



Şeker Fabrikası Kalsiyum Karbonat Atığının Adsorpsiyon ile AKM ve Renk Giderimine Olan Etkisinin İncelenmesi

Burak Güngörmüş^{1*}, Mesut Yaşar¹

¹ Varaka Kağıt Sanayi A.Ş., Balıkesir, Türkiye

E-Posta: burak.gungormus@varaka.com, mesut.yasar@varaka.com

Gönderim 04.12.2024; Kabul 16. 04.2025

Özet: Bu çalışmanın amacı, şeker fabrikalarından elde edilen kalsiyum karbonat atığının atık su arıtımındaki etkilerini incelemektir. Kalsiyum karbonat atığı, şeker üretimi sırasında oluşan ve çevreye zarar verebilecek potansiyele sahip bir atık türüdür. Bu çalışmada, en optimum bulunan kalsiyum karbonat miktarı 6 g/L olarak seçilmiş ve bu koşullarda adsorpsiyon kapasitesi 65,33 mg/gr olarak hesaplanmıştır. Kalsiyum karbonat, su arıtımında özellikle askıda katı maddeler (AKM) ve renk giderimi gibi kirleticilerin temizlenmesinde etkili bir adsorban olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda, bu atığın adsorban olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmalar artmış ve çevre dostu çözümler sunduğu gösterilmiştir.

Araştırma, şeker fabrikası atığının atık su arıtımında nasıl bir çözüm sunduğunu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından katkı sağladığını incelemektedir. Çalışma, endüstriyel atıkların geri dönüştürülerek alternatif adsorbent malzeme olarak atık su arıtımında kullanılmasının, maliyetleri düşürerek çevresel sürdürülebilirliği artırabileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar, atık yönetimi ve atık su arıtımı alanlarında yeni uygulamalar için önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Şeker Fabrikası, kalsiyum karbonat atığı, adsorpsiyon, su arıtımı, askıda katı madde

Investigation of the Effect of Sugar Factory Calcium Carbonate Waste on Suspended Solids (SS) and Color Removal Through Adsorption

Received 04.12.2024; Accepted 16. 04.2025

Abstract: The aim of this study is to investigate the effects of calcium carbonate waste, obtained from sugar factories, in wastewater treatment. Calcium carbonate waste is a byproduct that occurs during sugar production and has the potential to cause environmental harm. In this study, the optimum amount of calcium carbonate was selected as 6 g/L, and under these conditions, the adsorption capacity was calculated to be 65.33 mg/g. Calcium carbonate is used as an effective adsorbent in wastewater treatment, particularly for the removal of suspended solids (SS) and color pollutants. In recent years, studies on the use of this waste as an adsorbent have increased, showing that it provides environmentally friendly solutions.

This research examines how the sugar factory waste offers a solution for water treatment and contributes to environmental sustainability. The study demonstrates that recycling industrial waste to be used as an alternative adsorbent material in wastewater treatment can reduce costs and enhance environmental sustainability. The results obtained in this study provide valuable insights for new applications in waste management and water treatment.

Key Words: Sugar factory, calcium carbonate waste, adsorption, water treatment, suspended solids

GİRİŞ

Şeker fabrikaları, dünya çapında yaygın olarak faaliyet gösteren ve şeker üretimi sırasında önemli miktarda atık üreten endüstriyel tesislerdir. Bu atıkların başında, şekerin saflaştırılmasında kullanılan kalsiyum karbonat yer almaktadır. Şeker üretiminde, pancar suyu saflaştırılırken kireç (CaO) ve karbondioksit (CO₂) kullanılır. Bu işlem sırasında kalsiyum karbonat çökeltir ve pres filtre keki (PFK) olarak adlandırılan atıklar oluşur. [1]. Kalsiyum karbonat atığı, şeker üretimi sırasında oluşan ve çevreye zarar verebilecek potansiyele sahip bir atık türüdür (Şekil 1.). Bu tür atıkların etkin bir şekilde yönetilmesi, çevresel sürdürülebilirlik için büyük önem taşır. Çevre kirliliğini azaltma ve endüstriyel atıkları geri dönüştürme gerekliliği, bu alandaki araştırmaların artmasına neden olmuştur [2].

*İlgili E-posta / Corresponding E-mail: burak.gungormus@varaka.com (ORCID: 0009-0006-7951-7839)



Şekil 1. Kalsiyum karbonat atığı

Kalsiyum karbonat atığı, su arıtma süreçlerinde etkili bir adsorban olarak kullanılabilecek potansiyele sahip bir malzemedir.

Adsorpsiyon, su arıtımında etkin bir yöntem olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, suyun içerisinde bulunan kirleticilerin, özellikle askıda katı maddeler (AKM) ve renklerin giderilmesinde etkili bir çözüm sunar. Kalsiyum karbonat atığı, adsorpsiyon sürecinde bu kirleticileri adsorplama kapasitesiyle suyun temizlenmesine katkı sağlar. Yapılan araştırmalar, kalsiyum karbonat atığının uygun koşullarda, geleneksel adsorbanlarla benzer veya hatta daha yüksek verimle kullanılabileceğini göstermektedir. Bu da, su arıtma süreçlerinde daha verimli ve ekonomik alternatiflerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. [3]. Son yıllarda, kalsiyum karbonat atığının adsorpsiyon yöntemiyle su arıtımında kullanılabileceği üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. Kalsiyum karbonatın, su arıtma süreçlerinde adsorban olarak kullanılması, hem çevre dostu bir çözüm sağlamakta hem de bu atıkların geri dönüşümüne katkı sunmaktadır [4]. Bu bağlamda, adsorpsiyon süreci, kalsiyum karbonat atığının değerli bir kaynak haline gelmesini sağlayarak çevresel etkiyi azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, şeker fabrikalarından elde edilen kalsiyum karbonat atığının su arıtımındaki etkilerini incelemektir. Özellikle AKM ve renk giderimi üzerindeki etkilerin araştırılması, şeker fabrikası atıklarının çevre dostu çözümler olarak kullanılabileceğini gösterebilir.

