



**ARITMA ÇAMURUNDAN HİDROJEL ÜRETİMİ VE GÜBRE
POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Nuray IŞIKEL

Eskişehir 2023

**ARITMA ÇAMURUNDAN HİDROJEL ÜRETİMİ VE GÜBRE
POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRMESİ**

Nuray IŞIKEL

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Teknolojisi Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Mayıs 2023

Bu tez çalışması ESTÜ BAP Komisyonu 301-Araştırma Destek Projesi ve 2210-Öncelikli Alanlar Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Nuray IŞIKEL'in ARITMA ÇAMURUNDAN HİDROJEL ÜRETİMİ VE GÜBRE POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ başlıklı çalışması 11/05/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca Çevre Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı)

: Doç. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN

Üye

: Prof. Dr. Serdar GÖNCÜ

Üye

: Doç. Dr. Emine BAŞTÜRK

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

11.05.2023

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Nuray IşIKEL, ARITMA ÇAMURUNDAN HİDROJEL ÜRETİMİ VE GÜBRE POTANSİYELİNİN DEğERLENDİRMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Doç. Dr. Zehra YİğİT AVDAN

ÖZET

ARITMA ÇAMURUNDAN HİDROJEL ÜRETİMİ VE GÜBRE POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRMESİ

Nuray IŞIKEL

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Teknolojisi Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2023

Danışman: Doç. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN

Dünya nüfusunun giderek artmasıyla birlikte iklim değişikliği etkileri sürdürülebilir üretim ve tüketimi sağlama konusunda tarım sektörü üzerinde büyük baskılar oluşturmaktadır. Sürdürülebilir gıda üretiminin sağlanması amacıyla tarım sektörü üzerinde yeni stratejilere gidilerek, çevreye minimum zarar ve maksimum etki sağlanması yolunda yeşil ve yeni nesil teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Su adsorpsiyon kapasitesi ve geçirgenlik özellikleriyle dikkat çeken hidrojeller, bitki gelişiminin temel iki yapı elemanı olarak; su ve gübre konusunda mükemmel bir ara malzeme olacaktır. Hidrojeller döngüsel ekonominin de desteğiyle gübreyle ikincil kaynak olarak seçilen arıtma çamurlarıyla birlikte kombinlenmesiyle, yüksek besin içerikli gübre üretimi sağlamak ve bitkiler üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Ülkemizde ithal edilen gübreler yerine arıtma çamurundan geri kazanılmış hidrojel malzemenin gübre potansiyelinin belirlenmesi atıkların değerlendirilmesi açısından hem ticari ve ekonomik hem de sosyal yönden büyük katkı sağlayacaktır.

Anahtar Sözcükler: Tarım, Hidrojel, Geri Kazanım, Döngüsel Ekonomi, Sürdürülebilirlik

ABSTRACT

HYDROGEL PRODUCTION FROM SEWAGE SLUDGE AND EVALUATION OF FERTILIZER POTENTIAL

Nuray IŞIKEL

Department of Environmental Engineering

Programme in Environmental Technology Science

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2023

Supervisor: Assoc. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN

The increasing population of the world and the effects of climate change are creating great pressures on ensuring sustainability in the agricultural sector and causing the depletion of water and phosphorus, which are a limited resource. New strategies are needed in the agricultural sector for sustainable food production, green and next-generation technologies are needed that cause minimal damage to the environment and provide maximum impact. Hydrogels, which attract attention with their water adsorption capacity and permeability properties, have the potential to be an excellent intermediate material for water and nutrients, which are the two basic building elements of plant development. In this direction, in the thesis proposal, it is aimed to produce a plant nutrient with a high moisture content from treatment sludge with a high phosphorus content, which is selected as an alternative to commercial fertilizer in the context of the cyclic economy of hydrogels, and to investigate its effects on plants. In this context, determining the moisture and fertilizer potential of the hydrogel material recovered from the treatment sludge instead of the fertilizers imported in our country will make a great contribution both commercially and economically and socially in terms of waste assessment.

Keywords: Hydrogel, Water Scarcity, Recovery, Circular Economy, Sustainability

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecimde her zorlukta yanımda olan, bilgi birikimiyle hayatıma yön veren ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN'a,

Hayatımda aldığım kararlara hep saygı duyarak yanımda olan, destekleriyle bana güç veren canım aileme,

Yüksek lisans eğitim sürecim boyunca manevi desteklerini hep hissettiğim arkadaşlarım Merve SERHAN ve Hicret TAVUSBAY'a,

Analiz süreçleri boyunca yardımlarını esirgemeyen doktora öğrencisi Ece Tuğba MIZIK'a,

Ayrıca bu tez çalışmasını 2210-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ve ESTÜ BAP Komisyonu 301-Araştırma Destek Projesi için Eskişehir Teknik Üniversitesi'ne sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nuray IŞIKEL

11.05.2023

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Nuray IŞIKEL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	I
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET.....	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. ARITMA ÇAMURU.....	4
2.1. Türkiye’de Arıtma Çamurlarının Yönetimi	5
2.2. Dünya’da Arıtma Çamurlarının Yönetimi	6
3. HİDROJELLER.....	9
3.1. Hidrojellerin Sınıflandırılması	12
3.2. Hidrojel Hazırlamada Kullanılan Yöntemler	14
3.2.1. Toplu polimerizasyon	15
3.2.2. Yığın polimerizasyon	16
3.2.3. Süspansiyon polimerizasyonu veya ters süspansiyon polimerizasyonu ..	16
3.2.4. Çözelti Polimerizasyonu	17
3.2.5. Aşı polimerizasyonu.....	18
3.2.6. Süper Emici Polimerler (SAP) ve Süper Gözenekli Hidrojeller (SPH)...	20
3.3. Hidrojel Karakterizasyon Teknikleri	21

4. LİTERATÜR TARAMASI	23
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
5.1. Malzemeler	29
5.2. Çalışmada Kullanılan Cihaz, Araç ve Gereçler	30
5.3. Metot.....	31
5.3.1. Arıtma çamuru ön işlem.....	31
5.3.2. Aljinat miktarının belirlenmesi	32
5.3.3. Akrilik asit miktarının belirlenmesi.....	32
5.3.4. Çamur miktarının belirlenmesi	33
5.4. Karakterizasyon.....	33
5.4.1. Toplam organik karbon	33
5.4.2. Ağır metal analizi.....	34
5.4.3. Fosfor analizi	34
5.4.4. Azot analizi.....	35
5.4.5. Su tutma analizi	36
5.5. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi.....	37
6. BULGULAR	38
6.1. Toplam Organik Karbon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	38
6.2. Toplam Azot ve Fosfor Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	38
6.3. Ağır Metal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	39
6.4. Aljinat Miktarı Optimizasyonu	40
6.5. Akrilik Asit Optimizasyonu.....	42
6.6. Arıtma Çamuru Miktarı Optimizasyonu	44
6.7. Tekrarlanabilirlik.....	46
6.8. Ön İşlem Aşamasında Kullanılacak Olan Arıtma Çamuru Hammaddesinin FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	47
6.9. Arıtma Çamurundan Elde Edilen Hidrojellerin FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	50

7. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKÇA	62
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Türkiye’deki arıtma çamuru mevzuatı tarihsel gelişimi.....	6
Tablo 2.2. AB ülkeleri ağır metal konsantrasyonlarının sınır değerleri	8
Tablo 3.1. Hidrojel araştırmalarının uygulama alanları.....	10
Tablo 3.2. Hidrojel üretim alternatifleri için ekipman özellikleri	18
Tablo 3.3. Aşı polimerizasyon tekniğinin optimum koşulları	19
Tablo 3.4. SAP ve SPH’lerin karşılaştırılması.....	21
Tablo 6.1. TOK analiz sonuçları	38
Tablo 6.1. (Devam) TOK analiz sonuçları.....	38
Tablo 6.2. Toplam azot ve fosfor değerleri	39
Tablo 6.3. Toprakta kullanılabilecek stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek maksimum ağır metal muhtevaları	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Son 25 yılda yapılan hidrojel ile ilgili araştırma sayıları.....	9
Şekil 3.2. Hidrojin gübre potansiyelinin yıllara göre araştırma sayıları	12
Şekil 3.3. Hidrojellerin sınıflandırılması.....	14
Şekil 3.4. Basit hidrojel şematik diyagramı	15
Şekil 3.5. Toplu polimerizasyon yöntemi akış şeması.....	16
Şekil 3.6. Süspansiyon polimerizasyonu akış şeması	17
Şekil 3.7. Aşı polimerizasyonu akış şeması.....	19
Şekil 3.8. Süper Emici Hidrojellerin (SAP) akış diyagramı	20
Şekil 3.9. Hidrojel karakterizasyon teknikleri.....	22
Şekil 5.1. Arıtma çamuru örneği.....	29
Şekil 5.2. Deney akış diyagramı	30
Şekil 5.3. Deney sürecinde kullanılan cihaz örnekleri.....	31
Şekil 5.4. Arıtma çamuru ön işlem.	31
Şekil 5.5. Hidrojel elde etme yöntemleri	33
Şekil 5.6. Shimadzu-Vcph 3000 TOC Analyzer cihazı	34
Şekil 5.7. Fosfor analiz kitleri.....	35
Şekil 5.8. Azot analiz kitleri	36
Şekil 5.9. Su tutma analizleri	36
Şekil 5.10. SHIMADZU IRTracer – 100 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı	37
Şekil 6.1. Arıtma çamuru ağır metal içerikleri.....	40
Şekil 6.2. Öğütülmüş çamur aljinat optimizasyonu	41
Şekil 6.3. Ham çamur aljinat optimizasyonu	41
Şekil 6.4. Aljinat miktarı optimizasyonu yöntem karşılaştırması	42
Şekil 6.5. Öğütülmüş çamur için akrilik asit optimizasyonu	43

Şekil 6.6. Ham çamur için akrilik asit optimizasyonu	43
Şekil 6.7. Akrilik asit optimizasyonu yöntem karşılaştırması.....	44
Şekil 6.8. Öğütülmüş çamur için çamur miktarı optimizasyonu.....	44
Şekil 6.9. Ham çamur için çamur miktarı optimizasyonu.....	45
Şekil 6.10. Arıtma çamuru miktarı optimizasyonu için yöntemlerin karşılaştırılması.....	46
Şekil 6.11. Tekrarlanabilirlik deneyleri sonrası su tutma oranları	46
Şekil 6.12. Ham çamura ait FTIR spektrumu	48
Şekil 6.13. Öğütülmüş çamura ait FTIR spektrumu	49
Şekil 6.14. 550 °C yakılmış çamur ve 800 °C yakılmış çamur FTIR spektrumu	50
Şekil 6.15. Öğütülmüş çamur - Aljinat optimizasyonu FTIR spektrumu	51
Şekil 6.16. Ham çamur-Aljinat optimizasyonu FTIR spektrumu	51
Şekil 6.17. Öğütülmüş çamur-Akrilik asit optimizasyonu FTIR spektrumu	52
Şekil 6.18. Ham çamur- Akrilik asit optimizasyonu FTIR spektrumu	53
Şekil 6.19. Öğütülmüş çamur- Çamur miktar optimizasyonu FTIR spektrumu	54
Şekil 6.20. Ham çamur- Çamur miktar optimizasyonu FTIR spektrumu	54
Şekil 6.21. En iyi su tutma oranına sahip iki farklı jelin akrilik asit karşılaştırma FTIR spektrumu.....	55
Şekil 6.22. En iyi su tutma oranına sahip iki farklı jelin aljinat karşılaştırma FTIR spektrumu.....	56
Şekil 6.23. En iyi su tutma oranına sahip iki farklı jelin çamur türü karşılaştırma FTIR spektrumu.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA	: Akrilik Asit
Aam	: Akrilamid
AB	: Avrupa Birliği
APS	: Amonyum Persülfat
CMC	: Karboksimetil selüloz
IA	: İtakonik Asit
IPN	: İç İç Geçen Polimer Ağı
K	: Potasyum
KM	: Kuru Madde
KPS	: Potasyum Persülfat
MBA	: Metilenbisakrilamid
MW	: Mikrodalga
N	: Azot
P	: Fosfor
Psb	: Polisakkarit
SAP	: Süper Emici Polimerler
SPH	: Süper Gözenekli Hidrojeller
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UV	: Ultraviyole

1. GİRİŞ

Nüfus artışıyla birlikte gıda talebindeki küresel artış, tatlı su kaynaklarının azalması, AB tarafından [1] kritik bir hammadde olarak ilan edilen fosforun (P) giderek azalması tarım sektörü üzerinde büyük baskılar oluşturmaktadır. Gıda üretiminin sürdürülebilirliğini sağlamak için bitkilerin temel olarak ihtiyaç duyduğu elementler; su ve besin maddeleridir. Tarım sektörü, dünya su kaynaklarının yaklaşık olarak %70'ini sulama için kullanmasına [2] rağmen dünya üzerindeki çiftçilerin dörtte üçü hala yağmur sularına da ihtiyaç duymaktadır. Tekrarlayan kuraklıklar sonrasında önlem almak adına yapılan yönetim stratejileri (bkz: tarımda su kısıtlamaları), çiftçileri bitki gelişiminin bir diğer temel elementi olan besin maddelerine yönelterek; gübreye olan bağımlılığın artmasına sebep olmaktadır. Örneğin, 2015 yılı Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) verilerine göre; ülkemizde gübre üretimi için 98.7 milyon dolar değerinde yaklaşık 892 bin ton fosfat ithal edilmiştir [3]. Şu anda bilinen rezervlerin birkaç ülkede, özellikle Fas'ta yoğunlaşması [4], fosforun küresel olarak eksikliği ve dünya genelinde fosfat kayası rezervlerinin belli bölgelerde sınırlı kalmış olması tarım sektörünü kritik bir noktaya getirmiştir. Gıda üretimi, fosforun mevcudiyeti ile doğrudan ilişkilidir ve çıkarılan fosforun %90'ının tüketiminden tarımsal uygulamalar sorumludur [5]. Gıda üretiminin yoğunlaştırılması, küresel ölçekte 14 milyon t P/yıl düzeyinde olan fosfatlı gübrelerin kullanımına neden olmaktadır [6].

Tarım alanlarında su ve gübrenin uygun dağılımı, toprak verimliliğinin korunmasında, hasat kalitesinin iyileştirilmesinde ve üretim veriminin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Ancak buharlaşma ve liç yoluyla önemli miktarlarda gübre ve su kaybına yol açarak, tarımsal maliyetlerin artmasına ve aynı zamanda çevre kirliliğine de neden olmaktadır (http-4). Bu nedenle çevre açısından güvenli ve biyolojik parçalanabilen malzemelerin kullanılması oldukça önemlidir.

1990'lara kadar dünya çapında tarımsal gıda üretiminin iki katına çıkması, kısmen azot (N) gübrelemesinde 6.9 kat ve fosfor (P) gübrelemede 3.5 kat artışa bağlanabilir [7]. Örneğin Çin'de artan mahsul üretiminin yarısından fazlası gübre tüketimindeki hızlı artışa dayanmaktadır [7], [8]. Gelişmekte olan ülkelerin sosyo-kültürel yapılarına bağlı olarak birçok gübre yönetim stratejisi bulunmasına rağmen, ülkelerin uygulamaya geçme yönündeki zorluklar devam etmektedir. Üretimdeki zorluklar gıda fiyatlarının giderek artmasına, gelişmekte olan ülkelere sınıf farklılıklarına, dünya genelinde gıda üretiminin

orantısız bir biçimde dağılmasına sebep olabilmektedir. Bu bağlamda döngüsel ekonomi, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin, gıda üretimi ve sürdürülebilirliğini sağlamak, dışa bağımlılığını azaltmak, var olan kaynakların yönetimini sağlamak için bir çıkış noktasıdır. Döngüsel ekonomi, tüketicilerin "al-kullan-at" yaklaşımını engellemek amacıyla, atıkları ikincil bir kaynak olarak kullanıp kaynak azaltımı, geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi politikaları uygulamasını hedeflemektedir. Bu doğrultuda atıksu arıtma tesislerinde bertarafı büyük bir sorun haline gelen arıtma çamurlarının hem yük azaltımı hem de yeniden kullanımı konusunda gübreye en umut verici çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

TÜİK verilerine göre ülkemizin 2018 yılı nüfusu 82.003.882 kişi olup günde kişi başına 60 gram katı madde kabul edildiğinde evsel/kentsel kaynaklı günlük 4920 ton arıtma çamuru üretildiği tahmin edilmektedir [9]. Bir hammadde ve enerji kaynağı olarak arıtma çamurunun ülkemiz koşullarına uygun yararlı kullanım alternatiflerinin belirlenerek ülkemiz ekonomisine kazandırılması büyük önem taşımaktadır. Arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurunun bertarafı zordur ve oldukça yüksek sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Ülkemizde arıtma çamurlarının bertarafında genellikle arazide kurutma yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntem atmosfere ciddi oranda karbon salınımı ($CH_4(g)$, $C_2H_2(g)$, $CO_2(g)$, $CO(g)$ vb.) gerçekleştirerek iklim değişikliğinin artmasına neden olmaktadır. Arıtma çamuru içeriğindeki organik kirleticiler, toksik metaller ve patojenik mikroorganizmalardan dolayı çevresel etkileri göz önüne alındığında, tarımda direkt olarak uygulanamamaktadır. Arıtma çamuru içeriğindeki besin maddelerinin etkili bir şekilde geri kazanımı ve zararsız bir şekilde bertaraf edilmesi kombinasyonu, sadece kaynak sıkıntısı krizini hafifletmekle kalmayarak, arıtma çamurunun çevresel etkileri azaltılmasıyla iklim değişikliği kapsamında ulusal ve uluslararası yükümlülüklerin yerine getirilmesi için katkı sağlayacaktır. Ayrıca çevresel etkilerin yanında ekonomik anlamda da ülke ekonomisine kalkınma sağlayacak çözümler bulunması oldukça önemlidir.

Artan nüfus ve iklim değişikliğinin de getirileriyle birlikte kuraklıklardaki artış, dünyada gıda krizini de beraberinde getirecektir. Gıda krizi sonucu oluşan sosyo-ekonomik sıkıntılar, araştırmaları düşük maliyetli, biyolojik olarak parçalanabilen, toksik olmayan hidrojel uygulamalarına yöneltmiştir. Hidrojeller gıda endüstrisi, ambalaj, ilaç, tarım, kozmetik gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır [10]. Çok iyi adsorbanlar

olarak, tuzdan arındırmanın yanı sıra, ağır metallerin, boyaların ve polimerik bileşiklerin su ve atıksudan uzaklaştırılması gibi diğer birçok arıtma işleminde kullanılabilir [11]. Ayrıca hidrojel toprağın kurutulması sırasında depolanan suyun salınımını kontrol edebilmekte ve nemi uzun süre koruyabilmektedir [12]. Biyolojik olarak parçalanabilme ve polimerlerinin ayarlanabilmesi özellikleri kullanılarak, birçok araştırmacı tarafından farklı asit ve yapı malzemeleri ile hazırlanan hidrojel; kuraklık koşulları altında şişme özellikleri [13], farklı toprak çeşitleri üzerindeki potansiyelleri [14], geçirgenlik performansını iyileştirilmeleri [15] ve yavaş azot salınımı sağlamaları (http-5) gibi özellikleri ile tarımsal süreçlere katkı sağlamaktadır.

Tez çalışması kapsamında, arıtma tesislerinde bertarafı büyük bir sorun haline gelen arıtma çamurunun, çevresel etki ve yükünün azaltılmasının yanında yüksek besin içeriğinin de kullanılması sağlanarak arıtma çamuru bazlı hidrojel üretimi ve tarımsal süreçte değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda;

- a) Tarımsal uygulamalarda sürdürülebilirlik stratejisi geliştirilerek, fosfor içerikli gübre kullanımında dışa bağımlılığın azaltılması ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanması,
- b) Arıtma çamurunun tarım uygulamalarında kullanılması için alternatif bir yöntem sağlanması,
- c) Sürdürülebilir bir besin yönetim stratejisiyle artan gıda talebindeki açıklıkları kapatmak adına yeşil uygulamaların benimsenmesi,
- d) Hidrojinin yüksek su tutma kapasitesinden yararlanılarak topraktaki nemliliğin artması, kuraklığın önüne geçilmesi ve su tasarrufunun sağlanması hedeflenmektedir.

Ayrıca tez çalışması kapsamında arıtma çamurlarının çevresel etki ve yükünün azaltılması amacıyla yüksek besin içeriğine sahip arıtma çamurundan elde edilen hidrojinin sürdürülebilir ve güvenli bir tarım stratejisi için; bitkilerin daha hızlı üretiminin sağlanmasında kullanımı ve tarımsal üretimdeki etkilerinin araştırılmasının yolu açılacaktır.

2. ARITMA ÇAMURU

Evsel atıksu arıtımı, atıksuyun kalitesini önemli ölçüde iyileştirmek için birtakım fiziksel ve biyolojik süreçlerden oluşmaktadır. Birincil çökeltme aşaması sırasında uzaklaştırılan katılar ve ikincil arıtmadan sonra biyolojik dönüşüm süreçleri sırasında üretilen çöken mikroorganizmalar topluca atıksu arıtımının ana yan ürünü olan "atık çamuru" olarak adlandırılmaktadır [18]. Atıksu arıtımı ile uzaklaştırılan bileşenler arasında çamur, hacim olarak açık ara en büyüğüdür; bu nedenle, işleme yöntemleri ve bertaraf teknikleri büyük bir endişe konusudur [19]. Tipik bir arıtma tesisinde oluşan ham çamur içeriği %97-98 oranında su içermektedir. Çamur hacim olarak büyük alan kaplamaktadır ve bu durum bertarafını daha da önemli konu haline getirmektedir. Çamur bertaraf etme işlemleri arıtma tesisinin toplam yatırım masrafının %20-30'unu, işletme masrafının ise %50-70'ini oluşturmaktadır [20]. Arıtma çamurlarının değerlendirilmesi hem çevresel yükü azaltmak hem de döngüsel ekonomiye katkı sağlamak açısından oldukça önemlidir.

Arıtma çamurlarının bertarafı çamurun kalitesi ile ekonomik ve teknik imkanlara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Arıtma çamurlarının bertaraf yöntemleri;

- Düzenli depolama
- Arazide bertaraf
- Kompostlaştırma
- Teknik yöntemler
- Çamur lagünlerinde depolama
- Arazi iyileştirme
- Kimyasal sabitleme (stabilizasyon)/solidifikasyon
- Termik yöntemlerdir.

Yöntemlerin uygulanabilirliği ülkelerin yönetmelik ve mevzuatlarında verilen esaslarla sınırlandırılmaktadır. Tarım uygulamaları açısından bakıldığında; anaerobik çürütme son nesil atıksu arıtma tesislerinde en çok kullanılan tekniklerden biridir. Oluşan ürün, arıtma çamurunun organik ve inorganik kirleticilerin varlığına karşı kayda değer makro besin içeriği nedeniyle artı ve eksileriyle ilginç tarımda kullanım potansiyeline sahip olma özelliği göstermektedir [21]. Çamurun gübre potansiyeli N, P ve K miktarına bağlıdır. Ancak çamur; toprak, yüzey suları ve yeraltı suları için kirlilik riski oluşturan ağır metaller gibi patojenler ve toksik maddeler içeriğinden [22] dolayı tarımsal

uygulamalarda dikkate alınmalıdır. Ağır metaller besin zincirlerinde birikime yol açarak birçok sağlık riskine neden olabilmektedir. Arıtma çamuru arazi uygulamasının ekolojik risk değerlendirmesi üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur; ancak arıtma çamurlarının toprağa uygulanmasının insan sağlığı üzerindeki etkileri literatürde nispeten daha azdır [23].

Son yıllarda arıtma çamurları üzerinde önem kazanan bir diğer konu ise enerji geri kazanımıdır. Arıtma çamurlarının bertarafı ayrı bir enerji ve maliyet gerektirmektedir. Ayrıca çamurun tarım toprağı üzerine serpilmesi veya çamurla birlikte düzenli depolama alanları oluşturulması; yeraltı su kaynaklarına sızmasına ve atık gazların salınımı sonucu havayı kirletmesine neden olmaktadır [24]. Artan maliyet ve çevresel etkiler çamur sorununa kalıcı çözümler üretmeye teşvik ederken; sürdürülebilir ve yeşil uygulamalara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1. Türkiye’de Arıtma Çamurlarının Yönetimi

Arıtma çamuru, herhangi bir su/atıksu arıtma işleminin kaçınılmaz yan ürünüdür ve arıtılmış atıksuyun yalnızca %1-2'sini oluşturmaya rağmen, orijinal kirliliğin önemli bir kısmını içermektedir [25]. TÜİK Atık İstatistiklerine göre kentsel atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru miktarı 2020 yılı için toplam 314325,4 ton katı madde (KM) olarak verilmektedir (TÜİK, Atık İstatistikleri, 2020). Sadece Ankara, Eskişehir, Bursa, Adana, Gaziantep ve Antalya'daki fabrikalarda her gün 200 tonun üzerinde ıslak arıtma çamuru üretilmektedir [24]. Türkiye'de üretilen arıtma çamurunun %58'i düzenli depolama, %13'ü faydalı amaçlar için arazi uygulaması, %5'i yakma ve %24'ü biyogaz üretimi gibi çeşitli yöntemlerle bertaraf edilmektedir [26]. Arazi veya tarımsal uygulama gibi yeniden kullanım seçenekleri, ekolojik ve aynı zamanda ekonomik olarak en sürdürülebilir yollardır [26,27].

Evsel arıtma çamurlarının direkt olarak arazi uygulaması çamurun patojen içeriğinden dolayı sakıncalıdır. Bu tip uygulamalarda "Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik" esas alınarak uygulama yapılmak zorundadır (03.08.2010 tarihli ve 27661 sayılı Resmî Gazete). Arıtma çamurlarının arazide değerlendirilebilmesi için, stabilizasyon işlemleri yapıldıktan sonra çevresel açıdan sorun yaratmayacak koşulların sağlanması gerekmektedir. Arıtma çamuru 5/7/2008 tarihli ve 26927 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan "Atık Yönetimi

Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik" gereğince esaslara aykırı olmamak şartı ile toprakta iyileştirme ve gübreleme amaçlı kullanılabilir. Diğer bir kullanılan bertaraf yöntemi yakmadır. Arıtma çamurları tek başına veya diğer atıklarla birlikte yakılabilir. Bu yöntemin seçilmesi durumunda 06.10.2010 tarih ve 27721 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan "Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik” esasları dikkate alınarak uygulama yapılmalıdır. Türkiye’de en çok kullanılan bertaraf yöntemi düzenli depolamadır. Düzenli depolamadaki ilk amaç çamur hacminin azaltılmasıdır. Çamur su içeriği %65-80 arasında olan çamurların depolama sahasına kabulü için özel izin gerektirirken, katı madde içeriği yüksek olan çamurlarda bu şart aranmamaktadır. Düzenli depolama için 26.03.2010 tarih ve 27553 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" gereğince uygulama yapılmaktadır [35]. Nüfus artışıyla doğru orantılı olarak çamur üretiminin de artması, çamur mevzuatını da yıllar içinde çeşitli yönetmeliklerle değiştirmiştir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Türkiye’deki arıtma çamuru mevzuatı tarihsel gelişimi (http-2.)

