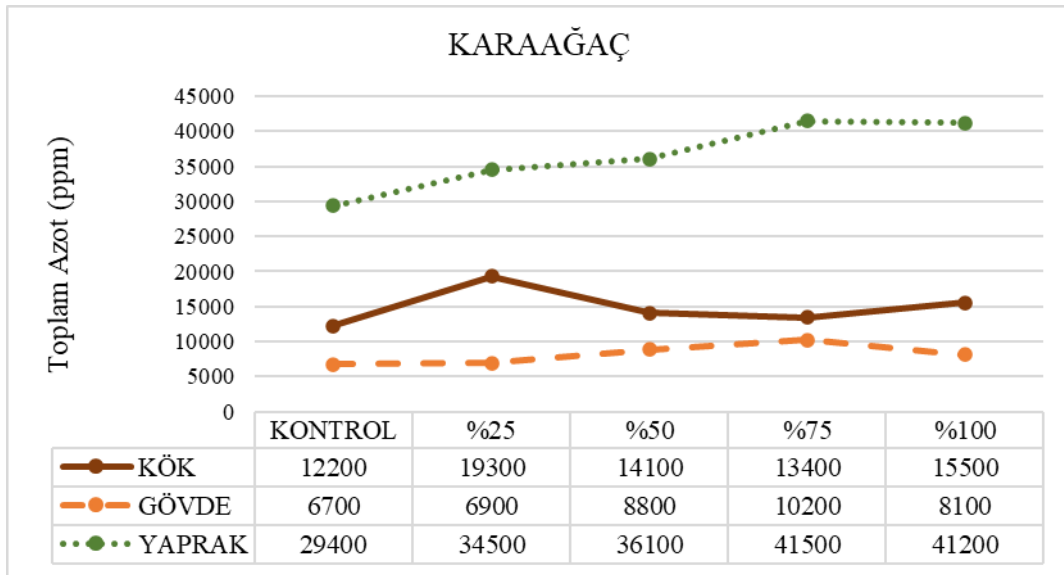
artan atık çamur dozlarındaki yaşam ortamında ağır metal miktarının artmasıyla ilişkilendirilmektedir. Yaşam ortamında ağır metal miktarının artışının, bitkiye yararlı besin madde alımını engellediği görülmektedir.

Bitkilerin toplam azot içeriklerine ait analiz bulguları



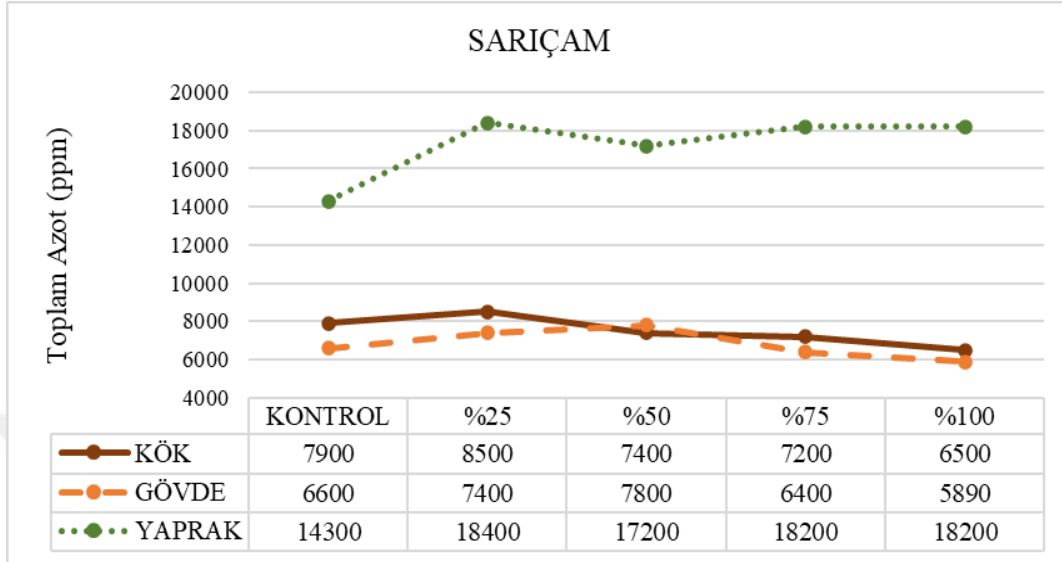
Şekil 78. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) toplam azot birikimi

Huş ağacında azot miktarı bitkinin bölümlerinde yaprak>kök>gövde şeklinde sıralanmıştır. Atık çamur uygulama dozu arttıkça kök ve yaprak kısımlarında paralel bir artış gözlenirken azotun gövdede az miktarlarda biriktiği ve büyük bir kısmının yapraklara aktarıldığı barizdir (Şekil 78).



Şekil 79. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) toplam azot birikimi

Azotun karaağacın bünyesindeki dağılımı yaprak>kök>gövde şeklindedir. Bitkide, atık çamur oranına paralel bir artış gösteren azot miktarı %75'lik çamur uygulamasına kadar bitkiye yararılı etki sağlamış fakat %100 çamur uygulamasında azot miktarı düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 79).



Şekil 80. Sariçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) toplam azot birikimi

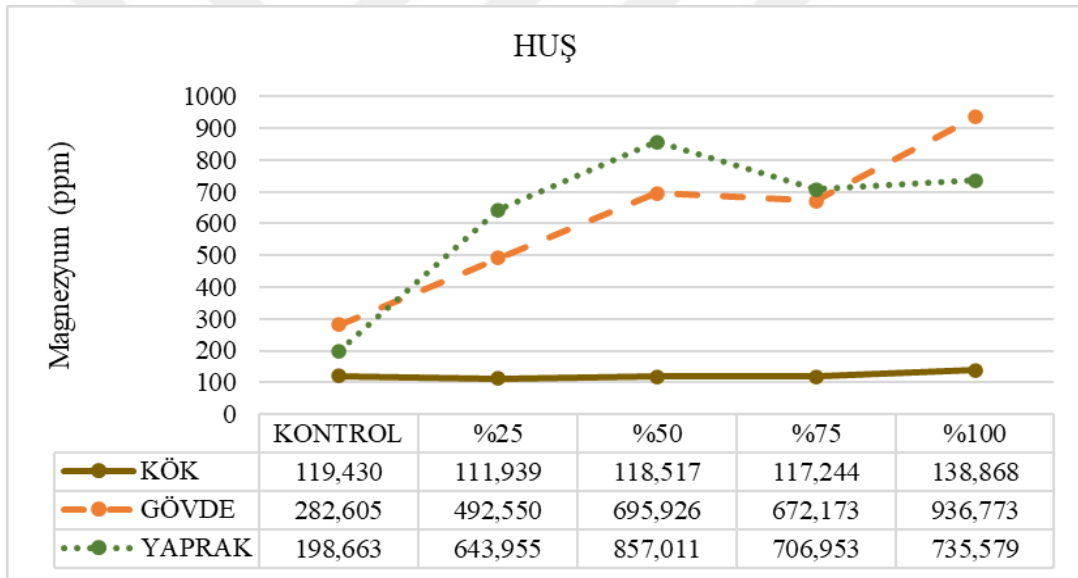
Sarıçamda en fazla yaprakta depolanan azot, atık çamur dozunun artışıyla yapraklarda artış gösterirken kök ve gövde kısımlarında %50 atık çamur uygulamasından sonraki artan dozlarda düşüşe geçmiştir. Bu durum atık çamurun yüksek dozlarında bitkinin azotu yeterince alamadığının göstergesidir (Şekil 80).

Tablo 27. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (kök, gövde, yaprak) Azot Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	18604,444±11703,902 ^b		
	Karaağaç	19900±12642,820 ^a	5841,377	0.000*
	Sarıçam	10553,111±4917,328 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	12082,222±3702,412 ^b		
	Gövde	7644,222±1468,503 ^c	29898,104	0.000*
	Yaprak	29331,111±9439,949 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	13814,814±8358,077 ^c		
	25	16455,555±10276,198 ^b		
	50	16659,259±11322,077 ^b	300,990	0.000*
	75	17433,333±12513,254 ^a		
	100	17399,629±12752,541 ^a		

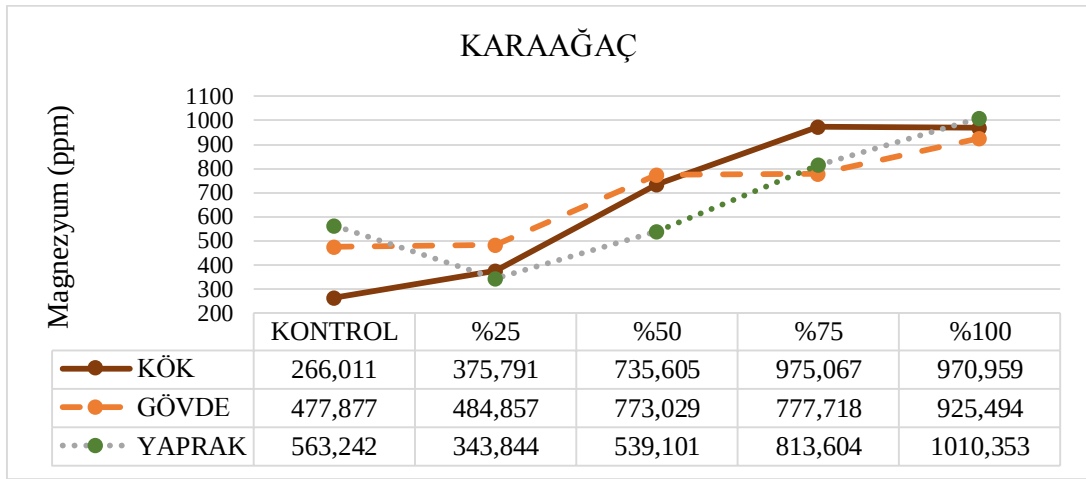
Toplam azotun, deneme bitkilerinin organlarında depolanması yaprak>kök>gövde şeklindedir. Bu durum azotun, topraktan hızlı bir şekilde alınarak yapraklara iletiliğinin ve atık çamurun gübre özelliğinin genellikle %50 doz uygulamasına kadar bitkiye faydalı etki sağladığının göstergesidir. %50 atık çamur uygulamasından sonra genel olarak kök ve gövde kısımlarında azot alımında düşme gözlenmektedir. Yaprakta ise %75 atık çamur uygulamasından sonra azot alımı sabit kalma eğilimindedir. Bu durum; bitkinin gelişiminde önemli bir besin maddesi olan ve kullanılan atık çamurun içeriğinde yüksek miktarda bulunan azotun, %50 atık çamur uygulamasına kadar bitkinin bünyesine alındığını ve özellikle yaprak kısmında yoğun miktarlarda biriktiğinin fakat bu dozun üzerindeki uygulamalarda, çamurun içeriğindeki ağır metaller sebebiyle azot alımını azaldığı hatta durma seviyesine geldiği görülmektedir.