Adsorpsiyon yönteminin, kalsiyum karbonat atığı ile birlikte su arıtımında nasıl etkili bir çözüm sunduğu üzerine yapılan incelemeler, endüstriyel atıkların işlenmesine dair potansiyel çözümler ortaya koymaktadır. Bu çalışma ayrıca, endüstriyel su arıtımında maliyetleri azaltma ve çevresel sürdürülebilirliği artırma gibi yeni yöntemlerin uygulanabilirliğini de gözler önüne serecektir. Sonuçlar, atık yönetimi ve su arıtımı alanlarında yeni uygulamalar için önemli bilgiler sağlayarak, çevresel sorunların çözülmesine katkıda bulunabilir. Endüstriyel atıkların geri dönüşümünün teşvik edilmesi, hem çevre sağlığını korumaya yönelik önemli bir adım hem de sanayi süreçlerinin daha sürdürülebilir hale gelmesine olanak tanıyacaktır.

Literatür, mevcut çalışmalarla ilgili genel bir bakış sunarak bu araştırmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

Alaryan 2022, yaptığı çalışmada, Konya II. Organize Sanayi Bölgesindeki düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerinin şeker pancarı üretimi sırasında ortaya çıkan pres filtre atık kireç çamuru (PKF) ile stabilizasyonunu incelemiştir. Çeşitli oranlarda PKF, çimento ve kireç kullanılarak zeminlerin basınç mukavemeti, kayma mukavemeti, oturma ve permeabilite değerleri araştırılmıştır. Sonuçlar, PKF katkısının zeminlerin dayanıklılığını artırıp, şişme potansiyelini azaltarak, oturma miktarını düşürdüğünü göstermektedir. Bu bulgular, PKF'nin killi zeminlerin stabilizasyonu ve altyapı projelerinde kullanımı için uygun bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır[5].

İşleyen 2021, yaptığı çalışmada, şeker fabrikalarından elde edilen karbonatlama çamurunun hammadde olarak kullanılmasını ve bu atıktan hidroksiapatit (HAP) nanokristallerinin üretimini incelemektedir. Karbonatlama çamuru, yüksek kalsiyum karbonat içeriği nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanıma uygun bir atık olsa da, genellikle çimento fabrikalarına dolgu maddesi olarak verilmektedir. Ancak, bu atığın doğrudan fabrikaların bulunduğu yerlerde kullanımı mümkün değildir. Çalışmada, karbonatlama çamurunun safsızlıklarının giderilmesi için EDTA kullanılarak saflaştırma

işlemi gerçekleştirilmiştir. Saflaştırma işlemi, istatistiksel deney tasarımı ve Box-Behnken yöntemi ile optimize edilmiştir. Optimum işletme koşulları, EDTA kütle kesri %0.6, sıcaklık 75 °C ve süre 1.5 saat olarak belirlenmiştir. Sonrasında, saflaştırılmış karbonatlama çamurundan fosforik asit kullanılarak yaş kimyasal çöktürme yöntemi ile HAP üretimi yapılmıştır. Üretilen HAP'in karakterizasyonu ICP-OES, FTIR ve XRD analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma, karbonatlama çamuru atığının, hidroksiapatit üretimi için uygun bir kaynak olabileceğini ve bu malzemenin doku mühendisliği, ortopedi, çene-yüz ve diş tedavileri gibi çeşitli sağlık alanlarında kullanılabileceğini göstermektedir[6].

Tunçez 2007, yaptığı çalışmada, şeker fabrikası atık çamuru ve pomzanın toprak iyileştirici olarak toprak özellikleri ve bitki gelişimi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Konya'nın mısır yetiştirilen üç farklı bölgesinden alınan toprak örnekleri üzerinde sera denemesi yapılmıştır. Tesadüf parsellerinde yürütülen deneme, üç tekerrürlü olarak dört farklı dozda (0, 4, 8, 16 ton/da) çamur ve pomza eklenerek gerçekleştirilmiştir. Deneme bitkisi olarak Pionner 32K61 cinsi silajlık mısır kullanılmış ve hasat sonrası bitki büyüme parametreleri (bitki boyu, sap kalınlığı, yaprak sayısı vb.) ile toprak analizleri yapılmıştır. İstatistiksel analizler sonucunda, uygulama dozları ile bitki büyüme özellikleri arasında anlamlı ilişkiler tespit edilmiştir. En yüksek verim, Atlantı ve Hayroğlu topraklarında 16 ton/da pomza, Karapınar toprağında ise 16 ton/da pomza + çamur uygulaması ile elde edilmiştir [7].

Erener 1997, yapmış olduğu çalışmada, şeker fabrikası atığı döner çamurunun (DÇ) yumurta tavuğu rasyonlarında kalsiyum kaynağı olarak kullanımını değerlendirmiştir. 26 haftalık yemleme ve 15 günlük kalsiyum dengesi denemelerinde, 24 ve 41 haftalık toplam 354 Babcock B-300 hibrit tavuk kullanılmıştır. Mermer tozu (MT) yerine DÇ'nin kalsiyum açığının %0, 20, 40, 60, 80 ve 100'ünü karşılayacak şekilde eklendiği altı rasyon incelenmiştir. Sonuçlara göre yumurta verimi, yem tüketimi, yemden yararlanma oranı, kabuk kalınlığı ve kemik mineral içeriği bakımından gruplar arasında anlamlı farklar bulunmuştur ($P<0.01$), ancak yumurta ağırlığı ve şekil indeksi etkilenmemiştir ($P>0.05$). Kalsiyum tutumu açısından gruplar arasında önemli farklar tespit edilmiştir ($P<0.01$). Sonuç olarak, rasyonlarda kalsiyum açığının %20'si MT yerine DÇ ile ikame edilebilir[8].

Literatürden de görüleceği üzere konu ile ilgili yapılan farklı çalışmalar olmasına rağmen, su arıtımında kullanım çalışmaları oldukça az seviyededir. Çalışma kapsamında kalsiyum karbonatın fiziksel ve kimyasal özellikleri, özellikle su arıtımında adsorban olarak kullanılabilirliği üzerinde durulacaktır. Kalsiyum karbonat atığı, şeker üretimi sırasında oluşan ve çevreye zarar verebilecek potansiyele sahip bir atık türüdür. Kalsiyum karbonatın su arıtımındaki etkinliğini değerlendiren araştırmalar, bu atığın adsorpsiyon kapasitesinin yüksek olduğunu ve çeşitli kirleticileri uzaklaştırmada etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir [9]. Ayrıca, kalsiyum karbonat atığının, aktif karbon, zeolit, bentonit gibi geleneksel adsorbanlarla karşılaştırıldığında çevre dostu bir alternatif olabileceği tartışılacaktır.