Yıl	Yönetmelik
1991	Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
2004	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
2005	Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
	Toprak Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
2006	Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği
2010	Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
	Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik
2014	Atıktan Türetilmiş Yakıt Ek Yakıt ve Hammadde Tebliği
2015	Atıkların Yönetimi Yönetmeliği

2.2. Dünya’da Arıtma Çamurlarının Yönetimi

Arıtma çamurlarının yönetimi birçok ülke yönetmeliği ve mevzuatlarında olduğu gibi; arazi yapısı, şartları ve ülkelerin gelişmişlik düzeylerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Günümüzde hala birçok ülkede ham ön çökeltim çamurunun su kütlelerine boşaltıldığı durumlar bulunmaktadır. Hindistan gibi üretilen atıksuyun

yalnızca %30'unun işlendiği büyük ülkelerde, sorun daha da büyümektedir [28]. Gelişmiş ülkelerde, çamurun tarım arazilerinde güvenli bir şekilde kullanımını sağlamak için arıtma kalitesine daha fazla önem verilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA), biyokatılları, uygun kirletici veya patojen seviyelerini karşılayan ve peyzaj uygulaması için gübre olarak kullanılan arıtılmış kanalizasyon çamuru olarak tanımlamaktadır [29]. Bu tür atık malzemelerin yönetmeliklerde nasıl tanımlandığı oldukça önemlidir. Tanımlar çamur yönetim stratejisindeki genel usul ve esasları içeren sınır değerleri belirlemekte önem rol oynamaktadır. Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Konseyi'nin 23 Ekim 2000'de kabul ettiği 2000/60/EC sayılı Direktif [33], çamuru atık bir malzeme olarak değil, atıksu arıtımının bir "ürünü" olarak tanımlamaktadır. 21 Mayıs 1991'de kabul edilen 91/271/EEC sayılı Konsey Direktifi'nin 14. Maddesi, kanalizasyon arıtımı sırasında üretilen çamura atıfta bulunur ve ters etkiyi önlemek için her uygun durumda arıtma çamurunun yeniden kullanılması gerektiğini belirtmektedir [33].

Atık Çerçeve Direktifi, arıtma çamuru üretimini engellemenin mümkün olmadığını, bu nedenle atığın yeniden kullanım ve geri dönüşüm seçeneklerinin birinci öncelik olduğunu vurgulamaktadır. Biyolojik Arıtmaya Tabi Biyobozunur Atıklara İlişkin Atık Sonu Kriterleri Sonu Raporu, arıtma çamurunu pozitif atık listesine alarak; temiz içerikli çamurun gübre olarak değerlendirilmesine izin vermektedir.

AB'de arıtma yöntemleri karşılaştırıldığında çamur kompostlaştırma tekniği olarak Çek Cumhuriyeti, Fransa, Almanya, Finlandiya, Macaristan, İtalya, Slovakya ve İsveç gibi ülkeler öne çıkmaktadır. Almanya, çamurdan fosfor geri kazanımını teşvik eden ve anaerobik çürütmeyi yöntem olarak seçen ilk ülke olduğu söylenebilmektedir. Birleşik Krallık'ta ise anaerobik çürütme stabilizasyon tekniği olarak tercih edilmektedir.

AB'ye bakıldığında çamur bertaraf teknikleri arasında yakma, tarımsal kullanım ve depolama öne çıkan seçenekler arasındadır. Arıtma çamurunun tarımsal kullanımına ilişkin çalışmalar son yıllarda daha da önem kazanmıştır. Arıtma çamurun tarımda kullanımını ülke yönetmeliklerinde yer alan ağır metal konsantrasyonlarının sınır değerleri belirlemektedir (Bkz. Tablo 2.2). Bazı ülkelerde çamurun toprağa uygulanması yasaklanmıştır. Örneğin, Almanya bu ülkeler arasında yer almasına rağmen, tarımsal amaçlı kullanımına karşı kirletici sınır değerleri belirlemiştir. Bunun yanı sıra, Portekiz

ve İspanya gibi ülkelerde arıtma çamurunun %65'ten fazlası gübre olarak kullanılmaktadır [34].

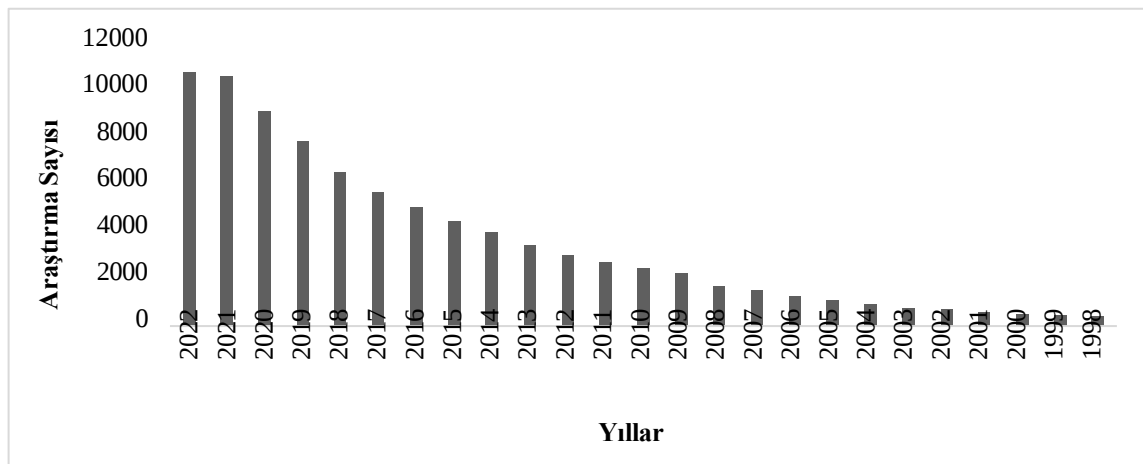
Tablo 2.2. AB ülkeleri ağır metal konsantrasyonlarının sınır değerleri [34]

Ülke	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
AB Direktifi 86/278/EEC	20-40	limitsiz	1000-1750	16-25	300-400	750-1200	2500-4000
Avusturya							
Belçika (Flandre)	2-10	50-500	300-500	2-10	25-100	100-500	1500-200
Belçika (Valon)	6	250	375	5	100	300	900
Bulgaristan	10	500	600	10	100	500	2000
Çek Cumhuriyeti	30	500	1600	16	350	800	3000
Danimarka	5	200	500	4	100	200	2500
Finlandiya	0.8	100	1000	0.8	30	120	4000
Fransa	3	300	600	2	100	150	1500
Almanya	20	1000	1000	10	200	800	3000
Yunanistan	2	80	600	1.4	60	100	1500
Macaristan	20-40	500	1000-1750	16-25	300-400	750-1200	2500-4000
İtalya	10	1000 (CrVI)	1000	10	200	750	2500
Hollanda	20	limitsiz	1000	10	300	750	2500
Polonya	1.25	75	75	0.75	30	100	300
	20	500	1000	16	300	750	2500
	25	1000	1250	20	400	1000	3500
	50	2500	2000	25	500	1500	5000
Portekiz	20	1000	1000	16	300	750	2500
Romanya	10	500	500	5	100	300	2000
Slovenya	0.5	40	30	0.2	30	40	100
İspanya	20-40	1000-1750	1000-1750	16-25	300-400	750-1200	2500-4000
İsveç	2	100	600	2.5	50	100	800
Çamurla ilgili çalışma belgesi (3. taslak)	10	1000	1000	10	300	750	2500
Teklif veya direktif 2010	10	1000	1000	10	300	500	2500

3. HİDROJELLER

Hidrojeller ilk olarak 1960'larda Wichterle ve Lim tarafından rapor edilmiş [36] ve suyla şişmiş, üç boyutlu, hidrofilik polimer ağlar olarak tanımlanmıştır. Hidrojeller fizyolojik koşullar altında büyük miktarda su veya biyolojik sıvıyı tutabilirler ve canlı dokulara benzer yumuşak, lastiksi bir kıvama sahip olmaları onları çeşitli uygulamalar için ideal bir madde haline getirmektedir [30]. Jellerin yapısı katı ve sıvı fazlardan oluşması nedeniyle hem katı hem de sıvı özelliklerini barındırmaktadır. Hidrojel üretiminde kullanılan doğal polimerler doğada çok eski zamanlardan beri bulunmaktadır. Nişasta, aljinat, kolajen, selülozik malzemeler, doğal sakızlar, proteinler, peptitler, kitosan vb. malzemeler doğal polimerler kategorisinde sınıflandırılabilir. Günümüzde doğal jel örnekleri medikal uygulamalar başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin; doğal hidrojeller doku jenerasyonu ve merkezi sinir sistemi onarımında büyük rol oynamaktadır [37,38].

Doğal polimerlerden elde edilen jellerin yanı sıra sentetik polimerlerin kimyasal çapraz bağlama yöntemleri kullanılarak da jeller elde edilebilmektedir. Kullanılan proses, jelin uygulama alanı biyoyumluluk ve biyobozunurluk gibi özellikleri göz önünde bulundurularak hidrojinin ideal parametrelerini elde etmek için en uygun teknik seçilmektedir. Günümüzde hidrojel uygulamaları, hidrofilik özellikleri ve dikkate değer solvent alımı nedeniyle dünya çapında yaygınlaşmıştır (Bkz. Şekil 3.1). Ayrıca kimyasal-biyokimyasal alanlardaki biyoyumlu cihazlar gibi alanlarda gelişmiş uygulamalar için değerli malzemeler haline gelmiştir [47,48].



Şekil 3.1. Son 25 yılda yapılan hidrojel ile ilgili araştırma sayıları (<http-1>.)

Hidrojel terim olarak literatürde ilk defa 1894 yılında inorganik tuzlardan oluşan koloidal bir jeli tanımlamak amacıyla kullanılmıştır [64]. Witcher ve Lim tarafından keşfedilmesinin ardından, ilk olarak kontakt lens şeklinde başarıyla uygulanmıştır [65]. 1980'de hidrojellerdeki ilerlemeler, Fransa ve Almanya'da çocuk bezi ürünleri olarak kullanışlı hale getirmiştir [72]. Daha sonra malzeme üretimi, ilaç dağıtım ve doku mühendisliği gibi biyomedikal uygulamalarda sıklıkla tercih edilmiştir. Yıllar içinde özelliklerinin keşfedilme ve geliştirilmesiyle kullanımı birçok alana dağılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Hidrojel araştırmalarının uygulama alanları (<http-1>.)

Konu Alanı	Araştırma Sayısı
Malzeme Bilimi	573873
Kimya	41381
Mühendislik	34095
Biyokimya, Genetik ve Moleküler Biyoloji	26307
Fizik ve Astronomi	17564
İlaç	15428
Farmakoloji, Toksikoloji ve Eczacılık	11211
Çevre Bilimi	4682
Enerji	3591
Zirai ve Biyolojik Bilimler	2780
Bilgisayar Bilimi	2559
Diğer	2250
İmmünoloji ve Mikrobiyoloji	2134
Multidisipliner	2094
Sinir Bilim	1490
Sağlık Meslekleri	1394
Ekonomi, Ekonometri ve Finans	1266

Hidrojeller tarım sektöründe gübre, besin ve su salınımı konusunda pozitif etki gösterebilme eğilimindedir. Tarım uygulama çalışmaları bitkilerde daha uzun su ve gübre tutmasını sağlayarak, bitkinin yetiştirme hızını arttırmaya yardımcı olabilmektedir.

Özellikle gelişmekte olan ve kurak iklim bölgelerinde sürdürülebilirliğin ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanması konusunda hidrojeller umut verici özellikler sergilemektedir. Daha önceleri yavaş salınlı gübreler olarak tarımda kullanılmaya başlanmış olsa da topraktaki kirletici konsantrasyonlarının artması sağlık açısından riskler oluşturmaya başlamıştır. Doğal jel kombinasyonlarıyla bunun önüne geçebilir, hatta daha düşük maliyet oranlarıyla gübre konusunda dışa bağımlı ülkelere seçenek sunulabilmektedir.

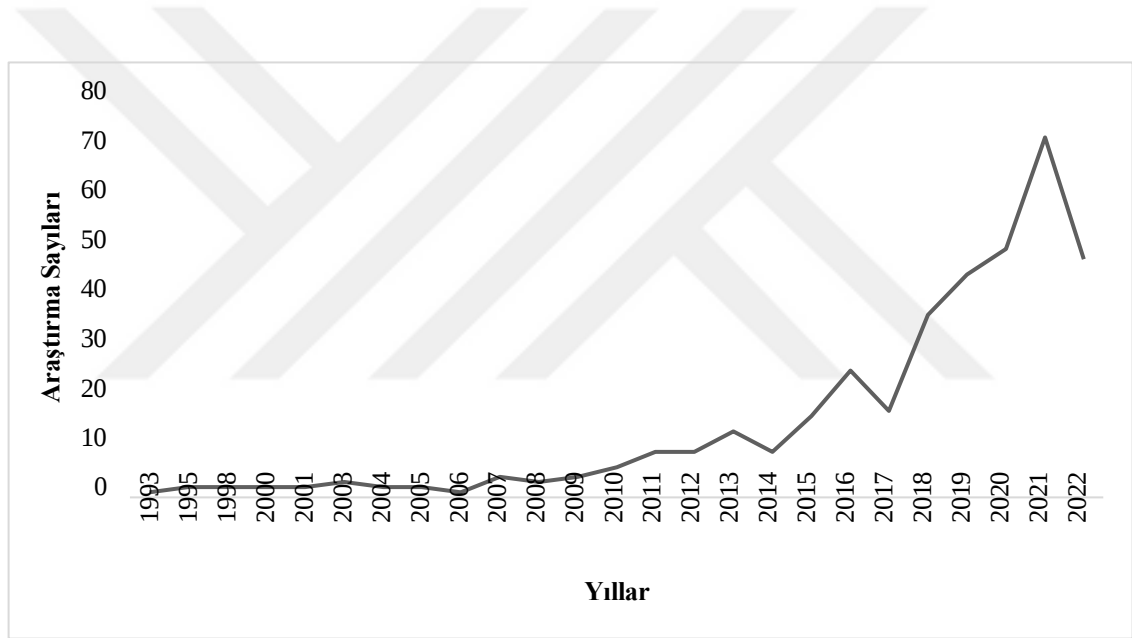
Hidrojinin özelliklerini ve kullanım verimini arttırmak için birçok farklı üretim stratejileri geliştirilmiştir. Bunlardan biri de doğal ve sentetik polimerleri birleştiren hibrit jel üretimidir. Hibrit jeller ilk defa 1995 yılında [66] potansiyel kullanımlarını araştırmak amacıyla ilaç dağıtım sistemlerinde kullanılmıştır. Daha sonra nişasta, kitosan, aljinat, selüloz gibi doğal polimerlerin birçok farklı kombinasyonu kullanılarak; farklı özelliklerde hibrit jeller tasarlanmıştır. Doğal polimerler özellikle yavaş salınlı gübre formülasyonlarının geliştirilmesi için alternatif bir ara malzeme olarak görülmüştür. Tarım uygulamalarında sıklıkla tercih edilen polisakkaritler Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Tarımda kullanılan bazı polisakkaritler ve özellikleri [67, 68, 69]

Polisakkaritler	Özellikleri
Aljinat	Kahverengi makro alglerden elde edilir. Çimlenme ve kök büyümesini hızlandırır.
Nişasta	Bitkilerde, tahıl taneleri, baklagiller, kökler ve meyvelerde bol miktarda bulunur. Tarım arazilerinde bakteri üremesini artırır.
Selüloz	Doğada en çok bulunan polisakkarittir. Biyolojik olarak parçalanabilirlik, biyoyumluluk, düşük toksisite ve düşük maliyet gibi olumlu özellikleri vardır.
Kitosan	Kabukluların dış iskeletlerinde, bazı bakteri ve mantarların hücre duvarlarında bulunur. Toksik olmaması, biyolojik olarak parçalanabilmesi ve biyolojik olarak uyumlu olması gibi özellikleri vardır.
Pektin	Yüksek bitkilerin hücre duvarlarında bulunur. Ağır metallerin tutulmasında etkilidir.
Zamklar	Genellikle ağaçların dış kabuklarında bulunan doğal sakızlardır. Hidrojinin viskozitesini arttırmakta başarılıdır.

Tarım arazilerinde toprakların besin maddeleri tarafından zengin olması oldukça önemlidir. Özellikle azot, fosfor, potasyum gibi besin maddeleri bitki köklerinin büyümesi ve gelişmesi için önemli rol oynamaktadır. Gübreler tarafından uygulanan azotun %40-70’i, fosforun %80-90’ı ve potasyumun %50-70’i bitkiler tarafından

emilemez ve çevreye salınmaktadır [70]. Toprakta besin kayıplarını engellemek ve kontrollü bir şekilde emilimin sağlamak için bir ara malzemeye ihtiyaç duyulmuştur. Hidrojeller, toprakta yüksek miktarda su ve kimyasalları adsorbe edebilen ve salabilen polar hidrofilik üç boyutlu polimer ağlardır [71]. Tarımsal gübrelerin toprakta hidrojel kullanılarak uygulanması, sadece besinlerin yavaş salınımını etkilemekle kalmaz; ayrıca toprakta havalandırma ve drenaj oranlarını iyileştirerek bitkilerin üretkenlik ve kalitesinin artmasını teşvik etmektedir [73, 74]. Hidrojinin tarım arazilerini iyileştirme özelliklerinin keşfedilmesi, gıda ve su krizindeki etkiler, son yıllarda hidrojinin tarım araştırma sayılarının yoğunlaşmasına olanak sağlamıştır. Şekil 3.2’de yıllara göre araştırma sayıları verilmiştir.



Şekil 3.2. Hidrojinin gübre potansiyelinin yıllara göre araştırma sayıları (<http-3>.)

3.1. Hidrojellerin Sınıflandırılması

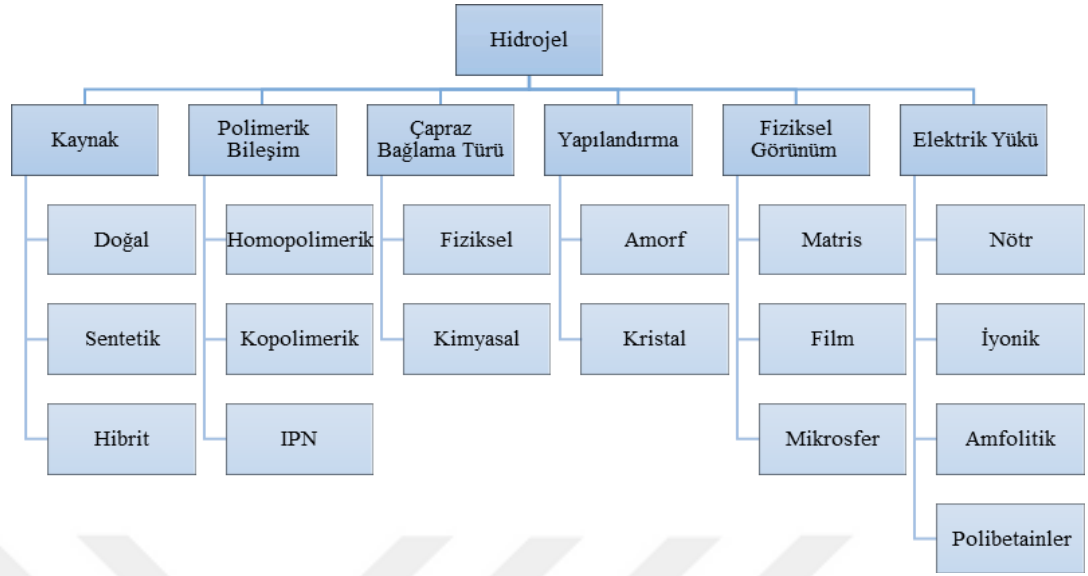
Hidrojeller; kaynağı, polimerik bileşimi, çapraz bağlama türü, yapılandırması, fiziksel görünümü ve iyonik yüküne bağlı olarak birçok grupta incelenebilmektedir. Kaynağına göre hidrojeller doğal, sentetik ve hibrit olarak üçe ayrılmaktadır. Doğal jeller üzerinde herhangi bir kimyasal uygulama yapılmadan direkt olarak kullanılabilir. Sentetik jeller ise bir dizi kimyasal reaksiyon ile oluşturulan hidrojellerdir. Son yıllarda oldukça ilgi gören hibrit jeller; doğal ve sentetik jellerin bir arada uygulanması sonucu oluşurlar. Hibrit jellerin diğerlerine göre avantajı her iki grubun özelliklerinden faydalanarak daha dayanıklı malzemeler üretilmesidir. Örneğin, doğal jellerin

biyoyumluluk oranı sentetik jellere göre daha fazla olmasına rağmen, dayanıklılık süresi sentetik jellere oranla çok daha düşüktür.

Hazırlama yöntemleri dikkate alındığında hidrojin polimerik bileşim sınıfları da ayrı gruplarda incelenebilmektedir. Örneğin tek bir monomerden oluşan jeller homopolimerik olarak adlandırılırken, iki veya daha fazla monomerden oluşan jeller kopolimerik sınıfta yer almaktadır. IPN ve yarı-IPN, iç içe geçmiş ağ formunda bulunan çapraz bağlı sentetik veya doğal polimer bileşenden oluşmaktadır. Yarı-IPN’de bir taraf çapraz bağlı durumdayken diğer taraf bağımsız konumdadır.

Hidrojenler çapraz bağlama türüne göre fiziksel ve kimyasal olarak iki ayrı gruba ayrılmaktadır. Doğal jeller yapısal olarak fiziksel çapraz bağlama yöntemine daha uygundur. Sentetik jeller kimyasal reaksiyonlar ile çeşitli polimerizasyon tekniklerine dayanmaktadır. Genel olarak sentetik jellerde kimyasal tepkimeler söz konusu olduğundan geri dönüştürülemez durumlarda doğal jeller tercih edilmektedir. Polisakkaritlerin fiziksel bağlanma yöntemlerine donma-çözülme tekniğini örnek olarak verebilmektedir. Hidrojin çapraz bağlı olduğu zincirlerdeki elektrik yükü dikkate alınarak dört ayrı grupta incelenebilmektedir. Bunlar; nötr, iyonik hem asidik hem de bazik grupları içeren amfoterik elektrolit (amfolitik) ve her yapısal tekrar ünitesinde hem anyonik hem de katyonik grupları içeren polibetainlerdir [39].

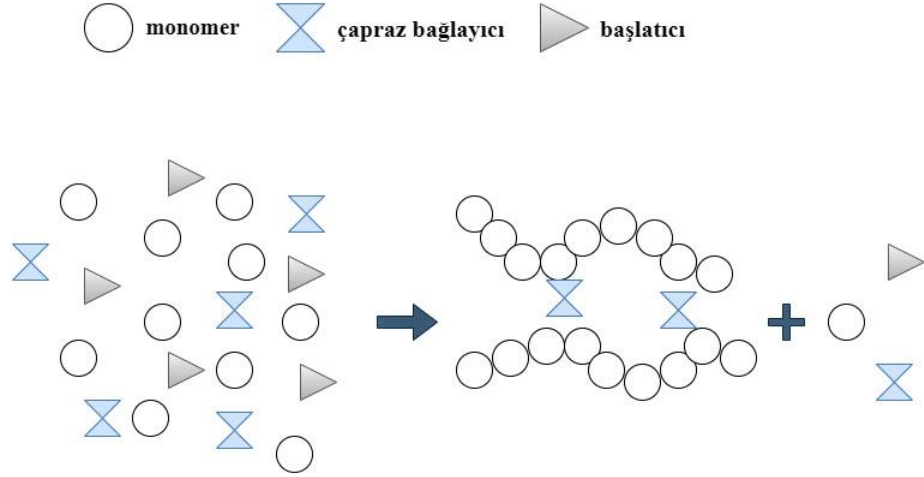
Yapılandırmaya göre jelin kimyasal yapısı amorf (kristal olmayan), amorf ve kristal fazın karışımı olan yarı kristalin ve kristal olarak üç ayrı grupta incelenebilmektedir. Hidrojin fiziksel görünümü hazırlama yönteminde kullanılan tekniğe bağlı olarak değişmektedir. Matris, film veya mikrosfer şeklinde gruplara ayrılır. Şekil 3.3’te hidrojenlerin sınıflandırma grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Hidrojellerin sınıflandırılması [39]

3.2. Hidrojel Hazırlamada Kullanılan Yöntemler

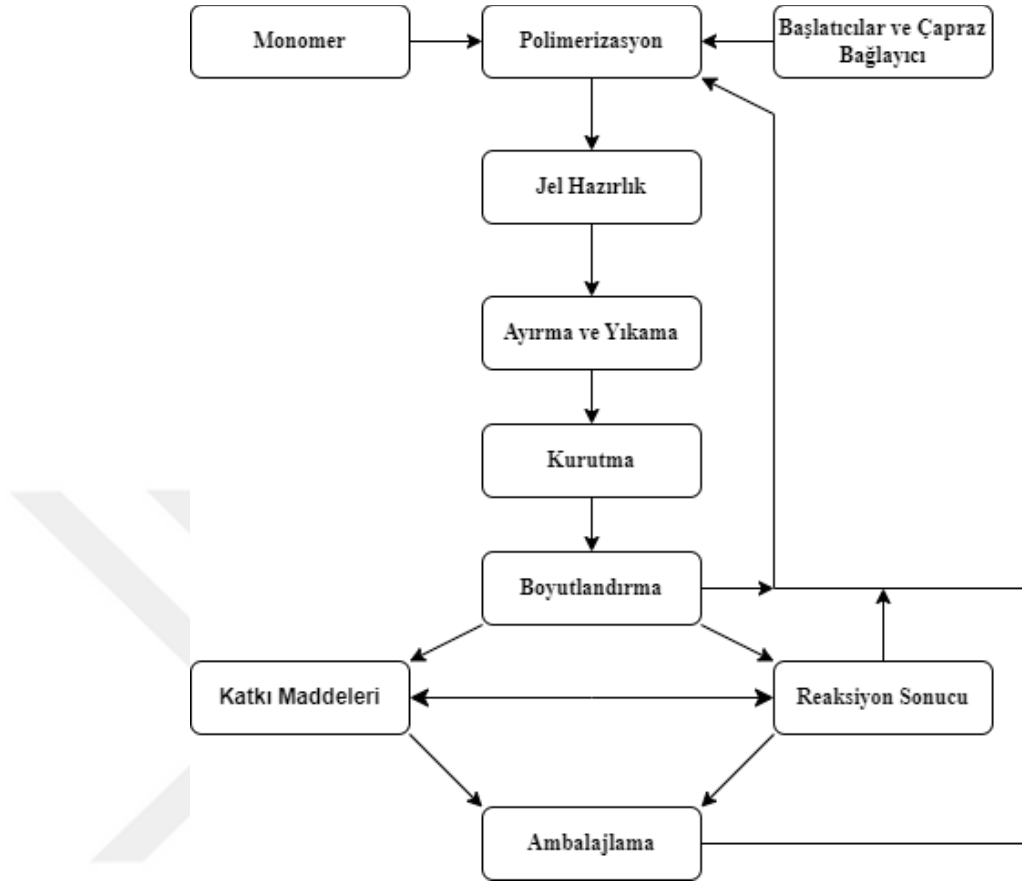
Hidrojeller hidrofilik polimer bileşikler olarak da adlandırılabilir. Doğal veya sentetik polimerlerden çeşitli tekniklerle hidrojel elde edilebilmektedir. Bunlar, tek adımlı prosesler olabileceği gibi; uygun çapraz bağlama yöntemleri kullanılarak çok adımlı prosesleri de içerebilmektedir. Genel hatlarıyla hidrojinin üç ana bileşiği bulunmaktadır. Monomer, monomere uygun bir çapraz bağlayıcı ve reaksiyonu aktive edecek bir başlatıcı kimyasal kullanılarak hidrojel elde etmek mümkündür (Bkz. Şekil 3.4). Hidrojel proseslerinin sonunda istenmeyen ve reaksiyona girmemiş maddeler açığa çıkar. Yan ürünlerden kurtulmak için süreç tasarımlarının sonunda mutlaka yıkama işlemi yapılmalıdır. Toplu polimerizasyon ve çözelti polimerizasyonu en çok kullanılan yöntemler arasındadır. Doğal ve sentetik jellerin birlikte kullanıldığı hibrit jel proseslerinde ise aşırı polimerizasyonu önleyen teknikler arasındadır. Aşırı polimerizasyonu geleneksel yöntemler veya ışınlama yöntemi kullanılarak da tercih edilebilmektedir. Özellikle mikrodalga tekniği araştırmalarda sıkça kullanılmaktadır. Süper Emici Polimerler (SAP) ve Süper Gözenekli Hidrojeller (SPH), yüksek emme kapasitesi, elastikiyet yapısı gibi gelişmiş özellikleriyle diğer jellerden ayrılmaktadır.