Bitkilerin magnezyum içeriklerine ait analiz bulguları



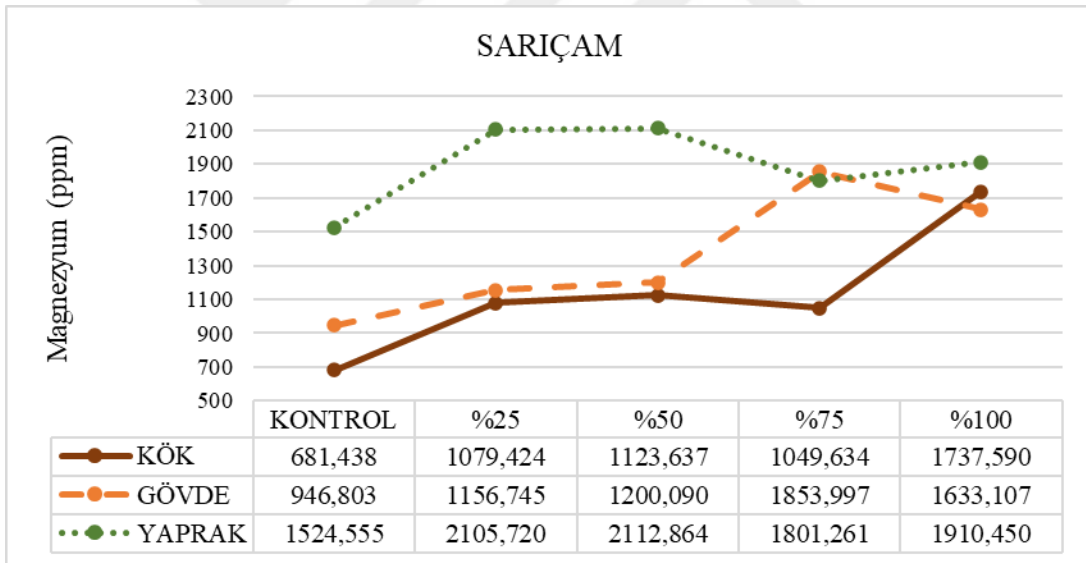
Şekil 81. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) magnezyum birikimi

Huş ağacının organlarında magnezyum birikiminin, genel olarak yaprak>gövde>kök şeklinde olduğu görülmektedir. Bu da magnezyumun, kök kısımlarda uzun bir süre kalmayıp gövde ve yaprak kısmına aktarıldığını göstermektedir. Genel olarak atık çamur oranının artmasıyla magnezyum birikimi önemli bir artış göstermiştir. Fakat bitkinin kök kısmında %100 atık çamur dozuna kadar önemli bir değişim olmamıştır (Şekil 81).



Şekil 82. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) magnezyum birikimi

Karaağacın kök ve gövde kısmının, atık çamurun uygulama dozlarının artışına paralel olarak magnezyum içeriğinin arttığını gösterdiği fakat yaprak kısmının %25 atık çamur uygulamasında ani bir azalış göstererek artan çamur dozlarında ivmelenerek arttığı gözlenmektedir. Yaprak kısmındaki bu durum, bitkinin %25'lik atık çamur uygulamasına tepkisiz kalmasıyla açıklanabilir (Şekil 82).



Şekil 83. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) magnezyum birikimi

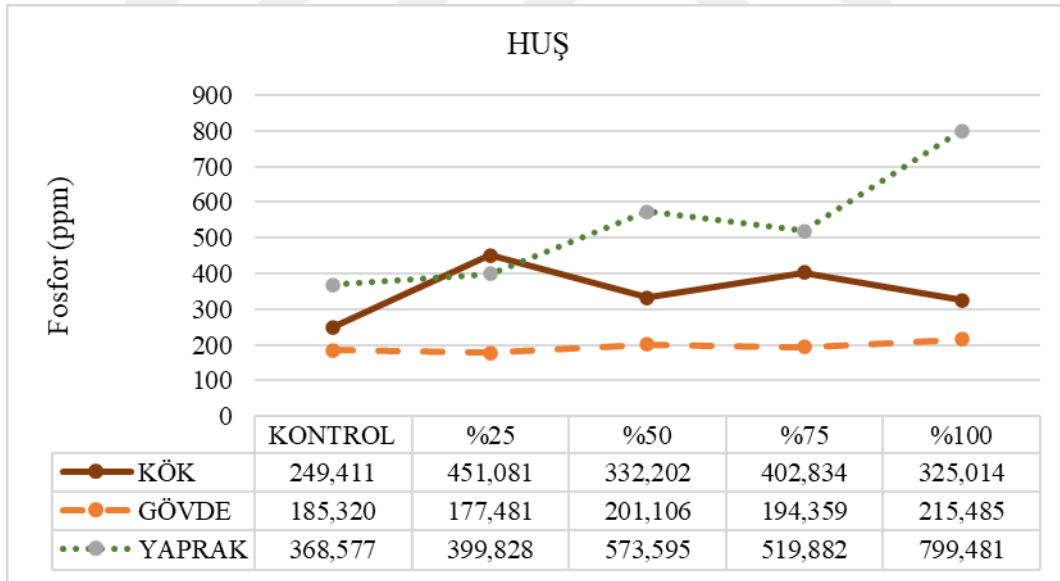
Atık çamurun uygulanmasıyla birlikte sarıçamda genel olarak; magnezyum birikimi yaprak>gövde>kök şeklinde olmuştur. Atık çamurdaki yüksek magnezyum miktarına uyumlu olarak uygulama dozların göre artış gösteren grafik beklenildiği gibi sonuç vermiştir (Şekil 83).

Tablo 28. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Magnezyum Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	456,196±301,826 ^c	363291,081413	0.000*
	Karaağaç	668,510±242,920 ^b		
	Sarıçam	1464,226±443,077 ^a		
Ağaç Bölüm	Kök	641,71±496,94 ^c	56323,413	0.000*
	Gövde	889,57±425,323 ^b		
	Yaprak	1057,64±637,688 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	563,931±428,066 ^e	34409,89	0.000*
	25	754,944±584,084 ^d		
	50	906,935±530,959 ^c		
	75	976,144±531,588 ^b		
	100	1112,934±538,241 ^a		

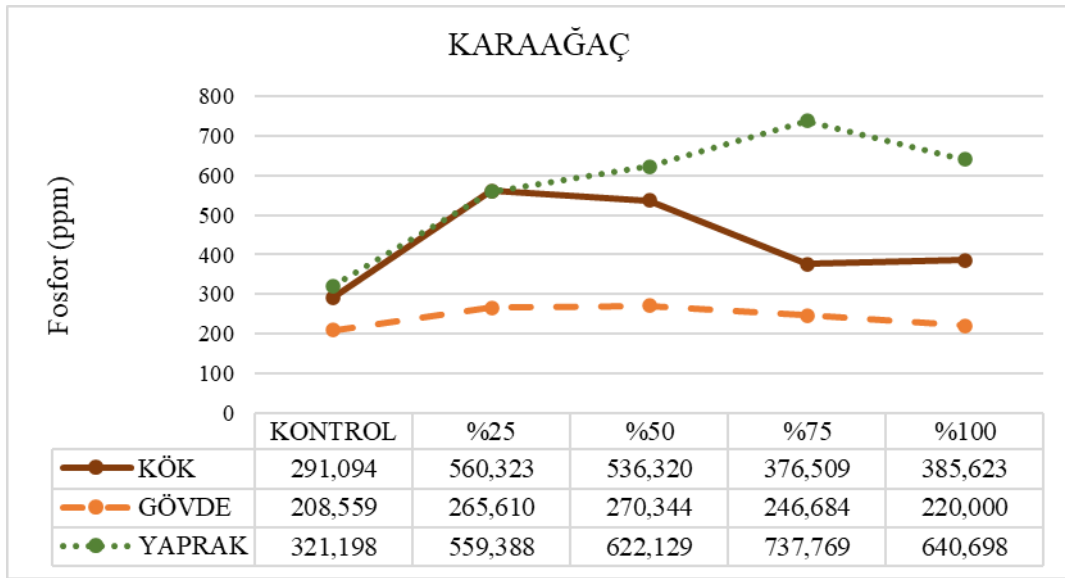
Huş ve sarıçamda genel olarak daha fazla yaprak kısmında yüksek miktarlarda biriken magnezyum sarıçamda gövdede birikmiştir. Denemelerde kullanılan ağaçların, topraktan ve atık çamurdan aldıkları magnezyumu bünyelerinde birikme sıralaması sarıçam>karaağaç>huş şeklindedir. Buda sarıçamın magnezyumu bünyesine daha fazla alabildiğini göstermektedir.

Bitkilerin toplam fosfor içeriklerine ait analiz bulguları



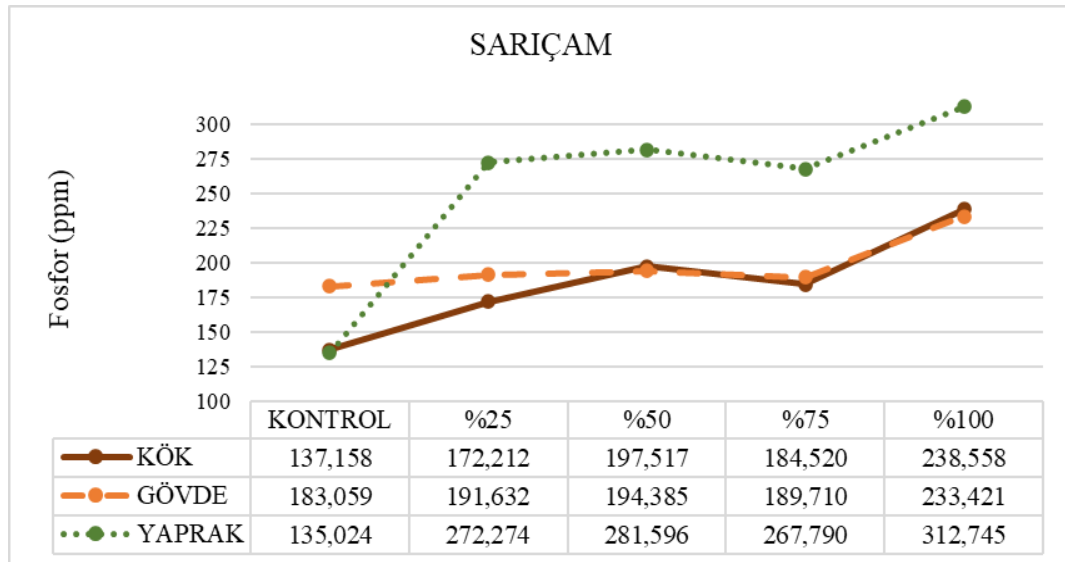
Şekil 84. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) fosfor birikimi

Genel olarak huş bitkisinde fosfor, atık çamur uygulama dozuna paralel olarak en fazla yaprak kısmında birikmiştir. Şekil 84’de bitkinin gövde kısmının, fosforu yeterince bünyesinde tutamadığı ve kök kısmından alarak yapraklara ilettiği görülmektedir.



Şekil 85. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) fosfor birikimi

Karaağacın fosforu bünyesinde depolama kapasitesi yaprak>kök>gövde şeklindedir. Bu durum gövdenin fosforu iyi bir şekilde bitkinin üst aksamlarına ilettiğinin göstergesidir. Atık çamur uygulama dozu arttıkça bitkinin bünyesinde artan fosfor miktarı genel olarak %50 atık çamur uygulama dozundan sonra azalma eğilimindedir. Şekil 79'daki grafikten yola çıkarak atık çamurun gübre etkisinin bitkiye en yararışlı dozunun %50 olduğu söylenebilir. Bu dozun üzerindeki uygulamalarda, bitki bünyesindeki fosfor miktarının artmadığı görülmektedir (Şekil 85).