Adsorpsiyon, su arıtımında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Literatürdeki çalışmalar, özellikle askıda katı maddeler ve renk giderimi gibi kirleticilerin giderilmesinde adsorpsiyonun etkili bir yöntem olarak öne çıktığını ve bu yöntemin çevresel etkileri üzerinde durulacağını göstermektedir. Şeker fabrikalarında ortaya çıkan kalsiyum karbonat atığının geri dönüşümü ve çevre dostu bir çözüm olarak kullanımı üzerinde yapılan önceki araştırmalar incelenecek ve bu atığın su arıtımında kullanılarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayıp sağlamadığı tartışılacaktır [10]. Şeker fabrikalarında üretilen bu tür endüstriyel atıkların yönetilmesi, çevreye zarar vermemesi için büyük önem taşımaktadır. Bu atıkların geri dönüştürülmesi, şeker fabrikalarının çevresel etkilerini azaltarak, çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Kalsiyum karbonat atığının, su arıtımında kullanılmasının, bu atıkların çevreye olan etkilerini azaltırken aynı zamanda endüstriyel su arıtımında maliyetleri de düşürebileceği değerlendirilmiştir. Bu araştırma, endüstriyel atıkların su arıtımında nasıl bir çözüm sunduğunu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından nasıl katkı sağladığını araştırarak, bu alandaki yeni uygulamalar için önemli bilgiler sunmaktadır.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, şeker fabrikalarından elde edilen kalsiyum karbonat (CaCO_3) atığının su arıtımındaki etkinliğini incelemek amacıyla adsorpsiyon yöntemi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sunulmaktadır. Araştırma, laboratuvar ortamında çeşitli parametrelerin etkilerini gözlemlemek ve kalsiyum karbonat atığının su arıtımındaki etkinliğini analiz etmek amacıyla tasarlanmıştır. Çalışma, şeker fabrikalarından temin edilen kalsiyum karbonat atığının su arıtımındaki potansiyelini keşfetmek

ve alternatif adsorban olarak kullanımını araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan materyaller;

Kalsiyum karbonat atığı, şeker üretimi sırasında oluşan ve çevreye zarar verebilecek potansiyele sahip bir atık türüdür. Bu çalışmada kullanılan kalsiyum karbonat atığı, şeker fabrikalarından temin edilerek önceden kurutulmuş ve ince toz formuna getirilmiştir. Su arıtma süreçlerinde, kalsiyum karbonat, pH seviyesine bağlı olarak suyun içerisindeki çeşitli kirleticilerle reaksiyona girer ve bu kirleticilerin çökmesini sağlar. Bu sayede, suyun temizlenmesine ve arıtılmasına katkı sağlanır [4]. Ayrıca kalsiyum karbonat atığı ağır metallerle kimyasal tepkimeler oluşturur (Eşitlik 1-9.). Bu tepkimeler;



Bu tepkimeler, kalsiyum karbonatın çözeltideki ağır metal iyonlarıyla tepkimeye girerek çözünmeyen karbonat bileşikleri oluşturduğu durumları temsil eder. Çözeltiler, çözeltiden ayrışmaları için çökeltme veya filtrasyon gibi yöntemlerle sudan uzaklaştırılabilir.

Deneysel düzenek: Bu çalışmada, adsorpsiyon süreçlerini değerlendirmek amacıyla batch (yığın) deneyleri uygulanmıştır. Deneysel düzenek, kalsiyum karbonat atığının su örneği ile karıştırılarak adsorpsiyonun sağlanmasına dayanmaktadır. Deneylerde, belirli oranlarda seçilen adsorban maddeler, jar test düzenğinde 50-750 rpm karıştırma hızında 1'er saatlik aralıklarla karıştırılmıştır. Bu karıştırma işlemi, adsorpsiyon sürecini hızlandırmak ve kirleticilerin adsorban yüzeyine bağlanmasını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda numuneler, karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra 1 gün boyunca bekletilmiş ve bu süre zarfında çökeltme gerçekleşmiştir. Ardından, numuneler analiz edilerek, adsorpsiyon sürecinin etkinliği ve suyun kalitesindeki değişiklikler değerlendirilmiştir. Bu düzenek, adsorbanın su arıtma üzerindeki etkisini test etmek ve en uygun koşulları belirlemek amacıyla kullanılan basit ve etkili bir yöntem olarak tasarlanmıştır.

Su örnekleri, atık su arıtma tesisinin dengeleme havuzundan alınmıştır. Kağıt üretiminden kaynaklanan atıksularda, özellikle askıda katı madde (AKM) miktarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüksek askıda katı madde miktarı, mevcut arıtma prosesi içerisinde daha fazla koagülant ve flokülant kullanımını zorunlu kılmaktadır. Koagülant ve flokülantların aşırı kullanımı, hem maliyetlerin artmasına hem de işlemin verimliliğinin düşmesine neden olabilmektedir. Bu durum, geleneksel su arıtma yöntemlerinin etkinliğini sınırlamakta ve çevresel etkileri artırmaktadır. Dolayısıyla, bu tür atıksularda daha sürdürülebilir ve ekonomik alternatiflerin bulunması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, alternatif arıtma yöntemlerinin araştırılması önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Kağıt atıksularındaki yüksek askıda katı madde miktarının giderilmesi, su arıtma verimliliğini artırma ve kullanılan kimyasalların miktarını azaltma açısından kritik bir hedef olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, şeker fabrikalarından elde edilen kalsiyum karbonat atığı gibi doğal ve ekonomik adsorbanların potansiyeli incelenmiştir. Adsorpsiyon yöntemlerinin bu tür atıksularda, özellikle askıda katı madde miktarını verimli bir şekilde azaltabilme kapasitesi, alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Kalsiyum karbonat atığının, bu arıtma süreçlerinde etkili bir adsorban olarak kullanılması, çevresel ve ekonomik açıdan önemli faydalar sağlayabilir.