Şekil 3.4. Basit hidrojel şematik diyagramı [43]

3.2.1. Toplu polimerizasyon

Toplu polimerizasyon, bir veya daha fazla monomerin üzerine az miktarda çapraz bağlama maddesi eklenmesiyle oluşturulmaktadır. Reaksiyonun tepkimeye girmesi için radyasyon, ultraviyole veya kimyasal katalizörler kullanılmaktadır. Kullanılan monomerlerin ve çözücülerin tipine bağlı olarak uygun başlatıcı seçimi yapılmaktadır. Hidrojelin şekli film, çubuk, parçacık gibi çeşitli formlarda üretilebilmektedir. Şekil 3.5’te toplu polimerizasyon yönteminin akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.5. Toplu polimerizasyon yöntemi akış şeması [43]

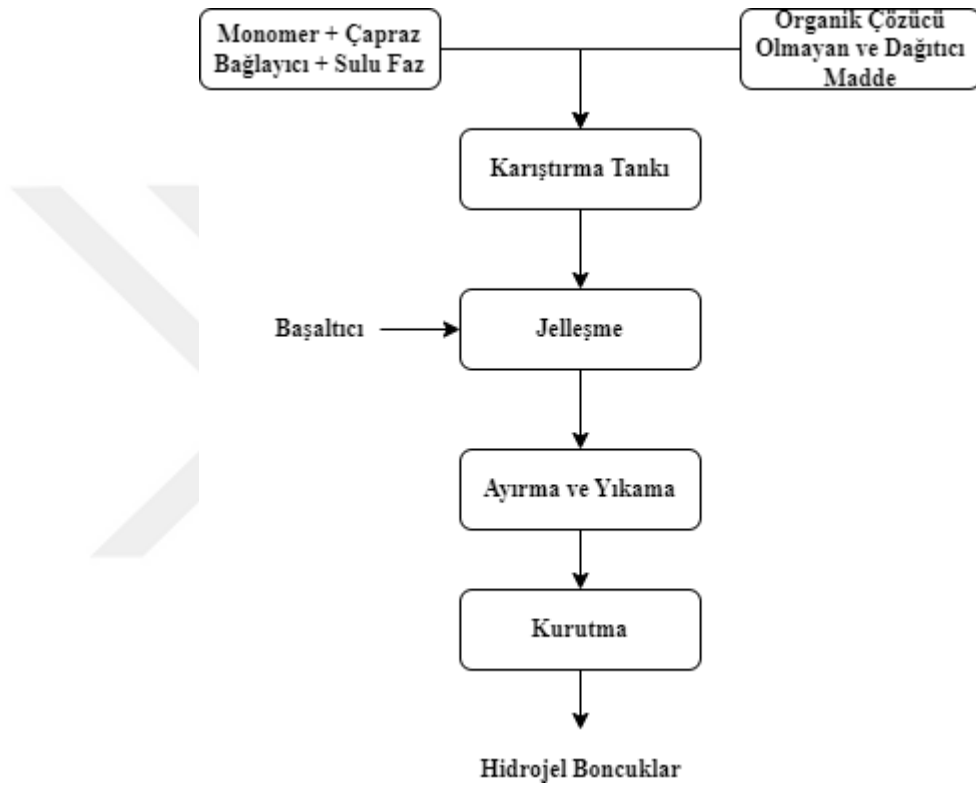
3.2.2. Yığın polimerizasyon

Yığın polimerizasyon, en basit teknikler arasında yer almaktadır. Tekniğin ana prensibinde yalnızca monomer ve monomerde çözünür başlatıcıları içermektedir. Polimerizasyon sırasında oluşan ısı reaksiyonun viskozitesini arttırdığından, düşük dönüşümlerle kontrol edilmesi gerekmektedir. Hidrojelin yapısı oldukça sert ve matris şeklindedir.

3.2.3. Süspansiyon polimerizasyonu veya ters süspansiyon polimerizasyonu

Bu teknikte monomerler ve başlatıcı hidrokarbon fazında homojen bir karışım olarak dağıtılmaktadır. Monomer solüsyonunun viskozitesi, çalkalama hızı, rotor tasarımı ve dağıtıcı tipi esas olarak reçine partikül boyutunu ve şeklini belirlemektedir [43]. Genel

olarak jellerin şekli toz veya boncuk şeklindedir. Suda yağ veya yağda su işlemi olarak ters süspansiyon şeklinde de adlandırılmaktadır. Partikül boyutunun küçük olması avantajları arasında yer almaktadır. Örnek süspansiyon polimerizasyonu şeması Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Süspansiyon polimerizasyonu akış şeması [43]

3.2.4. Çözelti Polimerizasyonu

Polimerizasyon, termal olarak UV ışınması veya bir redoks başlatıcı sistem tarafından başlatılmaktadır. Çözelti polimerizasyonunun toplu polimerizasyona göre en büyük avantajı, çözücünün soğutucu görevi görmesidir. Polimerizasyon sonrası faz ayırımından kaynaklı su açığa çıkar ve heterojen bir jel üretilmektedir. Jelleşme sonrası açığa çıkan su ve reaksiyona girmemiş yan ürünler yıkanması gerekmektedir. Son

aşamada oluşan istenmeyen artık ürün etanol veya metanol gibi çözücüler kullanılarak uzaklaştırılmaktadır.

3.2.5. Aşı polimerizasyonu

Aşılama tekniği genellikle nişasta, aljinat, kitosan, selüöz gibi polisakkarit bir jelin üzerine sentetik monomerlerin aşılama yoluyla elde edilen yöntemdir. Geleneksel aşı polimerizasyonunda potasyum persülfat (KPS) ve amonyum persülfat (APS) gibi başlatıcılar kullanılarak serbest radikal aşı polimerizasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür geliştirilen hidrojeller hibrit hidrojeller olarak adlandırılmaktadır. Tablo 3.2’de aşı polimerizasyon tekniğinde kullanılan ekipman özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Hidrojel üretim alternatifleri için ekipman özellikleri [44]

Ekipman	Özellikler
Geleneksel aşılama reaktörü	Karıştırmalı tank reaktörü, 150 L, SS 316, ceketli ve geri akış kondansatörlü, 5,5 KW
MW aşılama reaktörü	Endüstriyel mikrodalga, hazne içeriği: 670 L, 5 KW
UV aşılama reaktörü	Mercury UV ışık kontrol sistemi, 254–365 nm, 0,5 KW
Hidrolizör	Karıştırmalı tank reaktörü, 150 L, SS 316, ısıtma ve soğutma ceketli, 7,5 KW
Döner filtre (1)	Döner vakum filtre, 10 m ² filtrasyon alanı, vakum pompası ve filtre keki yıkama sistemi, 7.5 KW
Döner filtre (2)	Döner vakum filtre, 8 m ² filtrasyon alanı, vakum pompalı ve filtre keki yıkama sistemi, 5.5 KW
Yıkama tankı (1) ve (2)	Karıştırma tankı SS 304 1000 L şerit karıştırıcı ve değişken hız, 7,5 KW
Kurutma makinesi	Toz toplama için gaz yakıtlı brülörlü, hava fanlı ve siklonlu vakum tepsili kurutucu
Solvent geri kazanım ünitesi	Etanol geri kazanım ünitesi (250 L/h): damıtma kolonu, elektrikli ısıtıcı kazan, kondenser, 5,5 KW
Depolama tankları	SS 316 tankları

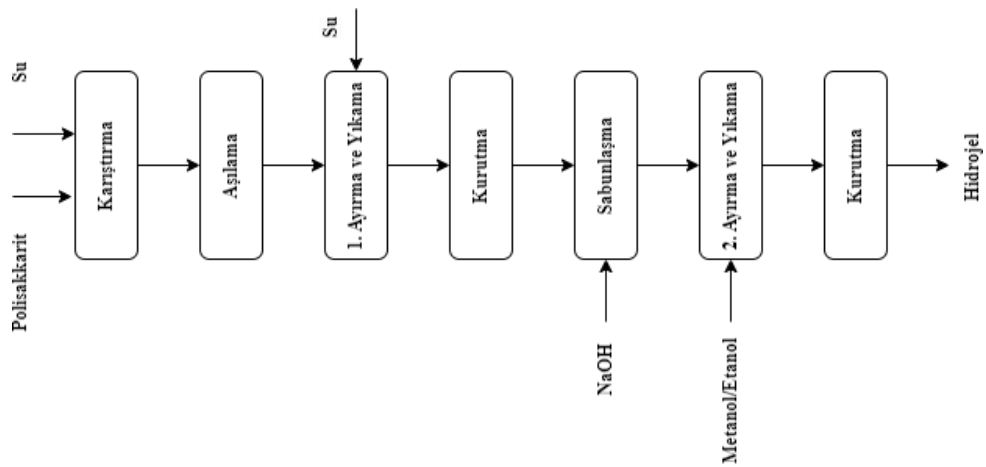
Aşılama yöntemin sıkça tercih edilmesinin en büyük nedeni, hidrojelin dayanıklılık ve mukavemet özelliklerinin geliştirmek istenmesidir. Geleneksel yöntemlere ek olarak UV veya mikrodalga kullanılarak ışınlama tekniği ile aşılama yöntemleri de

kullanılabilmektedir. Radyasyonla başlatmanın kimyasal başlatmaya göre en büyük avantajı, üretimin nispeten saf ve başlatıcı içermemesidir [40]. Örneğin, bir süper emici hidrojel [39] hazırlamak için manyok nişastası üzerine akrilamid ve itakonik asidin aşı kopolimerizasyonunun optimum koşulları Tablo 3.3'te gösterildiği gibi özetlenebilir [41].

Tablo 3.3. Aşı polimerizasyon tekniğinin optimum koşulları [41]

Kompozisyon	Oran (ağırlık/ağırlık, g/g)
Monomerin ağırlık oranı, AAm/IA	90:10
Nişastanın monomere ağırlık oranı	1:2
APS (ağırlıkça) monomer	0,5–2,0
APS/TEMED	1:2
MBA (ağırlıkça %)	2
Hava sıcaklığı	45 °C
Karıştırma hızı	250 devir

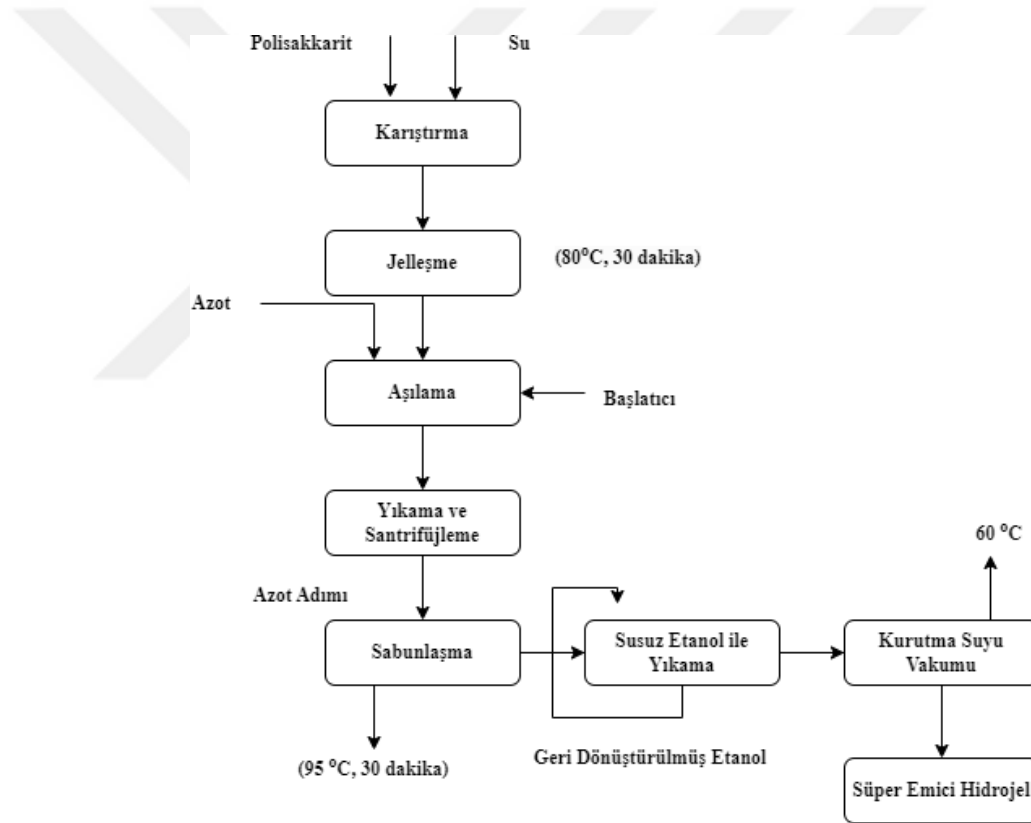
Aşılama yöntemi genel hatlarıyla üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar aşılama, yayılma ve sonlandırmadır. Şekil 3.7’de aşı polimerizasyonuna ait akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Aşı polimerizasyonu akış şeması [43]

3.2.6. Süper Emici Polimerler (SAP) ve Süper Gözenekli Hidrojeller (SPH)

Süper Emici Polimerler (SAP) ve Süper Gözenekli Hidrojeller (SPH) son nesil hidrojel kategorisinde yer alarak yüksek şişme ve dayanıklılık özellikleriyle diğer jellerden ayrılmaktadırlar. Hidrojinin üretiminde kullanılan malzemelere göre, şişme hızı bir dakikadan birkaç saate kadar farklılık gösterebilmektedir. Kendi ağırlığının 10-1000 katı arasında şişme kapasitesine sahiptirler. Modern SAP'ler ve SPH'ler normalde, bir bikarbonat bileşiğinin asitle indüklenen ayrışmasının kullanıldığı bir gaz üfleme tekniği kullanılarak hazırlanmaktadır (Bkz. Şekil 3.8) [46].



Şekil 3.8. Süper Emici Hidrojellerin (SAP) akış diyagramı [43]

SPH'ler genellikle köpük formunda ve yüksek gözenek yapılarına sahiptirler. Kurutmak için etanol gibi çözücü olmayan maddelerin kullanılması stabilize etmeye ve büzüşmesini önlemeye yardımcı olmaktadır. SPH hibritlerin en benzersiz özelliği şişmiş durumda oldukça elastik yapıya sahip olmalarıdır. Fiziksel veya kimyasal çapraz bağlama

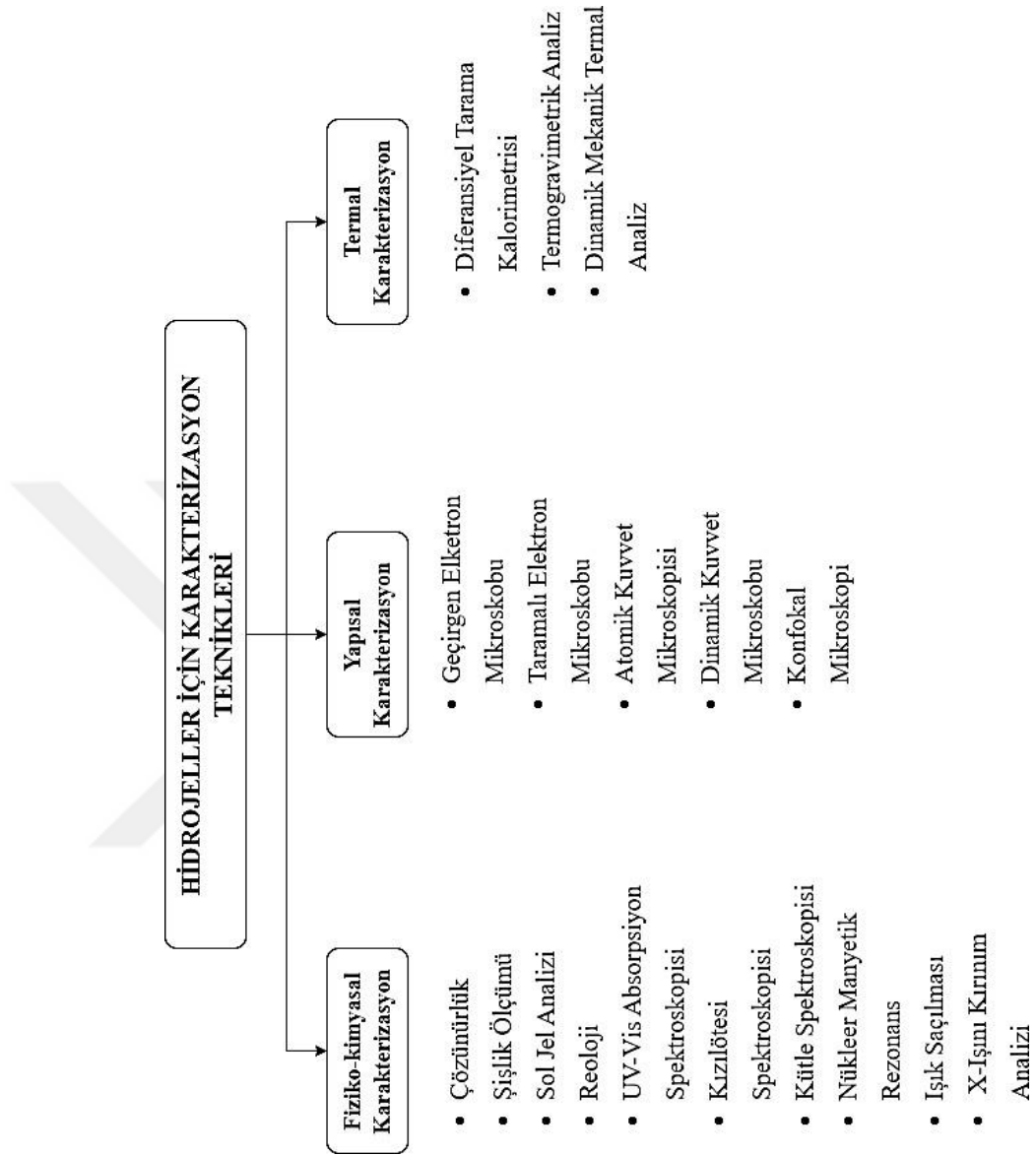
yöntemleriyle hazırlanabilen polimerlerdir. SAP hazırlama aşamasında monomer bir miktar su ile seyreltilmesi gerekmektedir. SAP üretim aşamasında çapraz bağlayıcı, amonyum persülfat veya potasyum persülfat gibi termal ve redoks başlatıcılar kullanılmaktadır. Süreç boyunca sürekli bir gaz akışı sağlanmaktadır. Polimerizasyon sırasında köpük üretmek için, monomer çözeltisine buzlu asetik asit gibi köpürme yardımcısı eklenmektedir [39]. SAP ve SPH'lerin karşılaştırması Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. SAP ve SPH'lerin karşılaştırılması [39]

	SAP'ler	SPH'ler
Yaygın olarak kullanılan monomer	Akrilamid, akrilik asit, sodyum ve potasyum akrilatlar dahil akrilik asit tuzları	Akrilamid, akrilik asit, sodyum ve sülfopropil akrilatlar, 2-hidroksietil metakrilat dahil akrilik asit tuzları
Sentez yöntemi	Toplu, çözüm, ters süspansiyon	Çoğunlukla sulu çözelti
Başlatma sistemi	Termal, redoks	Çoğunlukla redoks
Gözenekli yapı	Rastgele kapalıdan yarı açık hücrelere	Birbirine bağlı açık hücreler
Son ürün	Parçacıklar	Parçacıklar, levha, film, çubuk dahil herhangi bir şekil.
Uygulamalar	Yüksek şişme, hızlı-orta şişme oranının gerekli olduğu yerlerde	Boyuttan bağımsız yüksek ve çok hızlı şişmenin gerekli olduğu yerlerde

3.3. Hidrojel Karakterizasyon Teknikleri

Hidrojin istenilen yapıda ve yüksek jel özelliklerinin kontrolünü sağlamak için karakterizasyon önemli rol oynamaktadır. Hidrojin en basit karakterizasyon tekniği olarak şişme performansının görsel olarak gözlemlenmesi verilebilmektedir. Kurutma işleminden sonra jel su dolu bir kaptaki bekletilerek yüzeysel bir karakterizasyon işlemi yapılabilmektedir. Aynı şekilde hidrojin esneklik testi de basit karakterizasyon yöntemlerine örnek verilebilmektedir. Hidrojin yapısını karakterize etmek için kızılötesi spektroskopisi, X-ışını kırınım analizi, atomik kuvvet mikroskobu ve diğer birçok teknik Şekil 3.9'da gösterilmiştir [45].



Şekil 3.9. Hidrojel karakterizasyon teknikleri [45]

4. LİTERATÜR TARAMASI

Hidrojelın gübre potansiyelinin araştırmasını sağlayan ilk çalışmada [61], domates fidesinin topraksız ortamda su ve amonyum tutma kapasitesi araştırılmıştır. Amonyumun %33- %55 oranında geri kazanımı sağlanırken, hidrojelın su stresi koşulları altındaki performansı hakkında yorum yapılamamıştır.

Sentetik polimerlerin üretiminde kullanılan kimyasal miktarlarının azaltılması veya arttırılması için araştırmalarda karakterizasyon çalışmalarına yön verilmiştir. Örneğin, daha yüksek miktarlarda çapraz bağlayıcı kullanılması jelin esnekliği üzerinde azalışa sebep olmuştur [62]. Monomer olarak akrilamid kullanılan başka bir çalışmada [75] ise daha yüksek miktarlarda akrilamid kullanılan hidrojeller için ortalama gözenek boyutunda bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

Hidrojel elde etmek için birçok farklı monomer seçeneği bulunmaktadır ve uygun monomer seçimi çok önemlidir. Akrilik asit (AA) ve akrilamid (AAM) en çok tercih edilen sentetik monomerler arasındadır. Akrilik asit (AA), akrilamid (AAM) ve akrilik asit-ko-akrilamid (AA-co-AAM) kullanılarak acı biber bitkisi üzerinde bir büyüme çalışması yapılmıştır. Akrilik asitin bitki büyüme performansını arttırdığı ve akrilamidin olumsuz etkilediği görülmüştür. Akrilamid işlenmiş toprakta fazla gübre salınımından kaynaklı tuz birikimine sebep olarak bitki büyümesine engel olmaktadır [96].

Kimyasal apraz bağlayıcılar arasında gulutaraldehit hem protein hem de karbonhidratlardaki fonksiyonel gruplarla reaksiyona girebilmesi ve gerilme özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak sitotoksik özellikler sergilemesi nedeniyle kullanımı %8'e kadar sınırlandırılmıştır [95].

Çapraz bağlayıcı ve başlatıcı reaksiyonlara doğal sistem alternatifleri de yaratılmıştır. Lipazlar, çeşitli doğal polimerizasyon işlemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Başlatıcı apraz bağlayıcı sistem olarak çevreye zarar vermeyen endüstriyel polimer işleme için lipazdan yararlanılabileceği keşfedilmiştir [91].

Hidrojelın retiminde kullanılan kimyasallar kadar, kullanılan teknikte çok önemlidir. Geleneksel apraz bağlama, dondurma/çözme ve ışınlama teknikleri arasında yapılan bir karşılaştırma çalışmasında; dondurma/çözme tekniği veya dondurma/ çözme tekniğinin ışınlama kombinasyonu ile kullanıldığında hidrojelın fiziksel özelliklerini iyileştirildiği bulunmuştur [63].

Çevre bilincinin artmasıyla birlikte araştırmacıların çoğu mikrodalga ısıması (MW) yoluyla kimyasal senteze odaklanmıştır. Mikrodalga ile aşılama yöntemi geleneksel termal ürünlere göre basitlik, reaktivite, yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi, kirlilik azaltma ve hızlı toplu ısıtma kapasitesi gibi avantajlar sunmaktadır [76].

Hidrojellerin çoğu, mükemmel fiyat/performans oranları nedeniyle sentetik polimerlerden oluşmasına rağmen, bu tür sentetik malzemeleri kısmen "daha çevreci" alternatiflerle değiştirilmelidir [80]. Polisakkaritler gibi biyopolimerler, daha ucuz, kolay temin edilebilir ve yenilenebilir organik malzemeler olduğundan; sentetik polimerlere göre çevre dostu bir alternatiftir [78,79]. Birçok doğal polimer kaynağı, Endonezya gibi biyolojik çeşitliliği fazla olan ülkelerde kolaylıkla sağlanmaktadır [77].

Nişasta, aljinat, kitosan, selülozik bileşikler, doğal sakız ve reçineler tarımda en çok kullanılan polisakkaritlerdendir. Aljinat, Federal Yönetmelikler Yasası (21 CFR Bölüm 184) kapsamında Gıda ve İlaç İdaresi tarafından da güvenli ham madde (GRAS) olarak kabul edilmektedir [81]. Ancak saf aljinat hidrojelleri genellikle zayıf mekanik dayanıma ve yavaş salınım özelliğine sahip olduğundan; ikinci bir polimer kullanılarak jel performansının artırılması gerekmektedir [82]. Nişasta, çok sayıda hidroksil işlevine sahip en uygun ve ucuz polisakkaritlerden biridir ve tarımda yarı IPN hidrojellerin tasarımı için yaygın olarak kullanılmaktadır [83].