Şekil 86. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) fosfor birikimi

Şekil 86'da sarıçamın diğer deneme ağaçlarına nazaran yaşam ortamındaki fosforu bünyesine daha az alabildiği görülmektedir. Sarıçamın organlarının, artan atık çamur uygulamalarına olumlu cevap vermiştir. Fakat kök ve gövde kısımlarda iletimin düşük

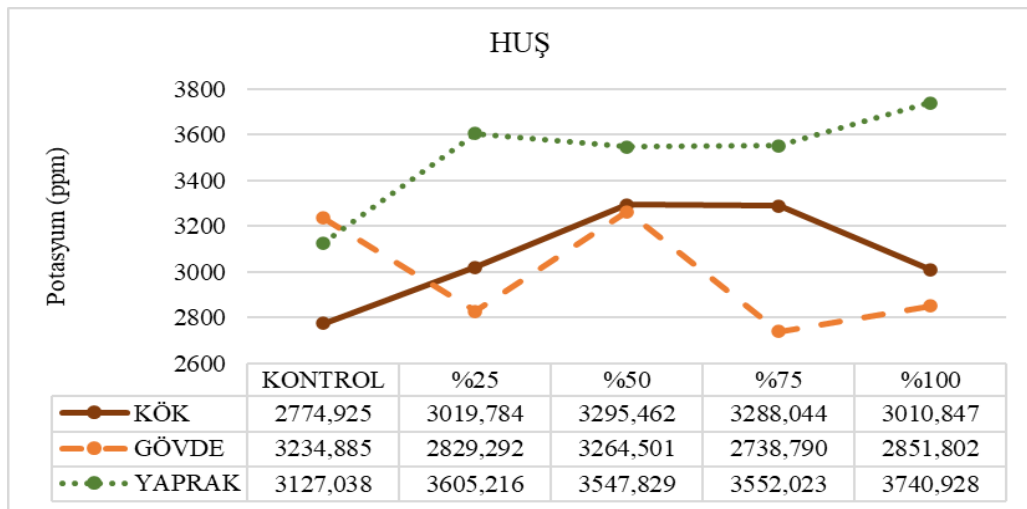
olduğunu gözlemlediğimiz Şekil 86’da gözlenen eğride yapraklarda fosfor birikimi diğer ağaçlara göre daha düşük düzeyde olduğu açıktır.

Tablo 29. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Fosfor Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	360,005±171,031 ^b	18407,208	0.000*
	Karaağaç	418,111±172,781 ^a		
	Sarıçam	212,785±51,904 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	321,997±127,470 ^b	24737,608	0.000*
	Gövde	211,968±29,613 ^c		
	Yaprak	456,935±191,817 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	232,835±81,821 ^e	3089,511	0.000*
	25	339,851±154,200 ^d		
	50	358,010±166,937 ^b		
	75	346,925±178,456 ^c		
	100	373,880±200,386 ^a		

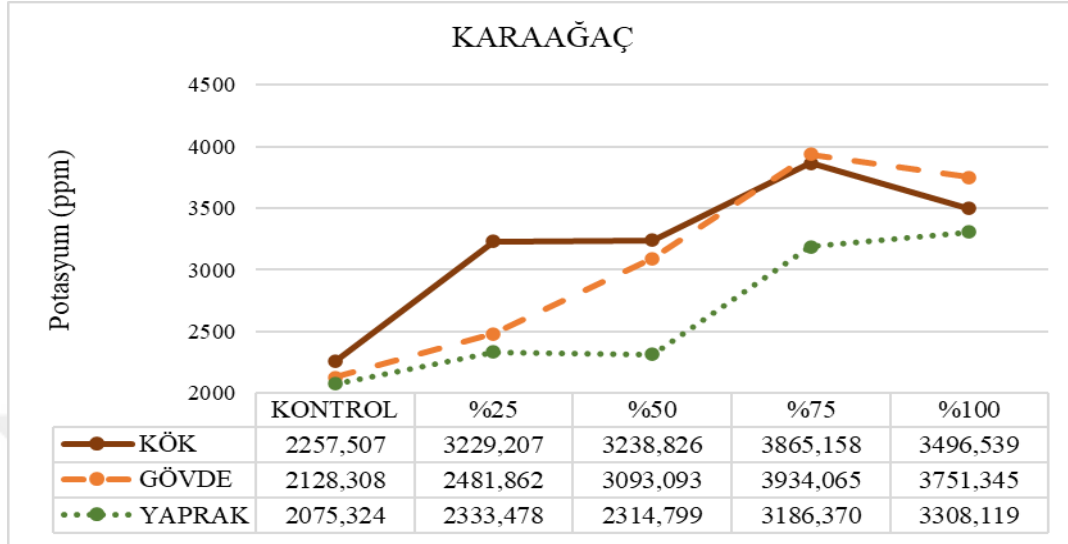
Fosfor bitkinin büyümesini ve gelişmesini destekleyen önemli bir besin elementidir. Ayrıca kökleri güçlendirerek bitkinin patojenlere karşı dayanım kazanmasını sağlamaktadır. Huş, karaağaç ve sarıçam bitkilerinin atık çamur ve toprakta fazla miktarlarda bulunan fosforu, bünyelerine alabilme ve organlarına dağılabilme durumu benzerlik göstermektedir. Fakat sarıçam diğer ağaçlara göre fosforu daha az miktarda bünyesine alabilmiştir. Bu durum sarıçamın, atık çamurun içerisindeki fosfordan, diğer deneme ağaçlarına göre daha düşük seviyede faydalandığının göstergesidir.

Bitkilerin toplam potasyum içeriklerine ait analiz bulguları



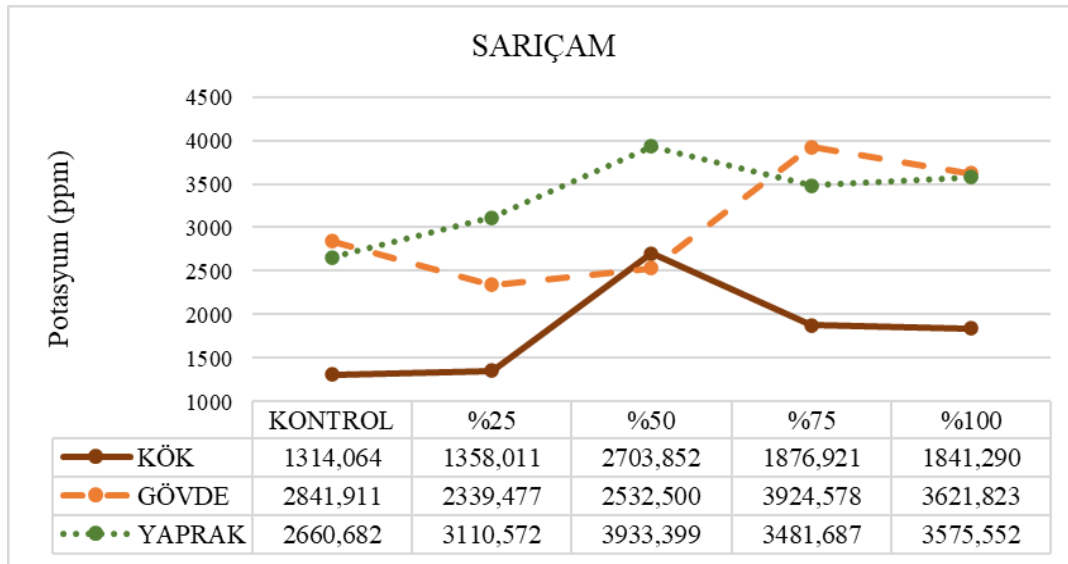
Şekil 87. Huş ağacının farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) potasyum birikimi

Atık çamur uygulanan huş bitkisinde potasyum miktarı inişli çıkışlı bir seyir izlemiştir (Şekil) Kök ve gövdede %50 atık çamur uygulama dozuna kadar artış gösteren potasyum miktarı artan dozlarda düşüşe geçmiştir. Fakat yaprak kısmında potasyum miktarı atık çamur dozuna genel olarak uyumlu bir seyir izlemiştir (Şekil 87).



Şekil 88. Karaağacın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) potasyum birikimi

Genel olarak karaağacın kök kısmında depolanan potasyum miktarının az bir kısmı, yapraklara iletebilmiştir. %75'lik atık çamur uygulamasına kadar artış gösteren potasyum miktarı %100 atık çamur uygulamasında azalma eğilimindedir (Şekil 88).



Şekil 89. Sarıçamın farklı organlarında (kök, gövde, yaprak) potasyum birikimi

Sarıçamda, potasyumun bitkinin bölümlerine dağılımı yaprak>gövde>kök şeklindedir. Şekil .. den görüleceği gibi potasyum bitkinin hemen hemen her organında depo edilmiş fakat yüksek dozlardaki atık çamur uygulamalarında potasyumu birikim miktarı düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 89).

Tablo 30. Farklı Atık Çamur Oranlarına Göre Organlarda (Kök, Gövde, Yaprak) Potasyum Değerleri (sonuçlar ppm cinsinden verilmiştir)

		Ort±S.Sapma	F	P
Ağaç Tür	Huş	360,005±171,031 ^b	18407,208	0.000*
	Karaağaç	418,111±172,781 ^a		
	Sarıçam	212,785±51,904 ^c		
Ağaç Bölüm	Kök	321,997±127,470 ^b	24737,608	0.000*
	Gövde	211,968±29,613 ^c		
	Yaprak	456,935±191,817 ^a		
Atık Çamur Oranı (%)	0	232,835±81,821 ^e	3089,511	0.000*
	25	339,851±154,200 ^d		
	50	358,010±166,937 ^b		
	75	346,925±178,456 ^c		
	100	373,880±200,386 ^a		

Potasyum bitkilerde kök gelişimini olumlu yönde etkileyen bitki büyümesini destekleyen önemli bir nutrient elementtir. Ayrıca azotun etkinliğini artırarak bitkiyi olumsuz dış etkenlere (soğuk, hastalık) karşı korur. Genel olarak deneme ağaçlarında, yakın miktarlarda bitkilerin bünyesinde depolanan potasyumun özellikle karaağaç ve sarıçamda %75 ve %100 atık çamur uygulamalarında bitkiye yararlı olamadığı gözlemlenmektedir.

Toprakların organik madde miktarını artırmak amacıyla çeşitli organik kökenli materyaller kullanılmaktadır. Fakat organik kaynakların yeterli düzeyde sağlanamaması ve bu kaynakların sınırlı olması sebebiyle atıksu arıtma çamurlarının kullanımı oldukça yaygındır. Arıtma çamurlarının içeriğindeki organik madde, N, P vd. besin elementleri göz önüne bulundurulduğunda önemli bir gübre ve toprak düzenleyicisi olduğu araştırmalarla sabittir. Organik maddeler, yüksek katyon değiştirme kapasitesi ile Fe^{+3} , Cu^{+2} , Zn^{+4} gibi yüksek değerlikli katyonlarla birleşerek şelatlar meydana getirip bu katyonların yüklerini nötralize ederek bitkiler tarafından alınımını kolaylaştırır. Ayrıca toprakta bulunan mikro canlılar için de besin kaynağı olarak kullanımı sayesinde mikroorganizma faaliyetlerini artırır (Aşık ve Katkat 2018).

İçeriğindeki makro ve mikro besin elementlerinin sağladığı gübre özelliğinin değerlendirilmesi bakımından, deneme bitkilerinin yaşam ortamlarına farklı oranlarda verilen atık çamurun gerek toprağın gerek ağaçların üzerinde olumlu etki gösterdiği çalışma bulgularımızla ortaya koyulmuştur. Atık çamur uygulamaları sayesinde; ağaçların boy-çap gelişimi, yaprak sayısı ve bitkinin organlarındaki nutrient madde artışında önemli farklılıklar oluşturduğu bulgular neticesinde belirlenmiştir.