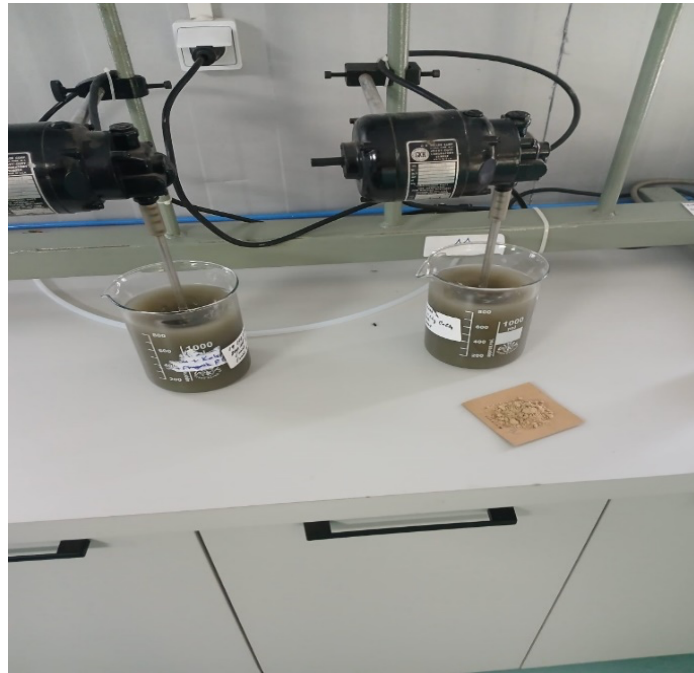
Kimyasallar: Kullanılacak adsorbanın, yardımcı kimyasallar (örneğin, polialüminyum klorür (PAC) ve anyonik polielektrolit (P.E.)) ile birlikte kullanılması üzerine yapılacak çalışmalar, tesisin verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Bu tür kombinasyonlar, adsorpsiyon sürecinin etkinliğini optimize ederek, su arıtma işlemlerinin verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. PAC, koagülant olarak, partiküllerin bir araya gelmesini sağlayarak büyük floklar oluştururken, P.E. ise flokların daha stabil hale gelmesini ve çökeltme işleminin hızlanmasını destekler. Kalsiyum karbonat atığı gibi doğal

adsorbanlar ile bu kimyasalların kombinasyonu, adsorpsiyon kapasitesini önemli ölçüde artırabilir ve böylece atık su arıtımında daha verimli bir sistem sağlanabilir. Ayrıca, yardımcı kimyasalların doğru oranlarda kullanılması, çamur oluşumunu kontrol altında tutarak, su arıtma prosesinin çevresel etkilerini azaltabilir ve işletme maliyetlerini optimize edebilir. Bu nedenle, PAC ve P.E. gibi kimyasalların, kalsiyum karbonat atığı ile birleşerek su arıtma sistemlerinde kullanılabilirliği, mevcut su arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi için önemli bir alan olarak öne çıkmaktadır.

Adsorpsiyon süreci: Deneylerde, belirli bir miktarda kalsiyum karbonat atığı, farklı konsantrasyonlar ve sürelerde su örneklerine eklenmiş ve karıştırılmıştır. Bu süreçte, adsorpsiyon süresi ve adsorban miktarı, önceki çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda optimize edilmiştir [4]. Adsorpsiyonun etkinliğini artırmak amacıyla, çeşitli konsantrasyonlar ve karıştırma süreleri kullanılarak, adsorbanın suyun içerisindeki kirleticilerle etkileşimi sağlanmıştır. Bu deneysel düzenek, kalsiyum karbonat atığının su arıtma sürecindeki etkinliğini belirlemek ve optimum koşulları saptamak için önemli bir aşama olarak tasarlanmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar, adsorpsiyon sürecinin, kirleticilerin giderilmesinde önemli bir rol oynadığını ve farklı parametrelerin bu süreç üzerinde nasıl etkili olduğunu göstermektedir.

pH ve sıcaklık koşulları: Adsorpsiyon deneylerinde, pH seviyeleri 5 ile 8 arasında değiştirilmiştir. Bu pH aralığı, suyun içerisindeki kirleticilerle olan etkileşimi ve adsorpsiyon verimliliğini optimize etmek amacıyla seçilmiştir. Bu koşullar altında, su örneklerinin rengindeki değişiklikler ve askıda katı madde (AKM) değerlerindeki azalmalar gözlemlenmiştir. pH seviyesi, adsorpsiyon sürecinin etkinliği üzerinde doğrudan etkili olabileceğinden, bu parametrenin farklı seviyelerde test edilmesi önemli olmuştur. Ayrıca, adsorpsiyon deneyleri oda sıcaklığında ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık koşulu, deneysel düzende kullanılan su örneklerinin doğal koşullar altında daha realist bir şekilde analiz edilmesini sağlamıştır. Sıcaklık, adsorpsiyon hızını ve verimliliğini etkileyebilecek bir diğer önemli parametre olarak dikkate alınmıştır.

Karıştırma ve filtrasyon: Karıştırma işlemi, karıştırıcıda sabit bir hızda (50-750 rpm) gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Karıştırma işlemleri

Analiz Yöntemleri

Askıda Katı Madde (AKM) analizi, su örneklerindeki askıda bulunan katı maddelerin miktarını belirlemek için yapılan bir analiz yöntemidir. Bu çalışmada, AKM değerlerinin belirlenmesi için spektrofotometrik yöntem kullanılmıştır. Spektrofotometri, bir maddeye ışık gönderildiğinde, bu ışığın ne kadarının geçebileceğini ölçen bir tekniktir. Su örneğindeki askıda katı maddelerin, ışığın geçişine

olan etkisi gözlemlenir. Yani, ışığın ne kadarının emildiği ya da ne kadarının geçebildiği hesaplanarak, suyun içerisindeki askıda katı madde miktarı belirlenir.

Renk giderimi, bu analizde önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Renk, genellikle 410 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Bu, suyun içerisindeki renkli maddelerin ışığı bu dalga boyunda ne kadar emdiğini gösteren bir ölçümdür. Bu ölçüm, suyun rengindeki değişiklikleri anlamak ve renk giderimi oranını hesaplamak için kullanılmıştır. Renk giderimi, su örneğinde bulunan renkli maddelerin ne kadarının arıtıldığını gösteren bir oran olarak hesaplanır. Çalışmada, kalsiyum karbonat (CaCO_3) kullanılarak yapılan denemelerde, sadece CaCO_3 kullanıldığında renk giderimi %44,59 olarak ölçülmüştür. Bu, CaCO_3 adsorbanının suyun rengini %44,59 oranında azaltabildiği anlamına gelir. Ancak, polialüminyum klorür (PAC) ve anyonik polielektrolit (P.E.) gibi yardımcı kimyasallar ile birlikte kullanıldığında, renk giderimi oranı %95'e çıkmıştır. Bu sonuç, PAC ve P.E. gibi yardımcı kimyasalların, sadece CaCO_3 ile yapılan arıtma işlemlerine göre çok daha etkili olduğunu ve suyun rengini büyük ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu şekilde, AKM ve renk giderimi analizleri, su arıtma süreçlerinde kullanılan adsorbanların etkinliğini ölçmek ve karşılaştırmak için önemli parametrelerdir.