Reçineler, karakteristik olarak polimerlere dönüştürülebilen, yüksek viskoziteli veya katı biyolojik olarak parçalanabilir, yenilenebilir ve doğal olarak sızan bitki türevi malzemelerdir. Çam bazlı reçineler, azotlu gübrelerin nitrifikasyon sürecini en aza indirebilir, azotun toprakta daha uzun süre kalmasını sağlayabilmektedir [84].

Reçine ve zamların bitki yetiştirme ortamının (hem topraklı hem de topraksız) nem özelliklerini önemli ölçüde iyileştirerek, bunun nem stresi tarımında çeşitli uygulamalar için muazzam bir potansiyele sahip olduğu bulunmuştur [85]. Örneğin guar sakızının akrilik asitle aşılansak toprağa uygulanması, suyun su tutma kapasitesi orijinaline göre %54'e kadar, gözenekliliği de orijinaline göre %9'a kadar artmıştır [86].

Potasyum klorür (KCl) bitkiler için önemli bir potasyum kaynağı olarak kullanılmaktadır. Enzim aktivasyonu, protein sentezi, fotosentez gibi işlemler için optimize potasyum ve klorür miktarı gereklidir. Bunun için yeşil ve mikrodalga destekli ksantan sakızı-cl-poli (akrilik asit)/AgNPs hidrojel geliştirilmiştir. Gümüş nanopartiküllerin aşırı kopolimerinin içine dahil edilmesi jelin yüksek gözeneklilik ve

besin salınım özelliklerini katkı sağlamıştır. Farklı toprak numunelerinde karşılaştırılarak 60 günden fazla su tutma kapasitesi olduğu bulunmuştur [98].

Tarımda kullanılmak için yavaş salınımlı gübreler (SRF) ve kontrollü salınımlı gübreler (CRF) olarak iki tür gübre vardır. Bunlardan ilki, besinleri yavaş bir şekilde ve ikincisi, bitki büyüme aşamasına ve talebin kinetiğine göre ayarlanan kademeli bir şekilde serbest bırakmaktadır [87]. CRF hidrojjellerinin topraktaki potasyum salma davranışı, incelenen bir çalışmada kitosan kullanılan hidrojjelin en yüksek kümülatif potasyum salınım yüzdesini sergilediği bulunmuştur [88]. Bunun nedeni, kitosanın biyolojik olarak parçalanabilen mükemmel bir malzeme olması; toprakta bulunan mikroorganizmalar ve iyonlar tarafından kolayca parçalanmasıdır.

Gellan sakızı-kitosan kullanılarak üretilen hidrojel çalışmasında [89], neredeyse tam salınımın yaklaşık 8 saatte gerçekleştiğini ve miktarının hidrojel bileşiminden çok kullanılan gübre konsantrasyonundan etkilendiği bulunmuştur. Kitosan bazlı jeller ayrıca elektrolit membran olarak, mikrobiyal yakıt hücrelerinde ve pestisitler gibi birkaç çevresel kirleticiyi tespit ve analiz etmek için elektrokimyasal/biyosensörler olarak kullanılabileceği de bulunmuştur [90].

Selüloz ile hazırlanan süper emici reçineler, güçlü su tutma özelliklerine, yüksek jel kuvvetine ve uzun hizmet ömrüne sahiptir. Selüloz bazlı reçinelerle ilgili çalışmalar, nişasta bazlı olanlara karşın daha az bulunmaktadır. Serbest radikal aşırı kopolimerizasyonu ile hazırlanmış reçinelerin su emme dengesi 18 dakikada sağlanmış ve su tutma oranının %42 bulunmuştur. Karışık toprak ile karşılaştırıldığında, buharlaşma oranı %7,13 oranında azaltılmıştır [99].

Kurak tarım bölgelerinde hidrojjelin varlığı oldukça önemlidir. Kumlu topraklar, düşük su tutma kapasitesi (WHC) ve kök bölgesinin altına aşırı yağmur ve sulama suyu drenajı ile karakterize edilmektedir ve bunun sonucu verimsiz su ve gübre kullanımına neden olmaktadır [92]. Besin kayıplarını daha az indirmek için farklı uygulama teknikleri geliştirilmiştir. Bitkilere hidrojjeli tohumla kaplanmış şekilde uygulamak; besin dozlarını önemli ölçüde azaltmakta, böylece çevreye çok az şey kaybedilmektedir [93]. Ayrıca kaplanmış tohumlar da özelliklerini kaybetmeden uzun süre saklanabilmektedir.

Ağ yapısında bulunan iyonik grupların iyonlaşması ışığında, iyonik hidrojjellerin şişmesinin, polimerin fonksiyonel gruplarının iyonlaşmasından önemli ölçüde etkilenmektedir. Düşük pH seviyelerinde hidrojen bağlarının yapısı çökmekte ve bu da

hidrojelin şişme derecesini azaltmaktadır. Orta pH aralığı olarak 4 ve 5 seviyelerinde dengeden kaynaklı büyük farklılıklar görülmemiştir [94].

Evsel, endüstriyel ve tarımsal atıksular da azot ve fosfor açısından zengindir. Ancak bu atık çözeltilerin çevreye salınımı sera gazı emisyonları, ötrafikasyon ve toprak kirliliği gibi çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Ayrıca yüksek arıtım maliyetlerine sebep olması bakımından tercih edilmemektedir. Besin maddelerinden faydalanmak ve filtre görevi görmesi amacıyla Fe(III)-polisakarit hidrojel boncukları geliştirilmiştir. Sonuçlar orijinal çözeltiden sırasıyla yaklaşık %32, %27 ve %90 nitrat, amonyum ve fosfat besin tutma kapasitesi sergilemiştir. Sera koşulları altında Fe(III)-polisakkarit hidrojellerinin bitkilerin büyümesini destekleyen potansiyel bir uygulama olduğu öne sürülmüştür [97].

Tarım en büyük tatlı su tüketicisidir ve tarımda tatlı su kaynakları yerine atıksu kullanılması sürdürülebilirliğin ve döngüsel ekonominin sağlanması konusunda etkili bir seçenektir. Ayrıca ekonomik ve yasal mevzuatlar göz ardı edildiğinde, bitki büyümesi için en iyi fosfor kaynağı atıksu olduğu kabul edilmiştir [100]. Farklı mahsül ürünleri üzerinde iki farklı sulama seçeneği karşılaştırılmıştır. Atıksuyun bitki verimini artırma konusunda önemli bir potansiyel olduğunu ancak mahsülün türüne bağlı değiştiği gözlemlenmiştir [101].

Su kaynaklarının giderek azalmaya başlaması tarımda büyük baskılar oluşturmaktadır. Tarım topraklarındaki olumsuz riskler gıda fiyatlarının artmasına ve sürdürülebilirliğin önündeki zorluklara işaret etmektedir. Hidrojelin su tutma kapasitesi ve su kıtlığı çeken bölgelerde oldukça umut verici bir seçenek olmuştur. Örneğin; Mısır'da kumlu toprakta 2019-2020 yılları arasında su stresi altında erik ağaçları yetiştirilen bir çalışmada [53], toplam verim gibi verim özelliklerini olumlu etkilediğini, ağaç başına düşen meyve sayısının arttığını bildirmiştir. Ayrıca, birçok çalışma hidrojel uygulamalarının azaltılmış sulama suyu seviyeleri altında olumlu etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Hidrojelin tarımda kullanımı aynı zamanda atıkların geri kazanımı konusunda alternatif seçenekler oluşturmuştur. Doğada yaygın olarak bulunan selülozik bileşiklerin hidrojel elde etme süreçlerinde kullanılması, toprağın iyileştirme sürecine katkı sağlarken, aynı zamanda besin maddelerinden faydalanmasına da olanak sağlamaktadır. Tarımsal atıkların birçoğu selüloz açısından zengindir. Tarımsal atıklardan türetilen nanoselüloz bazlı süper emici hidrojellerin tarımdaki uygulamalarının olası etkilerini [54]

araştıran bir çalışmada net çiftlik gelirini en üst düzeye çıkarabilecek ve ekolojik ayak izini en aza indirebilecek "çiftçi merkezli" bir uygulama olduğunu öne sürmüştür. Selülozik atıkların değerlendirilmesi yönünde bir diğer çalışmada [55] kâğıt atıklarından elde edilen selülozik yapıli hidrojelilerin toprakta domates büyümesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Dondurularak kurutulmuş selüloz boncukların, yüksek bir yeniden şişme oranı ve önemli miktarda gübre yükü sergilediğini vurgulamıştır. Ayrıca kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisinden çıkan yan ürünün mahsul üretimini iyileştirmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

Atık ürünlerin tarımda potansiyelinin değerlendirilmesi konusunda bir diğer alternatif seçenek ise arıtma çamurlarıdır. Arıtma çamurlarının içeriğinde bitkilerin besin ihtiyacını karşılayabilecek yüksek N ve P oranları bulunmaktadır. Ancak tarımda direkt uygulamaları kirletici sınır değerleri konusunda yönetmeliklerce sınırlandırılmıştır. Hidrojel bu konuda mükemmel bir ara malzeme görevi görebilmektedir. Arıtma çamurundan elde edilen hidrokömürün karboksimetil selüloz (CMC) yapıli jelin içerisine gömülmesine dayalı araştırmada [56] bitki büyümesini 28 güne kadar önemli ölçüde iyileştirdiğini ve hazırlandığı şekliyle çevre dostu kurak ve yarı kurak bölgelerde su tutma maddesi ve besin taşıyıcısı olabileceğini göstermiştir.

Selüloz, nişasta, lignin gibi maddeler tarımda son yıllarda daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Bunun sebebi yenilenebilir, biyouyumlu ve toksik olmayışlarıdır. Biyo-atıkların da hidrojel uygulamalarında oldukça tercih edilmesi, bitki verimliliğini arttırmasının yanında hidrojel üretim maliyetlerini de azaltılmasını sağlamaktadır. Ayrıca atık yan ürünlerin değerlendirilmesi döngüsel ekonomiye katkı sağlar. Kereste ve ormancılık endüstrisinin ucuz bir yan ürünü olan talaşın akrilik asit (AA) ve akrilamid (Aam) ile hidrojel eldesi [57] kullanılarak topraktaki karakterizasyonları incelenmiştir. Polimer numunelere (toprak veya kömür) eklendikten sonra, numunelerin su buharlaşma hızı önemli ölçüde azalmış ve doymuş su tutma kapasitesi ve gözenek yapısı da önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Soya fasulyesi atığından türetilen biyopolimerin [58] yeşil yapraklı sebzeler üzerinde etkisi araştırılmıştır. Biyopolimerin bitki büyümesini %35-60 arttırmış, sulama seviyelerini ise %30-60 oranında azalmasını sağlamıştır. Böylece çiftçinin tarlada su tasarrufunu sağlamıştır. Aynı zamanda toprakta daha fazla besini tuttuğunu ve dolayısıyla daha az gübreye ihtiyaç duyulacağını ileri sürmüştür. Sonuç kısmında bitki bazlı toprak

takviyesinin tarla koşullarında uygulanabileceğini, bitkilerin daha uzun süre sulu kalmasına izin verdiğini, bunun özellikle olumsuz su sınırlı ve olumsuz iklim koşullarında yararlı olacağını göstermiştir.

Hidrojel üretim stratejileri kullanım alan ve yöntemlerine göre birçok alternatif barındırmaktadır. Atık ürünlerle kombinlenmesi sonucu yeni ve sürdürülebilir karakteristik jel ürünlerin keşfine olanak sağlamaktadır. Sulu bir ortamda pirinçle pişirilmiş atıksu (nişasta), akrilamid ve 2-akrilamido-2-metilpropansülfonik asit kullanarak [59] yeni bir hidrojel stratejisi geliştirilmiştir. Hidrojeller, ATR-FTIR, Raman, XRD, XPS, TGA ve SEM gibi kapsamlı karakterizasyonlarla kanıtlanmıştır. Bulgular, maaş fasulyesi, bezelye ve kırmızı biber tohumlarının hidrojellere karıştırılmış toprakta çimlenmesini ve büyümesini desteklemiştir. 60 günün sonra hidrojinin orijinal ağırlığının yaklaşık %24,3'ü olan jeller, biyobozunma oranlarına bakıldığında; 120 gün sonra %34,6, açık havada 30 gün sonunda %6,5 oranında bozunma gözlemlenmiştir.

Su kaynaklarının azalmaya başlaması hidrojel sadece tarımsal uygulamalara itmemiş, aynı zamanda atıksu arıtım seçenekleri üzerine de odaklanmıştır. Temiz suyun mevcudiyeti, insanlığın ve tüm ekosistemlerin hayatta kalması için en önemli gereksinimdir [60]. Adsorban ve fotokataliz teknikleri kullanarak su arıtımı için hidrojel nanokompozitlerini kapsamlı bir şekilde analizi [60] incelenmiştir. Polimer zincirlerinin nanokompozitlerle kapsamlı çapraz bağlanması, yüksek performanslı adsorbanlar ve fotokatalizörler elde etmek için yüksek kütle/yük aktarımı, yüksek yüzey alanları ve gelişmiş polimer-su etkileşimleri sonucunda hidrojel nanokompozitlerin sahip olduğu mükemmel teknolojik potansiyeli doğrulanmıştır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

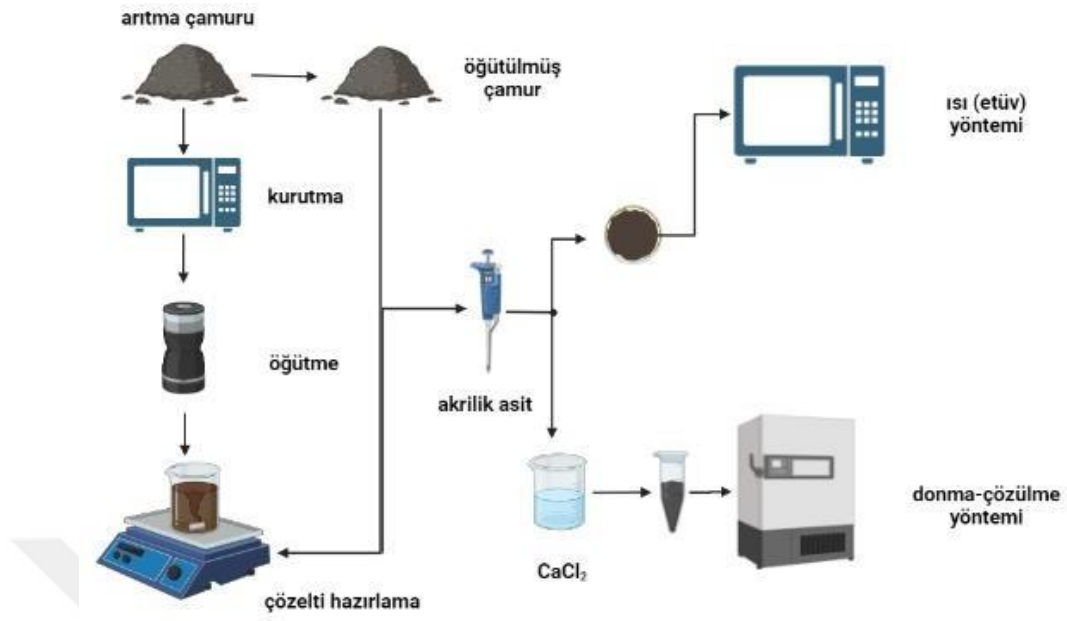
5.1. Malzemeler

Çalışmada hidrojel üretim sürecinde kullanılan arıtma çamuru T.C Eskişehir Büyükşehir Belediyesi ESKİ Genel Müdürlüğü'ne bağlı Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisinden temin edilmiştir. Şekil 5.1'de çalışma kapsamında kullanılan arıtma çamuru gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Arıtma çamuru örneği

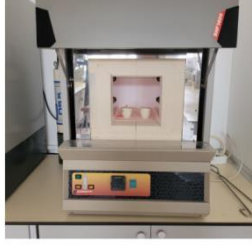
Hidrojel üretiminde doğal ve sentetik polimerler birlikte kullanılmıştır. Başlangıç polimeri olarak nişasta ve aljinat birlikte kullanılmıştır. Aşı polimerizasyonu aşamasında polimer ve çapraz bağlayıcı olarak akrilik asit (AA) seçilmiştir. Ayrıca tüm çözelti hazırlama süreçlerinde ultra saf su kullanılmıştır. Deney akış diyagramı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Deney akış diyagramı

5.2. Çalışmada Kullanılan Cihaz, Araç ve Gereçler

Çalışmada çamur ön işlem aşamasında arıtma çamurunun kurutulması sürecinde etüv (Nüve Dry Air Sterilizer FN 055) kullanılmıştır. Kurutulan çamurun öğütülmesi için Lavion YB-10BL bitki baharat öğütücü değirmen makinesi kullanılmıştır. Çamur ön işlem aşamasının son basamağı olan kül malzemeyi elde etmek için Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, Temel İşlemler ve Süreçler laboratuvarında yer alan kül fırını (PROTHERM PLF 130/45) kullanılmıştır. Malzeme hazırlanması sürecinde arıtma çamuru ve kimyasalların tartımları esnasında hassas terazi (OHAUS Adventurer-Pro) kullanılmıştır. Ek olarak çözeltilerin hazırlanması sürecinde ultra saf su (Millipore Milli-Q® Direct 8 Water Purification System) kullanılmıştır. Çözeltilerin hazırlanması aşamasında ısıtıcılı manyetik karıştırıcı (Heidolph MR 3001 K) kullanılmıştır. Şekil 5.3'te deneysel süreç içerisinde kullanılan cihazların bazılarına ait fotoğraflar gösterilmektedir.



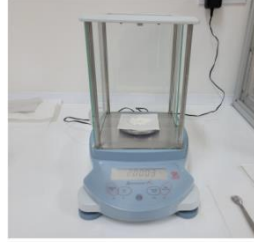
a) Kül fırın



b) Etüv



c) Baharat    t c 



d) Hassas terazi



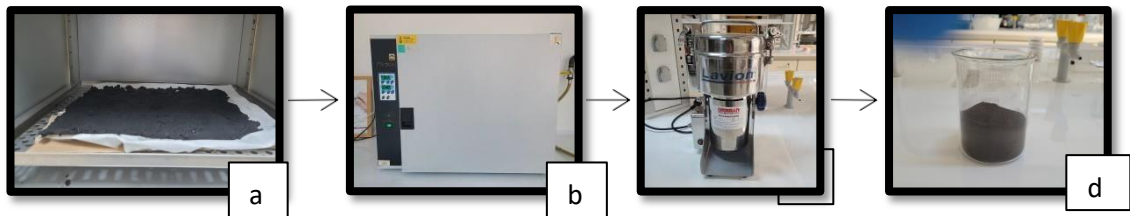
e) Manyetik karıştırıcı

     5.3. Deney sürecinde kullanılan cihaz  rnekleri

5.3. Metot

5.3.1. Arıtma  amuru  n i    

Arıtma  amuru nem içeriği %5'in altına düşecek       3 gün boyunca 50  C'de et vde (Nüve Dry Air Sterilizer FN 055) kurutulmuş ve Lavion YB-10BL bitki baharat    t c  kullanarak    t lm    .    t   n çamurdan k l elde etmek i  n 550  C ve 800  C olarak iki farklı sıcaklık kullanılmış ve kül fırınında (PROTHERM PLF 130/45) 1 saat bekletilmi   r.      5.4'te arıtma çamuru  n i     aşamasına ait fotoğraflar gösterilmektedir.



     5.4. Arıtma  amuru  n i    . a) Arıtma  amuru, b) Etüv, c)    t c , d)    t lm     amur

5.3.2. Aljinat miktarının belirlenmesi

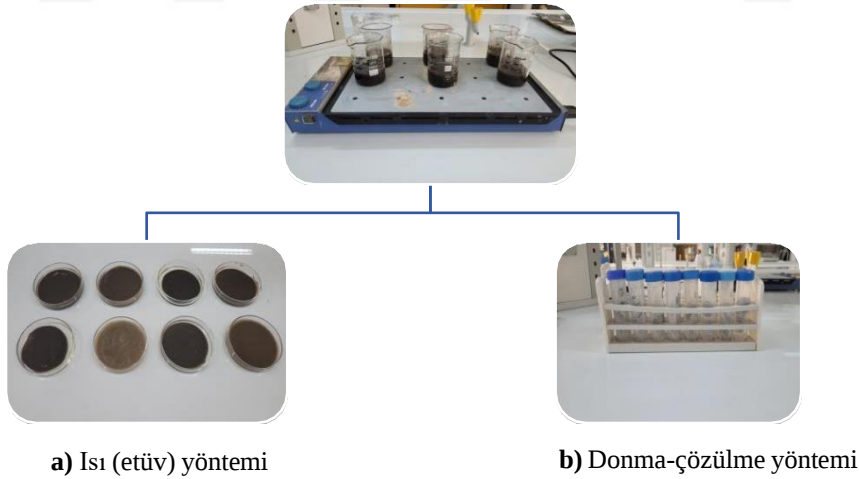
Nişasta ve çamur oranları sabit tutularak ağırlıkça belirlenen aljinat oranları (0,5 g, 1 g ve 1,5 g) ile üç farklı çözelti oluşturulmuştur. çamur örnekleri ham ve öğütölmüş olmak üzere iki farklı çamur örneği için tekrarlanmıştır. Nişasta çözelti içinde homojen kıvama gelene kadar 50°C'de 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından çamur ve belirlenen oranlardaki alijinatlarla birlikte 3 saat oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Numuneler petri kaplarına alınmış ve otomatik pipet yardımıyla belirli oranlarda akrilik asit ilavesi geręekleřtirilmıřtir. Hidrojel elde etme aşaması için ısı (etöv) ve donma-çözölme yöntemi olmak üzere 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Isı (etöv) yöntemi için numuneler 50°C'de 30 dakika etövde bekletilmıştir. Etövden çıkarılan numuneler saf su ile yıkanmış ve kurutulmak üzere kenara alınmıştır. Donma-çözölme yöntemi için %3'lük CaCl_2 çözeltisi hazırlandı ve numuneler CaCl_2 çözeltisi içinde 30 dakika bekletilmıştir. çözeltiden çıkarılan numuneler saf su ile yıkanmış ve 12 saat boyunca donmaya bırakılmıştır. Dolaptan çıkan numuneler oda sıcaklığında bekletilerek fazla suyu alınmıştır. Daha sonra numunelerin kurutulması sağlanmıştır.

5.3.3. Akrilik asit miktarının belirlenmesi

Nişasta, çamur ve aljinat oranları sabit tutularak yüzdece belirlenen akrilik asit oranları (%2,5, %5 ve %10) ile üç farklı çözelti oluşturulmuştur. çamur örnekleri ham ve öğütölmüş olmak üzere iki farklı çamur örneği için tekrarlanmıştır. Nişasta çözelti içinde homojen kıvama gelene kadar 50°C'de 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından çamur ve alijinatlarla birlikte 3 saat oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Numuneler petri kaplarına alındı ve otomatik pipet yardımıyla belirli oranlarda akrilik asit miktarı eklenmiştir. Hidrojel elde etme aşaması için 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Isı (etöv) yöntemi için numuneler 50°C'de 30 dakika etövde bekletilmıştir. Etövden çıkarılan numuneler saf su ile yıkanmış ve kurutulmak üzere kenara alınmıştır. Donma-çözölme yöntemi için %3'lük CaCl_2 çözeltisi hazırlanmış ve numuneler CaCl_2 çözeltisi içinde 30 dakika bekletilmıştir. çözeltiden çıkarılan numuneler saf su ile yıkanmış ve 12 saat boyunca donmaya bırakılmıştır. Dolaptan çıkan numuneler oda sıcaklığında bekletilerek fazla suyu alınmıştır. Kurutulmak üzere kenara alınmıştır.

5.3.4. Çamur miktarının belirlenmesi

Nişasta, aljinat ve akrilik asit oranları sabit tutularak ağırlıkça belirlenen çamur oranları (1,5 g, 3 g, 4,5g ve 6 g) ile dört farklı çözelti oluşturulmuştur. Çamur örnekleri ham ve öğütülmüş olmak üzere iki farklı çamur örneği için tekrarlanmıştır. Nişasta çözelti içinde homojen kıvama gelene kadar 50°C'de 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından çamur ve alijinatlarla birlikte 3 saat oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Numuneler petri kaplarına alındı ve otomatik pipet yardımıyla belirli oranlarda akrilik asit miktarı eklenmiştir. Hidrojel elde etme aşaması için 2 farklı yöntem kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5.5). Isı (etüv) yöntemi için numuneler 50°C'de 30 dakika etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler saf su ile yıkanmış ve kurutulmak üzere kenara alınmıştır. Donma-çözülme yöntemi için %3'lük CaCl_2 çözeltisi hazırlanmış ve numuneler CaCl_2 çözeltisi içinde 30 dakika bekletilmiştir. Çözeltiden çıkarılan numuneler saf su ile yıkanmış ve 12 saat boyunca donmaya bırakılmıştır. Dolaptan çıkan numuneler oda sıcaklığında bekletilerek fazla suyu alınmıştır. Kurutulmak üzere kenara alınmıştır.



Şekil 5.5. Hidrojel elde etme yöntemleri

5.4. Karakterizasyon

5.4.1. Toplam organik karbon

Ham çamur, öğütülmüş çamur, 550 ° C ve 800 ° C'de yakılmış çamur olmak üzere dört farklı çamur örneği 200 rpm'de 24 saat çalkalanmış (Heidolph Unimax 2010),

ardından 4.000 rpm’de santrifülenmiştir (Hettich Universal 320R). Süpernatant, 0,45 µm’lik gözenek çaplı naylon şırınga filtreden geçirilmiştir. Dört saf numune ve dört 1/10 oranında seyreltilmiş numune hazırlanmış, Shimadzu-Vcph 3000 TOC Analyzer cihazında analizlenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Shimadzu-Vcph 3000 TOC Analyzer cihazı

5.4.2. Ağır metal analizi

Ağır metal analizi yüksek sıcaklık ortamında elektronların ışık yaymasına dayanan bir metotla gerçekleştirilmiştir. Arıtma çamuru, toplam organik karbon analizinde hazırlanan numunelerle dört saf numune ve dört 1/10 oranında seyreltilmiş numune kullanılarak analiz yapılmıştır. Hazırlanan çözeltiler ile ICP cihazı kullanılarak sonuç elde edilmiştir.