Bitkilerin büyümesini ve gelişimini destekleyen makro ve mikro besinler, aynı zamanda bitkileri hastalıklara ve parazitlere karşı korumaktadır. Araştırma bulguları sonucunda; atık çamurun bitkilerin bünyesindeki nutrient maddeleri artırdığı ve olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu durum; atık çamurun, deneme ağaçlarına gübre faydası sağladığının bir kanıtıdır.

Bitkinin temel besin kaynakları olan karbon, azot, potasyum, fosfor ve magnezyum miktarı, atık çamur oranlarına paralel olarak artış göstermiştir. %50 atık çamur uygulama dozuna kadar artış gösteren bu besin maddelerinin miktarları, bu dozdan sonraki uygulamalarda durma ve hatta düşüşe geçme eğilimindedir. Bu durum; %50 atık çamur doz uygulamasına kadar bitkinin, çamurun içerisindeki N, P ve C elementlerini bünyesine alabildiğini ve bunun bitkiye fayda sağlayarak gübre etkisi oluşturduğunu göstermektedir (Alguacil *et al.* 2006). Fakat %50 atık çamur dozunun üzerindeki uygulamalarda nutrient maddenin bitki bünyesine alınamadığı gözlenmektedir. Bu durum yüksek dozda atık çamur uygulamalarında ağır metal miktarının artışının, bitkinin nutrient maddeleri alımını engellemesiyle açıklanmaktadır (Buran vd 2020).

Atık çamurun içeriğinde yüksek metal içeriği sebebiyle nutrient maddelerin bitkinin kök kısmından alımı zorlaşmaktadır. Özellikle atık çamurda alüminyumun (Al^{+3}) miktarının yüksek olması Ca^{2+} , Mg^{2+} gibi katyonların alımında azalmaya neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak bitkide, beslenme eksiklikleri görülmektedir. Ancak K^{+} formunda su içerisinde çok iyi çözünmediği için bitkinin yapraklarına rahatlıkla taşınabilir (Kalaycıoğlu 2005).

Mangifera persiciforma odunsu bitkisinde arıtma çamurunun uygulandığı bir çalışmada, çamurun bitki üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla artan çamur dozları (%0-%15-%30-%60-%100) denenmiştir. Çalışmamıza paralel olarak; ağaçtaki substrat artışı, bitki boyu ile çapı, biyokütle ve N, K, P alımı bakımından en iyi verim %30 atık çamur oranının uygulandığı bitkide tespit edilerek, belirli miktarlarda uygulanan çamurun bitkinin büyümesine olumlu fayda sağladığı görülmüştür (Chu *et al.* 2017).

Atık çamur uygulamasının kavak ağacı üzerinde denendiği başka bir çalışmada, bitkinin gelişimi açısından çok büyük farklılıklara sebep olmuştur. Çalışmamıza paralel olarak bitkinin organlarındaki element içerikleri, artan çamur miktarlarına karşı değişik tepkiler göstermiştir; gerek kök kısımlarındaki gerekse yapraklara kadar ulaşabilen mikro element miktarları, yüksek oranda çamur alımından ciddi derecede etkilenmiştir. Atık çamur uygulaması kavak ağacının Na, Ca, Cu birikimini yanı sıra S, N, Mg ve P'nin kökler, gövde ve yapraklar arasındaki dağılımını değiştirmiştir. Bu çalışma ile atık çamur uygulamasının kavak ağaçlarının çeşitli organlarında, besin alımını iyileştirdiği ve bitkinin gelişimini desteklediği sonucuna varılmıştır (Xu *et al.* 2019).

Horqin Sandy Land (İç Moğolistan)'daki bir araştırmada; Moğol çamı (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) için, atık çamur açık uygulama alanları (SL, 25 t.ha⁻¹) ve atık çamuru uygulaması olmayan kontrol uygulama alanı (CK, 0 t.ha⁻¹) oluşturulmuştur. Ağaçların büyüme performansları (ağaç boyu, taban çapı ve göğüs yüksekliğindeki çap), araştırıldığı çalışmada; bitki özellikleri (tür çeşitliliği, kapsam ve yer üstü biyokütle), toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri (besin içeriği, çözünmüş organik karbon, toprak su içeriği, yoğunluğu, pH) ve organik madde (toprak organik karbonu ve toplam nitrojen stokları) gibi pek çok parametrenin analizi yardımıyla incelenmiştir. Sonuçlar, atık çamur ilavesinin yalnızca toprağın besin içeriğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda toprak üstü verimliliğini de önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Atık çamur ilavesinin çalışmamıza paralel olarak; toprağın kütle yoğunluğunu azalttığı ve toprağın organik karbonu, toplam azot, toplam fosfor toprağın karbon ve nitrojen stoklarını da artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, atık çamur uygulamaları; toprağın çözünmüş organik karbon içeriğini ve bitkinin beslendiği üst topraktaki (0-5 cm) çözünmüş organik karbon bileşenlerinin (hümkik asit benzeri ve UV fulvik asit benzeri) yoğunluklarını önemli ölçüde arttırmıştır. Bu çalışma, evsel atık çamurun, Moğolistanın çam tarlalarında, toprak kalitesini ve ağaç-çim büyümesini iyileştirmek için kullanılabilir bir organik gübre olduğu ortaya konulmuştur (Bai *et al.* 2022).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Fizyolojik analiz sonuçları;

Tablo 31'e göre; yaş-kuru ağırlık seviyesi huş ve karaağaçta; en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, sarıçamda; en yüksek değer %50 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

Toplam klorofil miktarı, huş, karaağaç ve sarıçamda; en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

MDA miktarı, huş ve sarıçamda; en yüksek değer %100 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında, karaağaçta; en yüksek değer %100 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %50 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

Toplam karbonhidrat miktarı, huş ve sarıçamda; en yüksek değer %100 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında, karaağaçta; en yüksek değer %75 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

Fenolik madde miktarı, huş ağacında; en yüksek değer %50 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında, karaağaçta; en yüksek değer %75 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, sarıçamda; en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %75 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

H₂O₂ miktarı, huş ve karaağaçta, en yüksek değer %100 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında, sarıçamda; en yüksek değer %75 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

O²⁻ miktarı, huş, karaağaç ve sarıçamda en yüksek değer %100 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

Protein miktarı huş ağacında; en yüksek değer %50 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, karaağaçta ve sarıçamda en yüksek değer %100 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

CAT aktivite seviyesi, huş ve karaağaçta; en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, sarıçamda; en yüksek değer %50 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

APX aktivite seviyesi, huş ağacında; en yüksek değer %50 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %75 atık çamur uygulamasında, karaağaçta; en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, sarıçamda; en yüksek değer %75 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %25 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

SOD aktivite seviyesi, huş ağacında; en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, karaağaçta; en yüksek değer %75 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, sarıçamda; en yüksek değer %50 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

GST aktivite seviyesi, huşta ve karaağaçta; en yüksek değer %25 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında, sarıçamda; en yüksek değer %50 atık çamur uygulamasında, en düşük değer %100 atık çamur uygulamasında tespit edilmiştir.

Tablo 31. Fizyolojik Analiz Bulgularının (Huş Ağacı, Sariçam ve Karaağaçta) En Yüksek ‘▲’ ve En Düşük ‘▼’ Değerlerinin Gösterimi

Yaprak	<i>Betula Pendula</i> Roth. (Huş)											Atık Çamur Oranları(%)	
													
													25
													50
													75
													100
	<i>Ulmus Glabra</i> Huds. (Karaağaç)											Atık Çamur Oranları(%)	
													
													25
													50
													75
													100
	<i>Pinus Sylvestris</i> L. (Sarıçam)											Atık Çamur Oranları(%)	
													
													25
													50
													75
													100
	Y.K.ağ.	Top.K	MDA	T.Karb.	F.mad.	H2O2	O2	Pro.	CAT	APX	SOD	GST	
													

Ağır metal analiz sonuçları;

Tablo 32'e göre; Al birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin sarıçamda; organlar arasında mukayesede, köklerde ve lokal olarak sarıçamın gövde kısmının %75 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş ağacında; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak huş ağacının yaprak kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Mn birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin karaağaçta; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak karaağacın yaprak kısmının %75 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş ağacında; organlar arasında mukayesede, gövdelerde ve lokal olarak huş ağacının gövde kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Fe birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin karaağaçta; organlar arasında mukayesede, köklerde ve lokal olarak karaağacın kök kısmının %75 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş ağacında; organlar arasında mukayesede, gövdelerde ve lokal olarak huş ağacının gövde kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Cu birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin karaağaçta; organlar arasında mukayesede, köklerde ve lokal olarak karaağacın kök kısmının %100 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, sarıçam; organlar arasında mukayesede, gövdelerde ve lokal olarak sarıçamın gövde kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Zn birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin karaağaçta; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak karaağacın yaprak kısmının %100 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş; organlar arasında mukayesede, köklerde ve lokal olarak huş ağacının kök kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Pb birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin karaağaçta; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak karaağacın yaprak kısmının %75 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş; organlar arasında mukayesede, köklerde ve lokal olarak huş ağacının kök kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Ni ve Cd ise analiz sınırları dışında kaldığı için gözlemlenememiştir.

Tablo 32. Ağır Metal Analiz Bulgularının (Huş, Karaağaç ve Sarıçamda) En Yüksek ‘▲’ ve En Düşük ‘▼’ Değerlerinin Gösterimi

		<i>Betula Pendula</i> Roth. (Huş)								<i>Ulmus Glabra</i> Huds. (Karaağaç)								<i>Pinus Sylvestris</i> L. (Sarıçam)								Atık Çamur Oranları(%)	
		    								    								 									
Kök	    	 								 																25	
																										50	
																										75	
																										100	
Gövde	  	 																								25	
																										50	
																										75	
																										100	
Yaprak	   									  																25	
																										50	
																										75	
																										100	
		Al	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd		
																											

Besi maddesi (nutrient) analiz sonuçları;

Tablo 33'e göre; organik karbon birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin sarıçamda; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak sarıçamın yaprak kısmının %50 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş; organlar arasında mukayesede, köklerde ve lokal olarak huşun kök kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

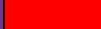
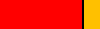
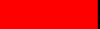
Toplam azot birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin karaağaç; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak karağacın yaprak kısmının %75 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, sarıçam; organlar arasında mukayesede, gövdelerde ve lokal olarak sarıçamın gövde kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Mg birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin sarıçamda; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak sarıçamın yaprak kısmının %50 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş; organlar arasında mukayesede, köklerde ve lokal olarak huş ağacının kök kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

P birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin huş ağacında; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak huş ağacının yaprak kısmının %50 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, sarıçamda; organlar arasında mukayesede, gövdelerde ve lokal olarak sarıçamın gövde kısmının %25 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

K birikiminin bitki türleri arasında mukayesede, en fazla birikiminin sarıçamda; organlar arasında mukayesede, yapraklarda ve lokal olarak sarıçamın gövde kısmının %75 atık çamur uygulamasında olduğu, en düşük birikiminin ise bitki türleri arasında mukayesede, huş ağacında; organlar arasında mukayesede, gövdelerde ve lokal olarak huş ağacının gövde kısmının %75 atık çamur uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 33. Besi Maddesi (Nutrient) Analiz Bulgularının (Huş, Karaağaç ve Sarıçamda) En Yüksek ‘▲’ ve En Düşük ‘▼’ Değerlerinin Gösterimi