Renk analizi, su örneklerindeki renk yoğunluğunu belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada, renk giderimi, su örneklerinin renk yoğunluğunun spektrofotometrik ölçümü ile belirlenmiştir. Spektrofotometri, suyun içerisindeki renkli maddelerin ışığı nasıl emdiğini ölçerek, suyun rengindeki değişimleri analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. Renk giderimi, suyun rengindeki azalma oranını gösterir ve genellikle arıtma süreçlerinde suyun temizliğini değerlendirmede kullanılır. Bu çalışmada, su örneklerindeki renk yoğunluğu 810 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Bu dalga boyu, suyun renkli maddelerinin en iyi şekilde emilim gösterdiği ve böylece renk giderimi oranının doğru şekilde hesaplanabildiği bir bölgedir. Renk yoğunluğu, ışığın su örneği tarafından ne kadar emildiğini yansıtır ve bu değerlerin karşılaştırılması ile suyun renkli bileşenlerinin ne kadar arıtıldığı belirlenir. Çalışmada, sadece kalsiyum karbonat (CaCO_3) kullanıldığında renk giderimi %16,77 olarak hesaplanmıştır. Bu, CaCO_3 'nin suyun rengini %16,77 oranında azalttığı anlamına gelir. Ancak, polialüminyum klorür (PAC) ve anyonik polielektrolit (P.E.) ile birlikte kullanıldığında, renk giderimi oranı %92'ye yükselmiştir. Bu, PAC ve P.E. gibi yardımcı kimyasalların, sadece CaCO_3 ile yapılan arıtma işlemine kıyasla çok daha etkili olduğunu ve suyun rengini büyük ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, yardımcı kimyasalların, özellikle PAC ve P.E.'nin, su arıtma süreçlerinde kalsiyum karbonat gibi doğal adsorbanlarla kombinlendiğinde etkinliği önemli ölçüde artırabileceğini ve renk giderimi gibi parametrelerde yüksek verim sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalara paralel olarak, adsorbanların ve yardımcı kimyasalların kombinasyonlarının su arıtma verimliliğini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir [6].

Deneylerde, suyun arıtılmasında kullanılan kalsiyum karbonat (CaCO_3) miktarı, 1 g/L ile 8 g/L arasında değişen oranlarda uygulanmıştır. Bu deneysel düzende, CaCO_3 'nin etkinliğini test etmek amacıyla farklı konsantrasyonlar kullanılarak çeşitli denemeler yapılmıştır. Bu tartım işlemleri, Şekil 3'te gösterilen deneysel düzende gerçekleştirilmiştir. Kağıt atıksuyunun içeriğindeki askıda katı madde (AKM) miktarının yüksek olması, daha düşük miktarlarda CaCO_3 kullanımının yeterli olmayacağını göstermiştir. Bu sebeple, adsorbanın en verimli şekilde kullanılabilmesi için 1 g/L ile 8 g/L arasındaki CaCO_3 miktarlarında deneyler yapılmıştır. Daha düşük miktarlarda CaCO_3 'nin su arıtma sürecindeki etkinliği yetersiz kaldığı için, daha yüksek konsantrasyonlar denenmiştir. Bu değerler arasında yapılan denemeler, en uygun adsorban miktarını belirlemeyi amaçlamıştır. Ayrıca, su içerisine karıştırılan adsorbanların çökeltme süreci sonucunda, havuz dibinde çamur şeklinde birikmesi beklenmektedir. Çamur, adsorpsiyon sürecinde kirleticileri bağlayarak suyun temizlenmesine yardımcı olur; ancak, çamurun birikmesi ve bertaraf edilmesi işletme maliyetlerini artırabilir. Bu nedenle, çamur bertarafı için maliyet artışına yol açmamak amacıyla, CaCO_3 miktarının 8 g/L'yi aşmasına izin verilmemiştir. Bu sınırlama, hem suyun temizlenmesi sürecinin etkinliğini sağlamak hem de işletme maliyetlerini kontrol altında tutmak için dikkate alınmıştır.



Şekil 3. Tartım işlemleri

Yapılan çalışmalar neticesinde 1-4 g/L arasında adsorbsiyon sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. 1-4 g/L arasında adsorbsiyon sonuçları

20.11.2024	Ham atık su	Çökeltim	Verim	1g/L	Verim	2g/L	Verim	3g/L	Verim	4g/L	Verim
AKM	578	466	19,38	424	26,64	429	25,78	438	24,22	439	24,05
Renk	1061	963	9,24	938	11,59	942	11,2	945	10,93	936	11,78
İletkenlik	3,74	3,74		3,81		3,86		3,87		3,90	
Ph	6	6		6,12		6,15		6,06		6,08	

1-4 g/L arasında adsorbsiyon sonucundaki renk değişimleri Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. 1-4 g/L arasında yapılmış deneyler

Karıştırma işlemleri, deneysel düzenek çerçevesinde belirli bir hızda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, karıştırma işlemi 750 rpm hızında başlatılmış ve 1 saat süreyle devam edilmiştir. Bu aşama, adsorpsiyon sürecinin etkinliğini başlatmak ve adsorbanın suya homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır. 1 saatlik karıştırma süresi sonunda, karıştırma hızı 50 rpm’ye düşürülmüş ve bir saat boyunca bu düşük hızda karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu iki aşamalı karıştırma işlemi, suyun etkin şekilde karıştırılmasını sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Bu deneysel düzenek, mevcut atık su arıtma tesisinde kullanılan şartların laboratuvar ortamında nasıl bir etki göstereceğini test etmek amacıyla yapılmıştır. Deneylerde elde edilen veriler, farklı hız ve süre kombinasyonlarının adsorpsiyon sürecindeki etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bir gün boyunca dinlendirilip bekletilen numuneler incelendiğinde, CaCO_3 eklenen su örneklerinde olumlu bir etki gözlemlenmiş olsa da, tek başına kalsiyum karbonatın su arıtma tesislerinde kullanılabilmesi için yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu durum, kalsiyum karbonatın adsorban olarak kullanımının, özellikle yüksek askıda katı madde (AKM) yükü bulunan su örneklerinde yeterli etkinliği sağlamadığını göstermektedir. Elde edilen

sonuçlara dayanarak, adsorban miktarının yeterli olmadığı düşünülmüş ve adsorban miktarının artırılmasına karar verilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinin ardından, 5-8 g/L arasında yapılan denemelerin sonuçları, Tablo 2'de verilmiştir. Bu adım, CaCO_3 'nin etkinliğini artırarak, suyun arıtımında daha verimli sonuçlar elde etmek amacıyla yapılmıştır.