5.4.3. Fosfor analizi

Arıtma çamuru ön işlem sonrası başlangıçtaki kül ve sıvı fazdaki fosfor (ortofosfat) miktarını hesaplamak için askorbik asit metodu ile kolorimetrik olarak tayin edilmiştir. Numunelerin fosfor analizi yapılmadan önce kalibrasyonu yapılmış; ardından fosfor ölçümüne geçilmiştir. 2 ml numune otomatik pipet ile kitlere yerleştirilmiştir. İşlem dört ayrı numune için de tekrarlanmıştır. Kitler 30 dakika süre ayarlanarak cihaza

yerleştirilmiştir. Kitler soğutulduktan sonra, kit içinde bulunan B kimyasalından her bir numuneye 0,2 ml eklenerek 10 dakika bekletilmiş ve cihazda hazırlanan kalibrasyon eğrisi üzerinden okutularak sonuç elde edilmiştir. Fosfor analizinde kullanılan kitler Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Fosfor analiz kitleri

5.4.4. Azot analizi

Toplam azot miktarının hesaplanabilmesi için kitler yardımıyla azot analizi gerçekleştirilmiştir. 1,3 ml numune otomatik pipet ile kitlere alınmış ve işlem dört ayrı numune için de tekrarlanmıştır. Kitlerin içinde bulunan A kimyasalından 1,3 ml ve B’den 1 tablet alınarak her bir kite eklenmiştir. Cihaza 30 dakika süre ayarlanarak kitler yerleştirilmiştir. Cihazdan çıkan kitlerden 0,5 ml ve D kimyasalından 0,2 ml eklenerek 15 dakika dışarda bekletilmiş ve cihazda hazırlanan kalibrasyon eğrisi üzerinden okutularak sonuç elde edilmiştir. Şekil 5.8’de azot analizinde kullanılan kitler gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Azot analiz kitleri

5.4.5. Su tutma analizi

Hidrojin su tutma performansını değerlendirmek adına su tutma analizleri gerçekleştirilmiştir. Kurutulmuş jel numune hassas terazi yardımıyla kuru ağırlığı hassas terazi yardımıyla tartılmıştır. Tartımı gerçekleştirilen kurutulmuş hidrojel numuneleri belirli miktar saf suya daldırılmış ve 24 saat oda sıcaklığında ıslanmaya bırakılmıştır. Bir tülbent veya çay poşeti yardımı ile jelin fazla suyunu çıkarmak için 10 dakika asılmıştır. Şişme oranı, Denklem 5.1 kullanılarak dört kez tekrarlanmıştır. Su tutma analizlerine ait fotoğraflar Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

$$\text{Şişme oranı (g/g)} = \frac{(\text{Şişmiş jelin ağırlığı} - \text{Kurutulmuş jelin ağırlığı})}{\text{Kurutulmuş jelin ağırlığı}} \quad (5.1)$$



Şekil 5.9. Su tutma analizleri

5.5. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi

Ftir dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi hücre doku ve molekülerin yapısına kadar her türlü küçük maddenin yapısını incelemeye uygun bir analiz çeşitidir. Hücre dokularındaki anormal bileşiklerin görünümünü IR radyasyonundan faydalananak kullanım sağlamaktadır. Kızılötesi spektroskopisi genel anlamıyla titreşimlerden faydalananak, bağlar arasındaki görünüm hakkında bize bilgi vermektedir. Orta kızılötesi bölgede ($4.000-1.000\text{ cm}^{-1}$), kimyasal bağlar boyunca, bağ uzunluğu değişikliklerini içeren, gerilme titreşimleri (ν) olarak adlandırılan titreşimler ve bağ açılarındaki değişiklikleri; özellikle eğilme titreşimlerini (δ —düzlem içinde, π —düzlem dışında) içeren titreşimleri iki ana titreşim türü gözlemlenmektedir [49]. Çift veya üçlü bağların, tekli bağlara göre titreşim frekansı çok daha yüksektir. Titreşim frekansını etkileyen bir diğer faktör ise, atomların kütesidir. Belirli kimyasal gruplarının kimyasal bağların türleri ve aynı zamanda kütlelerine bağlı olarak aynı titreşim frekansları incelendiğinde titreşimlerin aynı bölgede toplanması beklenmektedir. Kızılötesi spektroskopinin, diğer spektroskopik tekniklere göre avantajı, sessiz redoks tepkimelerini, amino asit zincirlerini ve su moleküllerini incelemek için ideal bir analiz yöntemidir. Hidrojel analiz yöntemleri arasında polimer bileşiklerin kimyasal bağlarını incelemek ve aralarındaki bağ ilişkisini tespit etmek amacıyla ftir spektroskopisi sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Hidrojin polimer bağlarını analiz etmek için SHIMADZU IRTracer – 100 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. SHIMADZU IRTracer – 100 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı

6. BULGULAR

6.1. Toplam Organik Karbon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ülkemizde uygulanan çevre mevzuatı gerekleri, atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurun arıtımını ve nihai uzaklaştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Evsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan arıtma çamurları üzerinde yapılan analizler sonucu, bu çamurların özellikle toplam ve çözünmüş organik karbon değerlerinin yönetmelikteki değerleri sağlamadığı ve çamurların bu parametreler bakımından tehlikeli atık sınıfında değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [102]. Toplam organik karbon analizi atıksu ve 4 farklı çamur numunesi incelenerek; atıksu için Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği, arıtma çamuru için Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik gereğince sınır değerler dikkate alınmıştır. Tablo 6.1’de analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 6.1. TOK analiz sonuçları (http-7)

	*NPOC	**Sınır değer
Atıksu	142,3 mg/L	70-90 mg/L
	138,9 mg/L	
Ham çamur	94,05 mg/L	80 mg/L
	110,9 mg/L	
	105,1 mg/L	
Öğütülmüş çamur	0,8260 mg/L	80 mg/L
	0,8325 mg/L	
550 °C’de yakılmış çamur	6,51 mg/L	80 mg/L
	9,86 mg/L	
800 ° C’de yakılmış çamur	0,4093 mg/L	80 mg/L
	0,3083 mg/L	
	0,1957 mg/L	

** Sıvı/katı oranı (L/S) 10 lt/kg alınarak hesaplanmaktadır.

6.2. Toplam Azot ve Fosfor Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Azot ve fosfor bitki büyümesi için gerekli besin maddelerinin başında gelmektedir. Azot, bir bitkinin kuru kütlelerinin yaklaşık %1-5’ini oluşturur ve bitki dokusunda en çok bulunan ikinci besin maddesidir. Azotun kökler tarafından zayıf alımı veya toprakta düşük bulunabilirliği bu nedenle bitki üretkenliğini ve rekabet gücünü olumsuz etkilemektedir [103]. Fosfor eksikliğinde ise, fotosentez engellenmekte ve bitkide erken yaşlanma gözlenmektedir. Bitkilerde, N ve P’nin her ikisi de işlevsel olarak bağlantılıdır,

fotosentetik enzimlerdeki ve bu enzimlerin üretiminde önemli rolleri bulunmaktadır [104]. Tablo 6.2’de toplam azot ve fosfor değerleri gösterilmektedir.

Tablo 6.2. Toplam azot ve fosfor değerleri

	Azot	Fosfor
Ham çamur	16,4 mg/L TNb	2,43 mg/L PO_4^{-3}
Öğütülmüş çamur	17,4 mg/L TNb	3,75 mg/L PO_4^{-3}
550 °C’de yakılmış çamur	3,01 mg/L TNb	2,50 mg/L PO_4^{-3}
800 ° C’de yakılmış çamur	3,41 mg/L TNb	0,019 mg/L PO_4^{-3}

Toplam azot ve fosfor analizi için dört ayrı çamur örneği karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre ham ve öğütülmüş çamurda toplam azot ve fosfor değerleri, bitki büyümesi için en ideal sonuçları vermektedir. Deney sürecinde iki ayrı çamur örneği de kullanılarak değerlendirme yapılmıştır.

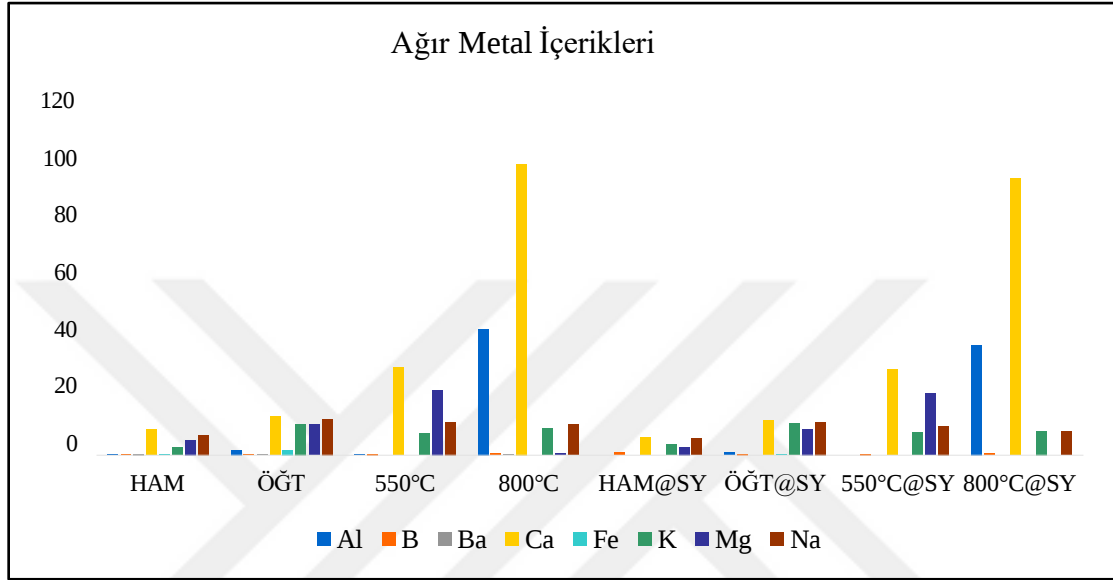
6.3. Ağır Metal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Arıtma çamuru bitkiler için gerekli olan yüksek besin maddelerini bulundurmasına rağmen; çevreye ve insan sağlığına zararlı, bozulabilir organik madde, ağır metaller içermektedir. Farklı iklim bölgelerinde ağır metal içerikleri değişkenlik göstermektedir. Bunun sonucu olarak tarımda direkt olarak uygulanması ülkelerin belirlediği değerler doğrultusunda sınırlandırılmıştır. Ülkemizde de Toprak Kirliliği Yönetmeliği gereğince EK I-B’de yer alan Toprakta Kullanılabilecek Stabilize Arıtma Çamurunda Müsaade Edilecek Maksimum Ağır Metal Muhtevaları Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3. Toprakta kullanılabilecek stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek maksimum ağır metal muhtevaları (http-6)

Ağır Metal (Toplam)	Sınır Değerler (mg/kg fırın kuru materyal)
Kurşun	1200
Kadmiyum	40
Krom	1200
Bakır	1750
Nikel	400
Çinko	4000
Civa	25

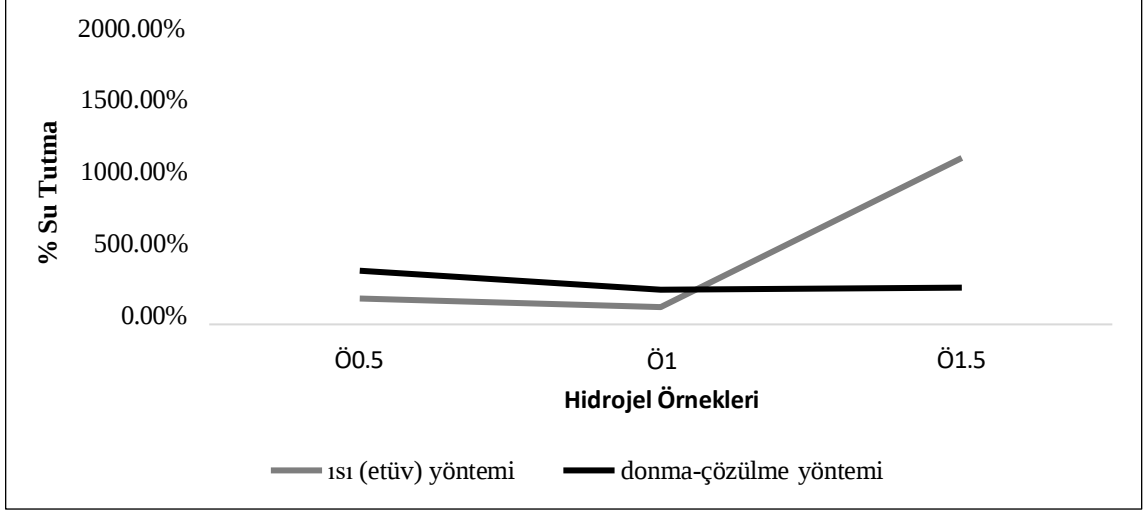
Analiz edilen dört farklı çamur örneği için de Tablo 6.3’de verilen ağır metal değerleri bulunmamaktadır. Sonuçlar literatür verileriyle desteklenmektedir. Ayrıca incelenen çamur örneklerindeki diğer ağır metal içerikleri Şekil 6.1’deki grafikte gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Arıtma çamuru ağır metal içerikleri

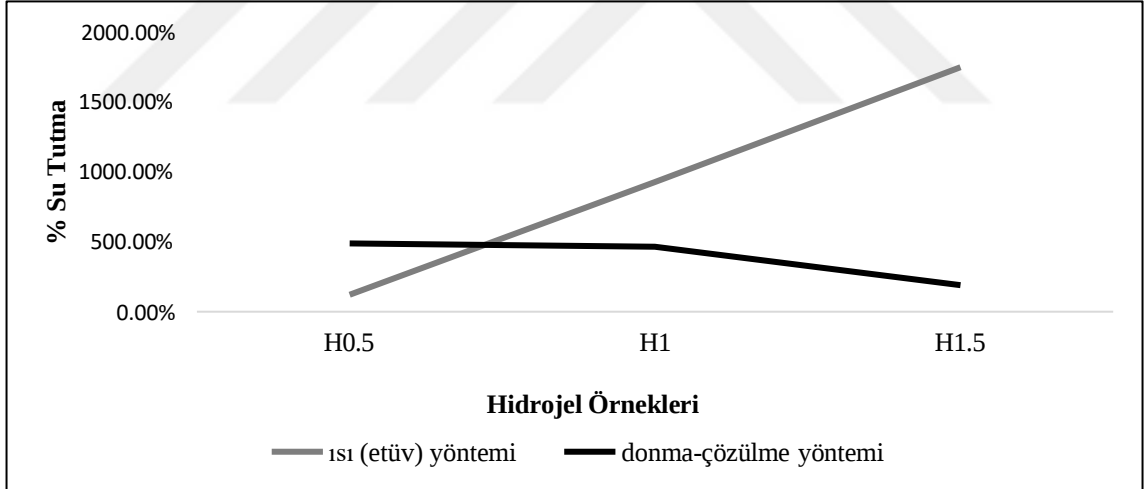
6.4. Aljinat Miktarı Optimizasyonu

Nişasta, akrilik asit ve çamur oranları sabit tutularak 0,5 g, 1 g ve 1,5 g ağırlığında üç farklı aljinat miktarı kullanılmıştır. Deney sürecinde ham ve öğütülmüş çamur olarak iki farklı çamur örneği için de tekrarlanmıştır. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’te optimizasyon sonucu gösterilmektedir.



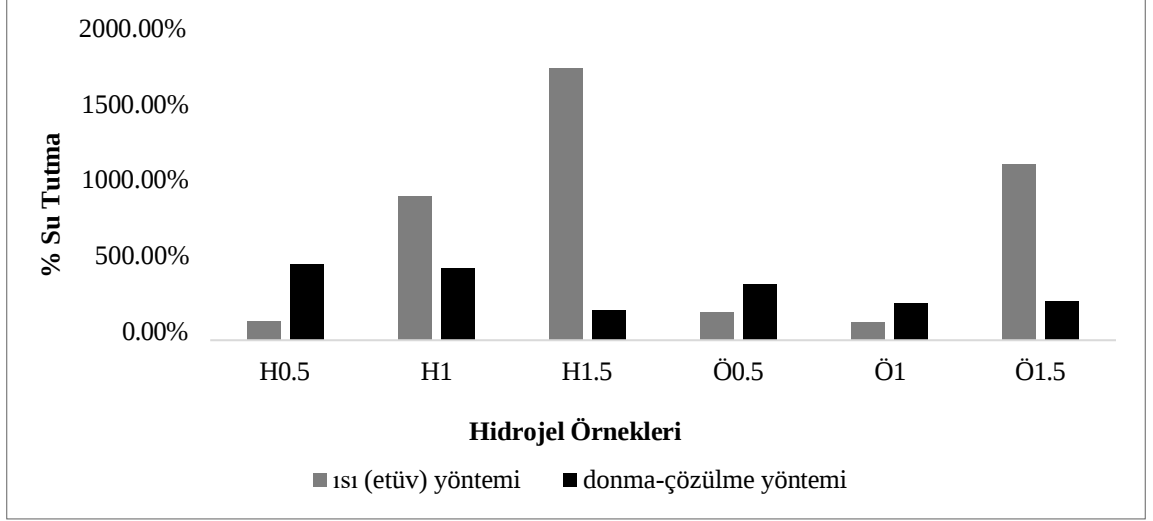
Şekil 6.2. Öğütülmüş çamur aljinat optimizasyonu

Öğütülmüş çamur için ısı (etüv) yöntemi kullanıldığında aljinat miktarı arttıkça su tutma oranının da doğru orantıda arttığı gözlemlenmiştir. Ancak donma-çözülme yönteminde aljinat miktarını arttırmanın sonucu çok fazla değiştirmedeği görülmüştür.



Şekil 6.3. Ham çamur aljinat optimizasyonu

Ham çamur için karşılaştırma yapıldığında ısı (etüv) yöntemi için, öğütülmüş çamurda olduğu gibi aljinat miktarı arttığında su tutma oranında da artış gözlemlenmiştir. Donma-çözülme yönteminde ise 1 g aljinat miktarında stabil sonuçlar elde edilirken; aljinat miktarı 1,5 g'a çıkarıldığında su tutma oranında bir azalma oluşmuştur. Şekil 6.4'te her iki çamur örneği için aljinat miktarları karşılaştırılmıştır.

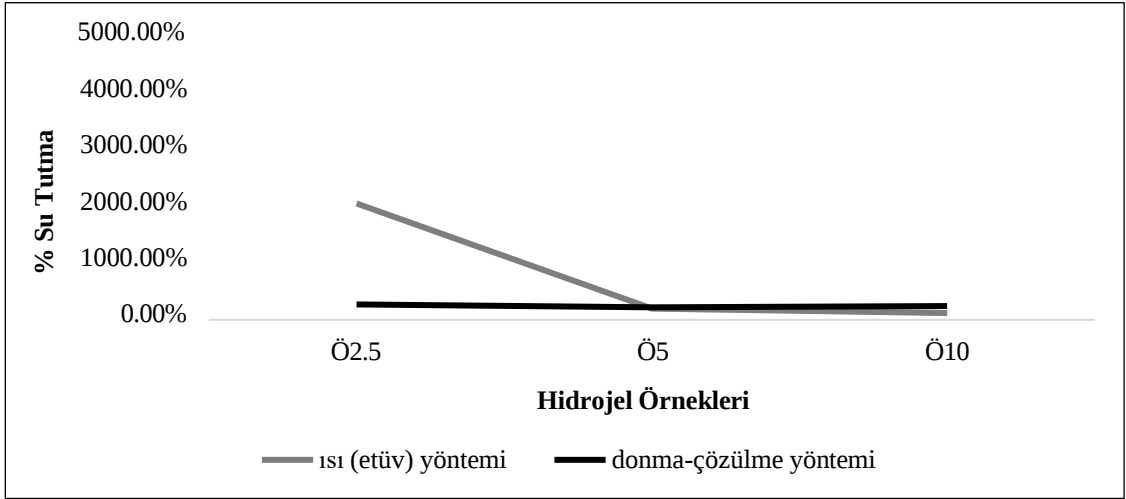


Şekil 6.4. Aljinat miktarı optimizasyonu yöntem karşılaştırması

Isı (etüv) yöntemi için iki çamur örneği için de en yüksek su tutma oranları için 1,5 g aljinat en uygun aralık olarak seçilmiştir. Donma-çözülme yönteminde öğütülmüş çamur için su tutma oranları ham çamura oranla daha düşük sonuçlar göstermiştir. Ham çamur için ise aljinat miktarının su tutma oranı üzerinde çok fazla etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

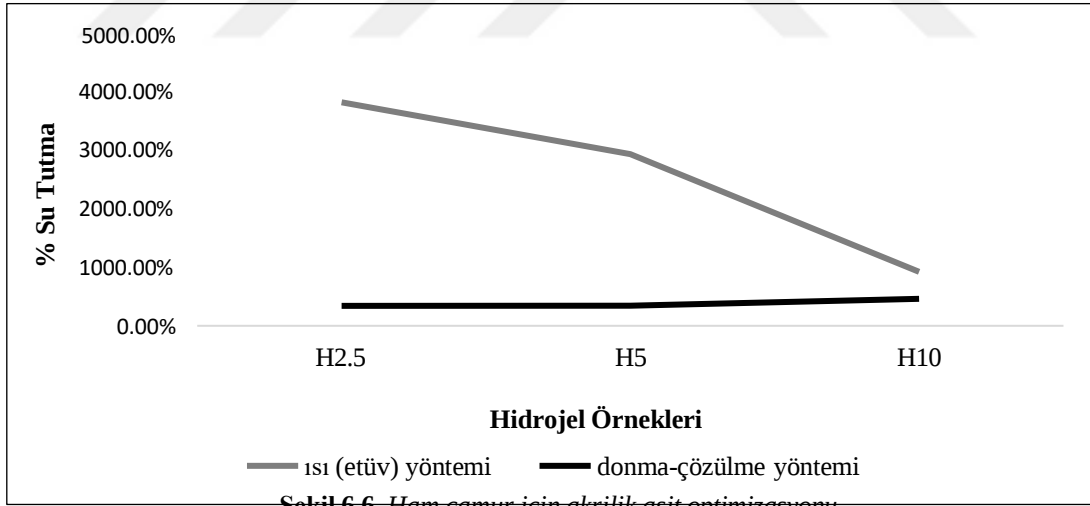
6.5. Akrilik Asit Optimizasyonu

Nişasta, aljinat ve çamur oranları sabit tutularak %2,5, %5 ve %10 oranında üç farklı akrilik asit miktarı kullanılmıştır. Deney sürecinde ham ve öğütülmüş çamur olarak iki farklı çamur örneği için de tekrarlanmıştır. Şekil 6.5 ve Şekil 6.7’de optimizasyon sonucu gösterilmektedir.



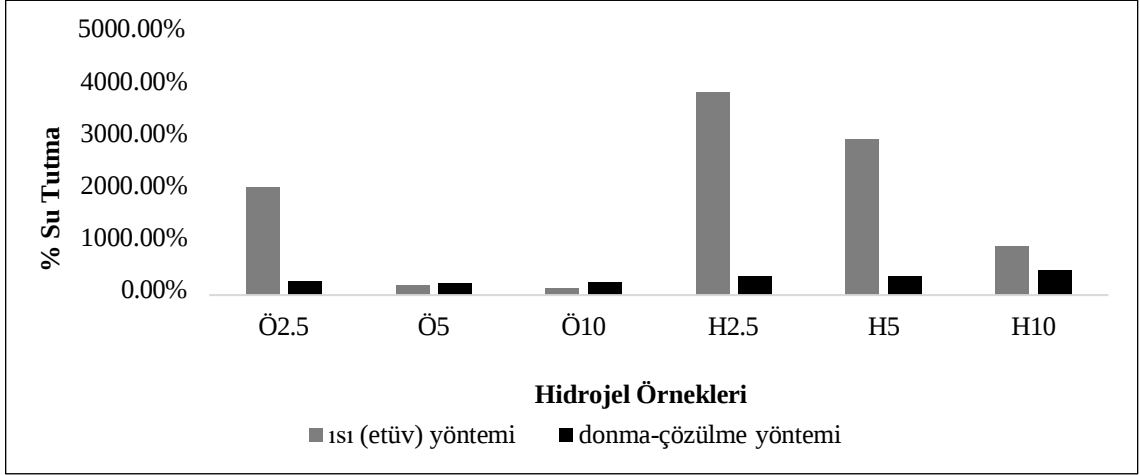
Şekil 6.5. Öğütülmüş çamur için akrilik asit optimizasyonu

Öğütülmüş çamur için ısı (etüv) yönteminde akrilik asit oranı arttıkça su tutma miktarında azalma meydana gelmiştir. Donma-çözülme yönteminde ise akrilik asit oranının su tutma üzerinde bir etkisi gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.6. Ham çamur için akrilik asit optimizasyonu

Ham çamur için de ısı (etüv) yönteminde akrilik asit oranı arttıkça su tutma oranında azalma gözlemlenmiştir. Donma-çözülme yönteminde öğütülmüş çamurda olduğu gibi akrilik asit oranındaki değişim su tutma miktarında kayda değer bir artış oluşturmamıştır (Şekil 6.7).

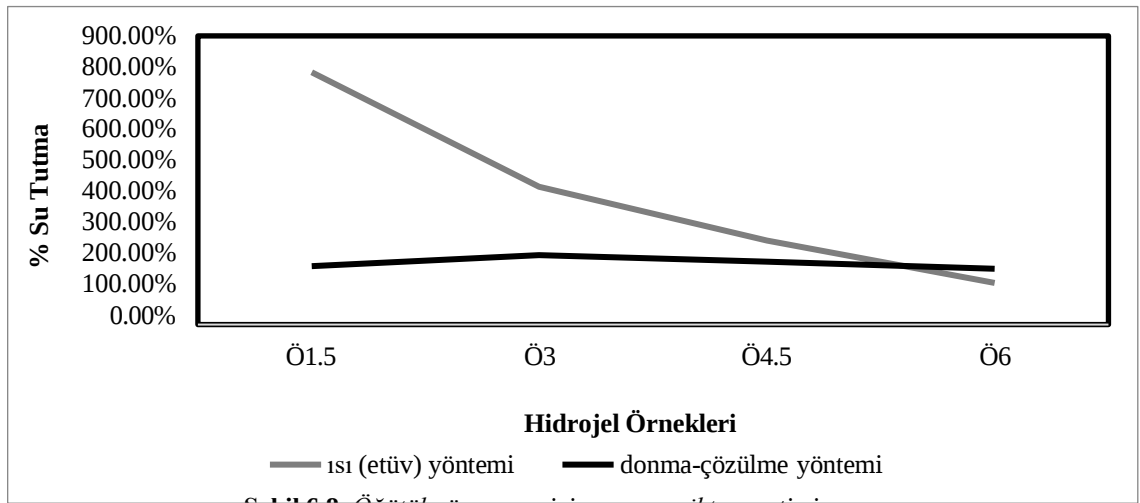


Şekil 6.7. Akrilik asit optimizasyonu yöntem karşılaştırması

Genel bir karşılaştırma yapıldığında, akrilik asit oranını arttırmanın su tutma oranında artışa bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Akrilik asit değeri her iki yöntem içinde %2,5 akrilik asit oranı optimum değer seçilebilir.