		<i>Betula Pendula</i> Roth. (Huş)					<i>Ulmus Glabra</i> Huds. (Karaağaç)					<i>Pinus Sylvestris</i> L. (Sarıçam)					Atık Çamur Oranları(%)
																	
Kök																25	
																50	
																	75
																	100
Gövde																25	
																50	
																	75
																	100
Yaprak																25	
																	50
																	75
																	100
		Org.C.	Top. N.	Mg	P	K	Org.C.	Top. N.	Mg	P	K	Org.C.	Top. N.	Mg	P	K	
																	

Tüm bu çalışmalarımızın ve incelemelerimizin sonucunda aşağıdaki önerileri sıralayabiliriz;

1-) Toprağın verimliliğinin artırılması için günümüzde çok yoğun kullanılan sentetik gübrelerin $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ - K_3PO_4 ,- KNO_3 - NH_4NO_3 vb ekosistem içerisindeki akıbetini inceleyecek olursak; bitkisel üretimi artırmak için toprağa en fazla uygulanan mineral gübreler arasında ilk sırada azotlu ve fosforlu gübreler yer almaktadır. Aşırı nitratlı gübreleme sonucunda topraktan çözünerek yeraltı sularına inen nitrat, buradan yüzeyel sulara taşınarak su ekosisteminde aşırı bitki büyümesi (ötrifikasyon) ve diğer su canlılarına (balık, karides, plankton) zarar vermektedir. Ortaya çıkan bu durum; sucul besin kaynaklarının azalmasının yanı sıra fitoplanktonların (karbondioksitin tutulmasında önemli bir rol üstlenen) azalmasına da neden olur. Aşırı nitratlı suların tüketimi çocuk ve hayvanlarda methemoglobina sendromuna ayrıca diğer azotlu bileşikler ise kanserojen özellik gösteren nitrozaminlerin oluşumuna sebep olurken diğer taraftan aşırı nitrat bitkilerin yapraklarında birikerek sebze ağırlıklı beslenen insanlarda önemli sağlık problemlerine neden olmaktadır. Fosforlu gübreler ise yer altı sularına ve oradan da yüzeyel sulara karışarak azotla beraber ötrifikasyonu tetikler. Azot ve fosforca aşırı yüklenmiş suların tarımda sulama amaçlı kullanılması, toprağın makro ve mikro besi maddesi dengesini, yetişen bitkinin aleyhine bozarak bitki açısından toksik etki oluşturur.

2-) Sentetik gübrelerin içerisinde bulunan aşırı azot miktarı, asidik karakterli olmaları sebebiyle toprağın asiditesini artırmaktadır. Asidik topraklara amonyum sülfat gübresi verilirse asidite derecesi artar. Bunun sonucunda da mikroorganizma faaliyet ve yaşamları olumsuz etkilenir. Sulardaki azot yoğunluğunun artışı insanlarda A vitamininin tutulumu azaltır hayvanlarda ise üreme gücünü düşürür ve süt üretiminin azalmasına neden olur. Bilinçsiz ve aşırı gübre kullanımı toprakların ve suyun fiziksel kimyasal ve biyolojik yapısını bozarak toprak kirlenmesine ve insan, hayvan sağlığının bozulmasına neden olur.

3-) Aşırı sentetik gübre kullanımının doğurduğu bu olumsuz sonuçların önüne geçebilmek için; gerek mutfak atıklarının (biyo bozunur organik atık) komposta çevrilmesi suretiyle gerekse kentsel atık su arıtım çamurlarının gübrelerin yerine tarım ve rekreasyon amaçlı kullanımı tavsiye edilmektedir. Böylece hem ekosistem kirliliğinin önlenmesi ve sürdürülebilir atık yönetimi boyutuyla hem de döngüsel ekonominin desteklenmesi boyutuyla ülke ekonomisi üzerine yapacağı olumlu katkı sağlamasıyla sentetik gübre kullanımına alternatif olarak sunulabilecek en mükemmel tavsiyeler arasındadır.

4-) Sürdürülebilir sıfır atık yönetim hiyerarşisine göre, yönetimin %70'lik kısmı atık oluşumunu önlemektir (prevention). Bu önleme içerisinde de yedi R'lerden olan azaltma (reduce) yeniden kullanma (reuse) ve başka bir amaçla kullanmak üzere değiştirme (repurpose) kademelerini tam olarak karşılayacak şekilde ıslah edilmesi ve yönetilmesi gereken bir atık olan

kentsel atıksu biyolojik arıtma çamuru bu şekilde bitki yetiştirilmesinde kullanılması tavsiye edilmektedir. Böylece atık çamur toprak verimliliğini artırmak üzere katma değeri yüksek olan bir ürün formunda kullanmak suretiyle, bir yandan atığı en güzel şekilde değerlendirmiş diğer yandan da yukarıda vurgulandığı üzere bilinçsiz sentetik gübre kullanımının önüne geçerek ekosistem kirliliğinin önlenmesi ve ekonomik kazanca dönüştürülmesi sağlanmış olur.

5-) Ağır metallerden özellikle çinko, bakır, kadmilyum ve nikel toprağın biyo elverişliliği üzerinde ciddi etkiler yaparlar. Potasyum, kalsiyum, magnezyum gibi elementlerin toprakta fazla miktarda bulunması, besin elementleri arasındaki dengeyi bozarak bazı besin elementlerinin bitkilerce alımını engellemektedir. Tarımda kullanılan makro ve mikro besin maddesi içeren sentetik gübreler yerine tüm bu olumsuz etkilerinden dolayı toprağı kirletmeyecek oranda daha ekonomik olan biyolojik gübre değerindeki atık çamurların toprağı takviye olarak kullanımı, toprak- atık çamur oranları dikkate alınarak teşvik edilmelidir.

6-) Ülkemizde bulunan toprakların organik madde açısından oldukça fakir olduğu göz önünde bulundurulursa; organik gübre muhtevası bakımından zengin olan ve toprak düzenleyici olarak uygun özellikler taşıyan arıtma çamurlarının tarımda kullanılmasıyla hem çamurun içeriğindeki besin elementlerinin topraktaki doğal döngülerine geri kazandırılması gerçekleşebilecek hem de tarımsal üretimde ekonomik kazanç sağlanabilecektir. Böylece arıtma çamurları yukarıda zararlı etkilerinden bahsedilen sentetik gübreye alternatif teşkil edebilecektir.

7-) Bir kirlilik unsuru olan ve geri dönüşüm malzemesi olarak bitkilerin büyüme ve beslenmelerinde kullanılan atık çamurların peyzaj değeri olan süs bitkileri sektörüne kazandırılması hem oluşturduğu çevre sorunlarını önlemede hem de ekolojik ve ekonomik anlamda büyük katkılar sunmaktadır.

8-) Araştırmada, kullanılan Ulmus, Pinus ve Betula türlerinde atık su arıtma çamurlarının toprağı belirli oranlarda verildiğinde (%25-%50), sürgün, kök, gövde ve yaprak gelişimini olumlu yönde etkileyerek, bitki gelişimini artırdığı tespit edilmiştir. Seçilen bitkiler Erzurum ilinde yaygın olarak kullanılan türlerdir. Atık su arıtma çamurunun bu türlerde, fide yetiştiriciliği ve peyzaj sahalarında kullanımında toprağı belirli dozlarda karıştırılarak kullanımı önerilmektedir.

9-) Yapılan çalışma ile, arıtma çamurlarının geri dönüşüm sistemi ile süs bitkileri sektöründe kullanılabileceği belirlenmiştir. Ancak, içeriğinde bulunan ağır metaller nedeniyle, arazi uygulamalarında, yönetmelikte bulunan sınır değerlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Yapılan bilimsel çalışmalar ile arıtma çamurlarının süs bitkileri sektöründe güvenle kullanılabilirliğinin sağlanması ve tür çeşitliliğinin arttırılması yönünde önemlidir.

Peyzaj tasarım çalışmalarında bitkiler, estetik ve fonksiyonel mekânlar oluşturmak için kullanılmaktadır. Bitkiler sahip oldukları çiçek, dal ve yaprak gibi organları ile mekanlara form, doku, renk gibi özellikler katarlar. Çalışmada Erzurum ilinde peyzaj tasarım alanlarında önemli olan ve dekoratif özellikleri nedeni ile sıkça kullanılan Ulmus, pinus ve Betula türlerinin bitkisel tasarım ilkelerinden renk, doku, form ve ölçü kriterlerine uyarak uygulama çalışmalarında kullanılması gerekmektedir. Bitkilerin sahip olduğu manzara formu, gövde, yaprak ve sürgün renklerine dikkat edilerek farklı görsel öğeler ortaya çıkarılabilir. Bitkilendirme çalışmalarında kullanılacak bitkilerin seçimini etkileyen en önemli özellik olan bitkide ölçüdür. Betula ve Pinus bitkisi en uygun şartlarda, ortalama 25 m² lik bir alanı kaplamaktadır. Ulmus'da ise bu alan 50 m²'ye çıkabilmektedir. Kar gibi beyaz gövdesinin üzerindeki siyah lekeleri ile Betula pendula Roth., herdem yeşil yapısı ile Pinus ve özellikle sonbahar yaprak renklenmesi ile Ulmus türlerinin bitkisel tasarım çalışmalarında kullanımı her geçen gün artmaktadır. Farklı türdeki bitki materyalleriyle yapılacak olan planlamalarla park ve bahçelerde, ev-okul-hastane ve çocuk bahçelerinde vb. kullanılarak Erzurum ili gibi, serin iklim bölgelerinin daha yaşanılabilir ve görselliğin daha da güzelleştirildiği çevrenin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

10-) Arıtma çamurlarının yönetiminde atık hiyerarşisine göre hareket edilmesi gerekir. Eğer bu çalışma doğrultusunda; peyzaj alanlarında kullanılan her tür bitki için ülkemizde arıtma çamurlarının toprakta kullanımı ile ilgili mevzuat uygulanması yaygınlaştırılabilirse çok büyük bir ekonomik kaynak israfının önüne geçilecektir. Arıtma çamurlarının toprakta kullanımı ile ilgili yapılacak çalışmalara hız kazandırılması amacıyla; Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Tarım ve Orman Bakanlığı, Yerel Belediyelerle beraber ilgili kurum ve kuruluşların katılımıyla yapılacak işbirliği arıtma çamurlarının toprakta kullanımının önünü açacaktır.