Tablo 2. 5-8 g/L arasında adsorbsiyon sonuçları

20.11.2024	Ham atık su	Çökeltim	Verim	5g/L	Verim	6g/L	Verim	7g/L	Verim	8g/L	Verim
AKM	879	488	44,48	504	42,66	487	44,60	508	42,20	539	38,68
Renk	1234	976	20,91	1037	15,96	1027	16,77	1069	13,37	1077	12,77
İletkenlik	3,86	3,88		4,47		4,43		4,57		4,57	
Ph	5,83	5,80		6,90		6,99		7,14		7,06	

5-8 g/L arasında adsorbsiyon sonucundaki renk değişimleri Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. 5-8 g/L arasında yapılmış deneyler

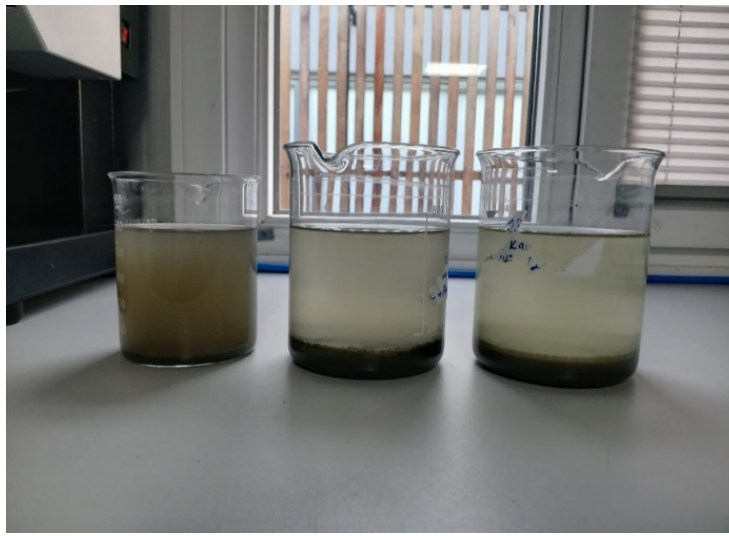
Uygun adsorban miktarını belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda, atık su arıtma tesisinde bulunan dengeleme havuzundan numuneler alınmış ve bu numuneler üzerinde 5-8 g/L aralığında denemeler yapılmıştır. Atık su arıtma tesisinden alınan numunelere herhangi bir ön işleme uygulanmadan, doğrudan CaCO_3 eklenerek bu miktarlarda deneyler tekrarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, atık suyun arıtılmasında olumlu etkiler gözlemlenmiş olsa da, yalnızca CaCO_3 kullanılarak elde edilen sonuçlar, suyun yeterli derecede temizlenmesini sağlamamıştır. Bu durum, CaCO_3 'nin tek başına etkili bir adsorban olarak kullanılamayacağına işaret etmektedir.

Deneylerde, CaCO_3 miktarının artırılmasının, askıda katı madde (AKM) miktarını daha fazla azaltacağı öngörülse de, belirli bir noktadan sonra adsorban miktarının artırılmasının daha fazla fayda sağlamayacağı anlaşılmıştır. Çünkü CaCO_3 miktarının daha da artırılması, tutulan askıda katı madde miktarını fazla artırmakta ve bu da sisteme daha fazla çamur yükü bindirerek işlem verimliliğini düşürmektedir. Daha iyi verim sağlamak için farklı koşullarla veya farklı adsorbanlarla daha fazla çalışma yapılması gerektiği bir gerçektir. Bu çalışma kapsamında, 6 g/L CaCO_3 kullanımının koagülant ve flokülantlarla birlikte nasıl bir etki göstereceği araştırılmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda elde edilen veriler, Tablo 3'te sunulmuştur. Bu adım, daha verimli bir arıtma süreci için CaCO_3 miktarının optimum seviyede tutulmasına olanak sağlamayı amaçlamaktadır.

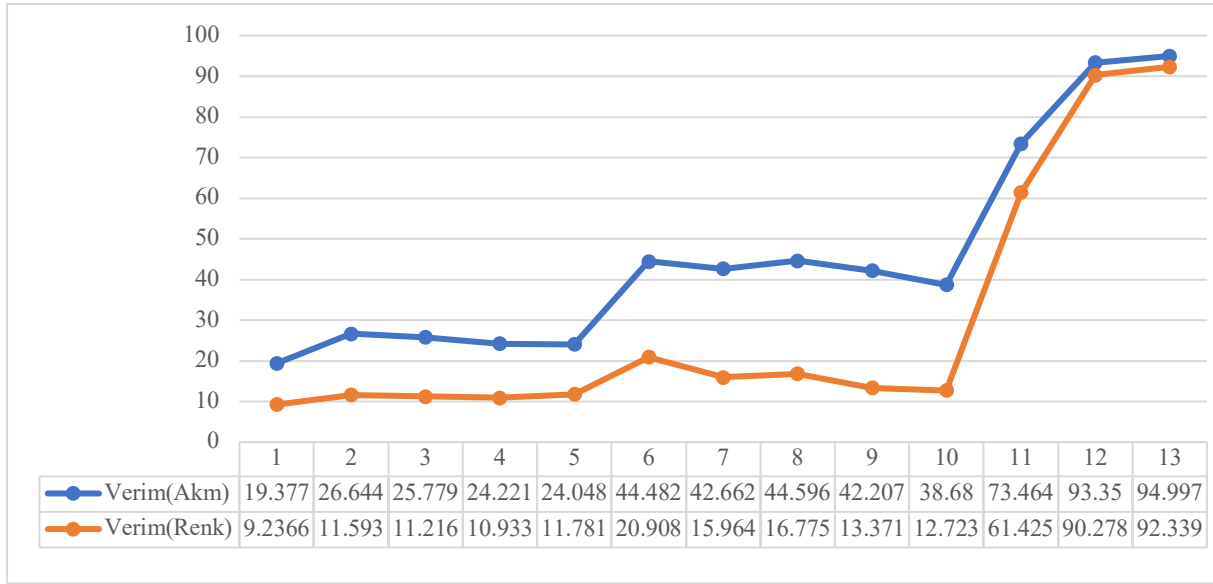
Tablo 3. 6 g/L CaCO₃, Polialüminyum Klorür ve Anyonik Polielektrolit Beraber Kullanımının İncelenmesi

	Ham atıksu	Çökeltim sonucu	Verim	Atıksu+PA C+ Anyonik P.E.	Verim	Atıksu+CaCO ₃ +PA C+ Anyonik PE	Verim
AKM	1579	419	73,46	105	93,35	79	95
Renk	2232	861	61,42	217	90,28	171	92,34
İletkenlik	2,8	2,85	-1,79	3,15	-12,5	3,35	-19,64
pH	6,95	6,73	3,165	7,03	1,15	7,39	-6,33

6 g/L CaCO₃, Polialüminyum klorür ve Anyonik polielektrolit beraber kullanılarak elde edilen renk değişimleri Şekil 6'da verilmiştir.