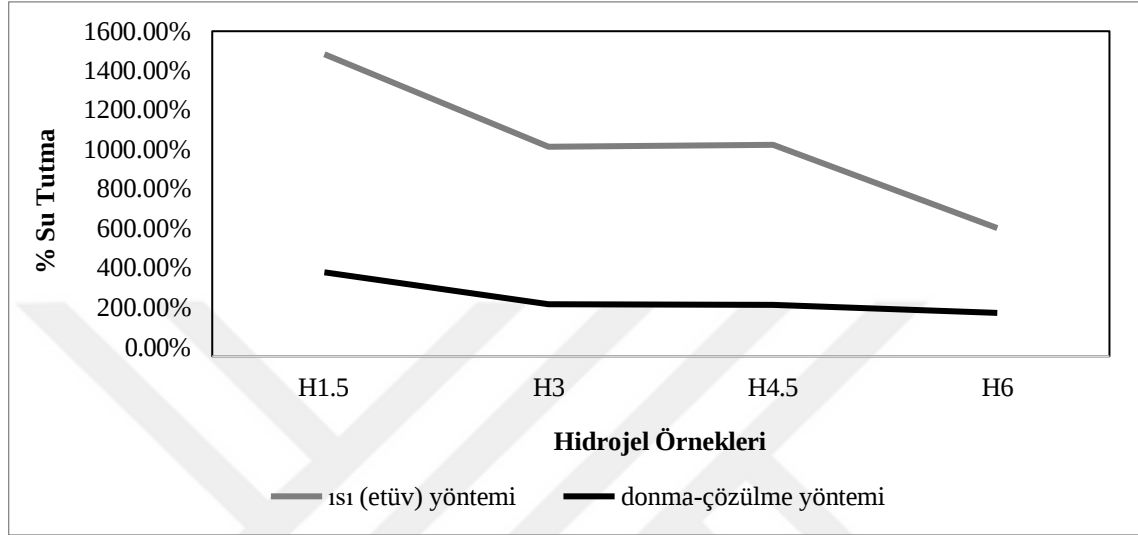
6.6. Arıtma Çamuru Miktarı Optimizasyonu

Nişasta, aljinat ve akrilik asit miktarı sabit tutulmak üzere, 1,5 g, 3 g, 4,5 g ve 6 g olmak üzere dört farklı çamur miktarı için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çamur miktarının su tutma üzerindeki etkisi Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da her iki çamur türü üzerinde incelenmiştir.



Şekil 6.8. Öğütülmüş çamur için çamur miktarı optimizasyonu

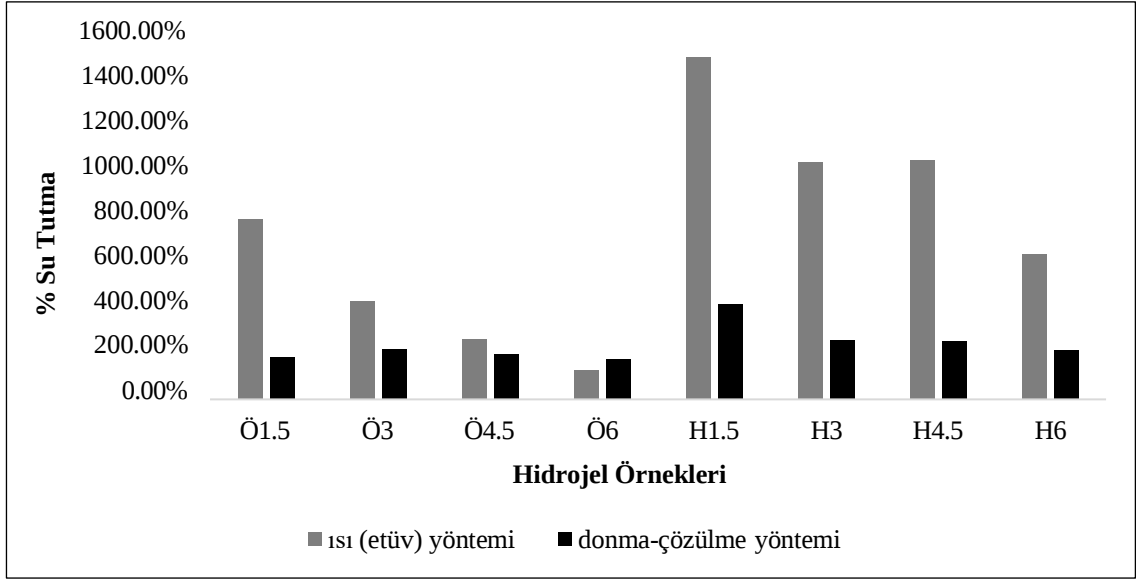
Öğütülmüş çamur için ısı (etüv) yönteminde çamur miktarı arttıkça su tutma miktarında azalma gözlemlenmiştir. Donma-çözülme yöntemine bakıldığında ise 1,5 g ve 3 g çamur aralığında az miktarda bir artış gözlenmiş ve daha sonra sabit aralıkta devam etmiştir.



Şekil 6.9. Ham çamur için çamur miktarı optimizasyonu

Ham çamur için ısı (etüv) yöntemi kullanıldığında 1,5 g çamur miktarı en yüksek su tutma oranına ulaşmıştır. Çamur miktarı artırıldığında 3 g ve 4,5 g çamur aralığında sabit bir su tutma eğrisi gözlemlenmiştir. Çamur miktarını 6 g'a çıkardığımızda ise su tutma oranında bir miktar azalma olmuştur. Bu durumda ham çamur için ısı (etüv) yöntemi kullanıldığında; 4,5 g çamur miktarı için maksimum çamur kapasitesi olduğunu söyleyebilmektedir. Donma-çözülme yönteminde de en yüksek su tutma kapasitesi 1,5 g çamur miktarında görülmüştür. Ancak diğer yöntemden farklı olarak maksimum çamur kapasitesi 6 g'a kadar çıkmıştır.

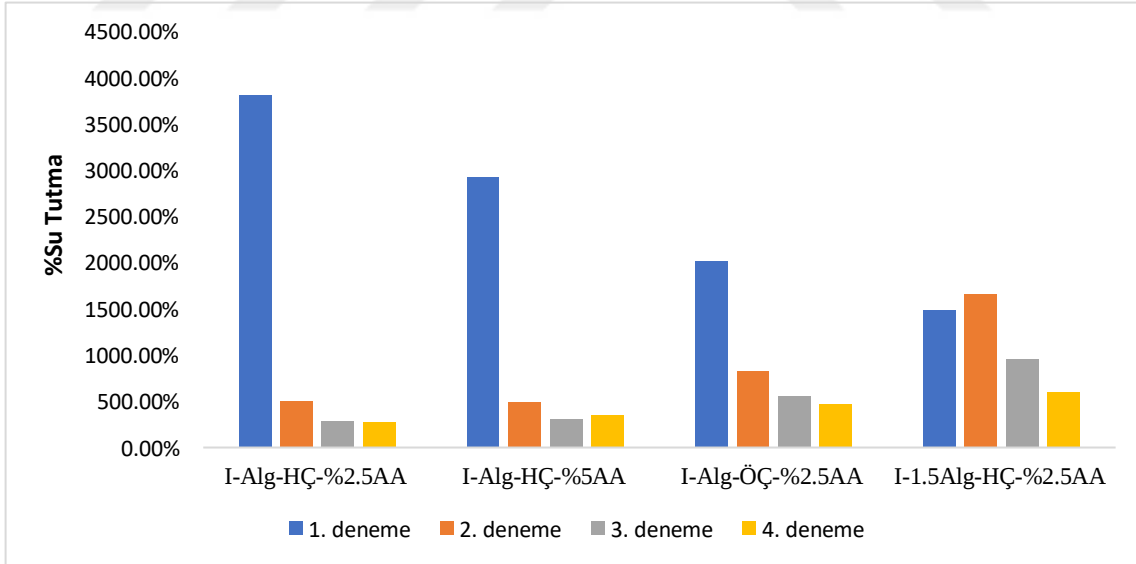
Her iki yöntem de incelendiğinde daha fazla arıtma çamuru miktarından yararlanmak için, ham çamur örneğini kullanmanın daha avantajlı olduğu görülebilmektedir (Bkz. Şekil 6.10). Ayrıca hidrojel elde etme yöntemleri arasında su tutma oranı olarak ısı (etüv) yöntemi daha yüksek oranlara ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 6.10. Arıtma çamuru miktarı optimizasyonu için yöntemlerin karşılaştırılması

6.7. Tekrarlanabilirlik

Su tutma deneyleri sonucunda en yüksek su tutma oranlarına ısı (etüv) yönteminde ulaşılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında en yüksek su tutma oranına sahip 4 farklı hidrojel numunesine karar verilmiştir (Şekil 6.11).

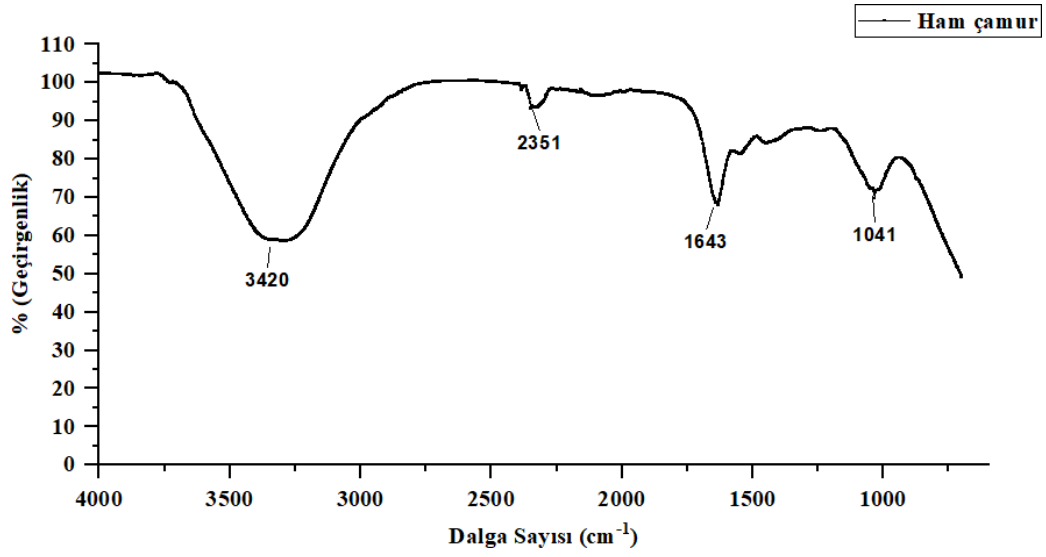


Şekil 6.11. Tekrarlanabilirlik deneyleri sonrası su tutma oranları

Hidrojel örnekleri I-Alg-HÇ-%2,5AA (1 g aljinat, 3 g ham çamur ve %2,5 oranında akrilik asit), I-Alg-HÇ-%5AA (1 g aljinat, 3 g ham çamur ve %5 oranında akrilik asit), I-Alg-ÖÇ-%2,5AA (1 g aljinat, 3 g öğütülmüş çamur ve %2,5 oranında akrilik asit) ve I-1,5Alg-HÇ-%2,5AA (1,5 g aljinat, 3 g ham çamur ve %2,5 oranında akrilik asit) olarak adlandırılmıştır. Optimum çamur miktarı tüm örneklerde aynı belirlenerek 3 g olarak seçilmiştir. Su tutma deneyleri numunelerin tekrar kullanılabilirliğini test etmek için dört kez tekrarlanmıştır.

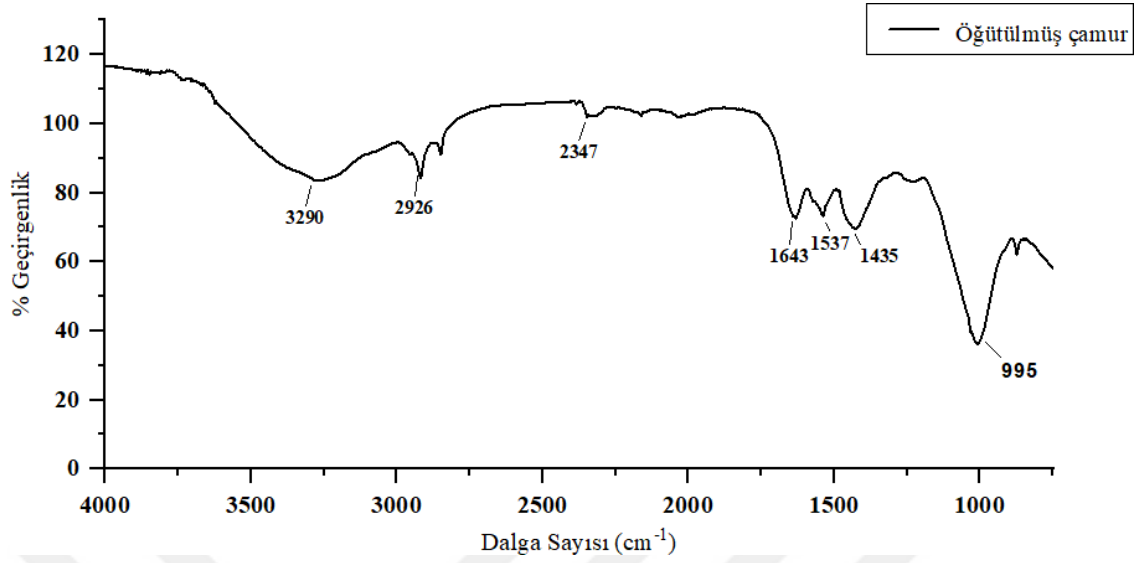
6.8. Ön İşlem Aşamasında Kullanılacak Olan Arıtma Çamuru Hammaddesinin FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi

FT-IR analizi öncelikli olarak hidrojel üretim sürecinde kullanılacak arıtma çamuru türünün kimyasal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.12’de ham çamura ait FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Arıtma çamurunun FT-IR spektrumu, alkoller, karboksilik asitler ve amid/aminler gibi bileşiklerin mevcudiyetini gösteren O-H ve N-H gerilme titreşimlerinin olduğu 3000 cm^{-1} ile 3600 cm^{-1} dalga sayısı arasında geniş ve orta bir bant göstermektedir. 3420 cm^{-1} pikinde geniş bir O-H cm^{-1} bandını göstermektedir. Diğer tarafa baktığımızda ise 1643 cm^{-1} piki keskin şekilde karbon çift bağ oksijen (C=O) arasındaki germe titreşimlerini içeren bir amid I bağının varlığını göstermektedir. Spektrumun parmak izi bölgesinde yer alan 1041 cm^{-1} ’de tepe noktası olan orta şiddetli bant aralığı Si-O ve Al-O bağlarını ifade etmektedir [108].



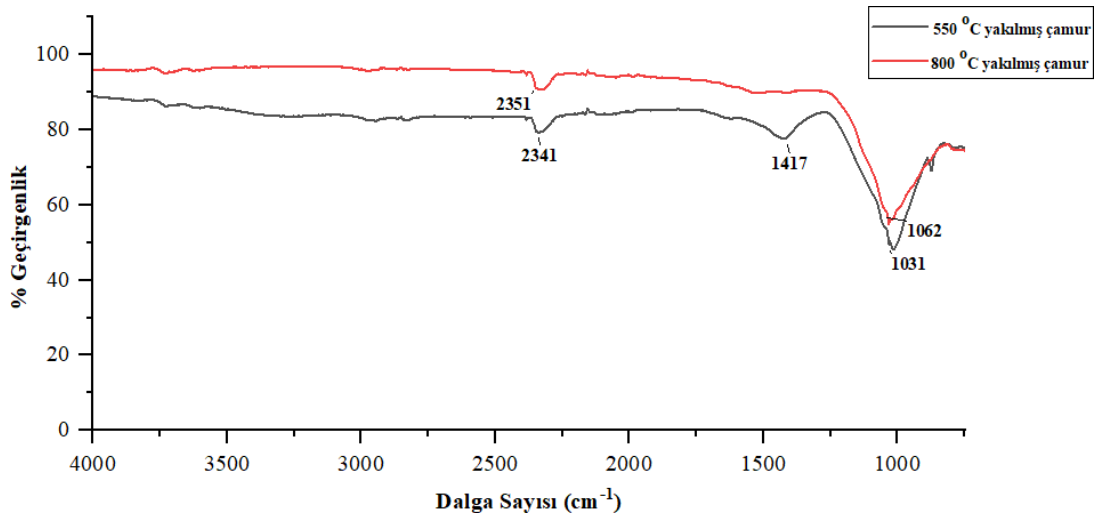
Şekil 6.12. Ham çamura ait FTIR spektrumu

Şekil 6.13'e baktığımızda öğütülmüş çamura ait FT-IR spektrumu gösterilmektedir. 3290 cm^{-1} piki orta ve geniş bir bant O-H ve N-H gerilme titreşimlerinin olduğunu göstermektedir. 2926 cm^{-1} piki alifatik ve aromatik C-H gerilme piklerinin (3100–2800 cm^{-1}) [105] gerilme titreşimini ifade etmektedir. 1643 cm^{-1} ve 1435 cm^{-1} arasında oluşan pikler aromatik C=C germe, simetrik ve antisimetrik halka modlarından kaynaklanmaktadır [106]. C-H esneme titreşimleri, hidrojen fakir karbonlar için çok zayıftır [105]. Parmak izi bölgesine baktığımızda 995 cm^{-1} pikinden açıkça görüldüğü gibi C-H tepe noktası açıkça bulunmaktadır.



Şekil 6.13. Öğütülmüş çamura ait FTIR spektrumu

Şekil 6.14'te 550 °C ve 800 °C yakılmış çamurun FT-IR spektrumu gösterilmektedir. İki çamur örneğini de incelediğimizde açıkça görüldüğü gibi herhangi bir O-H ve C-H gerilimine rastlanmamaktadır. Yine iki örnekte benzer şekilde 2341 cm^{-1} ve 2351 cm^{-1} pikleri görülmektedir. Burada üçlü bağ yapmış karbon gerilmesini ($\text{C}\equiv\text{C}$) göstermektedir. FTIR spektrumlarının parmak izi bölgesinde numuneler arasında önemli ölçüde değişiklik görülmemektedir. 1417 cm^{-1} pikinde karbonat absorpsiyon bantları tespit edilmiştir, ancak karbonat bandı 800 °C yakılmış için tamamen kaybolmaktadır. Bunun sebebi ise 550 °C'de yaktıktan sonra, bazı kalsiyum bileşiklerinin CO_2 ile karbonatlaşması nedeniyle karbonatın görünürken, organik maddenin absorpsiyon bantları kaybolmasından kaynaklanmaktadır [107].

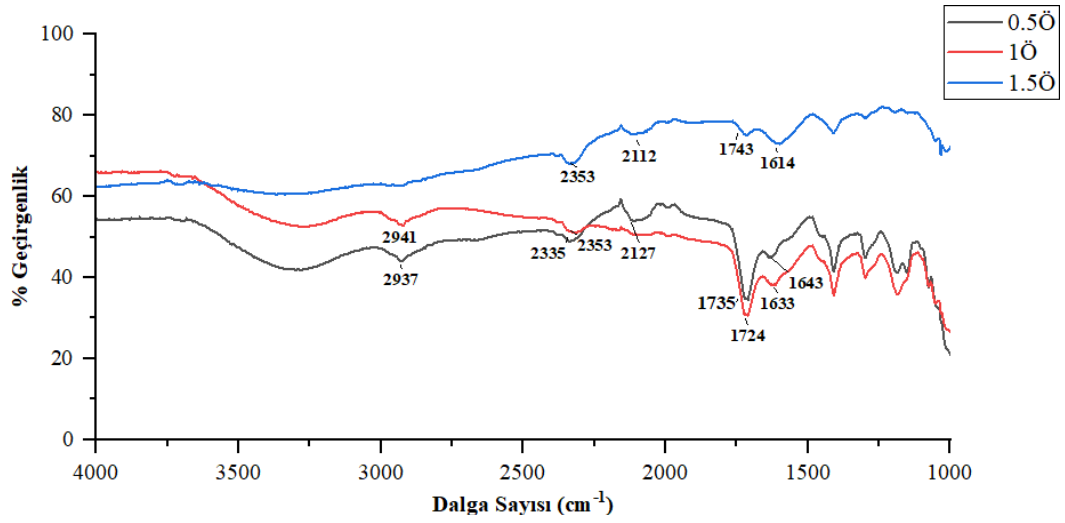


Şekil 6.14. 550 °C yakılmış çamur ve 800 °C yakılmış çamur FTIR spektrumu

4 farklı çamur örneğini incelediğimizde, 550 °C ve 800 °C yakılmış çamurun benzer özellikler gösterdiği söylenebilmektedir. Ancak FT-IR sonuçlarından açıkça görüldüğü üzere, organik maddenin tamamen kaybolması gübre hammaddesi olarak kullanımını sınırlamaktadır. Ham ve öğütülmüş çamurun nispeten benzer özellikler sergilemesi; toplam azot ve fosfor analizi sonuçlarının yakın değerlerde çıkmasıyla birlikte hammadde olarak her iki çamur örneğinin de hidrojel eldesinde kullanılması gerektiğine karar verilmiştir.

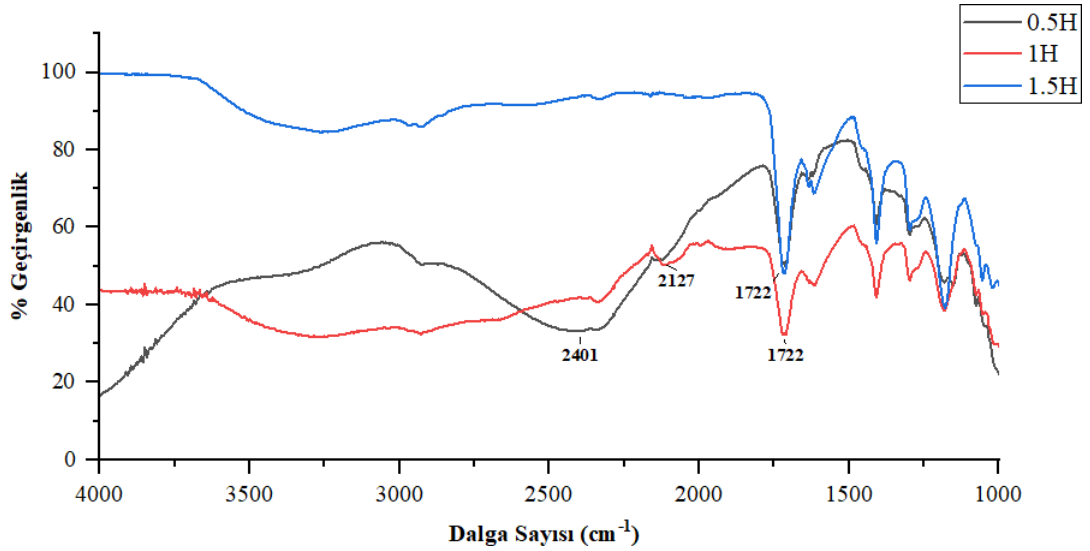
6.9. Arıtma Çamurundan Elde Edilen Hidrojellerin FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi

Hidrojel üretiminde kullanılan arıtma çamuru ve polimerlerin optimizasyon aşamaları sonrası FT-IR analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.15'te öğütülmüş çamura ait aljinat optimizasyon çalışmalarının FT-IR spektrumları görülmektedir. 0,5Ö ve 1Ö örneklerinde birbirine benzer olarak 2941 cm^{-1} ve 2937 cm^{-1} ait bant aralıklarında C-H gerilimine sahip olduğu ancak 1,5Ö örneğinin bu bant aralıklarında pik oluşturmadığı görülmektedir. Tüm örneklerde 2335 cm^{-1} - 2353 cm^{-1} aynı bant aralığı görülmektedir. Bu da bize üçlü bağ yapmış karbon gerilmesini ($\text{C}\equiv\text{C}$) anlatmaktadır. 1743 cm^{-1} - 1643 cm^{-1} bant aralığında C=C çift bağ gerilimini ifade etmektedir. 0,5Ö ve 1Ö örneğinde daha net bir şekilde görülürken, 1,5Ö örneğinde zayıf bir çift bağ gerilimini göstermektedir.



Şekil 6.15. Öğütülmüş çamur - Aljinat optimizasyonu FTIR spektrumu

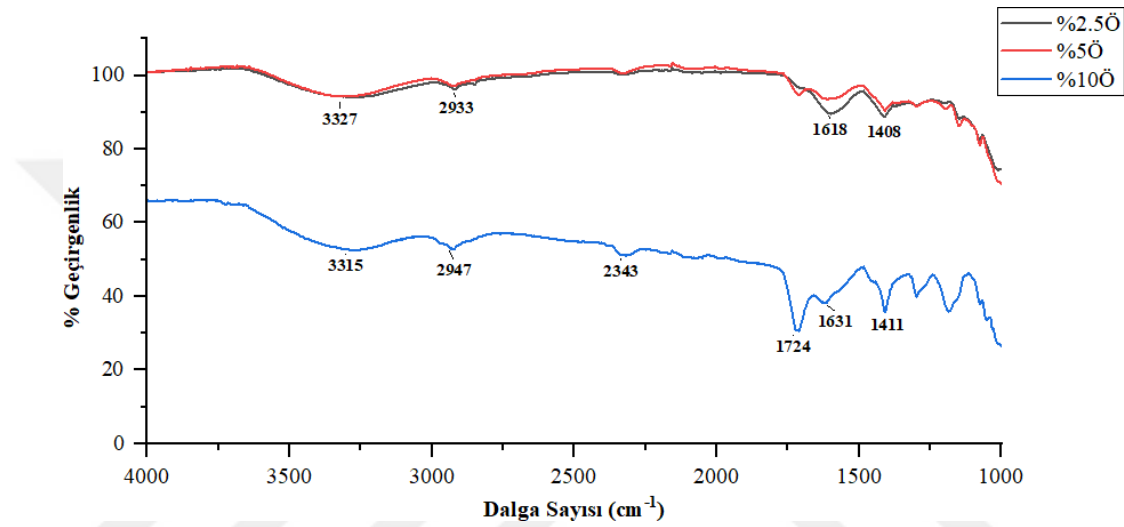
Şekil 6.16’da ham çamura ait aljinat optimasyon çalışmalarının FT-IR spektrumları gösterilmektedir. 0,5H örneğinde yaklaşık 2401 cm^{-1} pik aralığında bir O-H gerilimi görünmektedir. 1H’da ise diğerlerinden farklı olarak öne çıkan üçlü bağ yapmış karbon gerilmesi ($\text{C}\equiv\text{C}$) göze çarpmaktadır. Parmak izi bölgesine yakın olan 1722 cm^{-1} aynı pik aralığında $\text{C}=\text{C}$ çift bağ gerilimi görülmektedir.



Şekil 6.16. Ham çamur-Aljinat optimizasyonu FTIR spektrumu

Aljinat miktarı artırılması ile gözlemlenen bant aralıklarının genişliği de düşmüştür. 0,5 g kullanılan hidrojel örneklerinde O-H gerilimi daha net görülürken, 1,5 g hidrojel örneklerinde herhangi bir pik görülmemektedir. Bu da bize hidrojel oluşumu sırasında sodyumun kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirdiğini göstermektedir [109].

Şekil 6.17’de öğütülmüş çamura ait akrilik asit optimizasyonu çalışmalarının FT-IR spektrumları gösterilmektedir.

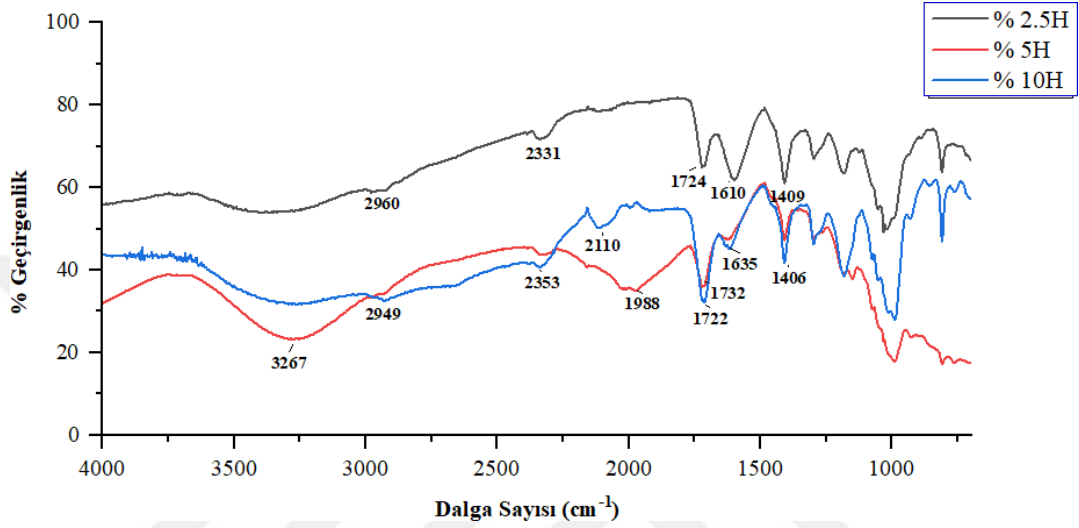


Şekil 6.17. Öğütülmüş çamur-Akrilik asit optimizasyonu FTIR spektrumu

3315 – 3327 cm^{-1} bant aralığında düşük-orta şiddetli O-H gerilimi gözlemlenmektedir. 2933 – 2947 cm^{-1} bant aralığında bir C-H gerilme titreşimi görülmektedir. %2,5Ö ve %5Ö örneklerindeki titreşimler benzer özellikler seğılemektedir. %10Ö jelinde 2343 cm^{-1} pikeinde düşük-orta şiddetli bir $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi olduğu söylenebilmektedir. Diğer örneklere baktığımızda ise net bir yorum yapılamaz. %2,5Ö örneğine baktığımızda ise farklı olarak 1618 cm^{-1} piki göze çarpmaktadır. Burada orta şiddetli $\text{C}=\text{C}$ çift bağ gerilimi gözlemlenmektedir [109].

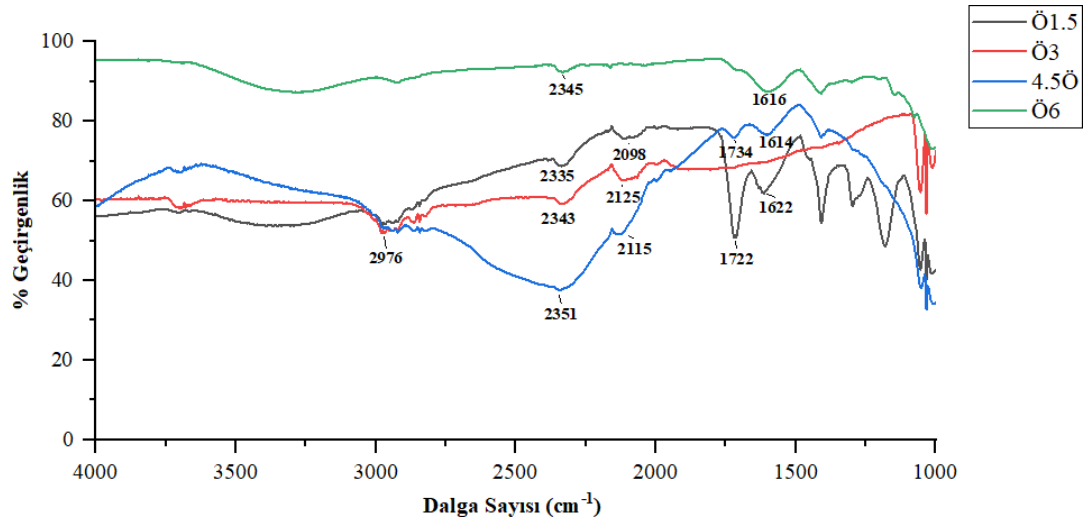
Şekil 6.18’de ham çamura ait akrilik asit optimizasyonu çalışmalarının FT-IR spektrumları gösterilmektedir. %10H örneğinde 3267 cm^{-1} pikeinde orta geniş bantta bir O-H gerilimi görülmektedir. Buradan akrilik asitin varlığını net bir şekilde gözleyebiliriz. %2,5H ve %5H’e bakıldığında belirgin bir O-H bandı gözlemlenemez. 2949 – 2960 cm^{-1} bant aralığında C-H gerilme titreşimleri bulunmaktadır. 2110 – 2353 cm^{-1} bant aralığında keskin düşük şiddetli bir $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi olduğu söylenebilir. 3 hidrojel

örneğinde 1700 cm^{-1} pik bandında keskin şiddetli karbonil ($\text{C}=\text{O}$) bağı gözlemlenmektedir.



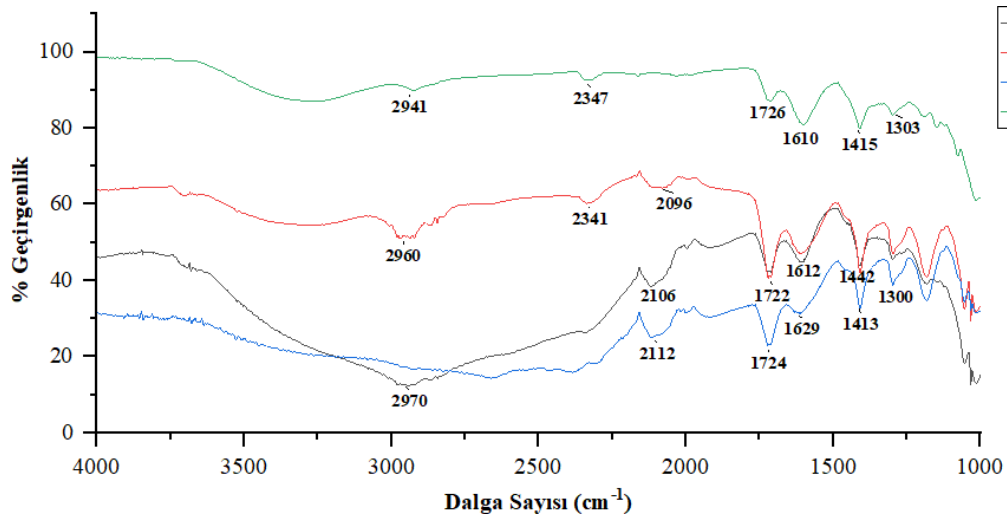
Şekil 6.18. Ham çamur- Akrilik asit optimizasyonu FTIR spektrumu

Şekil 6.19’da öğütülmüş çamura ait çamur miktar optimizasyonu çalışmalarının FT-IR spektrumları gösterilmektedir. Ö6’dan farklı olarak diğer örneklerde 2976 cm^{-1} piki görülmektedir. Düşük-orta şiddetli C-H veya O-H bağ titreşiminden kaynaklı olduğu söylenebilir. 2300 cm^{-1} bandında ortak bir $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi olduğu gözlemlenmektedir. 4,5Ö jelinde pik aralığı geniş bant aralığındadır. 1722 cm^{-1} pikinde keskin şiddetli karbonil ($\text{C}=\text{O}$) bağı göze çarpmaktadır. Tüm bileşikler, hidrojen bağlama kapasitelerine bağlı olarak $1610\text{--}1760 \text{ cm}^{-1}$ gibi oldukça geniş bir dalga sayısı aralığında, iyi tanımlanmış, güçlü ve simetrik karbonil absorpsiyon bantları göstermektedir [110].



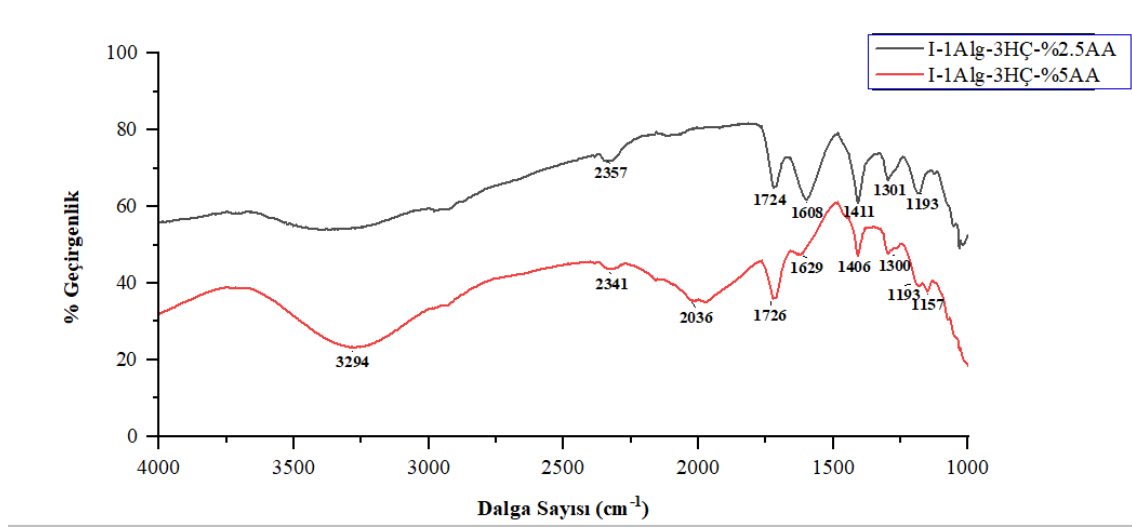
Şekil 6.19. Öğütülmüş çamur- Çamur miktar optimizasyonu FTIR spektrumu

Şekil 6.20’de ham çamura ait çamur miktar optimizasyonu sonrası FT-IR spektrumları incelenmiştir. 2900 cm^{-1} bandında asimetrik C-H gerilimi bulunmaktadır. 3H ve 6H’de benzer olarak düşük 2300 cm^{-1} bant aralığında $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi bulunmaktadır. 1,5H ve 4,5H örneklerinde ise $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi 2100 cm^{-1} bant aralığına kaydığını görebiliriz. 1700 cm^{-1} bant aralığında C=O çift bağ gerilimi bulunmaktadır. Burada 6H örneğinde bağların diğerlerine göre zayıfladığı görülmektedir. 1600 cm^{-1} bant aralığına ortak şekilde düşük- orta şiddetli C=C çift bağ gerilimi bulunmaktadır.



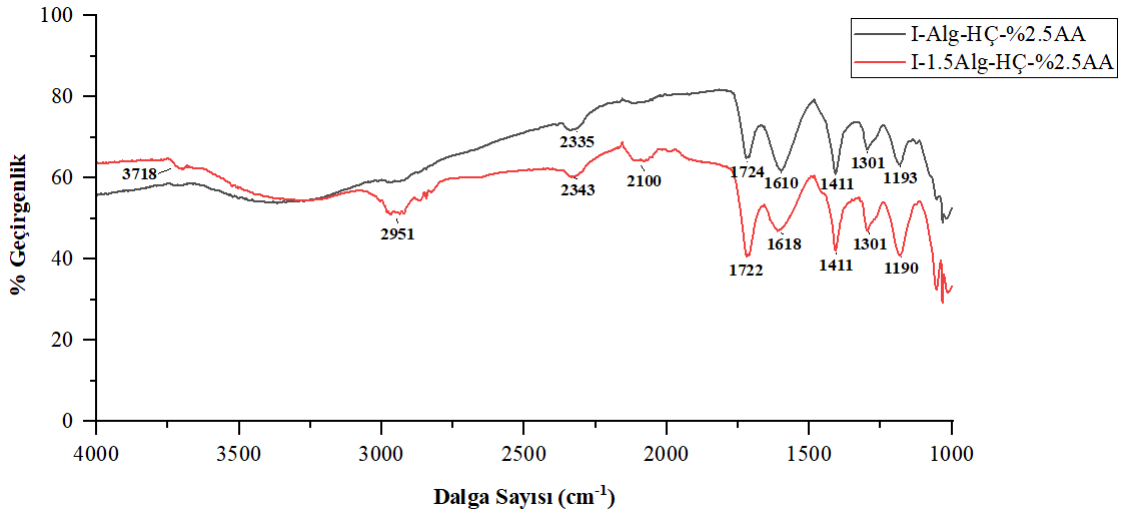
Şekil 6.20. Ham çamur- Çamur miktar optimizasyonu FTIR spektrumu

Su tutma deneyleri sonrası en iyi orana sahip 4 farklı hidrojel örneği belirlenmiştir. Belirlenen hidrojel örnekleri arasında bağ etkileşimini daha iyi gözlemleyebilmek adına FT-IR spektrumları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.21’de 2 farklı akrilik asit oranına sahip hidrojin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Burada 3294 cm^{-1} pikinde orta-geniş O-H bant aralığında akrilik asit varlığını net bir şekilde görülebilmektedir.



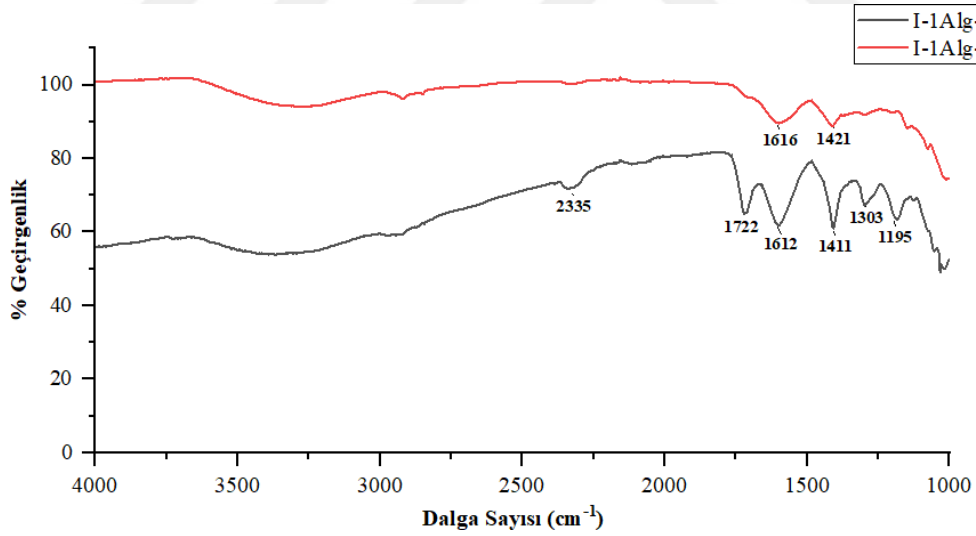
Şekil 6.21. En iyi su tutma oranına sahip iki farklı jelin akrilik asit karşılaştırma FTIR spektrumu

Şekil 6.22’de ise belirlenen 2 örnekteki aljinat miktarının karşılaştırılmasına ait FT-IR spektrumu görülmektedir. 2951 cm^{-1} pikinde bir C-H gerilmi göze çarpmaktadır. Ayrıca 1,5 aljinat kullanılan örnekte farklı olarak 2100 cm^{-1} pikinde ikinci bir C-H bağ gerilimi görülmektedir.



Şekil 6.22. En iyi su tutma oranına sahip iki farklı jelin aljinat karşılaştırma FTIR spektrumu

Şekil 6.23'te öğütülmüş ve ham çamur arasındaki bağ etkileşim farklarının FT-IR spektrumları görülmektedir.



Şekil 6.23. En iyi su tutma oranına sahip iki farklı jelin çamur türü karşılaştırma FTIR spektrumu

Öğütülmüş çamur örneğinde 2335 cm^{-1} pikinde $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi göze çarpmaktadır. Farklı olarak yine öğütülmüş çamurda $\text{C}=\text{O}$ çift bağ gerilimi görülmektedir. Parmak izi bölgesinde ise 1195 ve 1303 cm^{-1} piklerinde düşük $\text{C}-\text{O}$ bağ gerilimi bulunmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında T.C. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi ESKİ Genel Müdürlüğü Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisinden temin edilen arıtma çamuru, doğal (aljinat, nişasta) ve sentetik (akrilik asit) polimerler kullanılarak hidrojel üretimi gerçekleştirilmiştir. Süreç boyunca iki farklı teknik seçilerek ısı (etüv) ve donma-çözülme yöntemi kullanılmıştır. Gübre potansiyeli değerlendirilmek üzere, toplam azot ve fosfor analizi, ağır metal analizi, su tutma analizleri ve FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

❖ Azot ve fosfor bitki büyümesi için gerekli besin maddelerinin başında gelmektedir. En iyi gübre potansiyelini değerlendirmek adına toplam azot ve fosfor analizi için dört ayrı çamur örneği karşılaştırılmıştır. Ham ve öğütülmüş çamur için toplam azot değeri birbirine yakın sonuçlar göstermiştir. Sırasıyla ham çamur için 16,4 mg/L, öğütülmüş çamur için ise 17,4 mg/L bulunmuştur. Toplam fosfor analizine bakıldığında 800°C’de yakılmış çamurda fosfor değerlerinin kaybolduğunu söyleyebiliriz. Diğer üç çamur örneğinde ise benzer değerler göstermiştir. Analiz sonuçlarına göre ham ve öğütülmüş çamurda toplam azot ve fosfor değerleri, bitki büyümesi için en ideal sonuçları vermektedir. Deney sürecinde iki ayrı çamur örneğinde kullanılarak değerlendirme yapılmıştır.

❖ Arıtma çamurunun toprakta değerlendirilmesini engelleyen en önemli kriterlerden biri ağır metal içeriğidir. Farklı iklim bölgelerinde ağır metal içerikleri değişkenlik göstermektedir. Ağır metal içerikleri dört ayrı çamur örneği için de analiz edilmiştir. Sonuçlar Toprak Kirliliği Yönetmeliği gereğince EK I-B’de yer alan Toprakta Kullanılabilecek Stabilize Arıtma Çamurunda Müsaade Edilecek Maksimum Ağır Metal Muhtevaları hususunda karşılaştırılmıştır. Analiz edilen dört farklı çamur örneği için de verilen ağır metal değerleri bulunmamaktadır. Sonuçlar literatür verileriyle desteklenmektedir.

❖ Aljinat miktarının hidrojin su tutma performansını ne kadar arttırdığını belirleyebilmek için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Kullanılan 3 farklı aljinat miktarı belirlenerek, ham ve öğütülmüş çamur için aynı süreç tekrarlanmıştır. Hem ham çamur hem de öğütülmüş çamur için ısı (etüv) yöntemi

kullanıldığında aljinat miktarı arttıkça su tutma oranının da doğru orantıda arttığı gözlemlenmiştir. Ancak donma-çözülme yönteminde aljinat miktarını arttırmanın sonucu çok fazla değiştirmedeği görülmüştür. Donma-çözülme yönteminde öğütülmüş çamur için su tutma oranları ham çamura oranla daha düşük sonuçlar göstermiştir. Ham çamur için ise aljinat miktarının su tutma oranı üzerinde çok fazla etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

❖ Akrilik asit miktarının hidrojinin su tutma ve şişme performansı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için üç farklı akrilik asit miktarı seçilerek bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deney sürecinde ham ve öğütülmüş çamur olarak iki farklı çamur örneği için de tekrarlanmıştır. Isı (etüv) yönteminde hem öğütülmüş çamur hem de ham çamur için akrilik asit oranı arttıkça su tutma miktarında azalma meydana gelmiştir. Donma-çözülme yöntemi ise akrilik asit oranının su tutma üzerinde bir etkisi gözlemlenmemiştir. Akrilik asit için %2,5 oranında hidrojellerin daha yüksek su tutma oranlarına ulaştığı tespit edilmiştir.

❖ Çamur miktarını arttırmanın hidrojinin su tutma ve şişme performansı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için dört farklı çamur miktarı seçilerek bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Isı (etüv) yönteminde; iki çamur örneği için de çamur miktarı arttıkça su tutma miktarında azalma gözlemlenmiştir. Ham çamur için, çamur miktarı arttırıldığında 3 - 4,5 g çamur aralığında sabit bir su tutma eğrisi gözlemlenmiştir. Çamur miktarını 6 gram'a çıkardığımızda ise su tutma oranında azalma olmuştur. Bu durumda ham çamur için ısı (etüv) yöntemi kullanıldığında; 4,5 g çamur miktarı için maksimum çamur kapasitesi olduğunu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca grafik verileri ham çamur örneğinin su tutma kapasitesini arttırdığı niteliktedir. Donma-çözülme yönteminde sonuçlar, çamur miktarındaki artışın kayda değer bir değişim göstermediğini vurgulamıştır.

❖ Su tutma deneyleri sonucunda en yüksek su tutma oranlarına ısı (etüv) yönteminde ulaşılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında en yüksek su tutma oranına sahip 4 farklı hidrojel numunesine karar verilmiştir. Hidrojel örnekleri I-Alg-HÇ-%2,5AA, I-Alg-HÇ-%5AA, I-Alg-ÖÇ-%2,5AA ve I-1,5Alg-HÇ-%2,5AA olarak adlandırılmıştır. Çamur miktarı tüm örneklerde ortak bir şekilde 3 g olarak sonuçlanmıştır. Su tutma deneyleri numunelerin tekrar kullanılabilirliğini test etmek için dört kez tekrarlanmıştır. İlk deneme sonuçları baz alındığında en

yüksek su tutma oranına sahip hidrojinin %3816,1 oranında olduğu bulunmuştur. En yüksek su tutma yüzdesine sahip diğör örneklerle karşılaştırıldığında 1 g aljinatin 1,5 grama oranla 2329,3, ham çamurun öğütölmüş çamura oranla %1794,7, ve %2,5 akrilik asit oranının %5'e oranla %888 daha fazla su tutma oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, tekrar deneylerinden sonra diğör örneklerde su tutma oranında azalma olurken, 1,5 aljinat kullanılan örnekte bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca diğör örneklere kıyasla, daha dengeli bir azalma eğrisi olduğu söylenebilir.

❖ Hidrojel üretim sürecinde kullanılacak arıtma çamuru türünün kimyasal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak amacı ile FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Ham ve öğütölmüş çamurun FT-IR spektrumunda, 3000 cm^{-1} ile 3600 cm^{-1} dalga sayısı arasında geniş ve orta bir bant aralığında O-H ve N-H gerilme titreşimlerinin olduğunu göstermektedir. C-H esneme titreşimleri, hidrojen fakir karbonlar için çok zayıftır. Öğütölmüş çamur FT-IR spektrumunun parmak izi bölgesine baktığımızda C-H tepe noktası açıkça görölmektedir. $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ yakılmış çamurun FT-IR spektrumunda karbonat absorpsiyon bantları tespit edilmiştir, ancak karbonat bandı $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ yakılmış için tamamen kaybolmaktadır. $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yaktıktan sonra, bazı kalsiyum bileşiklerinin CO_2 ile karbonatlaşması nedeniyle karbonatın görünürken, organik maddenin absorpsiyon bantları kaybolmaktadır. 4 çamur örneğini de incelediğimizde, $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ yakılmış çamurun, organik maddenin tamamen kaybolması gübre hammaddesi olarak kullanımını sınırlamaktadır. Ham ve öğütölmüş çamurun nispeten benzer özellikler sergilemesi; toplam azot ve fosfor analizi sonuçlarının yakın değerlerde çıkmasıyla birlikte hammadde olarak her iki çamur örneğinin de hidrojel eldesinde kullanılması gerektiğine karar verilmiştir.

❖ Hidrojel üretiminde kullanılan arıtma çamuru ve polimerlerin optimizasyon aşamaları sonrası FT-IR analizleri gerçekleştirilmiştir. Aljinat miktarının bağlardaki değişimleri daha net gözlemlemek adına hem öğütölmüş hem de ham çamura ait FT-IR spektrumları incelenmiştir. Tüm örneklerde 2335 cm^{-1} - 2353 cm^{-1} aynı bant aralığı görölmektedir. Bu da bize üçlü bağ yapmış karbon gerilmesini ($\text{C}\equiv\text{C}$) anlatmaktadır. 0,5Ö ve 1Ö örneğinde net bir şekilde $\text{C}=\text{C}$ çift bağ gerilimi görölrken, 1,5Ö örneğinde zayıf bir çift bağ gerilimini

göstermektedir. Aljinat miktarı arttırılması ile gözlemlenen bant aralıklarının genişliği de düşmüştür. 0,5 g kullanılan hidrojel örneklerinde O-H gerilimi daha net görülürken, 1,5 g hidrojel örneklerinde herhangi bir pik görülmemektedir. Bu da bize hidrojel oluşumu sırasında sodyumun kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirdiğini göstermektedir. Sonuçlar 1,5 g hidrojel örneği için su tutma analizlerini destekler niteliktedir.

❖ Akrilik asit miktarındaki artış hidrojel bağ etkileşimi üzerindeki performansını daha net görebilmek adına FT-IR spektrumları incelenmiştir. Öğütülmüş çamura ait FT-IR spektrumunda %2,5Ö ve %5Ö örnekleri genel olarak benzer titreşim özellikleri sergilemektedir. %2,5Ö örneğine farklı olarak orta şiddetli C=C çift bağ gerilimi gözlemlenmektedir. %10Ö jelinde 2343 cm^{-1} pikinde düşük-orta şiddetli bir $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi olduğu söylenebilir. Ham çamura ait FT-IR spektrumunda %10H örneğinde orta geniş bantta bir O-H gerilimi görülmektedir. Buradan akrilik asitin varlığını net bir şekilde gözleyebiliriz. %2,5H ve %5H'e bakıldığında belirgin bir O-H bandı gözlemlenemez. Akrilik asitin bağlardaki geniş ve şiddetli titreşimleri tarımda kullanılacak jel örnekleri için istenmeyen bir durumdur. %10 oranda kullanılan örneklerde açıkça gözlemlenmektedir. %2,5 ve %5 oranı için öğütülmüş çamurda titreşimler benzer özellikler sergilemektedir. Ham çamurda ise %2,5 akrilik asit oranı net bir titreşim varlığı göstermemiştir. Bu durumda %2,5 akrilik asit oranı tarımda kullanılmak için su tutma analizlerini destekler niteliktedir.

❖ Çamur miktarındaki artışın bağlardaki etkileşimini gözlemlemek adına FT-IR spektrumları incelenmiştir. Ö6'dan farklı olarak diğer örneklerde düşük-orta şiddetli C-H veya O-H bağ titreşimi görülmektedir. 2300 cm^{-1} bandında ortak bir $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi olduğu gözlemlenmektedir. 4,5Ö jelinde bu pik aralığı geniş bant aralığındadır. Ö1,5 jelinde keskin şiddetli karbonil (C=O) bağı göze çarpmaktadır. Burada çamur miktarının arttıkça karbonil bağının kaybolduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca Ö6'da O-H geriliminin kaybolması, çamur miktarındaki artışın hidrojin şişme ve su tutma performansındaki düşüşe sebep olduğuna bir örnektir. Sonuçlar su tutma analizlerinin kanıtlar niteliktedir. Ham çamura ait çamur miktar optimizasyonu sonrası FT-IR spektrumlarına bakıldığında 2900 cm^{-1} bandında asimetric C-H gerilimi bulunmaktadır. 3H ve 6H'de benzer

olarak düşük 2300 cm^{-1} bant aralığında $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi bulunmaktadır. 1,5H ve 4,5H örneklerinde ise $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi 2100 cm^{-1} bant aralığına kaymıştır. 1700 cm^{-1} bant aralığında $\text{C}=\text{O}$ çift bağ gerilimi bulunmaktadır. Burada 6H örneğinde bağların diğerlerine göre zayıfladığı görülmektedir. Sonuçlar su tutma analizlerini destekler niteliktedir.

❖ Su tutma deneyleri sonrası en iyi orana sahip 4 farklı hidrojel örneği belirlenmiştir. Belirlenen hidrojel örnekleri arasında bağ etkileşimini daha iyi gözlemleyebilmek adına FT-IR spekturumları karşılaştırılmıştır. %5 akrilik akrilik asit oranına sahip hidrojin FT-IR spektrumunda 3294 cm^{-1} pikinde orta-geniş O-H bant aralığında akrilik asit varlığını net bir şekilde görülmüştür. Akrilik asitin geniş bant aralığındaki durumu tarımda kullanılacak hidrojel örnekleri için tercih edilmemektedir. Aljinat miktarının karşılaştırılmasına ait FT-IR spektrumunda 2951 cm^{-1} pikinde bir C-H gerilmi göze çarpmaktadır. Ayrıca 1,5 aljinat kullanılan örnekte farklı olarak 2100 cm^{-1} pikinde ikinci bir C-H bağ gerilimi görülmektedir. Burada aljinatın tekrar deneylerinde daha uzun sürede dengede su tutma sonuçlarını destekler niteliktedir. Öğütülmüş ve ham çamur arasındaki FT-IR spektrumlarında, öğütülmüş çamur örneğinde 2335 cm^{-1} pikinde $\text{C}\equiv\text{C}$ bağ gerilimi göze çarpmaktadır. Farklı olarak yine öğütülmüş çamurda $\text{C}=\text{O}$ çift bağ gerilimi görülmektedir. Parmak izi bölgesinde ise 1195 ve 1303 cm^{-1} piklerinde ise düşük C-O bağ gerilimi olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

- [1] N. Ulusal Bilim Vakfı. Gıda, Enerji ve Su: Matematik ve Fizik Bilimlerinde Dönüştürücü Araştırma Olanakları (2014).
- [2] Bilgin, Ö., Kantarcı, S., ve Çiftçi, H. (2019). Şırnak İli Maden Potansiyelinin Cevher Zenginleştirme Açısından Değerlendirilmesi ve Temiz Kömür Teknolojileri. Şırnak Enerji ve Maden Potansiyeli, 391.
- [3] Scholz, R. W., Ulrich, A. E., Eilittä, M., and Roy, A. (2013). Sustainable use of phosphorus: a finite resource. *Science of the Total Environment*, 461, 799-803.
- [4] Elser, J., Bennett, E. A broken biogeochemical cycle. *Nature* 478, 29–31 (2011).
- [5] Pantano, G., Grosseli, G. M., Mozeto, A. A., and Fadini, P. S. (2016). Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. *Química Nova*, 39, 732-740.
- [6] Pawelec, K., Siwek, H., Kitczak, T., and Włodarczyk, M. (2021). Fertilization with Municipal Wastewater Phosphorus Adsorbed to Alginate Beads: Results from a Pot Experiment with Italian Ryegrass. *Agronomy*, 11(11), 2142.
- [7] Chrispim, M. C., Scholz, M., and Nolasco, M. A. (2019). Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of environmental management*, 248, 109268.
- [8] Salehi, A. A., Ghannadi-Maragheh, M., Torab-Mostaedi, M., Torkaman, R., and Asadollahzadeh, M. (2020). Hydrogel materials as an emerging platform for desalination and the production of purified water. *Separation and Purification Reviews*, 1-20.
- [9] Salehi, A. A., Ghannadi-Maragheh, M., Torab-Mostaedi, M., Torkaman, R., ve Asadollahzadeh, M. (2020). Hydrogel materials as an emerging platform for desalination and the production of purified water. *Separation and Purification Reviews*, 1-20.
- [10] Khan, M., ve Lo, I. M. (2016). A holistic review of hydrogel applications in the adsorptive removal of aqueous pollutants: recent progress, challenges, and perspectives. *Water research*, 106, 259-271.
- [11] Khan, M., ve Lo, I. M. (2016). A holistic review of hydrogel applications in the adsorptive removal of aqueous pollutants: recent progress, challenges, and perspectives. *Water research*, 106, 259-271.
- [12] Pushpamalar, J., Langford, S. J., Ahmad, M. B., Lim, Y. Y., and Hashim, K. (2018). Eco-friendly smart hydrogels for soil conditioning and sustain release fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(10), 2059-2074.
- [13] Abdel-Raouf, M. E., El-Saeed, S. M., Zaki, E. G., and Al-Sabagh, A. M. (2018). Green chemistry approach for preparation of hydrogels for agriculture applications through modification of natural polymers and investigating their swelling properties. *Egyptian journal of petroleum*, 27(4), 1345-1355.

- [14] Calcagnile, P., Sibillano, T., Giannini, C., Sannino, A., and Demitri, C. (2019). Biodegradable poly (lactic acid) /cellulose-based superabsorbent hydrogel composite material as water and fertilizer reservoir in agricultural applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(21), 47546.
- [15] Pan, Z., Guo, H., Yu, H., Wen, G., Qu, F., Huang, T., and he, J. (2021). Sewage sludge ash-based thermo-responsive hydrogel as a novel draw agent towards high performance of water flux and recovery for forward-osmosis. *Desalination*, 512, 115147.
- [16] Cheng, D., Liu, Y., Yang, G., and Zhang, A. (2018). Water-and fertilizer-integrated hydrogel derived from the polymerization of acrylic acid and urea as a slow-release N fertilizer and water retention in agriculture. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(23), 5762-5769.
- [17] Peşkırcioğlu, N. (2016). 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri: Küresel Verimlilik Hareketine Doğru1.
- [18] Jordan Peccia and Paul Westerhoff *Environmental Science and Technology* 2015 49 (14), 8271-8276
- [19] Fytali, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(1), 116-140.
- [20] İRDEMEZ, Ş., YILMAZ, A. E., and ANLATICI, E. (2016). Domestic Wastewater Treatment Sludge Disposal with The Combustion Process of The Thermal Drying-incineration Efficiency Investigation of The Relationship Between Energy. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 6(4), 65-73.
- [21] Goldemund, H. (2004). SOIL DEVELOPMENT AND PROPERTIES| Soil Contamination and Amelioration.
- [22] Singh, R. P., and 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(4), 632-641.
- [23] Yakamercan, E., Ari, A., and Aygün, A. (2021). Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128568.
- [24] Abusoglu, A., Anvari-Moghaddam, A., and Guerrero, J. M. (2019, August). Producing bio-electricity and bio-heat from urban sewage sludge in Turkey using a two-stage process. In *2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)* (pp. 1-4). IEEE.
- [25] FİLİBELİ, A., Azize, A. Y. O. L., and BÜYÜKKAMACI, N. (2022). Arıtma Çamurlarının Yönetimi ve Maliyeti: Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetimi Projesi. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 1(1), 79-90.
- [26] Yakamercan, E., Ari, A., and Aygün, A. (2021). Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128568.

- [27] Zhou, G., Gu, Y., Yuan, H., Gong, Y., and Wu, Y. (2020). Selecting sustainable technologies for disposal of municipal sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: a case study from China. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104881.
- [28] Kapshe, M., Kuriakose, P. N., Srivastava, G., and Surjan, A. (2013). Analysing the co-benefits: case of municipal sewage management at Surat, India. *Journal of Cleaner Production*, 58, 51-60.
- [29] Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A. and Kacprzak, M. J. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge–The current situation. *Journal of environmental management*, 203, 1126-1136.
- [30] Ullah, F., Othman, M. B. H., Javed, F., Ahmad, Z. and Akil, H. M. (2015). Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 57, 414-433.
- [31] Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., and Kacprzak, M. J. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge–The current situation. *Journal of Environmental Management*, 203, 1126-1136.
- [32] Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., ... and Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental research*, 156, 39-46.
- [33] Wiśniowska, E., Grobelak, A., Kokot, P., and Kacprzak, M. (2019). Sludge legislation-comparison between different countries. In *Industrial and municipal sludge* (pp. 201-207). Butterworth-Heinemann.
- [34] Filibeli, A. (1996). *Arıtma çamurlarının işlenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
- [35] Thakur, S., Thakur, V. K., and Arotiba, O. A. (2018). History, classification, properties and application of hydrogels: An overview. *Hydrogels*, 29-50.
- [36] Hejcl A, Lesny P, Pradny M, Michalek J, Jendelova P, Stulik J, Sykova E (2008) Biocompatible hydrogels in spinal cord injury repair. *Physiol Res* 57: S121–S132
- [37] Mano JF, Silva GA, Azevedo HS, Malafaya PB, Sousa RA, Silva S, Boesel LF, Oliveira JM, Santos TC, Marques AP, Neves NM, Reis RL (2007) Natural origin biodegradable systems in tissue engineering and regenerative medicine: present status and some moving trends. *J R Soc Interface* 4:999–1030.
- [38] Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of advanced research*, 6(2), 105-121.
- [39] Singh, V., Tiwari, A., Pandey, S., and Singh, S. K. (2007). Peroxydisulfate initiated synthesis of potato starch-graft-poly (acrylonitrile) under microwave irradiation. *Express Polymer Letters*, 1(1), 51-58.
- [40] Lanthong, P., Nuisin, R., and Kiatkamjornwong, S. (2006). Graft copolymerization, characterization, and degradation of cassava starch-g-acrylamide/itaconic acid superabsorbents. *Carbohydrate Polymers*, 66(2), 229-245.

- [41] Zohuriaan-Mehr, M. J. (2006). Super-absorbents. *Iran Polymer Society, Tehran*, 228, 2-4.
- [42] Ogata, T., Nagayoshi, K., Nagasako, T., Kurihara, S., and Nonaka, T. (2006). Fosfinik asit gruplarına sahip hidrojel boncuklarının sentezi ve lantanit iyonları için adsorpsiyon yeteneği. *Reaktif ve Fonksiyonel Polimerler*, 66 (6), 625-633.
- [43] Sorour, M. H., El Sayed, M. M., Abd El Moneem, N. M., Talaat, H. A., Shaalan, H. F., and El Marsafy, S. M. (2013). Process and financial considerations pertinent to hydrogel manufacture. *Starch-Stärke*, 65(5-6), 527-534.
- [44] Azeera, M., Vaidevi, S., and Ruckmani, K. (2019). Characterization techniques of hydrogel and its applications. In *Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels* (pp. 737-761). Springer, Cham.
- [45] Ladola, M. K. (2014). Superporous hydrogel (SPH): A novel and advanced technique of oral controlled release drug delivery system. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 3(5), 297-319.
- [46] Koschella, A., Hartlieb, M. ve Heinze, T. (2011). Selüloz bazlı hidrojelere “tıklama kimyası” yaklaşımı. *Karbonhidrat Polimerleri*, 86 (1), 154-161.
- [47] Lazim, A. M., Osman, A. H., and Mokhtarom, M. A. R. Y. A. M. (2018). Keboleherapan metilena biru oleh hidrojel selulosa bakteria teradiasi gamma menggunakan isoterma Langmuir dan Freundlich. *Sains Malaysiana*, 47(4), 715-723.
- [48] Berthomieu, C., and Hienerwadel, R. (2009). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis research*, 101(2), 157-170.
- [49] Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods* (pp. 17-43). Woodhead Publishing.
- [50] Spieß, L., Behnken, H., Genzel, C., Schwarzer, R., and Teichert, G. (2009). *Moderne röntgenbeugung* (Vol. 2, pp. p-276). Wiesbaden: Vieweg+ Teubner.
- [51] Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods* (pp. 17-43). Woodhead Publishing.
- [52] Khalil, G. A., Ali, M. A., Harhash, M. M., and ELSegieny, A. M. (2022). Impact of super absorbent polymers (hydrogels) on water use parameters of Plum trees under water stress conditions. *Journal of the Advances in Agricultural Researches*, 27(4), 791-802.
- [53] Li, S., and Chen, G. (2020). Agricultural waste-derived superabsorbent hydrogels: Preparation, performance, and socioeconomic impacts. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119669.
- [54] Madramootoo, C. A., Jain, A., Oliva, C., Wang, Y., and Abbasi, N. A. (2023). Growth and yield of tomato on soil amended with waste paper based hydrogels. *Scientia Horticulturae*, 310, 111752.

- [55] Zhang, Y., Tian, X., Zhang, Q., Xie, H., Wang, B., and Feng, Y. (2022). Hydrochar-embedded carboxymethyl cellulose-g-poly (acrylic acid) hydrogel as stable soil water retention and nutrient release agent for plant growth. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(2), 116-127.
- [56] Zhang, M., Zhang, S., Chen, Z., Wang, M., Cao, J., and Wang, R. (2019). Preparation and characterization of superabsorbent polymers based on sawdust. *Polymers*, 11(11), 1891.
- [57] Zhu, J., Suhaimi, F., Lim, J. Y., Gao, Z., Swarup, S., Loh, C. S., ... and Tan, W. K. (2022). A field study on using soybean waste-derived superabsorbent hydrogel to enhance growth of vegetables. *Science of The Total Environment*, 851, 158141.
- [58] Kolya, H., and Kang, C. W. (2022). Synthesis of starch-based smart hydrogel derived from rice-cooked wastewater for agricultural use. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- [59] Kumar, N., Gusain, R., Pandey, S., and Ray, S. S. (2022). Hydrogel Nanocomposite Adsorbents and Photocatalysts for Sustainable Water Purification. *Advanced Materials Interfaces*, 2201375.
- [60] Bres, W., & Weston, L. A. (1993). Influence of gel additives on nitrate, ammonium, and water retention and tomato growth in a soilless medium. *HortScience*, 28(10), 1005-1007.
- [61] Tyliczszak, B., Polaczek, J., and Pielichowski, K. (2009). PAA-Based Hybrid Organic-Inorganic Fertilizers with Controlled Release. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(3).
- [62] El Salmawi, K. M. (2007). Application of polyvinyl alcohol (PVA)/carboxymethyl cellulose (CMC) hydrogel produced by conventional crosslinking or by freezing and thawing. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 44(6), 619-624.
- [63] Van Bemmelen, J. M. (1894). Das hydrogel und das krystallinische hydrat des kupferoxyds. *Zeitschrift für anorganische Chemie*, 5(1), 466-483.
- [64] Buwalda, S. J., Boere, K. W., Dijkstra, P. J., Feijen, J., Vermonden, T., & Hennink, W. E. (2014). Hydrogels in a historical perspective: From simple networks to smart materials. *Journal of controlled release*, 190, 254-273.
- [65] Cascone, MG, Sim, B. ve Sandra, D. (1995). Büyüme hormonu için ilaç verme sistemleri olarak sentetik ve doğal polimerlerin karışımları. *Biyomateryaller* , 16 (7), 569-574.
- [66] Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Fraceto, L. F., and Singh, B. (2015). Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals. *Agronomy for sustainable development*, 35(1), 47-66.
- [67] Qamruzzaman, M., Ahmed, F., Mondal, M., and Ibrahim, H. (2022). An overview on starch-based sustainable hydrogels: Potential applications and aspects. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(1), 19-50.
- [68] Thakur, S., Chaudhary, J., Kumar, V., and Thakur, V. K. (2019). Progress in pectin based hydrogels for water purification: Trends and challenges. *Journal of environmental management*, 238, 210-223.

- [69] Wu, L., and Liu, M. (2008). Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention. *Carbohydrate Polymers*, 72(2), 240-247.
- [70] Paulino, AT, Pereira, AG, Fajardo, AR, Erickson, K., Kipper, MJ, Muniz, EC, ... and Tambourgi, EB (2012). Doğal polimer bazlı manyetik hidrojeller: Uzaktan kontrollü ilaç salınımı için potansiyel vektörler. *Karbonhidrat polimerleri*, 90 (3), 1216-1225.
- [71] Thakur, S., Thakur, V. K., and Arotiba, O. A. (2018). History, classification, properties and application of hydrogels: An overview. *Hydrogels*, 29-50.
- [72] AOUADA, F. A., and MATTOSO, L. H. C. (2009). Hidrogéis biodegradáveis: uma opção na aplicação como veículos carreadores de sistemas de liberação controlada de pesticidas.
- [73] Zonatto, F., Muniz, E. C., Tambourgi, E. B., and Paulino, A. T. (2017). Adsorption and controlled release of potassium, phosphate and ammonia from modified Arabic gum-based hydrogel. *International journal of biological macromolecules*, 105, 363-369.
- [74] Aouada, F. A., Moura, M. R. D., Menezes, E. D. A., Nogueira, A. R. D. A., and Mattoso, L. H. C. (2008). Síntese de hidrogéis e cinética de liberação de amônio e potássio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1643-1649.
- [75] Wen, P., Han, Y., Wu, Z., He, Y., Ye, B. C., and Wang, J. (2017). Rapid synthesis of a corn cob-based semi-interpenetrating polymer network slow-release nitrogen fertilizer by microwave irradiation to control water and nutrient losses. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(7), 922-934.
- [76] Khoerunnisa, F., Sonjaya, Y., and Chotimah, N. (2016). Physical and chemical characteristics of alginate-poly (vinyl alcohol) based controlled release hydrogel. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 4863-4869.
- [77] Tomadoni, B., Casalongué, C., and Alvarez, V. A. (2019). Biopolymer-based hydrogels for agriculture applications: swelling behavior and slow release of agrochemicals. In *Polymers for Agri-food applications* (pp. 99-125). Springer, Cham.
- [78] Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F., ... and Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 72, 365-385.
- [79] Michalik, R., and Wandzik, I. (2020). A mini-review on chitosan-based hydrogels with potential for sustainable agricultural applications. *Polymers*, 12(10), 2425.
- [80] Lim, H. P., Ooi, C. W., Tey, B. T., and Chan, E. S. (2017). Controlled delivery of oral insulin aspart using pH-responsive alginate/ κ -carrageenan composite hydrogel beads. *Reactive and Functional Polymers*, 120, 20-29.
- [81] Zhang, Q., Yu, G., Zhou, Q., Li, J., Feng, Y., Wang, L., ... and Peng, Y. (2020). Eco-friendly interpenetrating network hydrogels integrated with natural soil colloid as a green and sustainable modifier for slow release of agrochemicals. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122060.

- [82] Motamedi, E., Motesharezedeh, B., Shirinfekr, A., and Samar, S. M. (2020). Synthesis and swelling behavior of environmentally friendly starch-based superabsorbent hydrogels reinforced with natural char nano/micro particles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103583.
- [83] Das, S. K., and Ghosh, G. K. (2022). Hydrogel-biochar composite for agricultural applications and controlled release fertilizer: A step towards pollution free environment. *Energy*, 242, 122977.
- [84] Chandrika, K. P., Singh, A., Sarkar, D. J., Rathore, A., and Kumar, A. (2014). pH-sensitive crosslinked guar gum-based superabsorbent hydrogels: Swelling response in simulated environments and water retention behavior in plant growth media. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(22).
- [85] Thombare, N., Mishra, S., Siddiqui, M. Z., Jha, U., Singh, D., and Mahajan, G. R. (2018). Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications. *Carbohydrate polymers*, 185, 169-178.
- [86] Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Dawiec-Liśniewska, A., Podstawczyk, D., Mikula, K., and Chojnacka, K. (2019). Immobilization of biosorbent in hydrogel as a new environmentally friendly fertilizer for micronutrients delivery. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118387.
- [87] Jamnongkan, T., and Kaewpirom, S. (2010). Potassium release kinetics and water retention of controlled-release fertilizers based on chitosan hydrogels. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(3), 413-421.
- [88] Sabadini, R. C., Martins, V. C., and Pawlicka, A. (2015). Synthesis and characterization of gellan gum: chitosan biohydrogels for soil humidity control and fertilizer release. *Cellulose*, 22(3), 2045-2054.
- [89] Nangia, S., Warkar, S., and Katyal, D. (2018). A review on environmental applications of chitosan biopolymeric hydrogel based composites. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 55(11-12), 747-763.
- [90] Kaith, B. S., Jindal, R., and Kapur, G. S. (2013). Enzyme-based green approach for the synthesis of gum tragacanth and acrylic acid cross-linked hydrogel: its utilization in controlled fertilizer release and enhancement of water-holding capacity of soil. *Iranian Polymer Journal*, 22(8), 561-570.
- [91] Abdallah, A. M. (2019). The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress. *International soil and water conservation research*, 7(3), 275-285.
- [92] Skrzypczak, D., Jarzembowski, Ł., Izydorczyk, G., Mikula, K., Hoppe, V., Mielko, K. A., ... and Witek-Krowiak, A. (2021). Hydrogel Alginate Seed Coating as an Innovative Method for Delivering Nutrients at the Early Stages of Plant Growth. *Polymers*, 13(23), 4233.
- [93] El-Mohdy, A., Hegazy, E. A., El-Nesr, E. M., and El-Wahab, M. A. (2011). Control release of some pesticides from starch/(ethylene glycol-co-methacrylic acid) copolymers prepared by γ -irradiation. *Journal of Polymer Research*, 18(6), 1605-1615.

- [94] Khoerunnisa, F., Sonjaya, Y., and Chotimah, N. (2016). Physical and chemical characteristics of alginate-poly (vinyl alcohol) based controlled release hydrogel. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 4863-4869.
- [95] Rabat, N. E., Hashim, S., and Majid, R. A. (2016). Effect of different monomers on water retention properties of slow release fertilizer hydrogel. *Procedia engineering*, 148, 201-207.
- [96] Karunarathna, M. J. S., Bailey, K. M., Ash, B. L., Matson, P. G., Wildschutte, H., Davis, T. W., ... and Ostrowski, A. D. (2020). Nutrient capture from aqueous waste and photocontrolled fertilizer delivery to tomato plants using Fe (III)–polysaccharide hydrogels. *ACS omega*, 5(36), 23009-23020.
- [97] Singh, J., and Dhaliwal, A. S. (2020). Water retention and controlled release of KCl by using microwave-assisted green synthesis of xanthan gum-cl-poly (acrylic acid)/AgNPs hydrogel nanocomposite. *Polymer Bulletin*, 77(9), 4867-4893.
- [98] Cheng, S., Zeng, W., Liu, X., Zhao, J., Qiu, X., and Lei, Z. (2020). Anti-evaporation performance of water in soil of superabsorbent resin with fast water absorption rate. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(6), 1-15.
- [99] Pawelec, K., Siwek, H., Kitzak, T., and Włodarczyk, M. (2021). Fertilization with Municipal Wastewater Phosphorus Adsorbed to Alginate Beads: Results from a Pot Experiment with Italian Ryegrass. *Agronomy*, 11(11), 2142.
- [100] Dhiman, J., Prasher, S. O., ElSayed, E., Patel, R. M., Nzediegwu, C., and Mawof, A. (2021). Effect of hydrogel based soil amendments on yield and growth of wastewater irrigated potato and spinach grown in a sandy soil. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101730.
- [101] Çokgör, E. U., PEHLİVANOĞLU-MANTAŞ, E., TAŞ, D. O., Insel, G., Aydin, E., ÖLMEZ-HANCI, T., and Görgün, E. (2010). Biyolojik arıtma çamurlarının aerobik stabilizasyonunun değerlendirilmesi. *Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi*, 20(1), 57-65.
- [102] Minden, V., Schaller, J., and Olde Venterink, H. (2021). Plants increase silicon content as a response to nitrogen or phosphorus limitation: a case study with *Holcus lanatus*. *Plant and Soil*, 462, 95-108.
- [103] Ågren, GI (2008). Doğal topluluklarda bitki büyümesinin stokiyometrisi ve beslenmesi. *Yıllık ekoloji, evrim ve sistematigi incelemesi* , 39 , 153-170.
- [104] Russo, C., Stanzione, F., Tregrossi, A., and Ciajolo, A. (2014). Infrared spectroscopy of some carbon-based materials relevant in combustion: qualitative and quantitative analysis of hydrogen. *Carbon*, 74, 127-138.
- [105] Galvez, A., Herlin-Boime, N., Reynaud, C., Clinard, C., and Rouzaud, J. N. (2002). Carbon nanoparticles from laser pyrolysis. *Carbon*, 40(15), 2775-2789.
- [106] Magdziarz, A., Wilk, M., Gajek, M., Nowak-Woźny, D., Kopia, A., Kalemba-Rec, I., and Koziński, J. A. (2016). Properties of ash generated during sewage sludge combustion: A multifaceted analysis. *Energy*, 113, 85-94.
- [107] Abrego, J., Arauzo, J., Sánchez, J. L., Gonzalo, A., Cordero, T., Rodríguez-Mirasol, J. (2009). "Structural changes of sewage sludge char during fixed-bed pyrolysis". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(6), 3211–3221.

- [108] Xiao, Q., Gu, X., and Tan, S. (2014). Drying process of sodium alginate films studied by two-dimensional correlation ATR-FTIR spectroscopy. Food chemistry, 164, 179-184.
- [109] Yilgor, I., Yilgor, E., Guler, I. G., Ward, T. C., and Wilkes, G. L. (2006). FTIR investigation of the influence of diisocyanate symmetry on the morphology development in model segmented polyurethanes. Polymer, 47(11), 4105-4114.
- http-1:** <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/8c6cb9a2-92d6-46af-ab9b-76efed348ae8-8f3a5dcf> (Erişim tarihi: 04.05.2023)
- http-2:** <https://www.resmigazete.gov.tr/> (Erişim tarihi: 16.12.2022)
- http-3:** <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/333bd7a9-e4da-4341-b0d9-4b5c59c26204-8f3ca519> (Erişim tarihi: 04.05.2023)
- http-4:** <https://data.tuik.gov.tr/bulten/index?p=belediye-atiksu-istatistikleri-2018-30667> (Erişim tarihi: 17.11.2021)
- http-5:** <http://dspace.ceid.org.tr/xmlui/bitstream/handle/1/831/OnbirinciKalkinmaPlani.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Erişim tarihi: 15.11.2021)
- http-6:** <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/05/20050531-6.htm> (Erişim tarihi: 16.03.2023)
- http-7:** <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=13887&MevzuatTur=7&MevzuatTeMevz=5> (Erişim tarihi: 16.03.2023)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID ID : 0009-0006-5709-4505

Adı Soyadı : Nuray IŞIKEL

EĞİTİM BİLGİLERİ

2020, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği

2023, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği
Anabilim Dalı/ Çevre Teknolojisi Bilim Dalı (Tezli) (YL)

İŞ DENEYİMLERİ

ESKİ Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisi/ Haziran, 2017 (Staj)

Eskişehir Tepebaşı Belediyesi/ Eylül, 2019 (Staj)

BAŞARILAR / EĞİTİMLER

Auto-Cad (Elginkan Vakfı)

İş ve İnsan İlişkileri (Elginkan Vakfı)

Proje Yönetimi (Elginkan Vakfı)

PROJELER / YAYINLAR

TÜBİTAK 4004 Doğa Eğitimi ve Bilim Okulları Projesi, Geleceğin Yeşil Yakalıları,
Proje No: 121B497- Eğitimci

2210-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı 2021/1 – Proje No:
1649B022113746 - Bursiyer