11-) Kentlerde büyükşehir belediyelerine bağlı olarak işletilen biyolojik arıtım tesislerinin arıtım çamurları için peyzaj alanlarının oluşturulmasında kullanılacak ağaçların yetiştirilmesinde kullanılabilirliğiyle ilgili yaptığımız bu detaylı çalışmaların sonuçları belediyelerle paylaşarak; kent genelinde peyzaj alanlarının oluşturulması ve ağaçlandırma faaliyetlerinde bu öneriler dikkate alınması sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Agarwal, S., Pandey, V., 2004. Antioxidant Enzyme Responses to NaCl Stress in *Cassia Angustifolia*. *Biologia Plantarum*, 48(4), 555-560.
- Akat, H., Çetinkale Demirkan, G., Akat, Ö., Yokaş, İ., 2015. 'Limoniumsinuatum' Yetiştiriciliğinde Farklı Ortamlara İlave Edilen Atıksu Arıtma Çamurunun Süs Bitkisi Yetiştirme Materyali Karışımı Olarak Kullanımı. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(1), 81-90.
- Akat, H., Demirkan, G., Yokaş, İ., 2013. Atık Su Arıtma Çamurlarının Süs Bitkisi Yetiştiriciliğinde Kullanımı. *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27 (1), 129-141.
- Akın, F., Kahraman, Ö., 2018. Atıksu Arıtma Çamurunun Süs Lahanası Yetiştiriciliğinde Kullanılabilirliği. *Anadolu Tarım Bilimi Dergisi*, 33, 177-183.
- M. Alguacil, M., Caravaca, F., Dí'az-Vivancos P., Herná'ndez J.A., Rolda'n, A., 2006. Effect of Arbuscular Mycorrhizae and Induced Drought Stress on Antioxidant Enzyme and Nitrate Reductase Activities in *Juniperus Oxycedrus* L. Grown in a Composted Sewage Sludge-Amended Semi-Arid Soil. *Plant and Soil* 279, 209–218.
- Ali, S., Bai, P., Zeng, F., Cai, S., Shamsi, IH., 2011. The Ecotoxicological and Interactive Effects of Chromium And Aluminum on Growth, Oxidative Damage and Antioxidant Enzymes on Two Barley Genotypes Differing in Al Tolerance. *Environmetal and Experimental Botany (EEB)*, 70(2), 185-191.
- Almaz, C., 2017. Arıtma Çamuru Uygulamalarının Kumlu Tın Bünyeli Toprağın ve Mısırın Ağır Metal İçeriği Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi.
- Alyanak, İ., 2014. Atıksu Çamurlarının Değerlendirilmesiyle İlgili Türkiye'deki Uygulamalar. 4. Turkish-German Water Partnership Day, 23-24.
- Anaç, D.A., Hakerlerler, H., İrget, M.E., 1993. Yağ Fabrikası Arıtma Tesisi Atıklarının Zeytinliklerde Organik Gübre Olarak Kullanılması. *E.Ü.Z.F.Derg.*, 30 (3), 25-32.
- Angelini, R., Federico R., 1989. Histochemical Evidence of Poliamin Oxidation and Generation of Hydrogen Peroxide in the Cell Wall. *J. Plant Physiol*, 135, 212-217.
- Angın, İ., 2016. Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonuna Alternatif Bir Yaklaşım: Vermistabilizasyon. *Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Dergisi*, 47 (2), 123-129.
- Antolin, M.C., Muro, L., Diaz, M.S., 2010. Application of Sewage Sludge Improves Growth, Photosynthesis and Antioxidant Activities of Nodulated Alfalfa Plants under Drought Conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 68, 75–82.
- Arargüç, E. C., 2018. Atık Aktif Çamurun Elektrokseidasyon Yöntemi ile Ön Arıtımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Arcak, S., Türkmen, C., Karaca, A., Erdoğan, E., 2000. A Study on Potential Agricultural use of Sewage sludge of Ankara Waste Water Treatment Plant. *Proceeding of International Symposium on Desertification*, 13-17 June Konya.
- Aşık, B., Katkat, A.V., 2004. Gıda Sanayi Arıtma Tesisi Atığının (Arıtma Çamuru) Tarımsal Alanlarda Kullanım Olanakları. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 18(2), 59-71.

- Aşık, B., Katkat, A.V., 2018. Topraklarda Organik Madde Kaynağı Olarak Atıksu Arıtma Çamurlarının Kullanım Olanakları. Organomineral Gübre Çalıştayı Bildirim Kitabı, 37-52.
- Aydın, S., 2020. Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Arıtma Çamuru Yönetiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Çevre Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bai, J., Sun, X., Xu, C., Ma, X., Huang, Y., Fan, Z., Cao, X., 2022. Effects of Sewage Sludge Application on Plant Growth and Soil Characteristics at a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation in Horqin Sandy Land. *Forests*, 13(7), 1-18.
- Baker, A.J.M., Brooks, R.R., 1989. Terrestrial Higher Plants which Hyperaccumulate Metallic Elements – A Review of Their Distribution, Ecology and Phytochemistry. *Biorecovery*, 1, 81-126
- Banu, M.N.A., Hoque M.A., Watanabe-Sugimoto, M., Matsuoka, K., Nakamura, Y., Shimoishi, Y., 2009. Proline and Glycinebetaine Induce Antioxidant Defense Gene Expression and Suppress Cell Death in Cultured Tobacco Cells Under Salt Stress. *J.Plant Physiol*, 166, 146-56.
- Bay, T., Kara, E.E., Bayseç, S., Söylemez, M.S., Yumrutaş, R., 2017. Arıtma Çamuru Bertarafında Kullanılan Yakma Yönteminin Dünya ve Türkiye’de Kullanımı. *Akademik Bilim Fen Bilimleri Dergisi (ABFED)*, 25-36.
- Blokhina, O., Virolainen, E., Kurt V. Fagerstedt 2003. Antioxidants, Oxidative Damage and Oxygen Deprivation Stress: A Review. *Annals of Botany*. 91-2.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron Jour*, 54(5), 464-465.
- Bozkurt, M.A., Erdal, İ., Çimrin, K., Karaca, S., Sağlam, M., 2000. Kentsel Arıtma Çamuru ve Humik Asit Uygulamalarının Mısır Bitkisinde Besin Elementi ve Ağır Metal Kapsamına Etkisi. *A.Ü. Tarım Bilimleri Dergisi*, 6 (4), 35-43.
- Braz, J., 2005. Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17, 145-146.
- Bright, J., Desikan, R., Hancock, J.T., Weir, I.S., Neill, S.J., 2006. ABA-Induced No Generation and Stomatal Closure in *Arabidopsis* are Dependent on H₂O₂ Synthesis. *Plant J*, 45, 113-122.
- Buran, A., Durğun, ME., Karaman, E., 2020. Ağır Metal (Cu ²⁺, Cd ²⁺) Stresi Uygulanan *Lavandula Angustifolia* (Lavanta) ve *Salvia Rosmarinus* (Biberiye) Bitkilerinin Toplam Fenolik, Antioksidan, Klorofil ve Karotenoid Miktarının Belirlenmesi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences* 5(1), 65-77.
- Butkus, D., Baltrėnaitė, E., 2007. Accumulation of Heavy Metals in Tree Seedlings from Soil Amended with Sewage Sludge. *Ekologija*. 53 (4), 68–76.
- Chaney, R.L., 1990. Twenty Years of Land Research. Part 1. *Biocycle*, 31, 54-59.
- Chaudiere, J., and Ferrari-Iliou R., 1999. Intracellular Antioxidants from Chemical to Biochemical Mechanism. *Food Chem. Toxicol*, 37, 949-962.
- Chu, S., Daoming Wu, D., Liang, L., Zhong, F., Hu, Y., Hu, X., Lail, C., Zeng, S., 2017. Municipal Sewage Sludge Compost Promotes *Mangifera Persiciforma* Tree Growth with No Risk of Heavy Metal Contamination of Soil. *Scientific Reports China*, 7, 13408.

- Çakır, H., Çimrin K., 2020. The Effect of Sewage Sludge Applications on the Growth of Maize (*Zea mays* L.) and Some Soil Properties. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 23(2), 321–327.
- Çakır, H., Çimrin, K., 2018. Kentsel Arıtma Çamur Uygulamalarının Etkisi: I. Mısır Bitkisi ve Topraktaki Bazı Besin Maddesi (N, P, K, Ca, Mg) İçerikleri Üzerine Etkisi. KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi, 21(6), 882-890.
- Çelebi, Z.Ş., Arvas, Ö., Çelebi, R., Yılmaz, İ.H., 2010. Atıksu Arıtma Çamuru ile Tesis Edilen Yeşil Alanda İngiliz Çimi (*Lolium Perenne* L.)’nin Performansının Belirlenmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 7 (3), 111-118.
- Çelebi, Z.Ş., Arvas, Ö., Çelebi, R., Yılmaz, İ.H., 2011. Rizomlu Kırmızı Yumak (*Festuca Rubra* Var. *Rubra*) İle Tesis Edilen Yeşil Alanda Atıksu Arıtma Çamurunun Tesis Gübresi Olarak Değerlendirilmesi. Ekoloji 20, 78, 18-25.
- Çimrin, K., Bozkurt, M., Erdal, İ., 2000. Kentsel Arıtma Çamurunun Tarımda Fosfor Kaynağı Olarak Kullanılması. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Bilimleri Dergisi, 10(1), 85-90.
- Çomaklı, E., Bingöl, M. S., Çomaklı, T., 2018. Determining the Some Heavy Metal Content of *Pinus Sylvestris* Needles and Soil in the Urban Forest by the Side of The Road. Alınteri Zirai Bilimler Dergisi, 33(2), 209-214.
- Çomaklı, E., Bingöl, M., 2021a. Heavy Metal Accumulation of Urban Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Plantation. Environ Monit Assess, 193: 192, 1-13.
- Çomaklı, E., Bingöl, M., 2021b. Evaluation of Heavy Metal Accumulations in Plant Organs and Soil White Birch (*Betula verrucosa* Ehrh.) Plantation. Water Air Soil Pollut, 232: 515, 1-11.
- De Pinto, M.C., De Gara, L., 2004. Changes In the Ascorbate Metabolism of Apoplastic and Symplastic Spaces are Associated with Cell Differentiation. J. Exp. Bot. 55, 2559-2569.
- Demir, E., Topaç, O., 2019. Arıtma Çamurlarının Tarımsal Amaçlı Kullanımı: Topraktaki Azot Proseslerinde Meydana Gelen Değişimler. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24 (2), 337-354.
- Demirkan, G., 2015. Arıtma Çamuru Uygulamalarının Bazı Ağaç Türlerindeki Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Demirkan, G., 2018. Atık Su Arıtma Çamuru Uygulamalarının *Platanusorientalis* (Çınar) Türüne Etkileri. Ege Univ. Ziraat Fak. Dergisi, 55 (1), 51-58.
- Das, P., Samantaray, S., Rout G.R., 1997. Studies on Cadmium Toxicity in Plants: A Review” Environmetal Pollution, 98, 29-36.
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K., Hailiu, R., 2002. Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50, 3010–3014.
- Dische Z., 1962. Color reaktions of carbohydrates. Methods in carbohydrate chemistry, 1,475-514.
- Doğru, A., Altundağ, H., Dündar, Ş., 2021. Bitkilerde Ağır Metal Hiperakümüülasyonu ve Fitoremediasyon. Journal of Agricultural Biotechnology (JOINABT) 2(2), 32-55.
- Dutta, S., Mitra, M., Agarwal, P., Mahapatra, K., De, S., Sett, U., Roy, S. 2018. Oxidative and Genotoxic Damages in Plants in Response to Heavy Metal Stress and Maintenance of Genome Stability. Plant Signaling & Behavior, 13(8), e1460048

- Eid, EM., El-Bebany, AF., Alrumman, SA., Abd El-latif, H., Taher, MA., Fawy KF., 2017. Effects of different sewage sludge applications on heavy metal accumulation, growth and yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Int J Phytoremed*, 19,340–347.
- Eid, EM., Hussain, AA., Taher, M.A., Galal T M., Shaltout, KH., Sewelam, N., 2020. Sewage Sludge Application Enhances the Growth of *Corchorus Olitorius* Plants and Provides A Sustainable Practice for Nutrient Recirculation in Agricultural Soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(1),149-159.
- El-Ghamery, AA., El-Kholy, MA., El-Yousser, A., 2003. Evaluation of Cytological Effects of Zn^{+2} in Relation to Germination and Root Growth of *Nigella sativa* L. and *Triticum aestivum* L. *Mutation Research*, 537, 29-41.
- Elmi, A., Alolayan, M., 2020. Sewage Sludge Land Application: Balancing Act Between Agronomic Benefits and Environmental Concerns. *Journal of Cleaner Production*, 1-6.
- Elstner, EF., Heupel, A., 1976. Inhibition of Nitrite Formation from Hydroxylammonium Chloride: A Simple Assay for Superoxide Dismutase. *Analytical Biochemistry*, 70, 616-620.
- Esen, M., 2019. Toprak Yıkama Yöntemiyle Cd ve Pb ile Kirlenmiş Tarımsal Toprakların İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Aksaray Üniversitesi.
- Eysel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik EK I-B 2010. <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=14167&mevzuatTur=Kuru mVeKurulusYonetmeligi&mevzuatTertip=5> (Erişim tarihi 28.01.2024)
- Ferraz, A., Momentel, L., Poggiani, F., 2016. Soil Fertility, Growth and Mineral Nutrition in *Eucalyptus Grandis* Plantation Fertilized with Different Kinds of Sewage Sludge. *New Forests*, 47, 861-876.
- Firat, B., Bitki Nasıl Beslenir. 1998. Atlas Kitabevi, Konya, 21,23,67,239.
- Gaur, A., Adholeya, A., 2004. Prospects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils. *Current Science*, 5(8), 528-534.
- Genç, E., 2017. Tavuk Tüyü Protein Hidrolizati Uygulamasının Buğdayın (*Triticum Aestivum* L.) Soğuk Stresi Toleransı Üzerine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Genç, E., 2021. Arıtma Çamuru Uygulamalarının Açıkta Biber Yetiştiriciliğinde Kullanım Olanakları ile Bitki Besin ve Ağır Metal İçeriği Üzerine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Bahçe Bitkileri Ana Bilim Dalı. Fen Bilimleri Enstitüsü. Malatya Turgut Özal Üniversitesi Malatya.
- Ghori, N.H., Ghori, T., Hayat, M.Q., Imadi, S.R., Gul, A., Altay, V., Ozturk, M. 2019. Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 16(3), 1807-1828.
- Giaveno, C.D., Filho, M.J., 2000. Rapid Screening for Aluminium Tolerance in Maize (*Zea mays* L.), *Genet. Mol. Biol.*, 23.
- Gill, M. 2014. Heavy metal stress in plants: a review. *International Journal of Advanced Research*, 2(6), 1043-1055
- Gong, Y., Toivonen, P.M.A., Lau, O.L., Wiersma, PA., 2001. Antioxidant System Level in 'Braeburn' Apple in Related to Its Browning Disorder. *Bot. Bull. Acad. Sin*, 42, 259-264.
- Gratao, L.P., Polle, A., Lea, P., Azevedo, A., 2005. Making the Life of Heavy Metalstressed Plants A Little Easier. *Functional Plant Biology*, 32, 481-494.

- Grzegorz, I., Mikula, K., Skrzypczak, D., Trzaska, K., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., Chojnacka, K., 2021. Agricultural and Non-Agricultural Directions of Bio-Based Sewage Sludge Valorization by Chemical Conditioning. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 47725-47740.
- Guo, J., Dai, X., Xu, W., Ma, M., 2008. Over Expressing GSHI and AsPCSI Simultaneously Increases The Tolerance and Accumulation of Cadmium and Arsenic in *Arabidopsis Thaliana*. *Chemosphere*, 72, 1020– 1026.
- Gupta, R. K., Patel, A. K., Shah, N., 2014. Oxidative Stress and Antioxidants in Disease and Cancer: A Review. *Asian Pac J Cancer Prev*, 15, 4405-4409.
- Gül, İ., 2018. Konya Kenti Atıksu Arıtma Tesisinde Bazı Ağır Metallerin Gideriminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü Necmettin Erbakan Üniversitesi.
- Günay, Ü., Dursun, Ş., 2018. Arıtma Çamuru ve Zirai Atıkların Kompostlanarak Tarım Arazilerinde Kullanımı. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(1), 14-19.
- Habig, WH., Pabst, MJ., Jakoby, WB., 1974. Glutathione S-transferases. The First Enzymatic Step in Mercapturic Acid Formation. *J Biol Chem*, 249(22), 7130-9.
- Halliwell, B., 1994. Free Radicals and Antioxidants: A personal View. *Nutri. Rev*, 52, 253-265.
- Heath, RL., Packer, L., 1968. Photoperoxidation in Isolated Chloroplasts: I. Kinetics Andstoichiometry of Fatty Acid Peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198.
- Hussain, A., Abbas, N., Arshad, F., 2013. Effects of Diverse Doses of Lead (Pb) on Different Growth Attributes of *Zea mays L.* *Agricultural Sci*, 4(5), 262–265.
- Izydorczyk, A., Mikula, K., Skrzypczak, D., Moustakas, K., Krowiak, A., Chojnacka, K., 2021. Potential Environmental Pollution from Copper Metallurgy and Methods of Management. *Environmental Research*, 197, 1-11.
- İşgenç, M., Kınay, E., 2005. Türkiye’de Arıtma Çamurları. Dokuz Eylül Üniversitesi, I. Ulusal Arıtma Çamurları Sempozyumu Bildiri Kitabı, İzmir, 25-26 Mart 2005: 219- 528.
- Jones, S.C., Brown, K.W., Deuel, L.E., Donelly, K.C., 1979. Influence of Rainfall on The Retention of Sludge Heavy Metals by the Leaves of Forage Crops. *J. Environ. Qual.* 8, 69-72.
- Kacar, B., Katkat, AV., 2007. Gübreler ve Gübreleme Tekniği. 1. Baskı. Nobel Yayınları No: 1119. Ankara.
- Karaca, A., Can, O.T., 2012. Toprak Kirliliği. Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi, 1(1), 13 – 19.
- Kalaycıoğlu, S., 2005. Isırgan (*Urtica Dioica L.*) Batkısında Bazı Ağır Metallerin Büyüme Parametreleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üni.
- Karakuş, K., Karakuş, S., Çelikyürek, H., 2019. Ülke Toprakları ve Tarım Arazilerinin Bitkisel ve Hayvansal Üretim Faaliyeti Dışında Kullanımı. *Journal of Animal Science and Products*, 2 (1), 84-90.
- Korboulewsky, N., Boninand,G., Massiani,C., 2002. Biological and Ecophysiological Reactions of White Wall Rocket (*Diplotaxiserucoides*) Grown on Sewage Sludge Compost. *Environmental Pollution*. 117, 365-370.
- Küçükhemek, M., Gür, K., Uyanöz, R., Çetin, Ü., 2005. Arıtma Çamuru ve Çiftlik Gübresinin Çim Bitkisi Verimine ve Renk Özelliğine Etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, I. Ulusal Arıtma Çamurları Sempozyumu Bildiri Kitabı, İzmir. 375-384.

- Kyle, M.A., McClintock, S.A., 1995. The availability of Phosphorus in Municipal Waste Water Sludge As A Function of The Phosphorus Removal Process and Sludge Treatment Method. *Water Environment Research*, 67 (3), 282-289.
- Lakhdar, A., Iannelli, M. A., Debez, A., Massacci, A., Jedidi, N., Abdelly, C., 2010. Effect of Municipal Solid Waste Compost and Sewage Sludge Use on Wheat (*Triticum Durum*): Growth, Heavy Metal Accumulation, and Antioxidant Activity. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 90(6), 965-971.
- Lasat, M.M., Pence, N.S., Garvin, D.F., Abbs, S.D. ve Kochian, L.V., 2000. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, *Journal of Experimental Botany*, 51, 71–79.
- Leila, S., Mhamed, M., Hermann, H., Mykolac, K., Oliver, W., Christin, M., Elenac, O., Nadiia, B., 2017. Fertilization Value of Municipal Sewage Sludge for Eucalyptus Camaldulensis Plants. *Biotechnology Reports*, 13, 8-12.
- Lin, X., Chen, X., Li, S., Chen Y., Wei, Z., Wu, Q., 2021. Sewage Sludge Ditch for Recovering Heavy Metals can Improve Crop Yield and Soil Environmental Quality. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 15(2), 22
- Marin, E., Rusănescu, C., 2023. Agricultural Use of Urban Sewage Sludge from the Wastewater Station in the Municipality of Alexandria in Romania. *Water*, 15(3), 1-19.
- McInnis, S.M., Desikan, R., Hancock, J.T., Hiscock, S.J., 2006. Production of Reactive Oxygen Species and Reactive Nitrogen Species by Angiosperm Stigmas and Polen: Potential Signalling Crosstalk *New Phytol*, 172, 221-228.
- Minibaeva, F.V., Gordon, L., 2003. Superoxide Production and the Activity of Extracellular Peroxidase in Plant Tissues under Stress Conditions. *Russ. J. of Plant Physiology*, 50 (3), 411-416.
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., Frank, V.B., 2004. Reactive Oxygen Gene Network of Plants. *Trends in Plant Science*, 9 (10), 490–498.
- Mohanpuria, P., Rana, N.K., Yadav, S.K., 2007. Cadmium Induced Oxidative Stress Influence on Glutathione Metabolic Genes of *Camellia sinensis* (L.). *Environmental Toxicology*, 22, 368-374.
- Morrey, D.R., 1995. Using Metal-Tolerant Plants to Reclaim Mining Wastes. *Mining Engineering* 47, 247-249.
- Mustafaoğlu, D., Korkmaz, Ş., Ceylan, Z., 2022. Recycling Domestic Sewage Sludge to Agricultural and Farming Areas in Line With Sustainable Development Goals (SDG). *Environmental Research and Technology*, 6(2), 1-13.
- Nahar, N., Hossen, S., 2020. Influence of Sewage Sludge Application on Soil Properties, Carrot Growth and Heavy Metal Uptake. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(1), 1-10.
- Nakano, Y., Asada, Y., 1981. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate Specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. *Plant Cell Physiol*, (22), 867-880.
- Nunes, N., Ragonezi, C., Gouveia, C., Carvalho, M., 2021. Sustainability Review of Sewage Sludge as a Soil Amendment in Relation to Current International Guidelines: A Heavy Metal Perspective. *Sustainability*, 13(4), 1-20.
- Oden, M.K., Özer, İ., Horasan, B.Y., 2019. Investigation of Usage Samples of Treatment Sludges in Agricultural Areas. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7(5), 743-749.

- Öztürk, İ., Çallı, B., Arıkan, O., Altınbaş, M., 2015. Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafları (El Kitabı). Türkiye Belediyeler Birliği, Ankara.
- Öztürk, İ., Koyuncu, İ., Köse Mutlu, B., Yıldız, O., 2016. Atıksu Arıtma Tesisi İşletimi (El Kitabı). İtü Akademi, Türkiye Belediyeler Birliği.
- Öztürk, İ., Timur, H., Koşkan, U., 2005. Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü. Atıksu Arıtımının Esasları Kitabı, 459 Sayfa.
- Öztürk, M., Aslan, Ş., Demirbaş, A., 2020. Effect of Domestic Wastewater Sewage Sludge Applications on Yield and Nutrient Uptake of Tomato Plant. Sivas Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 8(7), 1508-1516.
- Özyiğit, İ.İ., 2021. Tarım Topraklarında Ağır Metaller; Kökenleri, Yayılışları ve Etkileri. Necmettin Erbakan Üniversitesi Ereğli Tarım Bilimleri Dergisi, 1(1), 46-72.
- Pak, O., 2011. Kırklareli Sınırları İçerisindeki Otoban Kenarlarında Bulunan Tarım Arazilerinde Bazı Ağır Metal Kirliliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Pascual, I., Antolín, M.C., García, C., Polo, A., Sánchez-Díaz, M., 2007. Effect of Water Deficit on Microbial Characteristics in Soil Amended with Sewage Sludge or İnorganic Fertilizer under Laboratory Conditions. Bioresour. Technol, 98, 29-37.
- Pascual, I., Azcona, I., Aguirreolea, J., Morales, F., Corpas, F.J., Palma, J.M., Alvarez, R.R., Diaz, M.S., 2010. Growth, Yield, and Fruit Quality of Pepper Plants Amended with Two Sanitized Sewage. American Chemical Society J. Agric. Food Chem, 58, 6951-6959.
- Rascio, N., Navari-Izzo, F., 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? and what makes them so interesting? Plant Science, 180, 169-181.
- Rout, G.R., Samantaray, S., Das, P., 2001. "Aluminum Toxicity in Plants: a Review. Agronomie, 21, 3-21.
- Roy, S., Labelle, S., Mehta, P., Mihoc, A., Fortin, N., Masson, C., Gallipeau, C., 2005. Phytoremediation of Heavy Metal and PAH-Contaminated Brownfield Sites. Plant and Soil, 272, 277-290.
- Salihoğlu, N., 2007. Arıtma Çamurlarının Susuzlaştırılması ve Stabilizasyonunda Kapalı Kurutma Yataklarının Kullanımı. Doktora Tezi. Çevre Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Samsunlu A., 2006. Atıksuların Arıtılması Kitabı. Birsan Yayınevi. İstanbul. 8. Baskı, 400 sayfa.
- Sevgi, K., Leblebici, S., 2022. Bitkilerde Ağır Metal Stresine Verilen Fizyolojik ve Moleküler Yanıtlar. Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 4, 528-536.
- Shahid, M., Pourrut, B., Dumat, C., Nadeem, M., Aslam, M. & Pinelli, E. 2014. Heavy-metal-induced reactive oxygen species: phytotoxicity and physicochemical changes in plants. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 232, 1-44.
- Shukla, O.P., Juwarkar, A.A., Singh, S.K., Khan, S., Rai, U.N., 2011. Growth Responses and Metal Accumulation Capabilities of Woody Plants during the Phytoremediation of Tannery Sludge. Waste Management, 31, 115-123.
- SIST EN 12457-4: 2004- Characterisation of Waste-Leaching - Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials and Sludges - Part 4: One Stage Batch Test at A Liquid to Solid Ratio of 10 l/kg for Materials with Particle Size below 10 Mm (without or with size reduction).

- SIST EN 13137: 2002- Characterization of Waste-Determination of Total Organic Carbon (TOC) in Waste, Sludges and Sediments.
- SIST ISO 11261, 1996. Soil Quality: Determination of Total Nitrogen – Modified Kjeldahl Method, 4 p.
- Singh, R.P., Agrawal, M., 2008. Potential Benefits and Risks of Land Application of Sewage Sludge. *Waste Manage*, 28, 347-358.
- Singh, R.P., Agrawal, M., 2010. Variations in Heavy Metal Accumulation, Growth and Yield of Rice Plants Grown at Different Sewage Sludge Amendment Rates. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, 632-641.
- Slesak, I., Libik, M., Karpinska, B., Karpinski, S. ve Miszalski, Z., 2007. The Role of Hydrogen Peroxide in Regulation of Plant Metabolism and Cellular Signalling in Response to Environmental Stresses. *Acta Biochim. Pol*, 54, 39-50.
- Smith, H.W., Weldon, M.D., 1941. A Comparison of Some Methods for The Determination of Soil Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Amer*, 5, 177-182.
- Soudek, P., Katrusakova, A., Sedlacek, L., Petrova, S., Koci, V., Marsik, P., 2010. Effect of Heavy Metals on İnhibition of Root Elongation in 23 Cultivars of Flax (*Linum usitatissimum L.*). *Archives of Env. Contamination Toxicology*, 59, 194-203
- Soumare, M., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., 2003. Characterization of Malianand Belgian Solid Waste Composts with Respect to Fertilityand Suitability for Land Application. *Waste Management*. 23, 517-522.
- Şenlikci, A., Doğu, M., Eren, E., Çetinkaya, E., Karadağ, S., 2015. Pressure Calcimeter as A Simple Method for Measuring the CaCO₃ Content of Soil and Comparison with Scheibler Calcimeter. *Toprak Su Dergisi*, 24-28.
- Şimşek, T., Kalkancı, N., Büyük, G., 2021. Tarım Topraklarındaki Ağır Metallerin Kirlilik Düzeylerinin Belirlenmesi: Osmaniye Örneği. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 26 (1), 106-116.
- Terzi, H., Yıldız, M., 2013. Bitkilerde Ağır Metal Toksisitesi: Proteomik Yaklaşım. *AKÜ FEMÜBİD 13*, (1-21)
- Tiryaki, D., 2009. Salisilik Asidin Kadmiyum Toksisitesi Altındaki Buğdaylarda Apoplastik Antioksidatif Sistem Üzerine Etkilerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Biyoloji Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum*.
- Tolay, U., Yavuzsefik, Y., Tolay, M., Söğüt, N., 2000. Atık Çamurlarının Bitki Üretiminde Kullanılması Üzerine Araştırmalar. *Turk J Agric For*, (24), 705-712.
- Topaç, F. O., Uçaroglu, S., 2020. Atıksu Arıtma Çamurlarının Sürdürülebilir Kullanım Alternatifleri: Öncelikli Yaklaşımlar. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20, 728-739.
- Topal, M., Topal, I., 2014. Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Kehli Deresi Su Kalitesi Üzerine Etkisinin Belirlenmesi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi BEU*, 3(1), 53-64.
- Topcuoğlu, B., Önal, K., Arı, N., 2003. Toprağa Uygulanan Kentsel Arıtma Çamurunun Domates Bitkisine Etkisi, Birinci Bitki Besinleri ve Ağır Metal İçerikleri. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16(1), 87-96.
- Torun, Y., 2003. Salatalık (*Cucumis sativus L.*) Fide Gelişiminde İdeal İyon Konsantrasyonlarının Ve Alım Mekanizmalarının Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye*.
- Turan, G., 2014. Kentsel Atıksu Arıtma Tesisleri ve İşletme Sorunları. *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir*.

- Turksoy, R., Terzioglu, G., Yalcin, I. E., Turksoy Terzioglu, O., Demir, G., 2021. Removal of Heavy Metals from Textile Industry Wastewater. *Frontiers in Life Sciences and Related Technologies*, 2(2), 44-50.
- TÜİK, 2020. Belediye Atık Su İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu Haber Bülteni, SAYI: 37197.
- U.S. EPA. 2007. "Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils," Revision 1. Washington, DC.
- U.S. EPA. 2014. "Method 6010D (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry," Revision 4. Washington, DC.
- Uzun, P., Bilgili, U., 2011. Arıtma Çamurlarının Tarımda Kullanılma Olanakları. *U.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(2), 135-146.
- Ünal, M., Karaca, A., Camcı, Ç.S., Çelik, A., 2011. İçme Suyu Tesisi Arıtma Çamurunun Arpa Zambacı (*Freesiaspp.*) Bitki Gelişimi ve Bazı Toprak Özellikleri Üzerine Etkileri. *Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 25 (2), 46-56.
- Velikova, V., Yordanov, I., Edreva, A., 2000. Oxidative Stress and Some Antioxidant Systems in Acid Rain-Treated Bean Plants Protective Role of Exogenous Polyamines. *Plant Science*, 151, 59-66.
- Wang, X., Chen, T., Ge, Y., Jia, Y., 2008. Studies on Land Application of Sewage Sludge and Its Limiting Factors. *J Hazard Mater*, 160, 554-558.
- Witham, FH., Blaydes, BF., Devlin, RM. 1971. *Experiments in Plant Physiology*. Van Nostrand Reinhold, New York, USA. 167-200.
- Wu, D., Yu, X., Lai, M., Feng, J., Dong, X., Peng, W., Sining, S., Zhang, X., Wan, L., Jacobs, D., Zeng, S., 2021. Diversified Effects of Co-Planting Landscape Plants on Heavy Metals Pollution Remediation in Urban Soil Amended with Sewage Sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 1-12.
- Wyrwicka, A., Urbaniak, M., 2016. The Different Physiological and Antioxidative Responses of Zucchini and Cucumber to Sewage Sludge Application. *11(6)*, 1-17.
- Wyrwicka, A., Urbaniak, M., 2018. The biochemical response of willow plants (*Salix viminalis* L.) to the use of sewage sludge from various sizes of wastewater treatment plant. *Science of the Total Environment*, 615 (2018) 882–894.
- Xu, G., Cao, X., Bai, L., Qi, H., Lu, H., 2019. Absorption, Accumulation and Distribution of Metals And Nutrient Elements in Poplars Planted in Land Amended with Composted Sewage Sludge: A Field Trial. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182.
- Xue, D., Xiangdong, H., 2013. The Impact of Sewage Sludge Compost on Tree Peony Growth and Soil Microbiological, and Biochemical Properties. *Chemosphere*, 93, 583-589.
- Yakamercan, E., Ari, A., Aygün, A., 2021. Land Application of Municipal Sewage Sludge: Human Health Risk Assessment of Heavy Metals. *Journal of Cleaner Production*, 319, 1-11.
- Yalçın, G., Yavuz, R., Yılmaz, M., Taşpınar, K., 2011. Evaluation of Sewage Sludge on Agricultural Lands. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma*, (3) 156-164.
- Yee, Y., Tam, NFY., Wong, YS., Lu, CY., 2002. Growth and Physiological Responses of Two Mangrove Species (*Bruguira Gymnorhiza* and *Kandelia Candel*) to Waterlogging. *Environmental and Experimental Botany*, 1-13.
- Yerli, C., Çakmakcı, T., Şahin, Ü., Tüfenkçi, Ş., 2020. Ağır Metallerin Toprak, Bitki, Su ve İnsan Sağlığına Etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9 (Özel Sayı), 103-114.

- Yıldız, S., Oran, E., 2019. Sewage Sludge Disintegration by Electrocoagulation. International Journal of Environmental Health Research, 29(5), 531–543.
- Yıldız, Ş., Yılmaz, E., Ölmez, E., 2009. Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri: İstanbul Örneği. TÜRKAY Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, YTÜ. İstanbul.
- Yüksekdağ, M., Gökpınar, S., Bekir Yelmen, B., 2020. Atıksu Arıtma Tesislerinde Arıtma Çamurları ve Bertaraf Uygulamaları. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (18), 895-904.
- Zaitsev, G. A., Dubrovina, O. A., Shainurov, R. I., 2020. Iron and Manganese Migration in “Soil–Plant” System in Scots Pine Stands in Conditions of Contamination by the Steel Plant’s Emissions. Scientific Reports, 10(1), 1-11.
- Zengin, FK., Munzuroğlu, O., 2005. Effects of Some Heavy Metals on Content of Chlorophyll, Proline and Some Antioxidant Chemicals in Bean (*Phaseolus Vulgaris L.*). Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, 47(2), 157-164.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Damla MUSTAFAOĞLU
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Lisesi (1997-2001)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü (2002-2006)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü (2007-2011)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı (2018-2024)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Çok iyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	