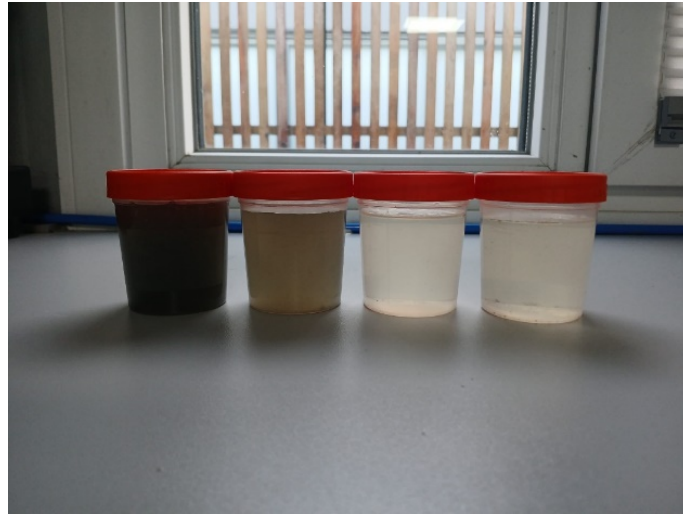
**Şekil 6.** CaCO₃'ün Pac ve Anyonik P.E. ile denemeleri

Seçilen CaCO₃ miktarı ile birlikte, polialüminyum klorür (PAC) ve anyonik polielektrolit (P.E.) eklenerek deneyler tekrar edilmiştir. Çalışmalar, önceki deneylerde belirlenen aynı şartlar altında devam ettirilmiş ve bu sefer CaCO₃ ile birlikte kullanılan kimyasalların arıtma verimine olumlu yönde bir etki sağladığı gözlemlenmiştir. Bu kombinasyon, özellikle koagülasyon ve flokülasyon süreçlerinin etkinliğini artırarak, kirleticilerin sudan daha verimli bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Yapılan deneylerin sonucunda elde edilen verim, kimyasalların ve adsorbanların birlikte kullanımı ile belirgin bir iyileşme göstermiştir. Bu sonuçlar, tesiste kullanılan kimyasalların, CaCO₃ ile birlikte daha verimli bir şekilde çalışacağına işaret etmektedir. Bu kombinasyonun, su arıtma süreçlerinde potansiyel bir alternatif olarak kullanılabileceği ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlayabileceği öngörülmektedir. Elde edilen verim ve sonuçlar, Şekil 7'de grafiksel olarak sunulmuştur. Bu grafik, deneysel verilerin görsel bir temsilini sunarak, kullanılan adsorbanlar ve kimyasalların arıtma verimine olan etkilerini daha net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 7. Askıda katı madde ve renk giderim grafiği

En uygun değerleri belirlemek amacıyla, 1-8 g/L arasında CaCO_3 miktarları kullanılarak çeşitli denemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, en verimli sonuçların elde edildiği CaCO_3 miktarının 6 g/L olduğu gözlemlenmiştir. Bu miktarda, askıda katı madde (AKM) giderimi en yüksek seviyeye ulaşmış ve diğer adsorban miktarlarına kıyasla daha etkili bir arıtma sağlanmıştır. Şekil 8’de bu sonuçlar görsel olarak sunulmuş ve 6 g/L CaCO_3 kullanıldığında elde edilen verim, deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bu sonuç, su arıtma proseslerinde en uygun CaCO_3 miktarının belirlenmesinde önemli bir bulgu teşkil etmektedir.



Şekil 8. Askıda katı madde-renk miktarındaki değişim

Adsorpsiyon Kapasitesinin Hesaplanması: Adsorpsiyon kapasitesi, su örneğindeki başlangıç ve sonrasındaki kirletici yoğunlukları arasındaki fark ile hesaplanmıştır (Eşitlik 10.). Adsorpsiyon kapasitesi (q_e , mg/g) aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

q_e = Adsorbentin adsorpsiyon kapasitesi (mg/g, mol/g)

C_0 = Adsorbatın(adsorplanan maddenin) başlangıç derişimi (mg/L, mol/L)

C_e = Adsorbatın(adsorplanan maddenin) denge anındaki (adsorplanmadan kalan) derişimi (mg/L, mol/L)

V = Çözelti hacmi (L)

m= Adsorbentin ağırlığı (g)

En optimum bulunan CaCO_3 miktarı 6 g/L olarak seçilmiş ve bu miktar ile yapılan deneyler sonucunda adsorpsiyon kapasitesi 65,33 mg/gr olarak hesaplanmıştır. Bu değer, su arıtma süreçlerinde kullanılan kalsiyum karbonat atığının etkinliğini ve potansiyelini göstermektedir.

Yapılan karşılaştırmalar, kalsiyum karbonat atığının adsorpsiyon kapasitesinin ve etkinliğinin geleneksel adsorbanlarla nasıl rekabet ettiğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma, kalsiyum karbonat atığının diğer yaygın adsorbanlarla (örneğin aktif karbon, bentonit vb.) karşılaştırıldığında su arıtma verimliliği açısından nasıl bir performans sergilediğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Elde edilen veriler, kalsiyum karbonat atığının geleneksel adsorbanlarla kıyaslandığında belirli durumlar için etkili olabileceğini ve düşük maliyetli bir alternatif olma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir [11]. Bu karşılaştırma, CaCO_3 atığının çevre dostu bir alternatif olarak su arıtma sistemlerinde nasıl daha verimli kullanılabileceğini anlamak için büyük önem taşımaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, şeker fabrikalarından elde edilen kalsiyum karbonat (CaCO_3) atığının atık su arıtımında değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kalsiyum karbonat, su arıtma süreçlerinde potansiyel olarak etkili bir adsorban olarak kullanılabileceği düşünülen doğal bir malzemedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, en verimli adsorban dozajının 6 g/L olduğu belirlenmiştir. Kalsiyum karbonatın tek başına kullanımında askıda katı madde (AKM) giderim verimi %44,6 olarak tespit edilmiştir. Ancak, koagülant (Polialüminyum klorür, PAC) ve flokülant (Anyonik polielektrolit, P.E.) ile birlikte kullanıldığında, bu oran %94,99'a yükselmiş ve renk giderimi ise %90,27'den %92,33'e çıkmıştır. Bu sonuçlar, kalsiyum karbonat atığının tek başına kullanımının su arıtma verimliliği açısından yeterli olmadığını, ancak uygun yardımcı kimyasallar ile kombinlendiğinde verimin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, yapılan araştırmalar, kalsiyum karbonatın fazla miktarda kullanımının çamur yükünü artırdığını ve bu nedenle gözenek yapısı daha küçük olan adsorbanların kullanımının daha verimli olabileceğini öngörmektedir.

Bu çalışmanın bulguları, şeker fabrikalarından elde edilen ve atık olan kalsiyum karbonatın, doğal, ekonomik ve çevre dostu bir adsorban olarak su arıtımında kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Şeker fabrikalarından elde edilen kalsiyum karbonat atığının, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılma potansiyeli büyük bir önem taşımaktadır. Diğer geleneksel adsorbanlarla karşılaştırıldığında, kalsiyum karbonat atığının ekonomik açıdan oldukça faydalı bir alternatif sunduğu anlaşılmaktadır. Ancak, optimum verimin sağlanabilmesi için adsorban miktarının doğru belirlenmesi ve yardımcı kimyasalların uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir.

Yapılan bu çalışma, literatürdeki diğer araştırmalarla da paralellik göstermektedir. Örneğin, İlknur Koyuer'in 2023 yılı çalışmasında, deniz kabuklarından elde edilen kalsiyum karbonatın gümüş iyonlarını adsorbe etme kapasitesi incelenmiş ve bu malzemenin Cu(II) iyonlarını uzaklaştırmada etkili olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, deniz kabuklarının ve diğer kalsiyum karbonat içeren materyallerin su arıtımındaki potansiyel kullanımını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, şeker fabrikası atığının da doğal, ekonomik ve çevre dostu bir adsorban olarak kullanılabileceği gösterilmiştir [12]. Ayrıca, Oğuzalp Güler'in 1999 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, şeker fabrikası atıklarından elde edilen karbonatlama kekinin krom (III) ve kadmiyum gideriminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada, saf kalsiyum karbonatın krom gideriminde daha etkin olduğu tespit edilirken, karbonatlama kekinin yüksek sıcaklıklarda kalsinasyonu ile etkinliğinin arttığı belirlenmiştir [13].

Bu araştırma ve benzer çalışmalar, kalsiyum karbonat içeren atıkların su arıtımında değerlendirilebileceğini ve bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı atık kaynaklarından elde edilen CaCO_3 'ün arıtma süreçlerindeki etkinliğini daha detaylı bir şekilde inceleyerek, çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir çözümler sunabilir. Bu, hem endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi hem de su kaynaklarının korunması açısından büyük bir önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, şeker fabrikalarından elde edilen kalsiyum karbonat atığının su arıtımındaki potansiyelini değerlendirerek, yeşil ekonomi ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunkaktadır. Şeker fabrikalarından elde edilen bu atık, ekonomik ve çevre dostu bir çözüm olarak, geleneksel adsorbanlarla kıyaslandığında düşük maliyetli bir alternatif sunmakta ve su arıtma süreçlerinin

verimliliğini artırma potansiyeline sahip olmaktadır. Bu araştırma, literatürdeki mevcut boşluğu doldurarak, endüstriyel atıkların su arıtımında kullanılabilirliğini genişleten ve daha sürdürülebilir bir su yönetimi sağlayan çözümler geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Erciğolu Akdoğan, N., & Ubay, E. (2022). Pişirime uygun duvar karosu üretiminde şeker sanayii atıklarının değerlendirilmesi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 66–74. <https://doi.org/10.53410/koufbd.1132963>
- [2] Bayram, H. (2019). *Adsorpsiyon Teknolojilerinin Su Arıtımında Kullanımı ve Uygulama Alanları*. İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Fakültesi Yayınları.
- [3] Demir, G., & Yıldırım, F. (2020). *Endüstriyel Atıkların Geri Kazanımı ve Çevre Dostu Teknolojiler*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- [4] Şen, S., & Kaya, A. (2021). Adsorpsiyon ile kirleticilerin giderilmesi: Kalsiyum karbonat atıkları üzerine bir inceleme. *Turkish Journal of Water Science*, 19(4), 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.tjws.2021.06.001>
- [5] Alaryan, M. (2022). Konya şeker fabrikası atık kireç çamuru (PKF)'nin geoteknik mühendisliğinde kullanımının araştırılması (Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı). Konya Teknik Üniversitesi.
- [6] İşleyen, S. (2021). Şeker fabrikası atığı karbonatlama çamurundan optimum koşullarda hidroksiapatit üretimi (Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kimya Mühendisliği Bilim Dalı). Ankara Üniversitesi.
- [7] Tunçez, F. D. (2007). Şeker fabrikası atık çamuru ve pomzanın toprak iyileştirici olarak kullanılması (Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Ana Bilim Dalı). Selçuk Üniversitesi.
- [8] Erener, G. (1997). Şeker fabrikası atığı döner çamurunun (birinci karbonatlama çamuru) yumurta tavuğu rasyonlarında kalsiyum kaynağı olarak kullanılabilme olanakları (Doktora tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zootehni Ana Bilim Dalı). Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- [9] Rao, S. R., Kumar, M. S., & Soni, S. (2020). Calcium carbonate as an adsorbent for environmental remediation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103631. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103631>
- [10] Rana, P., Mehta, S., & Gupta, R. (2017). Recycling and reuse of industrial waste: Calcium carbonate and its applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(6), 5024-5036. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8173-1>
- [11] Ahmed, M., Ahsan, A., & Khan, S. (2018). Adsorption of suspended solids and color from industrial effluents using activated carbon. *Journal of Environmental Management*, 223, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.044>
- [12] İlknur Koyuer. (2023). Doğal kalsiyum karbonat kaynağı ile gümüş karışımının ağır metal gideriminde kullanılmasının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Anabilim Dalı, Türkiye.
- [13] Güler, O. (1999). Şeker üretim artığı karbonatlama keki kullanılarak atıksulardan krom (III) ve kadmiyum giderilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye