

MÜHENDİSLİK ALANINDA TEORİ VE ARAŞTIRMALAR

HAZİRAN 2022

EDİTÖRLER

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP
DOÇ. DR. NURETTİN AKÇAKALE

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana
Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi
Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2022
ISBN • 978-625-7721-85-1

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing.

Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Yalı Mahallesi İstikbal Caddesi No:6
Güzelbahçe / İZMİR

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

Mühendislik Alanında Teori ve Araştırmalar

Haziran 2022

Editörler

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP
Doç. Dr. Nurettin AKÇAKALE

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

KÜRESEL ISINMA VE DEMİR ÇELİK ÜRETİM ATIKLARI

Gamze BİLGİN	1
Süha H. AKSOY	1

Bölüm 2

İYON DEĞİŞTİRİCİ MEMBRANLAR

Mehmet Semih Bingöl	27
---------------------------	----

Bölüm 3

KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Süha H. AKSOY	49
Gamze BİLGİN	49

Bölüm 1

KÜRESEL ISINMA VE DEMİR ÇELİK ÜRETİM ATIKLARI

Gamze BİLGEN¹

Süha H. AKSOY²

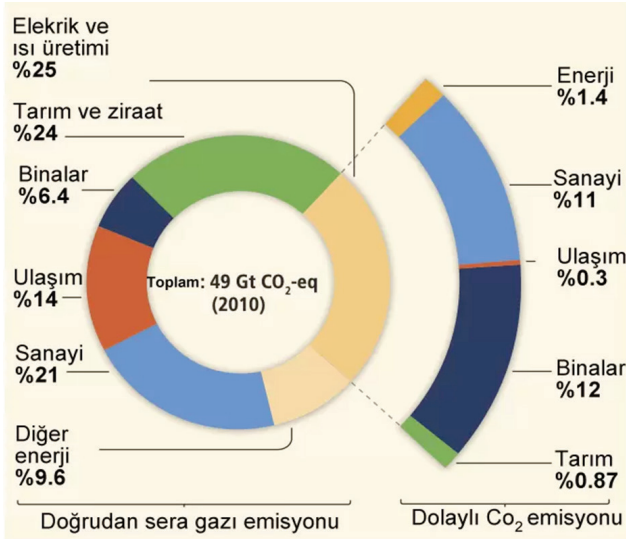
1 Dr. Öğr. Üyesi Gamze BİLGEN. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı MYO, Zonguldak, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2840-7369>.

2 Doç .Dr. Süha H. AKSOY. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-457X>.

1. GİRİŞ

Küresel ısınma, dünyanın ortalama sıcaklığının artması olarak tanımlanmaktadır. Dünyanın ortalama sıcaklığı, 21. yüzyılın ilk çeyreğini yaşamakta olduğumuz şu günlerde yüzyıl kadar öncesine göre başka bir deyişle 20. yüzyılın ilk çeyreğine göre 1°C artmıştır ve bu farkın kısa süre içerisinde 2°C'ye kadar artması beklenmektedir (Hoegh-Guldberg, Jacob, & Taylor, 2018). Bu ısınma, felaket olarak adlandırılan kasırgaların, kuraklığın ve sel gibi afetlerin olağandan çok daha sık yaşanması ve canlıların ölüm oranlarının artması anlamına gelmektedir. T.C. Orman ve Şehircilik Bakanlığı aracılığı ile Munich RE tarafından yapılan değerlendirmelere yer verilen “2018 Çevre raporu”nda, 2016 yılında 750 büyük ölçekli doğal afet meydana geldiği ve doğal afetler nedeniyle 9.200 kişinin hayatını kaybettiği belirtilmektedir (TMMOB, 2018). Ayrıca, dünyanın farklı bölgelerinde olduğu gibi 2021 yılı itibarı ile de Türkiye’de kontrol altına alınması oldukça zor olan yangınlar ve seller meydana gelmiştir (Balci, Kalça, & Bilgen, 2021).

Küresel ısınmanın sebebi, atmosferdeki karbondioksit (CO₂) seviyesini yükselmesi ve karbondioksitin sera etkisi yapması olarak belirlenmiştir. Aslında, okyanuslar havadan 50 kat fazla karbondioksit tutma özellikleri sayesinde sera etkisinin oluşmasını engellemektedir ve böylece ekolojik denge sağlanmaktadır (Venkataramanan, 2011). Ancak dünya nüfusunun yüksek oranda artması ve buna bağlı olarak gerek karasal bölgelerde gerek okyanuslarda biriken aşırı atık miktarları, fabrika ve benzeri tesislerde yakılan yakıtlardan ötürü havaya sürekli olarak karbondioksit salınımı yapılması, kısaca hem toprağın hem suların hem de havanın aynı anda ve yüksek dozda kirletilmesi dünyanın ekolojik dengesini bozarak, küresel ısınmaya sebep olmaktadır.



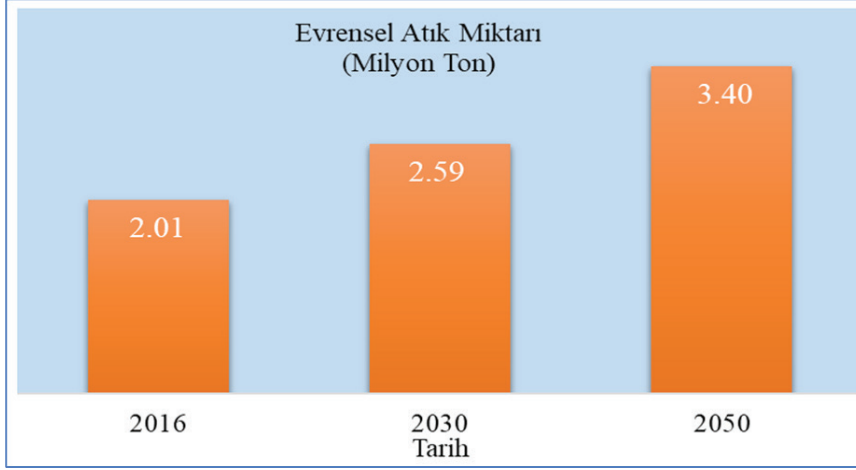
Şekil 1. Küresel ısınmaya etki eden faktörler (IPCC, 2018)

Küresel ısınma ile mücadele kapsamında, 1988 yılında “Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)” adında bir komite kurulmuştur. Bu komite, Birleşmiş Milletler (BM) çatısında faaliyette bulunan Çevre Programı ile Dünya Meteoroloji Örgütü’nün birleşmesi ile kurulmuş olan bir komitedir. IPCC, 2018 yılı itibari ile küresel ısınma ile ilgili geniş çaplı bir rapor hazırlanmıştır. Bu raporda, CO₂ salınımı yapan dolayısı ile küresel ısınmaya doğrudan etki eden faktörlerin %25 oranında elektrik ve ısı üretimi, %24 oranında tarım ve ziraat çalışmaları, %6,4 oranında binalar, %14 oranında ulaşım etmenleri, %21 oranında sanayi sektörü, %9,6 oranında ise diğer enerji sektörleri kaynaklı olduğunu belirtilmektedir. Başka bir deyişle, doğrudan havaya karışan CO₂ gazı salınımının %75 oranındaki kısmı enerji, sanayi, inşaat, ulaşım ve tarım sektörlerindeki çalışmalardan dolayı gerçekleşmektedir. Diğer %25 oranındaki kısmı ise yine bu sektörlerle bağlı yan sektörlerden dolayı oluşmaktadır. Şekil 1’de bu raporda sunulan verilere göre hazırlanmış olan dağılımı sunulmaktadır (Hoegh-Guldberg et al., 2018).

2. ATIKLAR ve ATIK YÖNETİMİ

Küresel ısınmada önemli bir rol oynayan “atıklar”, sözlük anlamı ile üretimden tüketime kadar olan süreçte ortaya çıkan, kullanılmış, işe yaramayan ve çevre için zarar oluşturan her türlü maddeyi ifade etmektedir (TDK, 2022b). 20. yüzyılın başlarına kadar, yararsız olduğu için atılan ufak tefek şeyler anlamındaki “çöp” kelimesi ile dönüşümlü olarak kullanılabilen, aralarında önemli bir anlam farkı olmadığı düşünülen “atık” kavramı, günümüze gelene kadar geçen süreçte büyük devinimlere uğramıştır. Bu deviminde, özellikle son 50 yıl boyunca doğal kaynakların hızla azalması, temiz su kaynaklarının tükenmeye başlaması gibi evrensel çevre sorunları önemli rol oynamıştır (Solak & Pekküçükşen, 2018). Şekil 2’deki grafikte evrensel atık miktarları milyon ton cinsinden verilmiştir. Grafik, dünya bankası raporlarına göre hazırlanmış olup, mevcut verilerden yola çıkarak hesaplanmış olan 2030 ve 2050 yıllarına ait tahmin edilen atık miktarlarını da belirtmektedir. Hesaplamalara göre 2030 yılı için tahmin edilen atık miktarı 2,59 milyon ton, 2050 yılı için ise 3,40 milyon ton olarak belirlenmiştir.

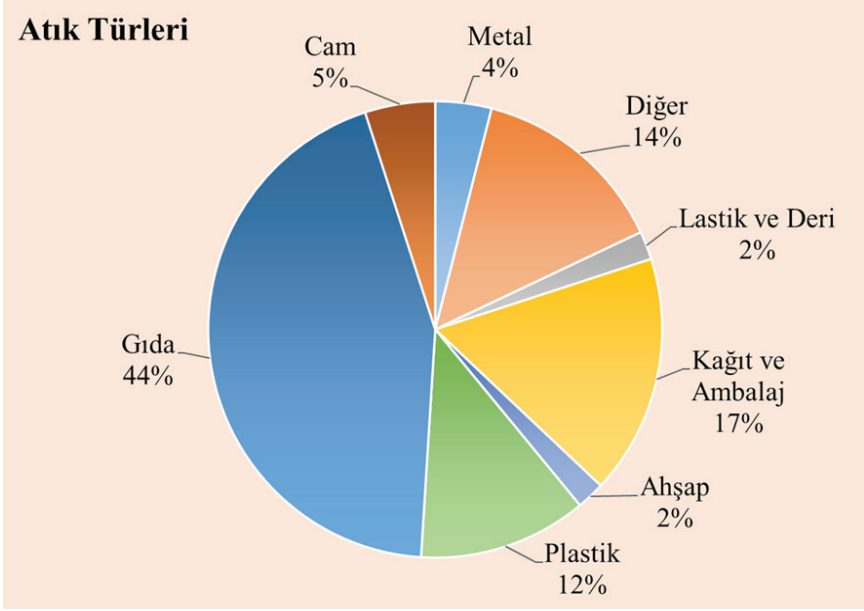
Şekil 2. Yıllara göre atık miktarları (Kaza, Yao, Bhanda-Tata, & Woerden, 2018)



Atıklar ve çevresel sorunlar konusunda ilk resmi adımlar 1970’li yıllarda atılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) federal hükümeti tarafından 2 Aralık 1970 tarihinde Çevre Koruma Ajansı (EPA) kurulmuştur (Congress of the United States, 1970). Akabinde, Birleşmiş Milletler (BM) tarafından 1972 yılında Stockholm’de gerçekleştirilen konferansta BM Çevre Programı (UNEP) kurularak atık konusu evrensel olarak ele alınması gereken en önemli konular arasında değerlendirilmeye başlanmıştır (TMMOB, 2018).

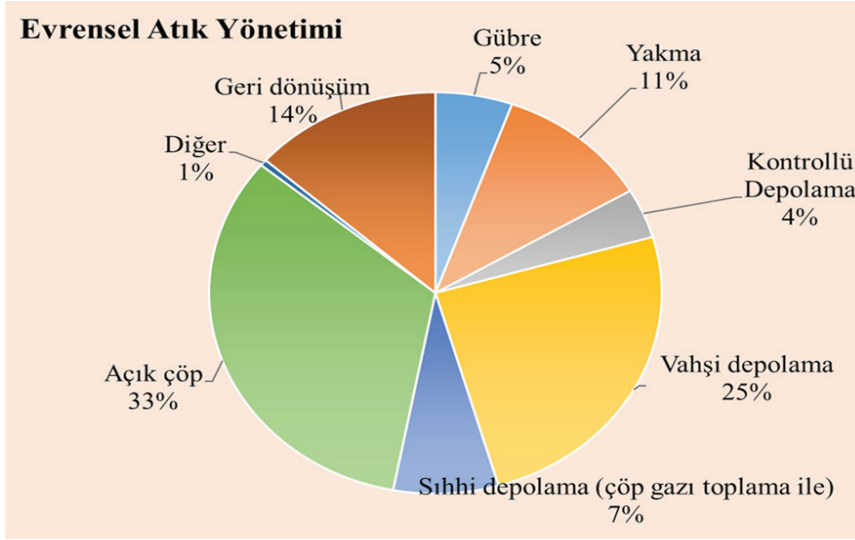
EPA, katı atıkların ayrı ayrı ele alınarak incelenmesine katkıda bulunmuştur. EPA’ya göre katı atıklar 5 ana grupta ele alınmaktadır. Bu gruplardan biri kentsel katı atıklardır (KKA). KKA lar aralarında, evsel atıklar, ticari atıklar ve endüstriyel atıklar şeklinde 3 alt guruba ayrılmaktadır. Ofis, kırtasiye, temizlik, ambalaj malzemeleri gibi atıklar “evsel atık” olarak; mobilya, ofis ve market ürünleri “ticari atık” ve büyük hacimli üretim atıkları ise “endüstriyel atık” olarak adlandırılmaktadır. Katı atıkların diğer grupları ise, inşaat yapım ve yıkım esnasında ortaya çıkan atıklar (İYA); hayvancılık, klinik atıklar gibi atıklardan oluşan “Özel atıklar”; “kimyasal atıklar” ve dip tarama malzemeleri ve yakıt atıklar gibi atıklar ise “diğer atıklar” olarak sınıflandırılmıştır (Bilgen, 2021). Ancak bu sınıflandırma, atık çeşitliliğinin hızla artması ile kısa bir zamanda çok daha fazla katagori olacak şekilde genişletilmiştir. Yeni sisteme göre aynı atık farklı atık sınıflarına girebilmektedir. En genel açıdan irdelendiğinde atıklar tarımsal atık su, biyobozunur atık, biyomedikal atık, kahverengi atık, kimyasal atık, inşaat yıkım atıkları, elektronik atık, gıda atıkları, yeşil atık, tehlikeli atık, ısı atıkları, endüstriyel atık, endüstriyel atık su, çöp deniz atıkları, maden atıkları, belediye katı atık, açık dışkılama ambalaj atıkları, tüketici sonrası atık, radyoaktif atık, hurda metal, kanalizas-

yon keskin atık, yüzey akışı, zehirli atıklar olarak sınıflandırılmaktadırlar (Wikipedia, 2021). Şekil 3’de Dünya Bankası tarafından hazırlanmış olan raporda sunulan atık türleri görülmektedir. Rapora göre, dünyadaki atıkların en büyük kısmını %44’lük bir oran ile gıda atıkları oluşturmaktadır. Bunu %17’lik bir oranla kağıt ve ambalaj atıkları, %12 ila plastik atıklar, %5 ila cam, %4 ila metal ve %2 ila lastik ve deri atıkları takip etmektedir. Bu grupların hiç birine girmeyen atık oranı ise %14 olarak belirtilmektedir (Kaza, Yao, Bhanda-Tata, & Woerden, 2018).



Şekil 3. Dünyadaki Atık türleri (Kaza et al., 2018)

Atıkların yönetimi, konu ile ilgili tüm kurum ve kuruluşlar için öncelikli olarak ele alınan bir konudur. Türkiye’de 2010 yılında, 27533 sayılı Resmi Gazete’de “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” yayınlanarak atık yönetimi konusu resmi olarak düzenlenmiştir (Resmi Gazete, 2010). Daha sonra 2015 yılında 29314 sayılı Resmi Gazete’de “Atık Yönetimi Yönetmeliği” yayınlanmış ve bu yönetmelik 2017 yılında 30016 sayılı Resmi Gazete’de de güncellenmiştir (Resmi Gazete, 2017). Yapılan bir çalışma, sürdürülebilir atık yönetimi konusunda “Entegre (Bütünleşik) atık yönetimi sistemi” nin ön plana çıktığını savunmaktadır (Tezel & Yıldız, 2020). Bu yöntemde atıkların oluşumunun önlenmesi, azaltılması, tekrar kullanımının sağlanması, geri dönüştürülmesi, atıklardan enerji elde edilmesi ve son alternatif olarak bertaraf edilmesi şeklinde bir sıralama vardır. Şekil 4’de evrensel çapta atık yönetimi ile ilgili dağılım yüzdelik dilimleri görülmektedir.

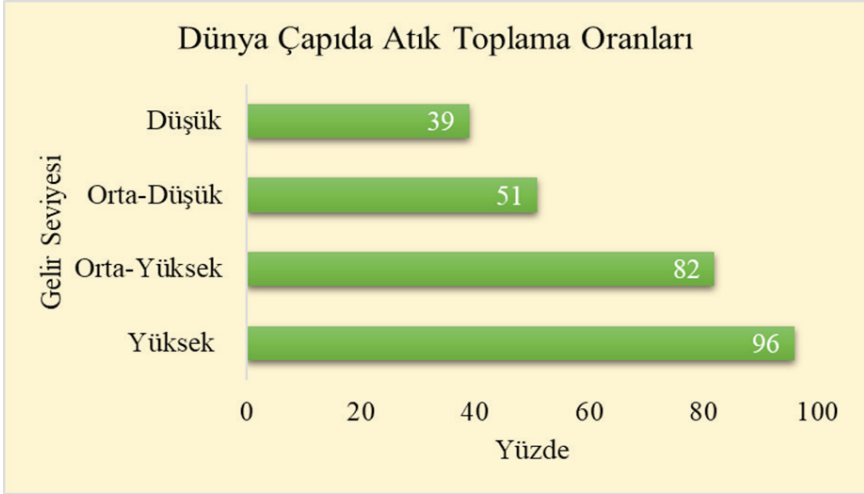


Şekil 4. Evrensel atık yönetimi yüzdelik dağılımı (Kaza et al., 2018)

Atıkların kullanımı dünyanın farklı bölgelerinde farklı oranlardadır. Şekil 4'te sunulan grafik bölgelerden bağımsız bir şekilde toplam atık miktarlarının yönetim yüzdelерinin hesaplanması sureti ile Dünya Bankası tarafından hazırlanmıştır. Elde edilen verilere göre, atıkların % 5'i gübre olarak kullanılırken, %11'i yakma sureti ile imha edilmektedir. %4'ü kontrollü olarak depolanırken %25'i vahşi olarak depolanmaktadır. %7'si sıhhi depolama, %33'ü açıktan çöp olarak ve %1'i ise diğer yöntemler ile yönetilmektedir. Atıkların sadece %14'ü geri dönüştürülmektedir. Başka bir deyişle, Dünya çapında, atıkların yaklaşık yüzde 40'ı arazilerde depolamak sureti ile atılmakta; yaklaşık yüzde 19'u gübrelemede kullanılması yoluyla geri dönüştürülmekte ve yüzde 11'i yakma yoluyla işlenmektedir (Kaza et al., 2018). Şekil 5'de Dünya çapında atık toplama yüzdeleri, bölgelerin gelir düzeyine göre verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere, bölgenin gelir seviye yükseldikçe atık toplama oranları da artmaktadır. Başka bir deyişle, atık toplama ile ekonomik gelir düzeyi arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

Bu çalışmada, şu ana kadar paylaşılan veriler, atıkların geri dönüşümünün ve yeniden kullanılmasının gerek ekolojik, gerek ekonomik olarak oldukça önemli olduğu belirtmektedir. Akademisyenler, bir atık sınıfı için ortaya çıkış aşamasından atıl hale gelme aşamasına kadar çok farklı yaklaşımlar üzerinde yoğunlaşarak çalışmalar yapmaktadır. Böylece, atıkların daha az oluşması veya geri dönüştürülmesi, yeniden kullanılması gibi faydalı kullanımları ile ilgili olarak literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir (Abdunaser, 2022; Bilgen, 2020b, 2020a, 2021; Bilgen, Houli-

han, Ryoo, Wang, & Aydilek, 2020; Bilgen & Kavak, 2010; Saribas, 2022; Yorulmaz, Sivrikaya, & Uysal, 2021).



Şekil 5. Dünya çapında gelir seviyesine göre atık toplama oranları (Kaza et al., 2018)

Çalışmanın bundan sonraki bölümünde büyük hacimli atıklar arasında bulunan “Cüruf Atıkları” üzerinde yoğunlaşılacaktır. Bu çalışmada, cürufların, oluşum aşamasından başlanarak, tanımları, kimyasal içerikleri, çevre için zararlı etkilerinin olup olmadığı ve mevcut durumda geri dönüşümü ve yeniden kullanımı ile ilgili çalışmalar derlenerek, literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

3. CÜRUF ÇEŞİTLERİ VE CÜRUF ATIĞI

Cüruf, Arapça kökenli bir kelime olup Arapça’da “curüf” olarak seslendirilirken, Türkçe’ye “cüruf” veya “cüruf” olarak geçmiştir. Metal atığı, metal posası olarak da ifade edilebilen cüruf, kimya bilminde erime halinde olan madenlerin yüzeyinde toplanan madde olarak tanımlanmaktadır (TDK, 2022a). Cüruflar, metalurjik cüruflar, volkanik cüruflar ve cam cürufu olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Bu cüruflar ile ilgili detaylar 3.1, 3.2 ve 3.3 başlıklı bölümlerde irdelenmektedir.

3.1. Volkanik Cüruf (Pomza Cürufu)

Pomza cürufu veya “Volkanik Cüruf” olarak adlandırılan bu cüruflar, volkanların ağızında bulunan eriyik magma olarak da adlandırılan kayalardır (Acar, 2022). Volkanın patlaması ile dışarı akarlar ve “lav” adını alırlar. Pomza cürufları oldukça gözenekli dolayısı ile birim hacim ağırlıkları az olan hafif malzemelerdir. Şekil 6’da görüldüğü üzere, doğal

hali ile farklı renklere ve estetik bir görünüme sahip olduklarından peyzaj işlerinde tercih edilirler. Su tutma kapasitelerinin yüksek olması bahçe düzenlemelerinde tercih edilme sebepleri arasındadır (Toprak Dünyası, 2022). Volkanik cüruf lar doğal malzemeler olduğu için atık katagorisine girmemektedirler.



Şekil 6. Volkanik Tüf (Pomza Cürufu) (Toprak Dünyası, 2022)

3.2. Cam Cürufu

Cam cürufu (glass-slag) veya cüruf camı, yüksek fırın cürufundan elde edilen ve estetik amaçlı seramik işlerinde kullanılan bir malzemedir. Cüruf camı, “malakit cam”, “mermer cam” ve “mozaik cam” gibi farklı isimlerle de anılmaktadır (Mango, 2010). Cüruf camı olarak anılmasının sebebi yapımında, çelik üretimi esnasında ortaya çıkan cürfun kullanılıyor olmasıdır. Demir cevherinin eritilmesi işleminde oluşan kalıntılar (Bölüm 4’de detaları verilmektedir) işlenmekte olan demirde bulunan minerallerle ve elementlerle reaksiyona girmektedir. Buna bağlı olarak farklı renklerde cam benzeri malzemeler meydana gelmektedir. Bu malzeme, camın üretimi aşamasında kullanılarak cam cürufu elde edilir. Cam cürufu, Şekil 7’de görüldüğü üzere genellikle canlı, parlak renklindedir. Çeşitli tekniklerle preslenerek üretilirler. Renkleri ve opaklık özellikleri gibi karakteristik ince varyasyonları nedeniyle koleksiyoncular tarafından tercih edilirler. Cam cürufu sert ve dayanımı yüksek bir malzemedir (Fredericci, Zanotto, & Ziemath, 2000). Cam cürufundan yapılan sanatsal ürünler yüksek bedeller ile satılmaktadırlar.



Şekil 7. Cam Cürufu (Mango, 2010)

3.3. Metalurjik Cüruflar

Metalurjik cüruflar, metallerin ya da metal bir malzeme içeren cevherlerin eritilmesi yoluyla ortaya çıkar. Metalden ağırlıkça hafif, aynı zamanda oksitlerin ve silikatların bir kompleksi olarak yoğunluk farkı nedeniyle yüzeyde toplanarak biriken bir yan üründür (Bilgen, Kavak, & Çapar, 2012; Bilgen, Kavak, Taner, & Çapar, 2010; Uysal & Bahar, 2018). Metalurjik cüruflar, yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu, ferrokrom cürufu, ferronikel cürufu, bakır cürufu, alüminyum cürufu şeklinde farklı metallerle ait olan cüruflar olarak gruplandırılmaktadırlar (Uysal & Bahar, 2018). Metalurjik cürufların henüz tam olarak geri dönüşümleri veya yeniden kullanımı sağlanamamıştır. Bu sebeple küresel ısınma ve atık sorunu ile ilgili çalışmaların devam etmekte olduğu atıklardır.

4. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ CÜRUF ATIKLARI

Bir önceki başlık altında tanımı ve çeşitleri verilen cüruflardan metalurjik cüruf atıkları, gerek üretim aşamasında gerek üretim sonrasında meydana getirdikleri etkileri ile küresel ısınma konusunda sorun teşkil eden cüruf atıklarıdır. Bu bölümde demir çelik üretimi esnasında ortaya çıkan cürufların, oluşum aşamaları ve geri dönüşümleri ya da yeniden kullanımları ile ilgili detaylar sunulmaktadır.



Şekil 8. Yüksek Fırın (Erdemir, 2011)

4.1. Yüksek Fırın Cürufu

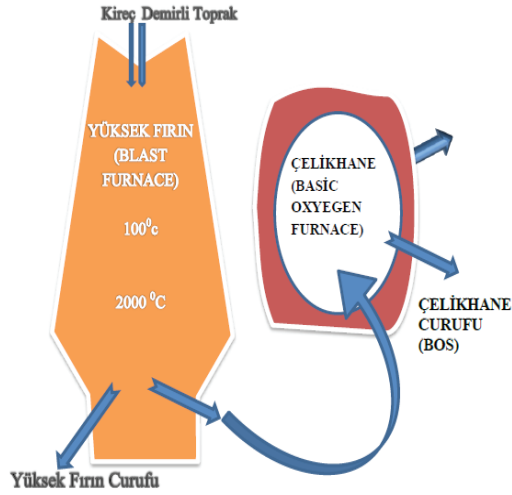
Yüksek Fırın Cürufu (YFC), yüksek fırında, demir cevherinin 2000°C de varan sıcaklıklarda eritilmesi ile oluşan ve bünyesinde alümina silikatlar, kalsiyum ve diğer çeşitli silikatları barındıran bir atıktır (Bilgen, 2004; Mazaheri, Bayat, & Hosinzadeh, 2021). Türkiye’de demirin topraktan ayrıştırılması işlemi Zonguldak Ereğli Demir Çelik Fabrikaları’nda (Erdemir) gerçekleştirilmektedir. Daha sonra Kardemir (Karabük) ve İsdemir (İskendurun-Hatay) tesislerine gönderilerek işlenmektedir. Şekil 8’de Erdemir’de demir cevherinin topraktan eritilerek elde edilişi amacı ile kullanılan yüksek fırınlar görülmektedir. Şekil 9’da ise bu fırınların işleyişi ile ilgili bir görsel sunulmuştur. YFC, kok kömürü ve demir küllerinde bulunan silika ve alümina maddelerinin kireç ile birleşip tepkime vermesi sonucunda oluşmaktadır (Lemougna, Wang, Tang, & Cui, 2017). Bir ton çelik üretimi esnasında 300-400 kg civarı YFC, ortaya çıkmaktadır (Bilgen, 2004; Gökceci & Dulkadiroğlu, 2021). Meydana gelen bu katı atıkların, rastgele çevreye atılması ya da demir çelik tesislerinin boş sahalarında depolanması, bünyesinde bulundurdıkları toksik maddelerin ve ağır metallerin, yağmur ve kar suları aracılığı ile zemin içerisine sızmasına ve yeraltı suyu ile karışmasına sebep olabilirler. Ayrıca, toprağa karışması, bitki, hayvan, ve insan sağlığını olumsuz yönde etkiler. Ek olarak, çelik üretimi esnasında yüksek oranda CO₂ açığa çıkmaktadır (Naidu, Sheridan, & van Dyk, 2020). Şekil 10’da sahada depolanmış YFC’ye ait bir görüntü bulunmaktadır. Demir-çelik tesislerinde meydana gelen yan ürünlerin, geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılması Dünya Çelik Örgütü tarafından, sıfır atığa ulaşmanın en iyi yöntem olarak değerlendirilmiştir (Gökceci & Dulkadiroğlu, 2021).

Tablo 1. Yüksek Fırın Cürufu Kimyasal Kompozisyonu (Bilgen, 2004)

Element/ Ülke	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avusturalya	Türkiye	Portlant Çimento
CaO	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6.0
MgO	0-19	8-2.1	1-3	3.5-7	0.1-4.0
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5	-
SO ₃	-	-	-	-	1-3

4.1.1. YFC'nin Kimyasal Kompozisyonu

Tablo 1'de dünyanın farklı ülkelerinde ortaya çıkan YFC ile Portlant çimentosunun kimyasal içerikleri verilmektedir. YFC atığının kimyasal içeriği, üretimde kullanılan demir cevheri içeren toprağa bağlıdır. Tablo 1'de verilen değerler, literatürde bulunan çalışmalardan derlenmiş ortalama değerlerdir. Bu verilere göre, Türkiye'de ortaya çıkan YFC lerin kimyasal bileşimde ortalama olarak %34 ila %41 oranında CaO (kireç) bulunmaktadır.



Şekil 9. Yüksek Fırın Cürufu ve Çelikhane Cürufunun ortaya çıkış süreçleri (Bilgen, 2011)

4.1.2. Dünyadaki YFC Miktarları

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2015 yılı itibarı ile hazırlanan Demir ve Çelik Raporu'na göre 1960 yılında dünya'daki çelik üretimi 500 milyon ton civarındadır. Bu değer 2015 yılı itibarı ile 1milyar 600 milyon ton civarında bir değere ulaşmıştır. Anlaşıldığı üzere YFC'nin oluşum miktarı 65 yılda %300 civarında bir artış göstermiştir (CSB, 2015). Rapor-da,Türkiye için Hatay, Zonguldak ve Karabük illerinde faaliyet gösteren demir-çelik entegre tesislerinde ortaya çıkan YFC miktarı 2,7 milyon ton olarak belirtilmektedir (Develioğlu & Pulat, 2018).

Şekil 10. Sahaya atılmış Cüruf atığı (Rakic, Basaric, Berisavljevic, & Berisavljevic, 2016)

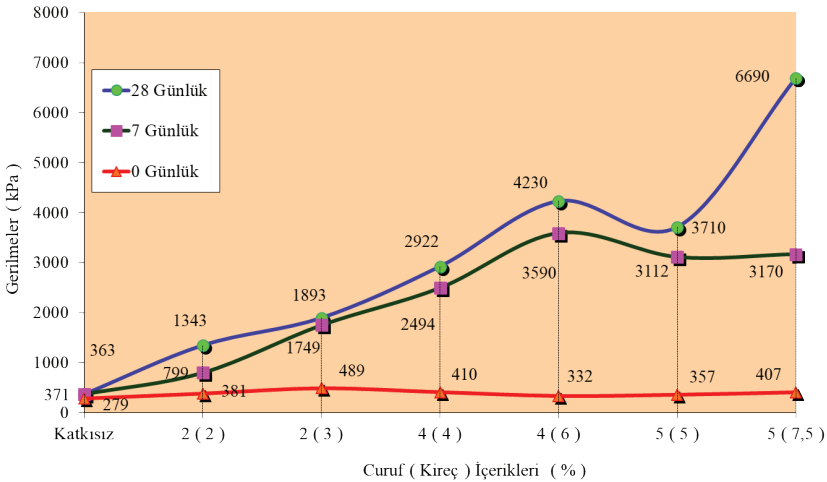


4.1.3. YFC ve Geri Dönüşüm

Doğal kaynakların tüketimini en aza indirmek ve çimento ve betonun özellikleri ile performansını geliştirmek için YFC kullanımı uzun yıllar önce araştırılmaya başlanmış, elde edilen sonuçlar ise olumlu yönde olmuştur (He, Li, Zhao, Zhao, & Qu, 2021). YFC'nin puzolanik etkilerinin araştırılması ilk olarak 1774 yıllarında başlamış ve 1889 yılında Paris metrosu inşaatı yapımında kullanılmıştır. Çimento imalatında bir katkı maddesi biçiminde ilk kullanım denemeleri ise 1892 yılında Almanya'da gerçekleşmiştir. Daha sonra 1896 yılında ABD'de çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmıştır (Uysal & Bahar, 2018). Beton agregası olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar, katkı malzemesi olarak kullanımına

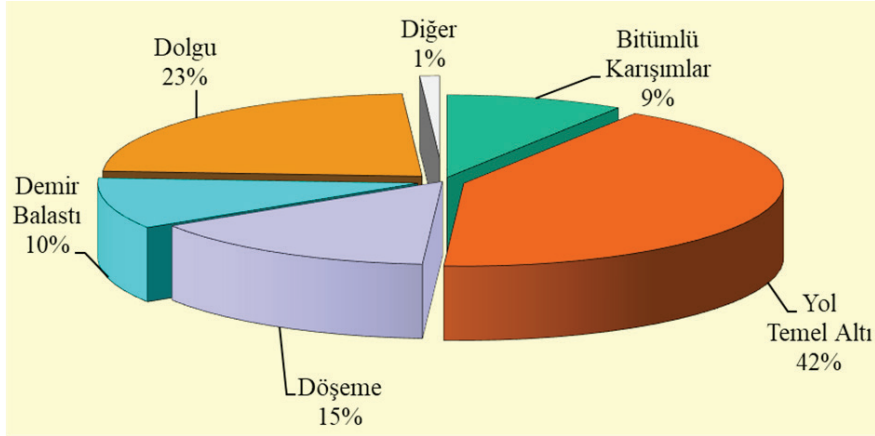
göre nispeten daha olumsuzdur. Bunda YFC'nin boşluklu bir yapıda olması dolayısı ile doğal agregaya kıyasla yoğunluğunun daha düşük olması rol oynamaktadır. Doğal bir agreganın ortalama birim hacim ağırlığı 1450 kg/m^3 civarlarında iken YFC'nin ortalama birim hacim ağırlığı 1350 kg/m^3 civarlarındadır (Develioğlu & Pulat, 2018).

Literatürde YFC'nin, karayolu mühendisliğinde, zemin iyileştirme, dolgu malzemesi, alt temel tabakası, temel tabakası ve yol kaplaması gibi mühendislik uygulamalarında kullanımı ile ilgili pek çok akademik çalışma bulunmaktadır (Kavak, Bilgen, & Capar, 2012; Khan, Kuri, & Sarker, 2021; Li, Ling, Yu, Wu, & Chen, 2019; Mahedi, Cetin, & Dayioglu, 2020; Nishida, Otsuki, Ohara, Garba-Say, & Nagata, 2015). Zemin iyileştirme amacı ile yapılan bir çalışmada, YFC'nin killi bir zeminin dayanımına etkisi, bu zeminin geoteknik özelliğinin iyileştirilmesi için kullanımı, bunun yanı sıra kireç ile etkileşimi araştırılmıştır. Karışım oranları YFC için %0 ile %7,5 arasında, kireç oranları içinse %0-%5 arasında seçilmiştir. Deneyssel olarak yapılan çalışmada, killi zeminler, farklı oranlarda YFC ve kireç ile karıştırılmıştır. Bu karışımlar üzerinde kıvam limitleri, serbest basınç, Proctor ve CBR deneyleri gibi bir takım geoteknik deneyler uygulanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre YFC'nin killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği savunulmaktadır (Bilgen, 2004). Şekil 11'de bu çalışma verilerinden elde edilmiş olan serbest basınç değerleri görülmektedir. Grafikten anlaşılabacağı üzere, kireç katkısı ile kullanılan YFC, killi zeminlerin dayanımını 371 kPa'dan 6690 kPa değerine çıkarmaktadır.



Şekil 11. YFC katkılı killi zeminlerdeki dayanım artışları (Bilgen, 2004)

Şekil 12’de YFC’nin %23 oranında bir kısmı dolgu yapımında, %42 oranındaki kısmının alt temel malzemesi olarak, 59 oranındaki kısmının bitümlü karışımlarda, %10 oranındaki kısmının demir baslastı olarak, %15 oranındaki kısmının döşeme yapımında kullanıldığı belirtilmektedir (Bilgen, 2004). Yapılan akademik çalışmalar, YFC’nin zeminde bulunan yeraltı suyu olumsuz bir tesiri olmadığı, arazide kullanımlarının uygun olduğu savunmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre, yol temeli ve yol alt temel malzemesi, beton yol agregası, demiryolu balastı, asfalt yolda kullanılan beton agregası, dolgu malzemesi biçiminde de kullanılmasında bir sorun yoktur (Geçkil, Tanyıldızı, & İnce, 2021).



Şekil 12. YFC'nin İnşaat sektöründe kullanım oranları

4.2 Çelikhane Cürufu (BOS) ve EAF Cürufları

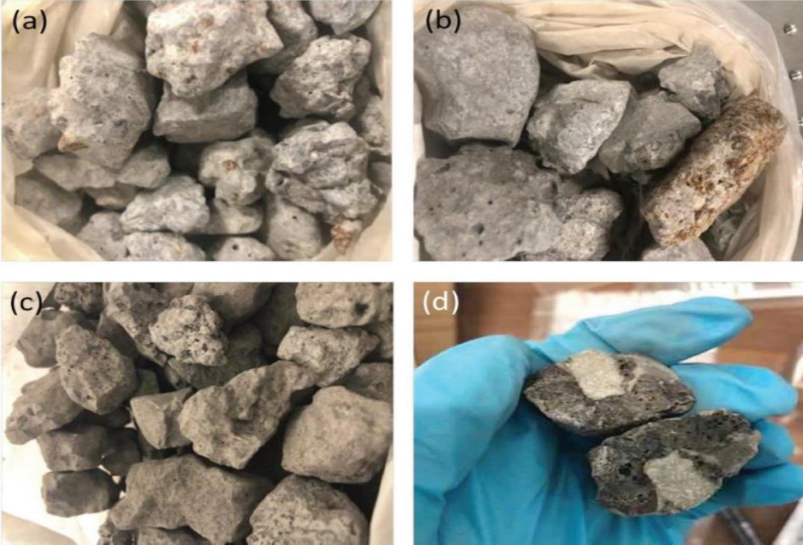
Çelikhane cürufu, çelik üretiminin ikinci aşamasında ortaya çıkan bir atıktır. Yüksek fırınlarda eritilmiş hale getirilen demir cevheri, çelikhane denilen fırınlarda içerisine eklenen farklı malzemelerle çelik haline dönüştürülürler. Çelikhanelerde bazik oksijen fırınları (BOF) ya da diğer adıyla LD konverterleri kullanılır. LD konverterleri, kullanılan refrakterin türünden ötürü “bazik” adını almaktadır. BOF fırınlarında ham demire kükürt, silisyum, fosfor giderme işlemleri uygulanır ve basınçlı saf oksijen verilerek bünyesindeki karbon miktarı azaltılır. Böylece, sıvı ham demirin (pik demirin) çeliğe dönüştürülmesi sağlanır. Bu işlemler sırasında farklı oksitlerden oluşan bir atık ortaya çıkar. Bu atığa çelikhane cürufu, çelik cürufu veya “Basic Oxygen Slag” (BOS) adı verilir (Bilgen, Kavak, & Çapar, 2012a). Sıvı demirin çeliğe dönüştürülmesinde elektirik arkı fırınları (EAF) da kullanılmaktadır. Bu tip fırınlardan çıkan cürufa da EAF cürufu denilmektedir (Fisher & Barron, 2021). Şekil 13’de çeliğin üretim aşamalarından bir kesit görülmektedir.



Şekil 13. Ham demirin çeliğe dönüşüm süreci (Erdemir, 2011)

4.2.1. BOS'un Kimyasal Kompozisyonu

Çelikhane cürufu, çelik içerisindeki empüritelerin oksidasyonu sonucu oluşan oksit ve silikatların oluşturduğu karmaşık bir kimyasal yapıya sahiptir. Fiziksel olarak çelik cürufları koyu gri renkte, kübik şekilli, yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptirler. Çelikhane cürufları YFC'ye kıyasla çok sert ve sıkı bir yapıdadırlar ve yoğunlukları %20-25 daha fazladır (Yıldırım & Özsu, 2001). Şekil 14'de tipik bir çelikhane cürufu görseli bulunmaktadır (Fisher & Barron, 2021). Tablo 2'de BOS'a ait tipik bir kimyasal içerik görülmektedir. BOS'un kimyasal yapısı, eriyik halde bulunan ham demirin ve elde edilecek olan çeliğin yapısına göre farklılık göstermekle birlikte genel olarak Tablo 2'de sunulan kimyasal içeriğe sahiptir (Bilgen, 2011; Çamcı, Aydın, & Arslan, 2002).



Şekil 14. Çelikhane Cürufu (BOS) (Fisher & Barron, 2021)

Tablo 2. BOS'un Kimyasal İçeriği (Bilgen, Kavak, & Çapar, 2012b)

Element	Fe	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	S	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
%	20,49	13,30	2,70	5,02	46,57	5,25	0,02	0,32	0,14	0,17	0,47

Tablo 3'te Erdemir ile TUBİTAK tarafından gerçekleştirilmiş olan bir proje kapsamında elde edilen veriler sunulmaktadır. Proje kapsamında BOS'un farklı boyutlardaki mühendislik özellikleri incelenmiştir. Proje çıktılarına göre, 19 ila 25 mm çapındaki dane boyutlarına sahip BOS'un yığın yoğunluğu 3,71 gr/cm³ dür. Boyutların 25 mm ila 40 mm arasında olması durumunda ise yığın yoğunluğu biraz azalmakta ve 3,69 gr/cm³ değerine düşmektedir. 0,075 mm'den küçük boyuttaki BOS'a ait özgül ağırlık değeri 2,95 gr/cm³, 0,075 ila 4 mm arasında 3,08 gr/cm³ ve 4 mm çapından büyük olan BOS'a ait özgül ağırlık değeri 3,12 gr/cm³ olarak tanımlanmaktadır. 19 mm ila 25 mm arasındaki BOS'larda gözeneklilik %2,01 iken boyutlar 25 mm ila 40 mm arasına yükseldiğinde bu değer %1,5 olarak azalmaktadır.

Su emme miktarı 0,075 mm ila 4 mm arasındaki BOS'lar için %0,83, 4 mm'den büyük boyutlarda %0,95 değerindedir. Ek olarak soyulma direnci %75 ila %85 arasında, yassılık indeksi %20, dona karşı dayanıklılık değeri 5 mm'den büyük boyutlu daneler için %8,56 ve Los Angeles aşınma kaybı %15,5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, doğal agregalarla kıyaslandığında BOS'un oldukça dayanıklı ve sağlam bir yapıda olduğu görülmektedir (Erdemir, 2007b).

4.2.2. Dünyadaki Çelikhane Cürufu Miktarları

Erdemir tesislerde 1 ton çelik üretiminde yaklaşık olarak 125 kg BOS ortaya çıkmaktadır (Bilgen, 2011). Erdemir'in 2005 verilerine göre, yıllık çelik üretimi sonucu yaklaşık 300 bin ila 350 bin ton arasında çelikhane cürufu açığa çıkmaktadır (Erdemir, 2007a). Dünya çelik örgütü 2021 verilerine göre ortalama olarak, bir ton çelik üretimi, elektrik ark ocağı (EAF) rotası için yaklaşık 200 kg ve yüksek fırın-bazık oksijen fırını (BF-BOF) rotası için 400 kg civarında yan ürün ile sonuçlanmaktadır. (World Steel Association, 2021).

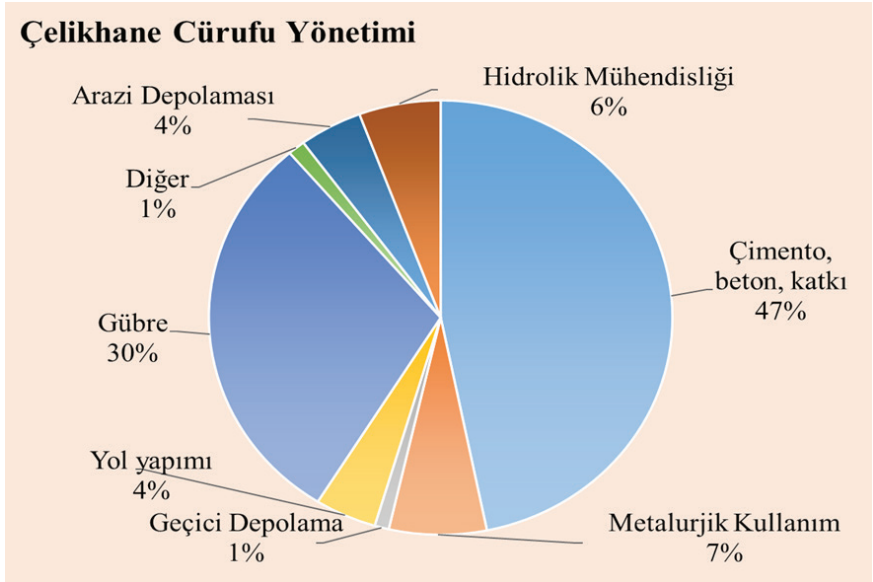
Tablo 3. BOS'un Mühendislik Özellikleri (Bilgen et al., 2012b)

Özellikler	Çelikhane Cürufu (BOS)
Yığın Yoğunluğu (gr/cm ³)	3,71 (25-19 mm) 3,69 (40-25 mm)

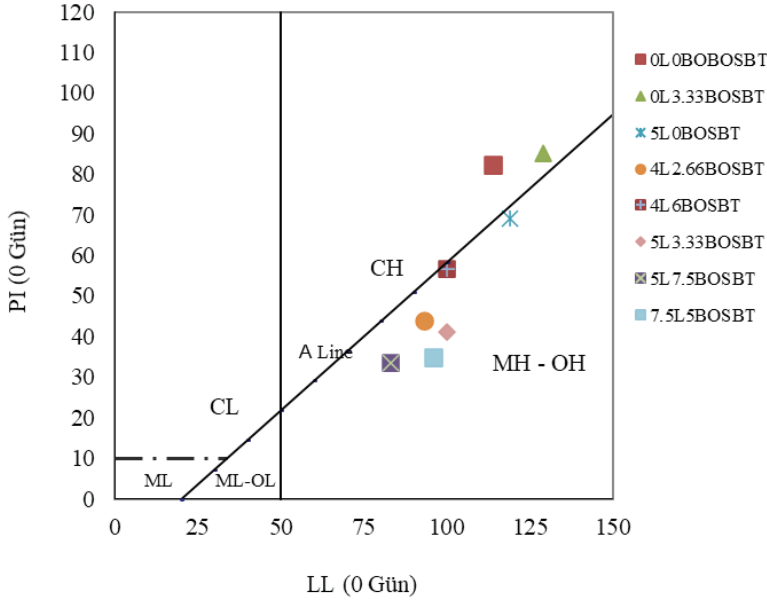
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,12 (+4 mm) 3,08 (-4+0,075 mm.) 2,95 (-0,075 mm)
Gözeneklilik (%)	2,01 (25-19 mm) 1,50 (40-25 mm)
Su Emme (%)	0,95 (+4 mm) 0,83 (-4+0,075 mm.)
Soyulma Dayanımı (%)	75-85
Yassılık İndeksi (%)	20
Dayanıklılık (Don Kaybı) (%)	8,56 (+5 mm)
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	15,5

4.2.3 Çelikhane Cürufu ve Geri Dönüşüm

Çelikhane cürufalarının yeniden kullanımı konusunda pek çok çalışma bulunmaktadır (Saltuk Bölükbaşı, Kemal, & Öngü, 2021; Wang Xinming Li Kebin Ren Chenhui Liu, 2020; Zhao et al., 2022). Yapılan çalışmalarda, çelikhane cürufunun başta inşaat sektörü olmak üzere, metal sektöründe ve ziraat sektöründe faydalı kullanımları konusunda olumlu sonuçlar alınmaktadır. 2021 dünya çelik raporunda çelikhane cürufunun kullanım alanları ile ilgili verdiği veriler Şekil 15'te sunulmuştur.



Şekil 15. Çelikhane Cürufunun Kullanım Alanları (World Steel Association, 2021)

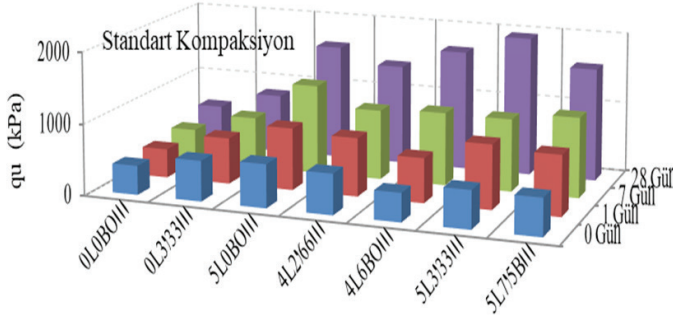


Şekil 16. BOS Katkılı Killi Zeminlerin USCS tablosundaki Konumları

Bu verilere göre, %47 oranında çimento ve beton yapımında katkı malzemesi olarak ve %4 oranında yol yapımı inşasında ve %6 hidrolik mühendisliğinde olmak üzere olmak üzere toplamda %57 oranında çelikhane cürufu inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Bunun dışında, %30 oranında gübre olarak ve %7 oranında metalürji sektöründe kullanılan çelikhane cürufunun %4 oranındaki kısmı arazilerde atıl olarak depolanmaktadır (World Steel Association, 2021).

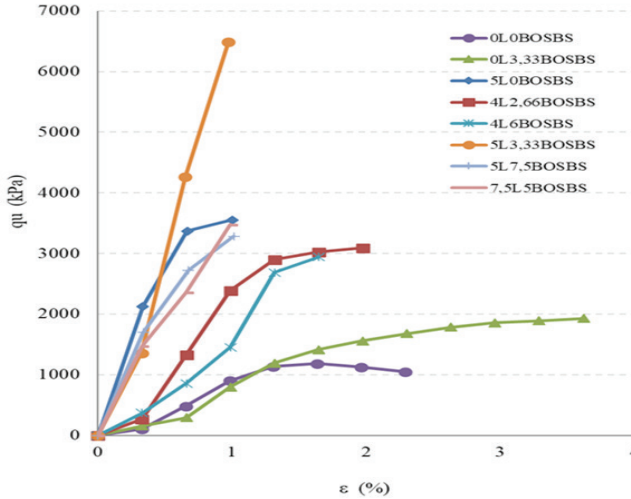
Literatürde yapılan çalışmalar, BOS'un doğal agregalarla kıyaslanması ve inşaat sektöründe daha yaygın olarak kullanılmasını desteklemektedir. Örneğin, Bilgen tarafından 2011 yılında yapılan doktora tezinde çelikhane cürufunun killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, farklı oranlarda BOS kullanılarak, BOS'un killi zeminlerin geoteknik özelliklerindeki etkileri incelenmiştir. Aynı zamanda BOS ve kireç etkileşiminin de incelendiği çalışmada, hazırlanan numuneler üzerinde ASTM standartlarına uygun olarak bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, elek analizi, kıvam limitleri ve hidrometre deneyi; Proctor deneyleri (modifiye ve standart enerjilerde; serbest basınç ve California taşıma oranı (CBR) deneyleri olarak sıralanabilir. Ayrıca killer ve katkı maddeleri üzerinde özgül ağırlık testleri ve asitlik denge ölçümü için pH ölçüm ve sismik dalga ölçüm deneyleri de gerçekleştirilerek BOS'un killer üzerindeki etkileri geniş çaplı

bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilmiş grafikler Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19’da sunulmaktadır (Bilgen, 2011).



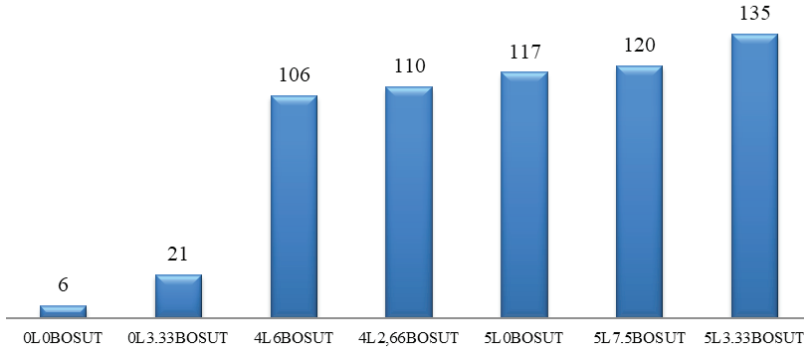
Şekil 17. BOS Katkılı Killi Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımları

Şekil 16’da görüldüğü üzere, Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre (USCS) (ASTM D4318, 2010) yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına giren zemin, %7,5 kireç ve %5 BOS katkısı ile karıştırıldığında, yüksek plastisiteli silt (MH) sınıfına geçiş yapmaktadır. Şekil 17’de standart kompaksiyon (ASTM D1557, 2003b) enerjisi ile sıkıştırılan BOS katkılı killerin serbest basınç dayanımlarının (ASTM D2166, 2013) 300 kPa değerlerinden, 2000 kPa değerlerine yükseldiği görülmektedir. Sıkıştırma yönteminin modifiye Proctor (ASTM D1557, 2003a) ile yapılması halinde ise serbest basınç değerinin Şekil 18’de görüldüğü gibi 1000 kPa değerinden 7000 kPa değerine yükselmiş, deformasyonlar %4 den %1 değerlerine düşmüştür.



Şekil 18. BOS Katkılı Killi Zeminlerin Gerilme-Şekil değiştirme İlişkisi

Şekil 19’da, BOS katkılı killi zeminlerin bir başka dayanım değerini belirten California taşıma gücü (CBR) değerleri (ASTM D1883, 2007), görülmektedir. Grafikten anlaşılaacağı üzere, katkısız durumda iken %6 olan CBR değeri, BOS katkısı ile %135 değerlerine kadar yükselmektedir. Killi zeminler, özellikle yol ve doğu çalışmalarında istenmeyen, geoteknik açıdan yetersiz zeminler olarak tanımlanırken, çalışma (Bilgen, 2011) sonuçlarındaki gerek serbest dayanımı gerekse CBR deneyleri katkı olarak kullanılan BOS’un, killi zeminlerin geoteknik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir.



Şekil 19. BOS Katkılı Killi Zeminlerin CBR değerleri

5. SONUÇ

Bu çalışmada, “Küresel Isınma” konusu üzerinde durulmuştur. Küresel ısınmanın artması, felaketlerin ve tahmin edilemeyecek sorunların rutin hale gelmesi ile sonuçlanacaktır. Nitekim 2020 yılında tüm dünyayı etkisi altına alan ve içinde bulunduğumuz 2022 yıllarının ilk aylarında hala etkisini gösteren Covid-19 salgını, 2021 yazında dünyanın farklı yerlerinde meydana gelen yangınlar ve seller ve benzeri felaketler ile küresel ısınma arasında bir bağlantı kurmak mantığa aykırı gibi görülmemektedir. İnsanların doğal kaynaklara sahip çıkmalarının nicel bir ölçüsü olan “ayak izi” kavramı ve sürdürülebilir bir gelecek için temiz enerji kavramları giderek daha önemli kavramlar haline gelmektedir. Dolayısı ile, doğal kaynakların yüksek miktarlarda tüketildiği sektörlerin sürdürülebilirlik adına kendilerini yenilemeleri kaçınılmazdır ve sürdürülebilirlik için üretim, tüketim ve atık yönetiminin yeniden tasarlanmasını gerektirir (Dovi, Friedler, Huisin, & Klemeš, 2009). Sunulan çalışma kapsamında, aşırı CO₂ salınımının küresel ısınmaya sebep olan en önemli etmen olduğu detayları ile açıklanmıştır. Bu sebeple, tüm sektörlerin ve akademisyenlerin, üretim aşamasından geri dönüştürme ve yeniden kullanım aşamasına kadar karbon salınımının en aza indirilmesi ile ilgili çalışmalar üzerinde yoğunlaşması hayati önem arz etmektedir.

Sunulan çalışma kapsamında detaylı olarak belirtildiği üzere, karbon salınımı ve sera etkisi konusunda, atıkların rolü oldukça büyüktür. Bu sebeple çalışma kapsamında, küresel ısınma ile atıklar arasındaki bağlantı üzerinde durulmaya çalışılmıştır. Atıkların, inşaat sektöründe kullanılması büyük önem taşımaktadır (Bilgen, 2020a; Bilgen et al., 2020; Houlihan, Bilgen, Dayioglu, & Aydılek, 2021). Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, beton yapımında Portland çimentosu yerine cüruflu çimento kullanılması, somut CO₂ emisyonlarının %59 oranında azalmasına ve somutlaştırılmış enerjinin %42 sine kadar tasarruf edilmesine aracı olmaktadır (World Steel Association, 2021). Büyük hacimli atıkların inşaat malzemeleri olarak yeniden kullanılabilmesi çevre kirliliğini önemli derecede azaltabilir (İbrahim, Mawlood, & Alshkane, 2021; Liu, Shi, Zhang, & Li, 2019). Kömür türevi uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu önemli çevre sorunlarına neden olan ve literatürde çok tartışılan atıklar arasındadır (Niyomukiza, Wardani, & Setiadji, 2021; Toksöz Hozathioğlu & Yılmaz, 2021; Yılmaz, 2020). Bu sebeple, yapılan bu çalışma kapsamında, demir çelik üretimi esnasında ortaya çıkan cürufların inşaat sektöründe, yol ve dolgu çalışmaları kullanımı ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

Oluşan yan ürünlerin geri dönüştürülmesi yanında, çeliğin üretim aşamasında atık miktarının azaltılması ile ilgili yapılan çalışmalar da küresel ısınma sorununun çözümüne büyük katkı sağlayacaktır. Dünya çelik örgütünün 2021 Mayıs ayında gerçekleştirildiği “İklim değişikliği ve demir sektörü” başlıklı sunuda, 2020’de ortalama olarak üretilen her bir ton çeliğin, 1,85 ton CO₂ emisyonuna yol açtığı ve bu değerin 2020’de toplam doğrudan emisyonlar ve küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının %7 ila %9’unu temsil eden 2,6 milyar ton düzeyinde olduğunu belirtilmiştir. Ayrıca, çelik üretimi için fosil CO₂ emisyonunu önlemek adına, sürdürülebilir biokütle gibi bir karbonu kullanılması, indirgeyici olarak karbon yerine hidrojenin kullanılması, CO₂ yerine H₂O (su) üretilmesi, elektrolize dayalı bir süreçle elektrik enerjisinin kullanılması gibi konular üzerinde çalışmalar yapıldığı belirtilmektedir (Ekdahl, 2021)

Literatür verileri cürufların yeniden kullanımı ve geri dönüşümü ile ilgili olumlu sonuçlar vermekle birlikte hala arazilerde atık durumda cüruflar bulunmaktadır. Bu sebeple geri dönüşüm konusunda yapılacak çalışmaların sürdürülmesine ihtiyaç vardır. İlgili çalışmalara tüm dünya çapında gerek üniversiteler gerek bilimsel kurum ve kuruluşların gerek sanayi ve devlet kurumları tarafından gerekli desteğin verilmesi oldukça önemlidir. Küresel ısınma ve demir çelik atıkları konusunun ele alındığı bu çalışmanın da konu hakkında yapılacak akademik çalışmalara katkı sağlaması umulmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abdunaser, K. (2022). Geotechnical study of contaminated produced water on sandy soil: a case study of Libya. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09283-6>
- Acar, M. C. (2022). Usability of Kayseri volcanic slags as filling material on flexible paved roads. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(1), 47–56. <https://doi.org/10.17341/gazimfd.870466>
- ASTM D1557. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. , 3 ASTM International, West Conshohocken, PA § (2003).
- ASTM D1557. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). , ASTM International, West Conshohocken, PA § (2003).
- ASTM D1883. Standard test method for California bearing ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. , ASTM International, West Conshohocken, PA § (2007).
- ASTM D2166. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. , ASTM International, West Conshohocken, PA § (2013).
- ASTM D4318. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. , 04 ASTM International, West Conshohocken, PA § (2010).
- Balcı, E., Kalça, Y. M., & Bilgen, G. (2021). Batı Karadeniz Havzası Bozkurt ilçesi sel felaketi incelemesi. *3th International Disaster and Resilience Congress (IDRC)*, (October), 71–79.
- Bilgen, G. (2004). *Yüksek Fırın Cürufu ile Zemin Stabilizasyonu*. Kocaeli Üniversitesi.
- Bilgen, G. (2011). *Öğütülmüş çelikhane cürufu, kireç ve deniz suyun killerin iyileştirilmesinde kullanımı*. Kocaeli Üniversitesi.
- Bilgen, G. (2020a). Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 3163–3173. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>
- Bilgen, G. (2020b). Utilization of powdered glass in lime-stabilized clayey soil with sea water. *Environmental Earth Sciences*, 79(19), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09195-w>
- Bilgen, G. (2021). *Sürdürülebilir çevre kavramı çerçevesinde inşaat ve yıkım atıkları (Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar)* (A. Güllü & S. Yalçınkaya, Eds.). Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları.
- Bilgen, G., Houlihan, M., Ryoo, S., Wang, Y., & Aydilek, A. H. (2020). Hydraulic and environmental compatibility of RCA with filters and subgrades

- in highways. *Environmental Geotechnics*, 1–13. <https://doi.org/10.1680/jenge.20.00040>
- Bilgen, G., & Kavak, A. (2010). Effects of seawater on geotechnical properties of a clay soil. *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(8), 1623.
- Bilgen, G., Kavak, A., & Çapar, Ö. F. (2012a). Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane curufunun kullanılması ve kireç ile etkileşiminin araştırılması. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 2(2), 30–38. <https://doi.org/10.7212/zkufbd.v2i2.92>
- Bilgen, G., Kavak, A., & Çapar, Ö. F. (2012b). Effect of steel slag used with sea water upon the strength of Uzunciftlik clay. *3 Rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1–8.
- Çamcı, L., Aydın, S., & Arslan, C. (2002). Reduction of iron oxides in solid wastes generated by steelworks. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(1), 37–44.
- Congress of the United States. (1970). *Reorganization Plan No . 3 of 1970 Environmental Protection Agency (EPA) Advantages of Reorganization An On-Going Process*. Retrieved from <https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/reorganization-plan-no-3-1970.html>
- CSB. (2015). *Demir çelik cüruf raporu*. Retrieved from https://celik.org.tr/wp-content/uploads/2016/12/4-TCUD-Curuf_Rapor.pdf
- Develioğlu, İ., & Pulat, H. F. (2018). Investigation of geotechnical properties and bearing capacity performance of blast furnace slag. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(3), 433–438. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.82574>
- Dovi, V. G., Friedler, F., Huisingh, D., & Klemeš, J. J. (2009). Cleaner energy for sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 889–895. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2009.02.001>
- Ekdahl, A. (2021). Climate Change and the Production of Iron and Steel: an Industry View. In *World Steel Association*. Belgium. Retrieved from <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel-an-industry-view.pdf>
- Erdemir. (2007a). *Çelik üretim curuflarının asfalt üretiminde kullanılması-Teknik Rapor*. Kdz.Ereğli- Zonguldak.
- Erdemir. (2007b). *Sustainable Steel Report 2006-2007*. Kdz.Ereğli- Zonguldak.
- Erdemir. (2011). *Technical Facts-Erdemir Reports*. Kdz.Ereğli- Zonguldak.
- Fisher, L. V., & Barron, A. R. (2021). Suitability of steel making slag as a construction material resource. *Recent Progress in Materials*, 03(03), 1–17. <https://doi.org/10.21926/rpm.2103028>

- Fredericci, C., Zanotto, E. D., & Ziemath, E. . (2000). Crystallization mechanism and properties of a blast furnace slag glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 273, 64–75.
- Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M., & İnce, C. B. (2021). Yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş killi bir zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri. *European Journal of Science and Technology*, (27), 158–170. <https://doi.org/10.31590/ejosat.932204>
- He, T., Li, Z., Zhao, S., Zhao, X., & Qu, X. (2021). Study on the particle morphology, powder characteristics and hydration activity of blast furnace slag prepared by different grinding methods. *Construction and Building Materials*, 270, 121445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121445>
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., & Taylor, M. (2018). Impacts of 1.5°C of global warming on natural and human systems. *Special Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), SR15_Chapt*(ISBN 978-92-9169-151-7), 175–181. Retrieved from http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_chapter3.pdf
- Houlihan, M., Bilgen, G., Dayioglu, A. Y., & Aydılek, A. H. (2021). Geoenviromental evaluation of RCA-stabilized dredged marine sediments as embankment material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 04020435. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003547](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003547)
- Ibrahim, H. H., Mawlood, Y. I., & Alshkane, Y. M. (2021). Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 496–503. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1647644>
- IPCC. (2018). İklim değişikliği : En kritik 20 yıl. In *Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli*. Retrieved from <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-45938984>
- Kavak, A., Bilgen, G., & Capar, O. F. (2012). Using ground granulated blast furnace slag with seawater as soil additives in lime-clay stabilization. *ASTM Special Technical Publication*, 1540 STP(7), 481–497. <https://doi.org/10.1520/stp49485t>
- Kaza, S., Yao, L., Bhanda-Tata, P., & Woerden, F. Van. (2018). *What a waste 2.0: A Global snapshot of solid waste management to 2050*. Tokyo: Wolrd Bank Group. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Khan, M. N. N., Kuri, J. C., & Sarker, P. K. (2021). Effect of waste glass powder as a partial precursor in ambient cured alkali activated fly ash and fly ash-GGBFS mortars. *Journal of Building Engineering*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101934>
- Li, B., Ling, T. C., Yu, J. G., Wu, J., & Chen, W. (2019). Cement pastes modified with recycled glass and supplementary cementitious materials: Properties at the ambient and high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118115.

- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., & Li, N. (2019). An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 144(December 2018), 297–309. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.007>
- Mahedi, M., Cetin, B., & Dayioglu, A. Y. (2020). Effect of cement incorporation on the leaching characteristics of elements from fly ash and slag treated soils. *Journal of Environmental Management*, 253, 109720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109720>
- Mango, B. I. G. (2010). Slag glass for the color obsessed. Retrieved from <https://www.bigmangotrading.com/for-the-color-obsessed/>
- Mazaheri, A., Bayat, A., & Hosinzadeh, F. (2021). Investigating the effect of alkali-activated slag on the strength of clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09039-2>
- Naidu, T. S., Sheridan, C. M., & van Dyk, L. D. (2020). Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses. *Minerals Engineering*, 149, 106234. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2020.106234>
- Nishida, T., Otsuki, N., Ohara, H., Garba-Say, Z. M., & Nagata, T. (2015). Some considerations for the applicability of seawater as mixing water in concrete. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 27(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001006](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001006)
- Niyomukiza, J. B., Wardani, S. P. R., & Setiadji, B. H. (2021). Recent advances in the stabilization of expansive soils using waste materials: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 623(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/623/1/012099>
- Rakic, D., Basaric, I., Berisavljevic, Z., & Berisavljevic, D. (2016). Geotechnical Characteristics of Industrial Waste Slag and Sludge From Smederevo Steel. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 17(2), 512–522.
- Resmi Gazete. *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik*. , Pub. L. No. 27533 (2010).
- Resmi Gazete. *Atık Yönetimi Yönetmeliği*. , Pub. L. No. 30016 (2017).
- Saltuk Bölükbaşı, Ö., Kemal, &, & Öngü, T. (2021). Exploratory of the freezing-thawing behavior of clay and steel slag mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(7), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06956-0/> Published
- Saribas, I. (2022). Structural Optimization Behavior of Green Concrete Members. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06426-5>
- Solak, S. G., & Pekkuçukşen, S. (2018). Türkiye’de kentsel katı atık yönetimi: karşılaştırmalı bir analiz. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(3), 653–683.

- TDK. (2022a). Cüruf. Retrieved from Türk Dil Kurumu website: <https://sozluk.gov.tr/>
- TDK. (2022b). Sözlük. Retrieved from Türk Dil Kurumu website: <https://sozluk.gov.tr/>
- Tezel, Ö., & Yıldız, E. (2020). Sürdürülebilir Atık Yönetimi Uygulamalarında Dünya Ve Türkiye Karşılaştırması: Edikab Örneği. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 9(2), 35–48.
- TMMOB. (2018). Dünya Çevre Günü Türkiye Raporu , Haziran 2018. Retrieved from Çevre Mühendisleri Odası website: https://www.cmo.org.tr/resimler/ekler/0d4a5b926c005a6_ek.pdf
- Toksöz Hozatlıoğlu, D., & Yılmaz, I. (2021). Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils. *Engineering Geology*, 280(105931). <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2020.105931>
- Toprak Dünyası. (2022). Volkanik Tuf (Cüruf). Retrieved from <http://toprakdunyasi.com/tr/volkanik-tuf-curuf>
- Venkataramanan, M. (2011). Causes and effects of global warming. *Indian Journal of Science and Technology*, 4(3), 226–229. <https://doi.org/10.17485/ijst/2011/v4i3.17>
- Wang Xinming Li Kebin Ren Chenhui Liu, S. (2020). Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4603–4615. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01313-6>
- World Steel Association. (2021). Steel industry. In *World Steel Association*. <https://doi.org/10.1201/9781420003840-24>
- Yildirim, G., & Özsu, A. (2001). “Erdemir’de çevre yatırımları ve ISO 14001 uygulamaları.” *Makine Mühendisleri Odası*, 977–1001.
- Yılmaz, F. (2020). Investigation of the effect of fly ash and marble powder additives on stabilization and freezing-thawing of soil (in Turkish). *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 56–61. <https://doi.org/10.21541/apjes.488373>
- Yorulmaz, A., Sivrikaya, O., & Uysal, F. (2021). Evaluation of the bearing capacity of poor subgrade soils stabilized with waste marble powder according to curing time and freeze-thaw cycles. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06749-5>
- Zhao, X., Sheng, Y., Lv, H., Jia, H., Liu, Q., Ji, X., ... Meng, J. (2022). Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate. *Construction and Building Materials*, 315, 125655. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125655>

“

Bölüm 2

İYON DEĞİŞTİRİCİ MEMBRANLAR

Mehmet Semih Bingöl¹

¹ Dr., Atatürk Üniversitesi, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Erzurum, Türkiye. ORCID: 0000-0002-4616-7143, e-posta: semih.bingol@atauni.edu.tr

”

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyıldan beri, iyon değiştirici membranlar, çeşitli alanlardaki uygulamaları nedeniyle araştırma konusu olmuştur. Tarihte ilk kez 1924 yılında iyon değiştirici membranlarla ilgili teori, Donnan tarafından geliştirilmiştir (Strathmann, 2010). İyon değiştirici membranların tarihsel gelişimleri Tablo 1’de verilmiştir (Costamagna & Srinivasan, 2001). İyon değiştirici membranlar, polimer matrisinde sabit yükler taşıyan önemli bir yoğun polimerik membran sınıfındadır (T. Luo vd., 2018). Bu membranlar, benzer yüklü iyonları engellerken, zıt yüklü iyonların (karşı iyonların) geçişine seçici olarak izin vermektedir (Merle vd., 2011). Karşı iyonlar için iyon değiştirici membran geçirgenliği ilk olarak Donnan tarafından açıklanmıştır. Bu nedenle bu mekanizma, Donnan etkisi veya Donnan dışlaması (ko-iyonlara doğru) olarak adlandırılmaktadır (Varcoe vd., 2014).

İlk elektro-membran prosesi	1850’ler
Donnan dışlama	1910’ler
İlk iyon Değiştirme membranı	1920’ler
İlk mozaik membran	1930’ler
İlk elektro membran endüstriyel uygulaması	1940’ler
İlk ticari iyon değiştirme membranı ve ED	1950’ler
İlk Deniz tuzu üretimi	1960’ler
İlk devamlı elektrodeionizasyon	1970’ler
İlk Bipolar Membran	1980’ler
İyon değiştirici membranların kapsamlı endüstriyel uygulamaları	2000’ler

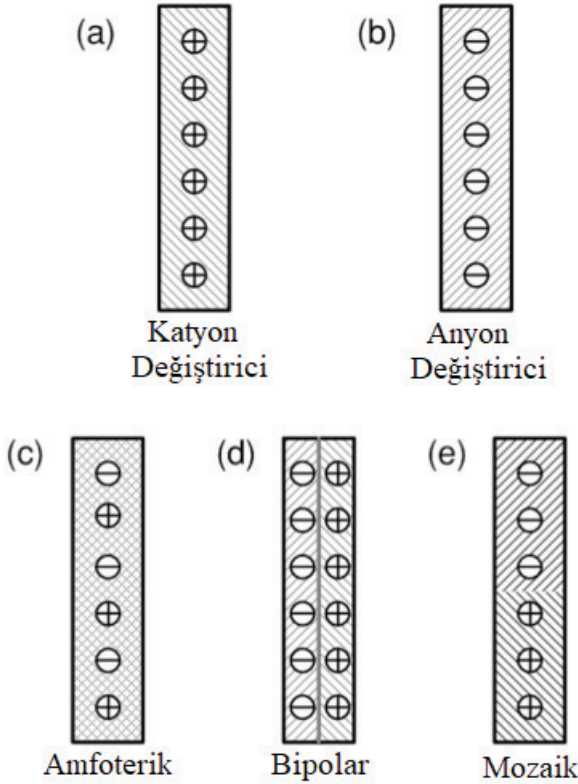
Tablo 1. İyon değişim membranlarının tiplerini ve ortaya çıkışlarının başlangıcından itibaren gelişim zamanlarını göstermektedir.

İyon Değiştirici Membran (İDM) akademik ve endüstriyel alanlarda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. İDM ile ilgili alanların çeşitli gereksinimlerini karşılamak için yeni İDM’ler geliştirilmiş ve belirli hedeflenen faaliyetlere yönelik araştırma çalışmaları yapılmıştır (Yaroslavtsev & Nikonenko, 2009). Bugüne kadar, İDM’lerin çoğu, önceden var olan polimerlerin işlevselleştirilmesi veya işlevselleştirilmiş monomerlerin doğrudan polimerizasyonu ile hazırlanan polimerik omurgalarından oluşur. Hazırlanan polimerleri İDM’lere dönüştürmek için uygun membran oluşturma tekniklerine ihtiyaç vardır ve bu teknikler geçmiş yıllarda geniş çapta çalışılmıştır (Timashev & Kemp, 1991). Mükemmel özelliklere sahip İDM’ler, çeşitli cihazlara ve süreçlere monte edilebilir. İyon değişim membranları, esnek polimer zincirleri temelinde inşa edilir, bunların tekrar eden birimleri alifatik, siklik, aromatik, hidrokarbon parçaları veya perflorlu birimler fonksiyonel gruplar ($-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{PO}_3\text{H}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_3\text{OH}$, vb.) içerir. Bir membranla temas eden çözeltilerde bulunan iyonlarla, proton veya OH^- grupları ikame edilebilir (Mesyats & Prokhorov, 2004).

Halihazırda, bir kısmı endüstride üretilen bir kısmı da fabrikasyon ve esas olarak araştırma amaçlı kullanılan çok sayıda membran malzemesi bulunmaktadır. Membranların pratik olarak uygulanabileceği bölgelerin çokluğu, onlara yapılan taleplerin çeşitliliğini belirler ve birçok işlemi gerçekleştirmek için uygulanan geniş yelpazesi gelişimini tetiklemektedir. İyon değiştirici membranlar da bu yönden önemlidir. Son on yılda, İDM uygulamalarının çoğunun enerji ve çevre ile ilgili sorunları çözmesi beklenmektedir. Bu çalışmada, iyon değiştirici membranların tipleri, üretim yöntemleri ve uygulamaları ele alınacaktır.

2. İYON DEĞİŞTİRİCİ MEMBRANLARIN SINIFLANDIRILMASI

İyon değiştirici membranlar işlevsel tipleri bakımından 5'e ayrılır. Bunlar Katyon değiştirici, anyon değiştirici, amfoterik, bipolar ve mozaik membranlar şeklindedir (Şekil 1) (Sata, 2007).



Şekil 1. İyon değiştirici membran tipleri

1.1.Kasyon Değişirici Membranlar

Kasyon değişim membranları (KDM), membran omurgasına sabitlenmiş $-\text{SO}_3^-$, $-\text{COO}^-$, $-\text{PO}_3^{2-}$, $-\text{PO}_3\text{H}^-$, $-\text{C}_6\text{H}_4\text{O}^-$ vb. gibi negatif yüklü gruplar içerir ve kasyonların geçişine izin verir, ancak anyonları reddeder. KDM'ler genellikle sülfonik asit grupları, fosforik asit grupları, sülfonamidler ve azot türevleri içerir(Hideo vd., 1991).

KDM'ler için Omurga olarak poli(eter sülfon) (PES), poli(eter keton) (PEK), polibenzimidazol (PBI), poliimid (PI), poli(fenilen), polifosfazen ve poliviniliden florür (PVDF) gibi çeşitli polimer malzemeler kullanılmıştır. Ayrıca, polimerik iyonomerlerin topolojik mimarilerindeki varyasyonun, KDM'lerin genel performansını önemli ölçüde etkilediğı doğrulanmıştır(Ran vd., 2017).

1.1.1. Ana zincir tipine sahip KDM'ler

KDM'ler başlangıçta, kasyonik grupların doğrudan polimer omurgalarına bağlandığı ana zincir yapısından geliştirilmiştir (Şekil 2a). Bu tip KDM'ler esas olarak ya kimyasal olarak sağlam ana zincirlerin sülfonasyonu sonrası ya da sülfonatlı monomerlerin kopolimerizasyonu ile hazırlanır(Z. Zhang & Xu, 2014). Poli-yoğunlaştırma, aromatik KDM'leri elde etmek için en sık kullanılan kopolimerizasyon reaksiyonudur. Bu yaygın olarak bir nükleofilik mekanizma yoluyla elde edilir(Z. Zhang vd., 2012; Z. Zhang & Xu, 2013).

1.1.2. Blok kopolimerlere dayalı KDM'ler

Blok kopolimerler, daha büyük, daha karmaşık bir makromolekül oluşturmak için birbirine kovalent olarak bağlanmış iki veya daha fazla kimyasal olarak farklı polimer fragmanından oluşan yapıya denir(Oh vd., 2012). KDM'lerin kasyon iletkenliğini arttırmanın en etkili yollarından biri, membran matrisi içinde birbirine bağlı kasyon iletici kanallar oluşturmaktır(Shi & Holdcroft, 2005). İşlevselleştirilmiş bölümler ile işlevselleştirilmemiş bölümler arasındaki hidrofilik/hidrofobik ayırım, nano ölçekte faz ayırımına yol açar (Bae vd., 2011). İyi tanımlanmış nano faz ayırımının oluşumunu kolaylaştırmayı amaçlayan en etkili stratejilerden biri, çeşitli topolojik yapılaraya sahip polimerleri keşfetmektir (Bae vd., 2010). Yoğun sülfonik asit grupları tarafından işlevselleştirilmiş belirli bir segmente sahip blok kopolimerler (Şekil 2b) kullanılarak, atomik kuvvet mikroskobu (AFM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) veya küçük açılı X-ışını ile gözlemlendiğı gibi mükemmel nano-faz ayırımı elde edilebilir (Chen vd., 2009).

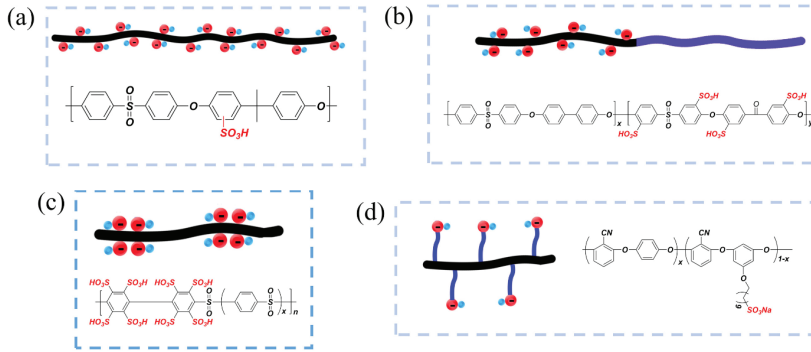
1.1.3. Yoğun şekilde işlevselleştirilmiş KDM'ler

Mikro-faz ayrılmasını teşvik etmek için bir başka etkili yöntem, yoğun bir şekilde kümelenmiş kasyonik gruplara sahip çeşitli monomerleri

polimer omurgalarına sokmaktır (Şekil 2c)(Takamuku vd., 2015).

1.1.4. Yan zincir tipine sahip KDM'ler

Nafion® membranının yapısından esinlenerek, iyi tanımlanmış faz ayırma mikro-morfolojisi oluşturmak için hayati önem taşıyan sülfonik asit gruplarının hareketliliğini geliştirmek için bir dizi yan zincir tipi KDM hazırlanmıştır (Şekil 2d)(Na vd., 2012). Yan zincirleri polimer ana zincirine sokmanın geleneksel yöntemi, fenol gruplarının 1,3-propan Sültan, 1,4-bütan sültan veya sodyum 6-bromoheksilsülfonat ile reaksiyona sokulmasıdır(Sheng vd., 2012; X. Zhang vd., 2015). Azid-alkin tıklama reaksiyonları ve potasyum karbonat aracılı nükleofilik ikame reaksiyonları gibi sülfonik asit gruplarını dahil etmeye yönelik diğer stratejiler de geliştirilmiştir (Lafitte vd., 2005; Qi vd., 2015).



Şekil 2. Katyon değiştirici membran tiplerinin kimyasal yapılarına örnekler

1.2. Anyon Değiştirici Membranlar

Anyon değiştirici membranlar (ADM) katyonları iterken anyonların geçişine izin veren pozitif yüklü baş grupları içerir (Xu, 2005). ADM'ler, alkali olmayan form anyonlarını (örneğin Cl⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻) geçen ADM'ler ve alkalın form anyonlarını (örneğin OH⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻) içermektedir (Varcoe vd., 2014). ADM'lere özel araştırmalar, anyon değişim membranlı yakıt hücreleri ve anyon değişim membranlı su elektrolizi gibi yüksek pH ve yüksek sıcaklık uygulamaları için AEM'lerin geliştirilmesine odaklanılmıştır (Gottesfeld vd., 2018; Marini vd., 2012; Vincent & Bessarabov, 2018).

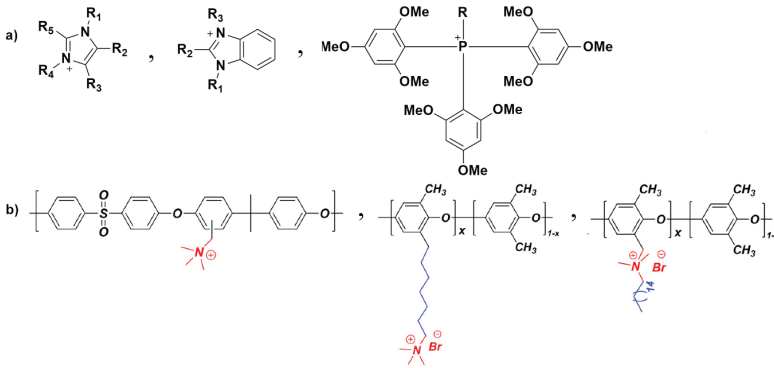
Bugüne kadar, iki ana kategoride sınıflandırılabilir bu alanda önemli araştırma çalışmaları yapılmıştır. İlk kategori, yeni anyon iletken grupların sentezini içerirken, ikinci kategori belirli bir polimer mimarisinin tasarımını içerir (Hagesteijn vd., 2018).

1.2.1. Ana gruplara sahip ADM'ler

ADM baş grupları geleneksel olarak kuaterner amonyum (QA) iyonlarıdır; bununla birlikte, mevcut araştırmalar üçüncül diaminler, fosfonyum, sülfonyum ve metal katyonlar gibi diğer ana grupları araştırılmıştır (Gottesfeld vd., 2018). ADM'ler, nispeten kolay hazırlanmaları ve iyi stabiliteyi nedeniyle ilk olarak QA ile sentezlenmiştir (Couture vd., 2011).

1.2.2. ADM polimer yapıları

Araştırmalar iyon değiştirme kapasitesi ve kimyasal stabiliteyi geliştirmek için polimer yapısına odaklanmıştır (Merle vd., 2011). ADM geleneksel olarak QA gruplarını kullandığından, ADM polimer yapısı üzerindeki çoğu çalışma, QA'lı polimerleri içermektedir. Daha önce bahsedildiği gibi, iyon değişim bölgelerinin sayısı aracılığıyla artan iyon değiştirme kapasitesi ile membran şişmesi nedeniyle azalan mekanik stabilite arasında bir denge vardır (Arges vd., 2010). Bu nedenle, ADM polimer araştırması, farklı hidrofilik ve hidrofobik bölgelere sahip polimerlerde polimer çapraz bağlanmasını ve iyon kanallarının oluşumunu artırmaya odaklanır (Ran vd., 2017). Bir polimere daha uygun termal, mekanik ve fizikokimyasal özellikler kazandırmak için çapraz bağlama yapılır. Yüksek moleküler ağırlıklı veya doğrudan çapraz bağlanabilir oligomerler (tek adımlı sentez) kullanan bir polimerizasyon reaksiyonunda çapraz bağlama adımı olarak veya polimerizasyondan sonra çapraz bağlama sonrası adım (çok adımlı sentez) olarak yapılabilir (Merle vd., 2011). Çoğu çapraz bağlama adımı, kovalent bağlanmayı ve çapraz bağlama kimyasal reaksiyonunu kolaylaştırmak için ısı, radyasyon ve/veya kimyasalların kullanımını içerir (Tillet vd., 2011). AEM'leri sentezlemek için kullanılan monomerlerin çeşitliliği göz önüne alındığında, evrensel bir çapraz bağlama mekanizması yoktur, bunun yerine çeşitli çapraz bağlama ve sonrası reaksiyonlar vardır (Sata vd., 1996).



Şekil 3. a) Ana gruplara sahip anyon değiştirici membran örnekleri, b) anyon değiştirici membranlar için polimer yapılara örnekler

1.3. Amfoterik iyon değişirici membranlar

Amfoterik iyon değişim membranları, hem katyon hem de anyon değişim gruplarının rastgele düzenlemelerini içerir. Temel olarak dört tip vardır: (1) kopolimerizasyon gibi hazırlama prosedürü sırasında hem anyon hem de katyon değişim gruplarının rastgele dağıldığı membranlar, (2) yılan kafesi tipi amfoterik membranlar, (3) polisalt membranlar ve (4) 'katman-katman' yöntemiyle hazırlanan membranlar (Sata, 2007).

Amfoterik iyon değişim membranları piezodiyaliz, ultrafiltrasyon, pervaporasyonu gibi işlemlerde faydalıdır. Ayrıca bazıları elektrodializde sodyum iyonlarına göre hidrojen iyonu geçirgenliği gösteren bileşimlere sahiptir (Michaels & Miekka, 1961; Yamane vd., 1965).

Amfoterik iyon değişim membranları, mekanik ve termal stabilitele ri iyileştirmede polimerik İDM'lere göre nispeten daha avantajlı olsa da, moleküler ölçekte homojenliği tamamlamak zor olmaktadır. Öte yandan, organik ve inorganik fazlar arasındaki arayüz, amfoterik iyon değişim membranların özellikleri için çok önemli olduğu için ayrıntılı olarak incelenmelidir. Bu yönlerle ilgili çalışmalar daha fazla araştırma yapılmasını gerektirmektedir.

İnorganik bileşenlerin organik polimerlere gömüldüğü karışık matris membranlar, hem polimerlerin hem de inorganik malzemelerin avantajlarını bir araya getirdikleri için yüksek performanslı İDM'lerin tasarımında daha avantajlıdır (Bakangura vd., 2016). Metal oksitler, metal fosfatlar, grafen oksit (GO) ve karbon nanotüp (CNT) gibi inorganik partiküller polimer matrislerine dağıtılırken, esneklikleri, ayarlanabilir iyon değiştirme kapasitesi ve işleme yetenekleri nedeniyle çeşitli polimerler sürekli faz olarak seçilmiştir. Termal ve mekanik kararlılığı arttırmanın yanı sıra arzu edilen elektrokimyasal özellikleri içerirler (Zimmerman vd., 1997).

1.4 Bipolar Membranlar

Son on yılda, İDM'ler bir laboratuvar aracından ziyade önemli teknik ve ticari etkileri olan endüstriyel ürünlere dönüşmüştür (Hickner vd., 2013; Strathmann vd., 2013). Bu İDM'ler arasında bir katyon değişim katmanı, bir anyon değişim katmanı ve iki katman arasında bir ara yüzey katmanından oluşan bipolar membran, doğru akım polarizasyonu altında su moleküllerinden proton ve hidroksit iyonları üretmesi nedeniyle özel bir konuma sahiptir. 1956'da, akademik bir literatürde ilk kez bipolar membran olarak anılmıştır (Frilette, 1956). O zamandan beri, çevresel olarak temiz teknolojiler için elektrodializ ve tuzlu su atıklarının arıtılması gibi bir dizi endüstriyel uygulamalarına odaklanan bipolar membranlar üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır (Femmer vd., 2015). Bipolar membranlarda elektrik alanıyla güçlendirilmiş su molekülü ayrışmasının mekanizma-

sının anlaşılması, bu alanda köklü bir dönüm noktası olmuştur (Simons, 1979). Bu membranlarda su ayrışmasının, serbest çözeltidekinden yedi kat daha yüksek olduğunu tespit edilmiştir (Simons, 1985).

1.5. Mozaik iyon değiştirici membranlar

1932'de Sollner, bir mozaik iyon değişim membranı aracılığıyla iyon taşınımını bildirdi(Sollner, 1932). Bu tür membranlar, katyon veya anyon değişim gruplarının membranın enine kesiti boyunca dağıldığı ve her iki alanın bir yalıtkan malzeme ile ayrılmaktadır. Mozaik membran hazırlamak için çeşitli yöntemler gerçekleştirilmiştir(Platt & Schindler, 1971):

(i) Her reçine parçacığının her iki zar yüzeyine de nüfuz etmesini sağlamak için parçacık halindeki katyon ve anyon değişim reçinelerinin bir atıl polimer film içinde dağıtılması;

(ii) Değişen katyon ve anyon değişim zarlarından oluşan lamine bir bloğun zar yüzeyine dik filmlere kesilmesi;

(iii) İki farklı kopolimer (stiren-bütadien ve vinilpiridin-bütadien kopolimeri) kullanarak bir film oluşturma ve bir çapraz bağlama reaksiyonu ile birlikte anyon ve katyon değişim gruplarını ilgili kopolimer alanlarına dahil etme;

(iv) Bir döküm yoluyla bir film oluşturma katyon değişim gruplarının verilebildiği bir parça, anyon değişim gruplarının verilebildiği bir parça ve yalıtım için bir parçadan oluşan bir blok kopolimeri kullanan ve ardından ilgili iyon değişim gruplarını alanlara dahil eden yöntem;

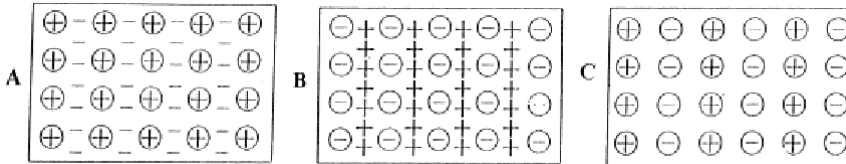
Katyonik mikroküre jeli, anyonik mikroküre jeli ve matris polimeri içeren bir dispersiyon kullanarak döküm yöntemiyle bir film oluşturmak ve gerekirse jellere yüklü gruplar eklemek(Ma & Fukutomi, 1992)

Bu yaklaşımla en az üç farklı tipte iyon değişimi mozaik yapısı yapılabilir (Şekil 2):

(a) bir katyon değişim matrisinde dağıtılan küresel anyon değişim alanları;

(b) bir anyon değişim matrisinde küresel katyon değişim alanları ve

(c) bir nötr matriste küresel katyon ve anyon değişim alanları(Linder & Kedem, 2001).



Şekil 4. Mozaik iyon değiştirici membran tipleri

3. İYON DEĞİŞTİRİCİ MEMBRANLARIN HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ

3.1. Polimer Harmanlama

Polimer harmanlama, tek bir bileşenin eksik özelliklerinin üstesinden gelirken her bir bileşenin olağanüstü özelliklerini birleştirebildiğinden, iyon değiştirici membran hazırlamada ilgi çekici bir yöntemdir. Yöntem sadece İDM'lerin stabilitesini, seçiciliğini ve iyon iletkenliğini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda maliyeti ve şişmeyi de azaltır (Kerres, 2005).

İDM'ler alanında, polimerleri harmanlamak için iki genel strateji kullanılır: florlu/florlu olmayan polimerlerin harmanlanması ve fonksiyonel/fonksiyonel olmayan gruplara sahip polimerlerin harmanlanması. Florlu polimerler, yüksek kimyasal kararlılıkları ve mükemmel membran oluşturma yetenekleri nedeniyle İDM'lerin hazırlanmasında oldukça yaygındır (Nielsen vd., 2013). Bununla birlikte, yüksek maliyet ve aşırı hidrofobiklik, İDM'ler alanında kullanımlarını kısıtlamaktadır. Florlu olmayan malzemeler nispeten ucuzdur, ancak yetersiz stabiliteyi vardır, bu da onları birçok uygulamadan uzak tutar. İDM'leri hazırlamak için bu iki tür malzemenin harmanlanması, İDM'lerin performanslarını iyileştirmek için uygun, verimli ve potansiyel bir yaklaşım olarak kabul edilmiştir. İyon işlevselleştirilmiş polimerler, su kanalları oluşturarak iyonik iletkenliklerin artırılmasını her zaman kolaylaştırırken, aşırı iyonik gruplar mekanik arızaya neden olabilmektedir (Panwar vd., 2012). Bu nedenle, bazı tür hidrofobik polimerlerin eklenmesi, su şişmesini kısıtlamak ve İDM'lerin stabiliteyi arttırmak için çok faydalı bir yaklaşımdır (Farrokhzad vd., 2015).

Polimer harmanlama, basit ama tek bir bileşenin eksikliklerini gidermenin büyüleyici bir yolu olduğundan İDM'lerin performanslarını iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Bu bağlamda, daha ileri araştırma çalışmaları halen devam etmektedir (Wu vd., 2008).

3.2. Gözenek Doldurma

Gözenek doldurma, düşük şişme ve yüksek seçicilik ile İDM'leri hazırlamak için yeni bir yöntemdir. Bir gözenek doldurma yöntemi kullanılarak İDM'leri hazırlamak için en önemli ön koşul, uygun gözenekli alt tabakaların bulunmasıdır. Gözenekli bir malzemenin kimyasal olarak inert ve mekanik olarak kararlı olması gerekir. Bu nedenle gözeneklerdeki yumuşak elektrolit polimerlerinin genişlemesi sert matris tarafından sınırlandırılabilir (Croce vd., 2006). İDM'ler için, mevcut substratlardan gözenekli PAN (Z. Li vd., 2011), yüksek yoğunluklu polietilen (PE) (Jung vd., 2011), polipropilen (PP) (Agarwal vd., 2016), PES (M. Wang vd., 2007)

ve PI (Kuzume, Miki, & Ito, 2013) kullanılmaktadır. Gözenekler, track etching veya faz tersine çevirme yöntemleri ile oluşturulur (Nguyen vd., 2009). Polimerik substratların yanı sıra gözenekli alümina gibi inorganik malzemeler de gözenek dolgulu İDM'ler elde etmek için kullanılabilir (N. Wang vd., 2015).

Gözenek doldurma İDM'leri genellikle polimerik elektrolitlerin gözenekli substratlara eklenmesiyle hazırlanır. Bu işlemi gerçekleştirmenin en basit yolu, seçilen iyonomerleri membranların yüzeyine dökmektir (Kim vd., 2013). Elektrolitler inert gözeneklere akar ve uçucu çözücüler tamamen buharlaştığında bir İDM oluşabilir. Başarılı bir hazırlama sağlamak için, polimerleri gözenekler içinde tutmak için yeterli viskoziteye sahip nispeten konsantr çözeltiler tercih edilir. Bazen, “kusursuz” İDM'lerin oluşumunu garanti etmek için işlem birkaç kez tekrarlanmalıdır. Gözenekli substratları iyonize polimerlere daldırmak, bu tip membranları hazırlamanın bir başka etkili yoludur ve gözenek ıslatma tekniği olarak adlandırılır (T. Wang vd., 2012). Gözenek ıslatma tekniğinin ardındaki temel ilke, gözenek doldurma tekniğinkine benzer.

3.3. In situ polimerleşme

İDM'lerin geleneksel hazırlanması, genellikle bozulmamış polimerlerin modifikasyonu veya işlevselleştirilmiş monomerlerin doğrudan polimerizasyonu şeklinde olur (Wu vd., 2011). Bu yaklaşımlarda hem reaksiyon hem de membran oluşum süreçleri sırasında kullanılan çok miktarda organik çözücü çevreye toksisite riskleri getirecektir (Lin vd., 2013). Bu nedenle, endüstriyel ölçekte üretim elde etmek amacıyla İDM'leri hazırlamak için basit, hızlı ve çevre dostu yöntemler geliştirmek önemlidir (Y. Li vd., 2015). Son zamanlarda, in situ polimerizasyonu kullanan solventsiz bir stratejinin, solvent destekli polimerizasyonda karşılaşılan engellerin üstesinden geldiği rapor edilmiştir. Bu strateji, yukarıda bahsedilen modifikasyon sonrası ve doğrudan polimerizasyon tekniklerinden farklıdır. Çünkü organik çözücüler, nihai membrana tamamen dahil olan sıvı monomerler ile değiştirilir (Xu vd., 2008).

3.4. Elektro-eğirme

Elektro-eğirme yöntemi, üç boyutlu ağlar, tamamen birbirine bağlı gözenekler, yüksek gözeneklilik ve geniş spesifik yüzey alanı gibi çekici özelliklere sahip olan, nano ölçekte çaplara sahip elektrospinli nanolifler üretme konusunda benzersiz avantajlar sunmaktadır (Thavasi vd., 2008). Ek olarak, elektrospun nanoliflerin yığınla karşılaştırıldığında daha yüksek gerilme modülü sergilediği bulunmuştur (Pan vd., 2015). Elektro-eğirme yöntemi, çeşitli uygulamalarda CEM'lerin ve AEM'lerin performanslarını geliştirmek için araştırmacıların yoğun ilgisini çekmiştir (Huang & Kaner, 2004). Geniş spesifik yüzey alanı ve yüksek gözenekliliği nede-

niyle, ortaya çıkan AEM, benzer bir IEC'ye sahip toplu AEM ile karşılaştırıldığında, asit ve metal iyonlarına karşı yedi kat daha yüksek ayırma verimliliği sergilediği görülmüştür. Benzer şekilde, alkali geri kazanımı için SPPO bazlı nano fiber CEM'ler araştırıldı, bu da zarın seçiciliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Büyüleyici avantajlarına rağmen, elektro-eğirme yöntemi hala sadece laboratuvar ölçeğinde uygulanmaktadır. İDM'leri çeşitli polimer yapılarından ve fonksiyonel gruplardan uyarlamak için derinlemesine araştırılması gerekmektedir(Pan vd., 2014).

4. İYON DEĞİŞTİRİCİ MEMBRANLARIN UYGULAMA ALANLARI

İyon değiştirici membranlar, çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmış ve uyarlanabilir polimer membranları nedeniyle yeni alanlarda kullanım için büyük potansiyele sahiptir. İDM'ler, su bazlı kategorinin esas olarak elektrodializ, difüzyon diyalizi ve membran kapasitif deiyonizasyonu içerdiği iki büyük kategoriye genelleştirilebilecek çeşitli uygulamalarda yaygın olarak uygulanırken, enerji bazlı kategori esas olarak ters elektrodializ, yakıt hücreleri, redoks akışını, pil ve elektroliz kullanılmaktadır. Bu uygulamalar aşağıda ayrıntılı olarak tartışılmaktadır(Jiang vd., 2021).

4.1. Elektrodializ

Elektrikle yürütülen bir ayırma işlemi olarak elektrodializ (ED), İDM'lerin en önemli uygulama alanlarından biridir(Al-Amshawee vd., 2020). Bir ED hücresi genellikle, her parçanın anot veya katot olmak üzere bir elektrotla sahip olduğu iki yarım parçaya sahiptir. İki parça birbirine sabitlenmeden önce, iki parça arasına ara parçalarla ayrılan bir dizi alternatif katyon değişim membranı (CEM'ler) ve anyon değişim membranları (AEM'ler) yerleştirilir(Ran vd., 2017). AEM'ler katyonlar için bariyer görevi görürken CEM'ler anyonlar için bariyer görevi görür. ED hücresinin anot ve katodu daha sonra bir güç kaynağına bağlanır. Ayrıca hücrede ayrıca elektrot bölmesi, yoğunlaştırma bölmesi ve seyreltme bölmesi dahil olmak üzere üç dış bölmeye bağlanan giriş ve çıkışlar bulunur (Campioni vd., 2018). Genellikle çözeltiler, seyreltme bölmesindeki çözeltinin tuzunun giderileceği ve konsantre etme bölmesindeki tuz konsantrasyonunun artırılacağı hücreye pompalanır (Hosseini vd., 2020). Güç sağlandığında, yoğunlaştırma bölmesindeki katyonların CEM'lere ve konsantre etme bölmesindeki anyonların AEM'lere doğru hareket etmemesini sağlamak için AEM'lerin ve CEM'lerin bir ED hücresinde dikkatlice düzenlenmesi gerektiği vurgulanmalıdır.

4.2. Difüzyon diyalizi

Bir difüzyon diyaliz (DD) hücresinde, genellikle İDM'ler ile ayrılan farklı konsantrasyonlara sahip iki farklı kısım vardır. Konsantrasyon far-

kı tarafından yönlendirilen iyonlar, membrandan yüksek konsantrasyonlu çözelti kısmından düşük konsantrasyonlu çözelti kısmına geçebilir. Küçük karşı iyonlar da yükleri dengelemek için membrandan geçecektir. DD, neredeyse harici enerji girdisine ihtiyaç duymayan kendiliğinden gerçekleşen bir süreçtir (Bendová & Palatý, 2018). Bu nedenle düşük maliyetli ve enerji tüketimi az olan bir süreçtir (L. Wang vd., 2018). DD, asit geri kazanımı için umut verici bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Emmanuel vd., 2016). Ancak, DD çok yavaş ve verimsiz bir süreçtir. Çünkü itici güç çok zayıftır. Süreci hızlandırmak için geniş membran alanı uygulanabilse de, sermaye maliyetini artıracak ve DD'yi daha az elverişli hale getirecektir. Bu nedenle, iyon taşıma direncini azaltmak için ince ve gözenekli membranlar geliştirilerek yapılabilecek asit geri kazanım kapasitesini ve verimliliğini artırmak için daha çok araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır (J. Luo vd., 2011).

4.3. Membran kapasitif deiyonizasyon

Membran kapasitif deiyonizasyon (MCDI) için, CEM'ler ve AEM'ler aynı anda kullanılır. Tuzlu sudan (örneğin acı su) gelen katyonlar CEM tarafına gelir, CEM'den geçer ve genellikle karbon nanotüpler ve karbon aerogeller gibi karbon malzemelerden yapılan gözenekli elektrot tarafından emilir (H. Li & Zou, 2011). Buna karşılık, tuzlu sudan gelen anyonlar AEM tarafına gelir, AEM'den geçer ve gözenekli elektrot tarafından emilir. MCDI işlemi sırasında tuz giderme verimliliği, membran direnci/iletkenliğinden güçlü bir şekilde etkilenir. Birçok çalışma, düşük dirençli IDM'ler geliştirmeye odaklanmıştır (Palakkal vd., 2018).

4.4. Ters elektrodializ

Ters elektrodializ (RED) "elektrodializ" kelimesini içermesine rağmen, ED'den oldukça farklıdır. Yukarıda tartışıldığı gibi, ED esas olarak su arıtımında sudan iyonları uzaklaştırmak için kullanılır ve bir ED işleminde elektrik enerjisi tüketilir. Ancak RED enerji üretmek için kullanılır (Cho vd., 2017). İtici güç açısından, ED harici güç kaynağı tarafından, RED ise konsantrasyon farkı veya tuzluluk farkı ile çalıştırılır. Bu nedenle, RED genellikle farklı tuzluluklara sahip iki sulu çözeltinin karıştırılmasını içerir (Jande & Kim, 2014). Bu tuzluluk farkından kaynaklanan enerji, tuzluluk gradyan gücü olarak bilinir (Mei, Yao, Ji, Toy, & Tang, 2018). Daha spesifik olmak gerekirse, tuzluluk farkı nedeniyle deniz suyu ve nehir suyu/tatlı su farklı elektrokimyasal potansiyellere sahiptir. IDM'ler aracılığıyla iki sulu çözelti arasında iyon taşınması gerçekleştiğinden, elektrokimyasal potansiyeller azalır. RED, büyük ölçekli enerji üretimi için umut verici bir yenilenebilir enerji teknolojisidir (Hong vd., 2015). Özellikle membran direncine ve hücre uzunluğuna odaklanılarak; hücre tasarımı değiştirilerek, RED'den yüksek güç yoğunlukları elde edilebilir (Vermaas vd., 2012). Ters elektrodializ (RED) ve elektrodializ

tersinmesinin (EDR) iki farklı terim olduğuna dikkat edilmelidir. EDR, elektrotların polaritesini düzenli zaman aralıklarında tersine çevirmeyi ifade eder ve EDR, membran kirlenmesini azaltmak için geliştirilmiştir(Zhao vd., 2019).

Şu anda RED uygun maliyetli bir teknoloji değildir ve bunun dışında RED'in geniş ölçekli uygulamasını engelleyen bazı teknik sorunlar da vardır. Bu nedenle, bir strateji de RED yığının bileşenlerini ve sistemini yenilikçi bir şekilde yeniden tasarlamak olmalıdır. İşletme maliyetini düşürmek ve güç çıkışını iyileştirmek için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır (Mei & Tang, 2018). Ayrıca, RED'in ticarileştirilmesini hızlandırabilecek yüksek geçirgenlik ve düşük elektrik direncine sahip RED'e özel İDM'ler geliştirmek için de daha fazla çalışılmalıdır(Hong vd., 2019).

4.5. Yakıt hücreleri

Yakıtların kimyasal enerjisini yanma olmaksızın elektrik enerjisine dönüştürebilen bir elektrokimyasal cihaz olan yakıt pili, İDM'lerin bir başka yaygın uygulama alanıdır(Jiang & Ladewig, 2017). Yakıt hücrelerinde kullanılan yaygın yakıtlar arasında hidrojen, metanol, etanol ve doğal gaz bulunur. Ancak bunlarla sınırlı değildir(Aliaş vd., 2020). Farklı yakıt hücresi türleri arasında proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) en popüler olanıdır(Firouz Tadavani, Abdolmaleki, Molavian, & Zhiani, 2018). Şu anda PEMFC, yüksek saflıkta hidrojenin yüksek üretim maliyeti nedeniyle pahalı bir teknolojidir. Karbon monoksit gibi hidrojendeki safsızlıklar, PEMFC'deki platin gibi katalitik elektrot malzemelerini devre dışı bırakabilir(Rosli vd., 2017). Bu nedenle, safsızlıklar hidrojen beslemesinden uzaklaştırılmalıdır. Ek olarak, yaygın olarak kullanılan Nafion ve diğer ticari PEM'ler mükemmel bir proton iletkenliğine sahip olmalarına rağmen, çok maliyetlidirler ve 80 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda stabil değildirler(Shabani vd., 2019). Yakıt hücrelerinin yüksek sıcaklıkta çalıştırılması, su taşması sorunu ve katalizör zehirlenmesi sorunu gibi geleneksel yakıt hücrelerinin bazı kritik sorunlarını çözerek genel performansı iyileştirebilir. Bu nedenle, mükemmel stabiliteye (örneğin, termal stabilite, kimyasal stabilite ve mekanik stabilite) ve yüksek iletkenliğe sahip düşük maliyetli membran malzemeleri geliştirmek ve özellikle yüksek sıcaklıklarda iyi işlev görebilen membranlar geliştirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır(Iulianelli & Basile, 2012).

4.6. Redoks akış pili

Temel olarak redoks akış pili (RFB), kimyasal enerjiyi elektrığe dönüştürerek çalışır. Bir RFB sisteminde, elektrotları içeren ve bir İDM ile ayrılan bölgelere iki elektrolit çözeltisi pompalanır. Redoks reaksiyonları bu bölgelerde gerçekleşir. Vanadyum redoks akış pili (VRFB), en yaygın RFB türüdür ve sistemde yer alan vanadyum iyonları arasında VO_2^+ ,

VO₂⁺, V₃⁺ ve V₂⁺ bulunur(Hwang vd., 2018). Boşalma işlemi sırasında katotta VO₂⁺ iyonları elektron kazanır ve VO₂⁺ iyonlarına indirgenir. Anotta V₂⁺ iyonları elektron kaybeder ve V₃⁺ iyonlarına oksitlenir. VRFB teknolojisi, diğer teknolojilere kıyasla düşük maliyeti, uzun çevrim ömrü, yüksek verimliliği, kolay kullanımı, iyi güvenliği ve yüksek tasarım esnekliği nedeniyle büyük ölçekli enerji depolaması için umut vericidir(Liao vd., 2017). Bununla birlikte, geçiş etkileri, pompalama kayıpları, şönt akım kaybı, sınırlı enerji yoğunluğu, zorlu çevre nedeniyle sistemin bozulması vb. gibi bazı kritik zorluklar vardır. Bu sorunları ele almak için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır (Lourenssen vd., 2019). Membran perspektifinden bakıldığında, İDM'ler VRFB uygulamalarında kilit bir rol oynar ve daha etkili membranlar geliştirilerek sistem performansı iyileştirilebilir. Bu nedenle, birçok çalışma VRFB için İDM'lere odaklanmıştır. Özellikle amfoterik İDM'ler, yüksek iletkenliği korurken düşük vanadyum iyonu geçirgenliğine sahip olmaları gibi geleneksel membranlara kıyasla avantajları nedeniyle VRFB uygulamalarında yaygın olarak çalışılmaktadır. Şu anda VRFB'de perflorlu membranlar yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu membranların fiyatı çok yüksektir. Gelecekteki önemli bir araştırma yönü, yüksek kolomb verimliliği elde etmek için yüksek iyonik iletkenliğe ve düşük vanadyum iyonu geçirgenliğine sahip düşük maliyetli kısmen florlanmış ve florlanmamış İDM'ler geliştirmektir(Hu vd., 2012)

4.7. Elektroliz

İDM tabanlı elektroliz, hidrojen üretimi için geniş çapta çalışılmaktadır. Genel olarak, hidrojen üretimi için alkalın elektrolizi, proton değişim membranı (PEM) elektrolizi ve katı oksit elektrolizi dahil olmak üzere üç ana su elektrolizi türü vardır(Amikam vd., 2018). Alkalın elektroliz ile karşılaştırıldığında, PEM bazlı elektroliz, membran anot ve katodu ayırmak için hareket edebildiğinden gaz geçişini önemli ölçüde azaltabilir, bu nedenle yüksek saflıkta hidrojen üretilebilir. Hidrojen üretimi için PEM bazlı elektroliz, hiçbir kirlenici üretilmediğinden temiz bir teknoloji olarak kabul edilir. Ancak, şu anda yüksek işletme maliyeti nedeniyle ekonomik olarak rekabetçi bir teknoloji değildir. Ayrıca, geleneksel alkalın elektroliz ile karşılaştırıldığında, PEM bazlı elektrolizde tipik olarak daha pahalı katalitik elektrot malzemeleri (örneğin platin) kullanılır(Vidales, Choi, & Omanovic, 2018). Bu nedenle, birçok çalışma platine uygun maliyetli alternatifler geliştirmeye odaklanmıştır. Bununla birlikte, PEM bazlı elektroliz için asidik çalışma koşulları, katalizör seçimini sınırlar. Son zamanlarda, yüksek pH koşullarında çalışabilen hidrojen üretimi için AEM bazlı elektroliz geliştirilmiştir ve bu nedenle daha ucuz katalizörler mevcuttur. AEM tabanlı elektroliz için, yüksek iletkenliğe, iyi mekanik dayanıklılığa ve özellikle alkali koşullarda yüksek stabiliteye sahip membranlar geliştirmek için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır(Fortin vd., 2020).

KAYNAKLAR

- Agarwal, C., Cattrall, R. W., & Kolev, S. D. (2016). Donnan dialysis based separation of gold (III) from electronic waste solutions using an anion exchange pore-filled membrane. *Journal of Membrane Science*, 514, 210–216.
- Al-Amshawee, S., Yunus, M. Y. B. M., Azoddein, A. A. M., Hassell, D. G., Dakhil, I. H., & Hasan, H. A. (2020). Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122231.
- Alias, M. S., Kamarudin, S. K., Zainoodin, A. M., & Masdar, M. S. (2020). Active direct methanol fuel cell: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 19620–19641.
- Amikam, G., Nativ, P., & Gendel, Y. (2018). Chlorine-free alkaline seawater electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(13), 6504–6514.
- Arges, C. G., Ramani, V. K., & Pintauro, P. N. (2010). The chalkboard: Anion exchange membrane fuel cells. *The Electrochemical Society Interface*, 19(2), 31.
- Bae, B., Hoshi, T., Miyatake, K., & Watanabe, M. (2011). Sulfonated block poly (arylene ether sulfone) membranes for fuel cell applications via oligomeric sulfonation. *Macromolecules*, 44(10), 3884–3892.
- Bae, B., Yoda, T., Miyatake, K., Uchida, H., & Watanabe, M. (2010). Proton-conductive aromatic ionomers containing highly sulfonated blocks for high-temperature-operable fuel cells. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(2), 317–320.
- Bakangura, E., Wu, L., Ge, L., Yang, Z., & Xu, T. (2016). Mixed matrix proton exchange membranes for fuel cells: State of the art and perspectives. *Progress in Polymer Science*, 57, 103–152.
- Bendová, H., & Palatý, Z. (2018). Continuous dialysis of hydrochloric acid and lithium chloride: permeability of anion-exchange membrane to chloride ions. *Chemical Papers*, 72(5), 1151–1157.
- Campione, A., Gurreri, L., Ciofalo, M., Micale, G., Tamburini, A., & Cipollina, A. (2018). Electrodialysis for water desalination: A critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications. *Desalination*, 434, 121–160.
- Chen, L., Hallinan Jr, D. T., Elabd, Y. A., & Hillmyer, M. A. (2009). Highly selective polymer electrolyte membranes from reactive block polymers. *Macromolecules*, 42(16), 6075–6085.
- Cho, D. H., Lee, K. H., Kim, Y. M., Park, S. H., Lee, W. H., Lee, S. M., & Lee, Y. M. (2017). Effect of cationic groups in poly (arylene ether sulfone) membranes on reverse electrodialysis performance. *Chemical Communications*, 53(15), 2323–2326.

- Costamagna, P., & Srinivasan, S. (2001). Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000: Part II. Engineering, technology development and application aspects. *Journal of power sources*, 102(1–2), 253–269.
- Couture, G., Alaaeddine, A., Boschet, F., & Ameduri, B. (2011). Polymeric materials as anion-exchange membranes for alkaline fuel cells. *Progress in Polymer Science*, 36(11), 1521–1557. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.04.004>
- Croce, F., Hassoun, J., Tizzani, C., & Scrosati, B. (2006). Nanoporous composite, low cost, protonic membranes for direct methanol fuel cells. *Electrochemistry communications*, 8(7), 1125–1131.
- Emmanuel, K., Cheng, C., Erigene, B., Mondal, A. N., Hossain, M. M., Khan, M. I., ... Xu, T. (2016). Imidazolium functionalized anion exchange membrane blended with PVA for acid recovery via diffusion dialysis process. *Journal of Membrane Science*, 497, 209–215.
- Farrokhzad, H., Darvishmanesh, S., Genduso, G., Van Gerven, T., & Van der Bruggen, B. (2015). Development of bivalent cation selective ion exchange membranes by varying molecular weight of polyaniline. *Electrochimica acta*, 158, 64–72.
- Femmer, R., Mani, A., & Wessling, M. (2015). Ion transport through electrolyte/polyelectrolyte multi-layers. *Scientific reports*, 5(1), 1–12.
- Firouz Tadavani, K., Abdolmaleki, A., Molavian, M. R., & Zhiani, M. (2018). A promising proton-exchange membrane: high efficiency in low humidity. *ACS Applied Energy Materials*, 1(6), 2464–2473.
- Fortin, P., Khoza, T., Cao, X., Martinsen, S. Y., Barnett, A. O., & Holdcroft, S. (2020). High-performance alkaline water electrolysis using Aemion™ anion exchange membranes. *Journal of Power Sources*, 451, 227814.
- Frilette, V. J. (1956). Preparation and characterization of bipolar ion exchange membranes. *The Journal of Physical Chemistry*, 60(4), 435–439.
- Gottesfeld, S., Dekel, D. R., Page, M., Bae, C., Yan, Y., Zelenay, P., & Kim, Y. S. (2018). Anion exchange membrane fuel cells: Current status and remaining challenges. *Journal of Power Sources*, 375, 170–184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.010>
- Hagesteijn, K. F. L., Jiang, S., & Ladewig, B. P. (2018). A review of the synthesis and characterization of anion exchange membranes. *Journal of Materials Science*, 53(16), 11131–11150. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2409-y>
- Hickner, M. A., Herring, A. M., & Coughlin, E. B. (2013). Anion exchange membranes: Current status and moving forward. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 51(24), 1727–1735.
- Hideo, K., Tsuzura, K., & Shimizu, H. (1991). Ion exchange membranes. *Ion Exchangers*, Walter de Gruyter, Berlin.

- Hong, J. G., Park, T.-W., & Dhadake, Y. (2019). Property evaluation of custom-made ion exchange membranes for electrochemical performance in reverse electrodialysis application. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 850, 113437.
- Hong, J. G., Zhang, B., Glabman, S., Uzal, N., Dou, X., Zhang, H., ... Chen, Y. (2015). Potential ion exchange membranes and system performance in reverse electrodialysis for power generation: A review. *Journal of Membrane Science*, 486, 71–88.
- Hosseini, S. M., Alibakhshi, H., Jashni, E., Parvizian, F., Shen, J. N., Taheri, M., ... Rafiei, N. (2020). A novel layer-by-layer heterogeneous cation exchange membrane for heavy metal ions removal from water. *Journal of hazardous materials*, 381, 120884.
- Hu, G., Wang, Y., Ma, J., Qiu, J., Peng, J., Li, J., & Zhai, M. (2012). A novel amphoteric ion exchange membrane synthesized by radiation-induced grafting α -methylstyrene and N, N-dimethylaminoethyl methacrylate for vanadium redox flow battery application. *Journal of membrane science*, 407, 184–192.
- Huang, J., & Kaner, R. B. (2004). Flash welding of conducting polymer nanofibres. *Nature Materials*, 3(11), 783–786.
- Hwang, G.-J., Kim, S.-W., In, D.-M., Lee, D.-Y., & Ryu, C.-H. (2018). Application of the commercial ion exchange membranes in the all-vanadium redox flow battery. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 60, 360–365.
- Iulianelli, A., & Basile, A. (2012). Sulfonated PEEK-based polymers in PEMFC and DMFC applications: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), 15241–15255.
- Jande, Y. A. C., & Kim, W.-S. (2014). Integrating reverse electrodialysis with constant current operating capacitive deionization. *Journal of environmental management*, 146, 463–469.
- Jiang, S., & Ladewig, B. P. (2017). High ion-exchange capacity semihomogeneous cation exchange membranes prepared via a novel polymerization and sulfonation approach in porous polypropylene. *ACS applied materials & interfaces*, 9(44), 38612–38620.
- Jiang, S., Sun, H., Wang, H., Ladewig, B. P., & Yao, Z. (2021). A comprehensive review on the synthesis and applications of ion exchange membranes. *Chemosphere*, 282, 130817. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130817>
- Jung, H., Fujii, K., Tamaki, T., Ohashi, H., Ito, T., & Yamaguchi, T. (2011). Low fuel crossover anion exchange pore-filling membrane for solid-state alkaline fuel cells. *Journal of membrane science*, 373(1–2), 107–111.
- Kerres, J. A. (2005). Blended and cross-linked ionomer membranes for application in membrane fuel cells. *Fuel cells*, 5(2), 230–247.

- Kim, D.-H., Park, J.-H., Seo, S.-J., Park, J.-S., Jung, S., Kang, Y. S., ... Kang, M.-S. (2013). Development of thin anion-exchange pore-filled membranes for high diffusion dialysis performance. *Journal of membrane science*, 447, 80–86.
- Kuzume, A., Miki, Y., & Ito, M. (2013). Characterisation of PAMPS–PSS pore-filling membrane for direct methanol fuel cell. *Journal of membrane science*, 446, 92–98.
- Lafitte, B., Puchner, M., & Jannasch, P. (2005). Proton conducting polysulfone ionomers carrying sulfoaryloxybenzoyl side chains. *Macromolecular rapid communications*, 26(18), 1464–1468.
- Li, D., & Xia, Y. (2004). Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel? *Advanced materials*, 16(14), 1151–1170.
- Li, H., & Zou, L. (2011). Ion-exchange membrane capacitive deionization: A new strategy for brackish water desalination. *Desalination*, 275(1–3), 62–66.
- Li, Y., Lin, X., Wu, L., Jiang, C., Hossain, M. M., & Xu, T. (2015). Quaternized membranes bearing zwitterionic groups for vanadium redox flow battery through a green route. *Journal of Membrane Science*, 483, 60–69.
- Li, Z., Zhang, B., Qu, L., Ren, J., & Li, Y. (2011). A novel atmospheric dielectric barrier discharge (DBD) plasma graft-filling technique to fabricate the composite membranes for pervaporation of aromatic/aliphatic hydrocarbons. *Journal of membrane science*, 371(1–2), 163–170.
- Liao, J., Chu, Y., Zhang, Q., Wu, K., Tang, J., Lu, M., & Wang, J. (2017). Fluoro-methyl sulfonated poly (arylene ether ketone-co-benzimidazole) amphoteric ion-exchange membranes for vanadium redox flow battery. *Electrochimica Acta*, 258, 360–370.
- Lin, X., Liu, Y., Poynton, S. D., Ong, A. L., Varcoe, J. R., Wu, L., ... Xu, T. (2013). Cross-linked anion exchange membranes for alkaline fuel cells synthesized using a solvent free strategy. *Journal of power sources*, 233, 259–268.
- Linder, C., & Kedem, O. (2001). Asymmetric ion exchange mosaic membranes with unique selectivity. *Journal of Membrane Science*, 181(1), 39–56.
- Lourenszen, K., Williams, J., Ahmadpour, F., Clemmer, R., & Tasnim, S. (2019). Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 25, 100844.
- Luo, J., Wu, C., Xu, T., & Wu, Y. (2011). Diffusion dialysis-concept, principle and applications. *Journal of Membrane Science*, 366(1–2), 1–16.
- Luo, T., Abdu, S., & Wessling, M. (2018). Selectivity of ion exchange membranes: A review. *Journal of Membrane Science*, 555, 429–454. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.051>
- Ma, G. H., & Fukutomi, T. (1992). Preparation and chemical fixation of poly (4-vinylpyridine) microgel film with ordered structure. *Macromolecules*, 25(7), 1870–1875.

- Marini, S., Salvi, P., Nelli, P., Pesenti, R., Villa, M., Berrettoni, M., ... Kiros, Y. (2012). Advanced alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta*, 82, 384–391. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.05.011>
- Mei, Y., & Tang, C. Y. (2018). Recent developments and future perspectives of reverse electrodialysis technology: A review. *Desalination*, 425, 156–174.
- Mei, Y., Yao, Z., Ji, L., Toy, P. H., & Tang, C. Y. (2018). Effects of hypochlorite exposure on the structure and electrochemical performance of ion exchange membranes in reverse electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 549, 295–305.
- Merle, G., Wessling, M., & Nijmeijer, K. (2011). Anion exchange membranes for alkaline fuel cells: A review. *Journal of Membrane Science*, 377(1–2), 1–35.
- Mesyats, G. A., & Prokhorov, M. D. (2004). Hydrogen power engineering and fuel cells. *Vestn. Ross. Akad. Nauk*, 74(7), 579–597.
- Michaels, A. S., & Miekka, R. G. (1961). Polycation-polyanion complexes: Preparation and properties of poly-(vinylbenzyltrimethylammonium) poly-(styrenesulfonate). *The Journal of Physical Chemistry*, 65(10), 1765–1773.
- Na, T., Shao, K., Zhu, J., Sun, H., Liu, Z., Zhao, C., ... Zhang, G. (2012). Block sulfonated poly (arylene ether ketone) containing flexible side-chain groups for direct methanol fuel cells usage. *Journal of membrane science*, 417, 61–68.
- Nguyen, T. H., Wang, C., & Wang, X. (2009). Pore-filling membrane for direct methanol fuel cells based on sulfonated poly (styrene-ran-ethylene) and porous polyimide matrix. *Journal of Membrane Science*, 342(1–2), 208–214.
- Nielsen, M. M., Yang, A. C.-C., Jankova, K., Hvilsted, S., & Holdcroft, S. (2013). Enhancing the phase segregation and connectivity of hydrophilic channels by blending highly sulfonated graft copolymers with fluorous homopolymers. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(28), 8118–8126.
- Oh, D. Y., Lee, J. U., & Jo, W. H. (2012). Synthesis of fluorinated amphiphilic triblock copolymer and its application in high temperature PEM fuel cells. *Journal of Materials Chemistry*, 22(15), 7187–7193.
- Palakkal, V. M., Rubio, J. E., Lin, Y. J., & Arges, C. G. (2018). Low-resistant ion-exchange membranes for energy efficient membrane capacitive deionization. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 13778–13786.
- Pan, J., Ge, L., Lin, X., Wu, L., Wu, B., & Xu, T. (2014). Cation exchange membranes from hot-pressed electrospun sulfonated poly (phenylene oxide) nanofibers for alkali recovery. *Journal of membrane science*, 470, 479–485.
- Pan, J., He, Y., Wu, L., Jiang, C., Wu, B., Mondal, A. N., ... Xu, T. (2015). Anion exchange membranes from hot-pressed electrospun QPPO–SiO₂ hybrid nanofibers for acid recovery. *Journal of Membrane Science*, 480, 115–121.

- Panwar, V., Lee, C., Ko, S. Y., Park, J.-O., & Park, S. (2012). Dynamic mechanical, electrical, and actuation properties of ionic polymer metal composites using PVDF/PVP/PSSA blend membranes. *Materials Chemistry and Physics*, 135(2–3), 928–937.
- Platt, K. L., & Schindler, A. (1971). Ionic membranes for water desalination. I. Charge mosaic membranes from blends of random copolymers. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie: Applied Macromolecular Chemistry and Physics*, 19(1), 135–155.
- Qi, Z., Gong, C., Liang, Y., Li, H., Wu, Z., Feng, W., ... Li, Y. (2015). Side-chain-type clustered sulfonated poly (arylene ether ketone) s prepared by click chemistry. *international journal of hydrogen energy*, 40(30), 9267–9277.
- Ran, J., Wu, L., He, Y., Yang, Z., Wang, Y., Jiang, C., ... Xu, T. (2017). Ion exchange membranes: New developments and applications. *Journal of Membrane Science*, 522, 267–291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.09.033>
- Rosli, R. E., Sulong, A. B., Daud, W. R. W., Zulkifley, M. A., Husaini, T., Rosli, M. I., ... Haque, M. A. (2017). A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9293–9314.
- Sata, T. (2007). *Ion exchange membranes: preparation, characterization, modification and application*. Royal Society of chemistry.
- Sata, T., Tsujimoto, M., Yamaguchi, T., & Matsusaki, K. (1996). Change of anion exchange membranes in an aqueous sodium hydroxide solution at high temperature. *Journal of Membrane Science*, 112(2), 161–170. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-7388\(95\)00292-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-7388(95)00292-8)
- Shabani, B., Hafttananian, M., Khamani, S., Ramiar, A., & Ranjbar, A. A. (2019). Poisoning of proton exchange membrane fuel cells by contaminants and impurities: Review of mechanisms, effects, and mitigation strategies. *Journal of Power Sources*, 427, 21–48.
- Sheng, L., Higashihara, T., Nakazawa, S., & Ueda, M. (2012). Polystyrenes containing flexible alkylsulfonated side chains as a proton exchange membrane for fuel cell application. *Polymer Chemistry*, 3(12), 3289–3295.
- Shi, Z., & Holdcroft, S. (2005). Synthesis and proton conductivity of partially sulfonated poly ([vinylidene difluoride-co-hexafluoropropylene]-b-styrene) block copolymers. *Macromolecules*, 38(10), 4193–4201.
- Simons, R. (1979). Strong electric field effects on proton transfer between membrane-bound amines and water. *Nature*, 280(5725), 824–826.
- Simons, R. (1985). Water splitting in ion exchange membranes. *Electrochimica Acta*, 30(3), 275–282.
- Sollner, K. t. (1932). Uber mosaikmembranen. *Biochem. z*, 244, 370.
- Strathmann, H. (2010). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264(3), 268–288.

- Strathmann, H., Grabowski, A., & Eigenberger, G. (2013). Ion-exchange membranes in the chemical process industry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(31), 10364–10379.
- Takamuku, S., Wohlfarth, A., Manhart, A., Räder, P., & Jannasch, P. (2015). Hypersulfonated polyelectrolytes: preparation, stability and conductivity. *Polymer Chemistry*, 6(8), 1267–1274.
- Thavasi, V., Singh, G., & Ramakrishna, S. (2008). Electrospun nanofibers in energy and environmental applications. *Energy & environmental science*, 1(2), 205–221.
- Tillet, G., Boutevin, B., & Ameduri, B. (2011). Chemical reactions of polymer crosslinking and post-crosslinking at room and medium temperature. *Progress in Polymer Science*, 36(2), 191–217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.08.003>
- Timashev, S. F., & Kemp, T. J. (1991). *Physical chemistry of membrane processes*. New York: Ellis Horwood.
- Varcoe, J. R., Atanassov, P., Dekel, D. R., Herring, A. M., Hickner, M. A., Kohl, P. A., ... Scott, K. (2014). Anion-exchange membranes in electrochemical energy systems. *Energy & environmental science*, 7(10), 3135–3191.
- Vermaas, D. A., Guler, E., Saakes, M., & Nijmeijer, K. (2012). Theoretical power density from salinity gradients using reverse electrodialysis. *Energy Procedia*, 20, 170–184.
- Vidales, A. G., Choi, K., & Omanovic, S. (2018). Nickel-cobalt-oxide cathodes for hydrogen production by water electrolysis in acidic and alkaline media. *international journal of hydrogen energy*, 43(29), 12917–12928.
- Vincent, I., & Bessarabov, D. (2018). Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1690–1704. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.258>
- Wang, L., Zhang, F., Li, Z., Liao, J., Huang, Y., Lei, Y., & Li, N. (2018). Mixed-charge poly (2, 6-dimethyl-phenylene oxide) anion exchange membrane for diffusion dialysis in acid recovery. *Journal of Membrane Science*, 549, 543–549.
- Wang, M., An, Q.-F., Wu, L.-G., Mo, J.-X., & Gao, C.-J. (2007). Preparation of pH-responsive phenolphthalein poly (ether sulfone) membrane by redox-graft pore-filling polymerization technique. *Journal of membrane science*, 287(2), 257–263.
- Wang, N., Wang, L., Zhang, R., Li, J., Zhao, C., Wu, T., & Ji, S. (2015). Highly stable “pore-filling” tubular composite membrane by self-crosslinkable hyperbranched polymers for toluene/n-heptane separation. *Journal of Membrane Science*, 474, 263–272.

- Wang, T., Sun, F., Wang, H., Yang, S., & Fan, L. (2012). Preparation and properties of pore-filling membranes based on sulfonated copolyimides and porous polyimide matrix. *Polymer*, 53(15), 3154–3162.
- Wu, L., Xu, T., Wu, D., & Zheng, X. (2008). Preparation and characterization of CPPO/BPPO blend membranes for potential application in alkaline direct methanol fuel cell. *Journal of Membrane Science*, 310(1–2), 577–585.
- Wu, L., Zhou, G., Liu, X., Zhang, Z., Li, C., & Xu, T. (2011). Environmentally friendly synthesis of alkaline anion exchange membrane for fuel cells via a solvent-free strategy. *Journal of membrane science*, 371(1–2), 155–162.
- Xu, T. (2005). Ion exchange membranes: State of their development and perspective. *Journal of Membrane Science*, 263(1), 1–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.05.002>
- Xu, T., Woo, J.-J., Seo, S.-J., & Moon, S.-H. (2008). In situ polymerization: A novel route for thermally stable proton-conductive membranes. *Journal of Membrane Science*, 325(1), 209–216.
- Yamane, R., Izuo, R., & Mizutani, Y. (1965). Permselectivity of the amphoteric ion exchange membranes. *Denki Kagaku*, 33(1), 5.
- Yaroslavtsev, A. B., & Nikonenko, V. V. (2009). Ion-exchange membrane materials: Properties, modification, and practical application. *Nanotechnologies in Russia*, 4(3), 137–159.
- Zhang, X., Dong, T., Pu, Y., Higashihara, T., Ueda, M., & Wang, L. (2015). Polymer electrolyte membranes based on multiblock poly (phenylene ether ketone) s with pendant alkylsulfonic acids: effects on the isomeric configuration and ion transport mechanism. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(34), 19596–19606.
- Zhang, Z., Wu, L., & Xu, T. (2012). Novel aromatic proton-exchange polyelectrolytes via polyacylation of pre-sulfonated monomers. *Journal of Materials Chemistry*, 22(28), 13996–14000.
- Zhang, Z., & Xu, T. (2013). One-pot acylation/benzimidazolization copolymerization approach to side-chain-type proton conductive membranes. *Journal of membrane science*, 446, 121–124.
- Zhang, Z., & Xu, T. (2014). Poly (ether ketone) s bearing pendent sulfonate groups via copolyacylation of a sulfonated monomer and isomeric AB-type comonomers. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 52(2), 200–207.
- Zhao, D., Lee, L. Y., Ong, S. L., Chowdhury, P., Siah, K. B., & Ng, H. Y. (2019). Electrodialysis reversal for industrial reverse osmosis brine treatment. *Separation and Purification Technology*, 213, 339–347.
- Zimmerman, C. M., Singh, A., & Koros, W. J. (1997). Tailoring mixed matrix composite membranes for gas separations. *Journal of membrane science*, 137(1–2), 145–154.

“

Bölüm 3

KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Suha H. AKSOY¹

Gamze BİLGİN²

1 Doç .Dr. Suha H. AKSOY. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye.

ORCID ID: : <https://orcid.org/0000-0003-0564-457X>..

2 Dr. Öğr. Üyesi Gamze BİLGİN. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı MYO, Zonguldak, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2840-7369>

”

1. GİRİŞ

Bir yapının (yol, bina, baraj, vb.) inşa edileceği alan ile ilgili olarak, geoteknik mühendisleri için en önemli kriterler zemine ait taşıma gücü değerleri, zeminin oturma problemleri ve zeminin sıvılaşma potansiyeli olarak sıralanabilir. Bu kriterlerden herhangi biri sorun teşkil ediyor ise bu alanda yapılacak yapılar için yüzeysel temellerin yeterli olmayacağı söylenebilir. Bu durumda olası alternatif çözümler şu şekildedir:

- Yapılması planlanan yapı projesi değiştirilip zemine uygun olarak yeniden tasarlanabilir. Örneğin, kazıklarla güçlendirilmiş radye temel kullanılabilir, oturmalarından etkilenmeyecek kadar rijit veya farklı hareketleri karşılayabilecek esnek bir yapı tasarlanabilir.
- Uygun olmayan zemin uzaklaştırılarak yeni bir zemin yerleştirilebilir.
- Mevcut zemindeki sorunların giderilmesi (zeminin iyileştirilmesi) sağlanabilir.

Zemin iyileştirmede kullanılabilecek çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler arasından seçim yapılırken aşağıda sıralanan kriterler göz önüne alınır:

- İyileştirmenin amacı
- Uygulanabileceği zemin türü
- Uygulanabileceği etkili derinlik
- Uygulanabileceği ekonomik alan
- Avantaj ve dezavantajları
- Deprem performansı
- Maliyeti

Zemin iyileştirme yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı çalışmalar arasında yol ve dolgu inşaatları bulunmaktadır (Bilgen, 2021). Yol ve dolguların iyileştirilmesinde, özellikle kohezyonlu zeminler için katkı malzemesi kullanılması oldukça eski ve yaygın bir yöntemdir. Katkı malzemeleri arasında kireç (Diamond & Kinter, 1965; Eren & Filiz, 2009), çimento (Ciancio, Beckett, & Carraro, 2014) gibi bağlayıcıların yanında, yüksek fırın curufu (Bilgen, 2004; Bilgen, Kavak, & Çapar, 2012), çelik-hane curufu (Bilgen, 2011; Kavak, Bilgen, & Capar, 2012), öğütülmüş cam (Bilgen, 2020b, 2020a, 2022), uçucu kül (Dagli & Capar, 2022) gibi malzemelere ek olarak farklı atıklar (Bilgen, Aksoy, & Cana, 2013; Bilgen, Houlihan, Ryoo, Wang, & Aydılek, 2020; Bilgen & Kavak, 2010) kullanılır.

maktadır. Kohezyonsuz zeminlerde ise kohezyonlu zeminlere göre oldukça farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler, gelişen teknolojiye paralel olarak gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, kohezyonsuz zeminlerde yaygın olarak kullanılan iyileştirme yöntemleri açıklanmış ve yöntemler ile ilgili detaylara yer verilmiştir.

2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRMASI

Zemin iyileştirme yöntemleri farklı araştırmacılar tarafından farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Bazı araştırmacılar yöntemleri, uygulanabilecek zemin türüne göre, bazıları hem zemin türüne hem de zeminde katkı kullanılıp kullanılmayacağına göre, bazıları ise iyileştirme yönteminin zemine uygulanış biçimine göre sınıflandırmışlardır. Japan International Cooperation Agency (JICA, 1994) iyileştirme yönteminin uygulanabileceği zemin türüne göre yaptığı sınıflandırma aşağıdaki gibidir:

1. A. Kil zeminler için:

2. a. Zemini değiştirme
3. b. Önyikleme
4. c. Kum Dren
5. d. Kağıt Dren
6. e. Vakum Yöntemi
7. f. Ozmotik Basınç
8. g. Sönmemiş Kireç Kazık
9. h. Derin Karıştırma Yöntemi
10. i. Kum Sıkıştırma Kazık Yöntemi
11. j. Isı Uygulaması
12. k. Elektro – Kimyasal Enjeksiyon

1. B. Kum Zeminler İçin:

2. a. Kompaksiyon Kazığı
3. b. Kum Sıkıştırma Kazığı
4. c. Vibro Kompaksiyon (Flotasyon)
5. d. Vibro Değiştirme ve Taş Kolonlar
6. e. Patlatarak Kompaksiyon
7. f. Elektrik Şoku ile Kompaksiyon

8. g. Dinamik Kompaksiyon

9. h. Jet Grout

10. i. Enjeksiyon

1.

2. C. Bütün Zeminler İçin:

3. a. Geotekstil ve Geogrid Serme

Özellikle kum zeminlerde yüzeysel iyileştirme için, sıkıştırılmış granüler şilte uygulaması da yaygın olarak yapılmaktadır. Aşağıda bu yöntemler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3. KUM ZEMİNLER İÇİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

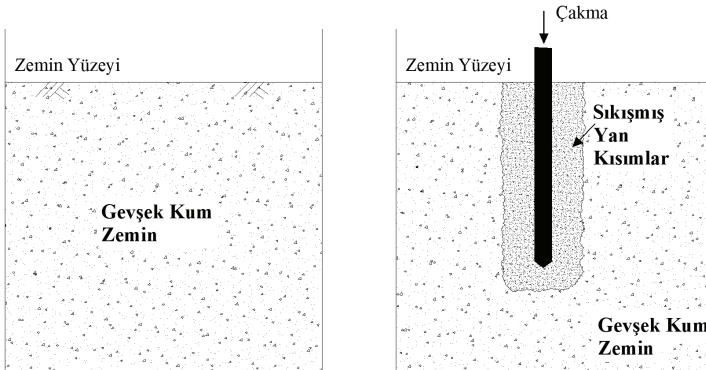
3.1. Kompaksiyon Kazığı

Kompaksiyon kazığı, kumun sıvılaşma riskini azaltmak ve zeminin taşıma gücünü arttırmak, zemini sıkılaştırmak amacıyla gevşek kum tabakasına Şekil 1'de görüldüğü gibi çakılan kazıklardır. Bu yöntemde, betonarme bir kazık kumlu zemine çakılır, bu sayede kazığın çevresindeki zemin kazığın hacmine eşit hacimde sıkışır. Ayrıca kazık çakma işlemi sırasında oluşan titreşimler, kumlu zeminin daha fazla sıkışmasını sağlamaktadır. Kompaksiyon kazıklarıyla zemin iyileştirme yönteminde, zemin performansı, 3 farklı şekilde iyileştirilmektedir:

1. Kazıkların eğilme dayanımı zemindeki hareketlere karşı bir direnç oluşturmaktadır. Bu bir güçlendirme olarak da düşünülebilir.

2. Kazıkların zemine girişi sırasında meydana gelen titreşim ve yer değiştirmeler, zeminde sıkışmayı sağlamaktadır.

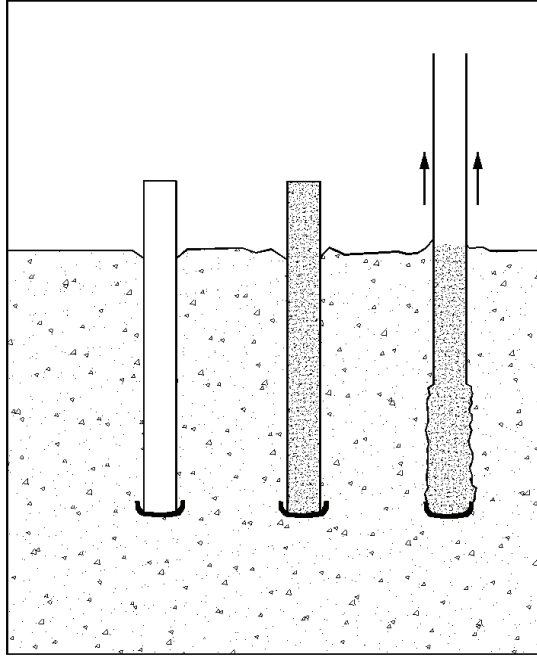
3. Yerleştirme sonrasında kazığın etrafındaki zeminde yanal gerilmeler artmaktadır.



Şekil 1. Kompaksiyon Kazığı Uygulaması

3.2. Kum Kompaksiyon Kazığı

Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu yöntem 1950'li yılların sonlarında Japonya'da geliştirilmiştir. Bu yöntemde Şekil 2'de görüldüğü üzere, uç kısmında bir plaka olan kaplama borusu zemine çakılır, daha sonra kaplama borusu içerisine konan kohezyonsuz zemin sıkıştırılırken kaplama borusu geri çekilir. Taban plakası ise zemin içerisinde kalır. Yöntem başlangıçta gevşek kumlu zeminleri sıkıştırmak için geliştirilmişti, ancak daha sonra killi zeminleri iyileştirmek için kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemle en iyi sonuçlar, çok ince malzeme içeren suya doymun kum zeminlerde elde edilir. Bu yöntemle suya doymun killi zeminlerin sıkıştırılması mümkün değildir.



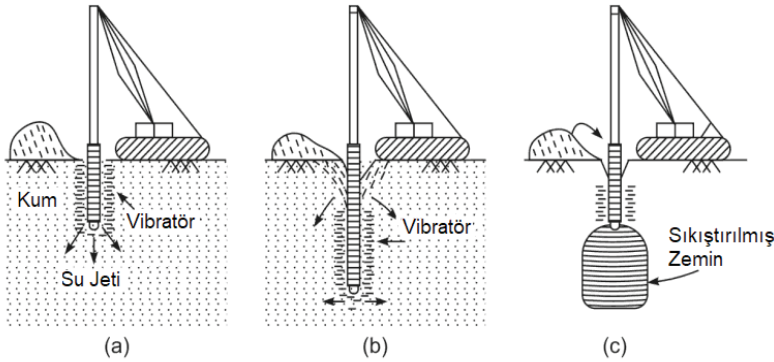
Şekil 2. Kum Kompaksiyon Kazık Yöntemi

3.3. Vibrokompaksiyon (Flotasyon)

Derin kum, çakıl (kohezyonsuz) zemin tabakalarında zemine yerleştirilen bir vibratörün oluşturduğu titreşimler ile zeminin sıkıştırılarak zeminin iyileştirilmesine vibro kompaksiyon denilmektedir. Şekil 3'te vibrokompaksiyon uygulaması görülmektedir. Bu amaçla zemine girebilen vibratörler kullanılmaktadır. Zeminin derinliklerinde bulunan zayıf zeminler, gevşek dolgular, kohezyonsuz zeminler zemine yerleştirilen bu vibratörün yüksek seviyeli enerji titreşimleri ile sıkıştırılarak zemin özellikleri iyileştirilebilir. Bu titreşimlerin etkisiyle ince ve iri danecikler

arasındaki sürtünme kuvvetlerinde geçici olarak azalmalar meydana gelir ve bu olay danelerin birbirinden ayrılmasına (uzaklaşmasına) neden olur. Bu durumun sonucu olarak kohezyonsuz zeminlerde sondanın etrafındaki bölgede sıvılaşma meydana gelir ve bu sıvılaşma sebebiyle çok hızlı oturmalar meydana gelir. Bu sondanın meydana getirdiği titreşimler neticesinde sonda etrafındaki zeminde sıkışma sağlanmış olur. Bu teknikle, 40 cm çapında silindirik vibratörün uç kısmındaki jetlerden basınçlı su, hava veya su-hava karışımlarının püskürtülmesi sonucu vibratörün, 30 metreye varan derinliklere indirilmesi mümkün olmaktadır.

Vibrokompaksiyon ince daneli malzeme içermeyen veya az içeren kohezyonsuz zeminlerin kompaksiyonunda kullanılır. Vibratörün su jeti sürekli çalışır, su zemin daneleri arasındaki sürtünme kuvvetlerinin azalmasını sağlar. Bu durum ise danelerin daha sıkı bir yerleşime geçmesini kolaylaştırır. Bu yöntemle, rölatif sıkılık %70 ila %85 arasındaki değerlere kadar artırılabilir.

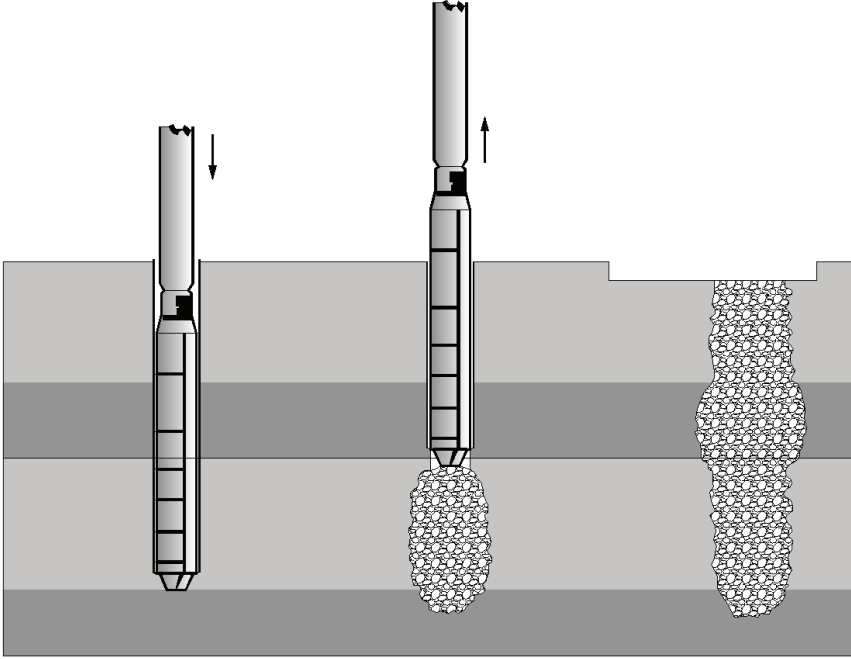


Şekil 3. Vibro Kompaksiyon Yönteminin Uygulanması

3.4. Vibro Değiştirme ve Taş Kolonlar

Yumuşak ve gevşek kumlu zeminlerin iyileştirilmesi için tercih edilen taş kolon yöntemi Şekil 4'de şematik olarak görülmektedir. Taş kolonlar sayesinde, zeminin taşıma kapasitesi artırılabilir, oturma süresi azaltılabilir veya deprem esnasında sıvılaşabilen veya taşıma gücünü kaybedebilen zeminler sağlamlaştırılabilir. İnce dane oranı %25'ten fazla olan zeminlerde vibrokompaksiyon uygulaması etkili olamamaktadır. Bu tip zeminlerde taş kolonların teşkil edilmesi gerekmektedir. Taş kolonlar, genellikle zayıf zemin tabakası kalınlığının 10m den fazla olmadığı durumlarda tercih edilmektedir. Taş kolonların kullanımıyla, oturma sorunları %50-60 civarında azaltılabilir, taşıma gücü ise çok daha

yüksek oranlarda artırılabilir. Taş kolonlar, zeminin su jeti yardımıyla delinerek granüler kohezyonsuz dolgu malzemesinin yerleştirilmesi ve titreşim ile sıkıştırılması ile elde edilir. Taş kolonların imal edildiği zeminlerin taşıma gücü ve kayma mukavemeti artmaktadır. Taş kolonlar, bir nevi dren özelliği de gösterdiği için konsolidasyonu hızlandırmaktadır. Bu yöntem, düşük maliyetli olması ve imalatın hızlı yapılabilmesi nedeniyle sıklıkla tercih edilir.

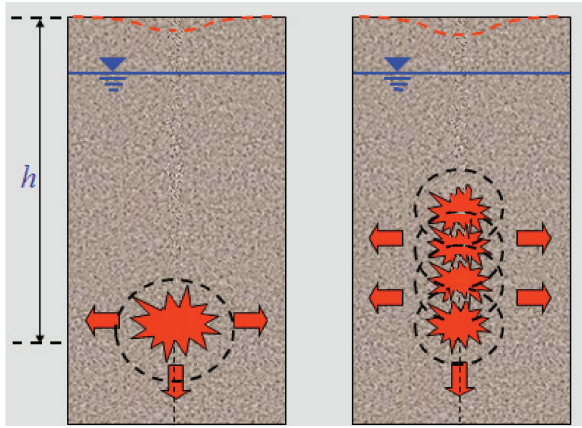


Şekil 4. Taş Kolon Uygulaması

Taş kolon uygulaması 3.3. başlığında detayları verilen vibrokompaksiyon (Flotasyon) uygulamasına benzer gibi görülmektedir. Ancak taş kolon uygulamasında zemin delinip içine büyük çakıllar doldurulup sıkıştırılmaktadır. Vibrokompaksiyon (flotasyon) uygulamasında ise var olan zemine devasa bir titreşim uygulayan bir alet sokulur ve var olan zemin sıkıştırılır. Özetleyecek olursak taş kolon uygulamasında zemin değiştirilip ve sıkıştırılırken; vibrokompaksiyon (flotasyon) uygulamasında zemin sadece sıkıştırılır.

3.5. Patlatma ile Kompaksiyon

Patlatma teknolojisi, inşaat alanındaki alt zemin tabakalarının iyileştirilmesi için kullanılır. Patlatma metodunda, iyileştirilecek zemin tabakaları arasına patlayıcılar Şekil 5'te görüldüğü gibi yerleştirilerek art arda ateşlenip hızlı basınç dalgaları oluşturularak zeminin sıkıştırılması amaçlanır. 1 kg TNT'nin patlamasıyla üretilen enerji, 100 m yükseklikten serbest düşen 5 ton tokmağın enerjisine eşittir. Doygun gevşek kohezyonsuz zemin tabakalarında patlatma ile oluşan sıvılaşma sayesinde çok etkili ve homojen bir sıkılaşma gerçekleşmektedir. Bu esnada yüzeyde su ve gaz çıkışı olurken kaymalar stabilite kayıpları da görülebilir. Patlamanın gerçekleştiği yüzeyin üst kısmında sıkışma gerçekleşmediğinden üst kısımdaki zeminin sıkışması için silindirler kullanılır.



Şekil 5. Patlatarak Sıkıştırma Yöntemi Şematik Görünümü

3.6. Elektrik Şoku ile Kompaksiyon

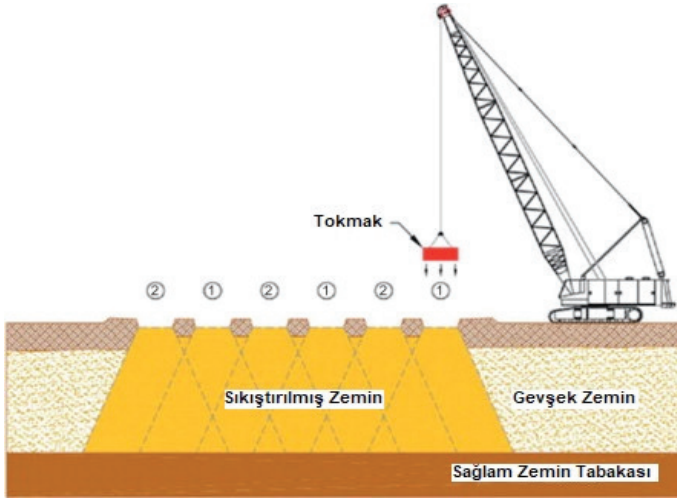
Yüksek elektrik voltajının oluşturduğu şok dalgaları ile granüler zeminin sıkıştırılması yolu ile yapılan zemin iyileştirme işlemidir. Çok pahalı bir yöntem olduğundan fazla tercih edilmemektedir.

3.7. Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon yönteminin amacı, granüler zeminlerin sıkışmasını sağlayarak taşıma güçlerinin artırılması, oturmaların azaltılması ve sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesidir. Dinamik kompaksiyon yönteminde, kontrollü şok darbeleri ile zayıf zeminlerin iyileştirilmesi hedeflenir. Uygulama sırasında zeminlerin sıkışma miktarı, zemin tipine ve uygulanan enerjiye göre değişmektedir. Bu yöntemde, Şekil 6 ve Şekil 7'de görüldüğü üzere, doymuş temel zemini yerinden kaldırılmadan, üzerine düşürülen ağırlıkların oluşturduğu şok dalgaları yardımıyla sıvılaşmaya zorlanmakta ve sıkışma gerçekleştirilmektedir. Dinamik kompaksiyonla

zeminin doğal durumunda herhangi bir değişiklik yapılmadan iyileşmesi sağlanır. Heterojen ve doygun olmayan zeminler ise zımbalama etkisi ile sıkışmaktadır. Bu nedenle, dinamik kompaksiyon atık döküm alanların sıkıştırılması için de etkili bir yöntemdir.

Pratikte genellikle, 6 – 20 ton arasında değişen yükler 20 m yükseklikten düşürerek kullanılmaktadır. Ancak özel durumlarda ağırlık 10-20 tondan 150 tona, düşüş yüksekliği 10-20 metreden 40 metreye kadar çıkabilmektedir. Dinamik kompaksiyon uygulamasında 30 metre yüksekliğinde standart vinçler kullanılmaktadır.



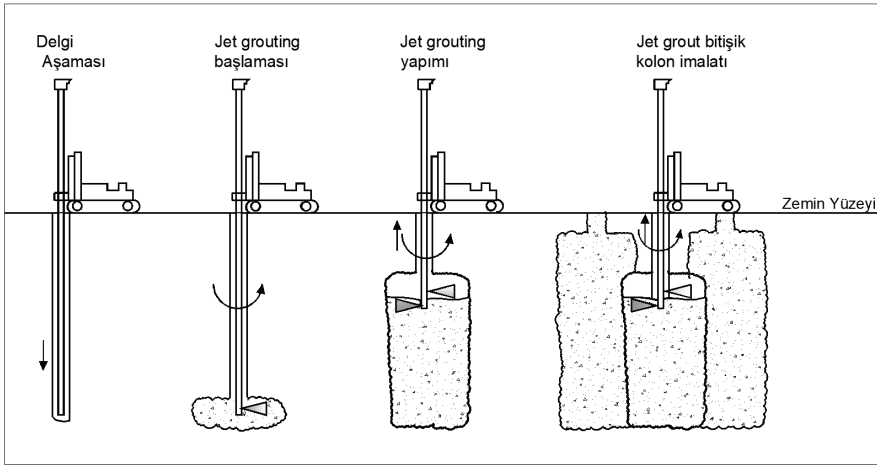
Şekil 6. Dinamik Kompaksiyon



Şekil 7. Dinamik Kompaksiyon Uygulamasında Kullanılan Tokmak

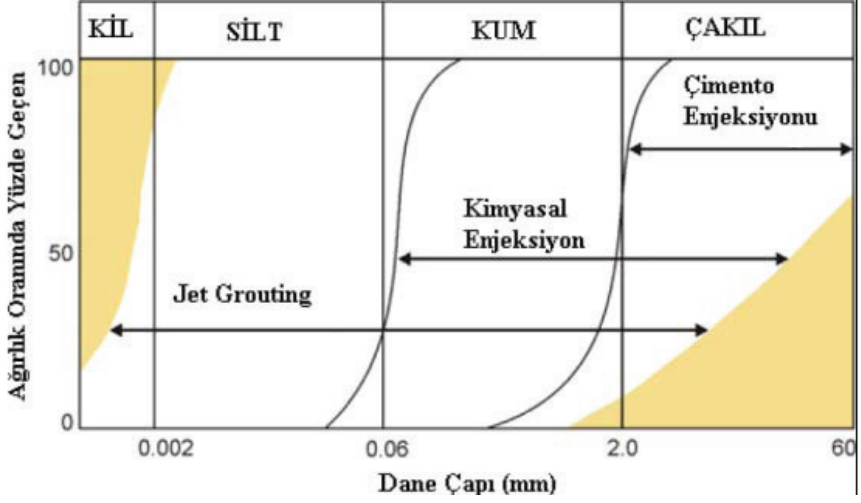
3.8. Jet Grout

Ana maddesi çimento olan Jet grout yönteminde, “toprakarme” (so-il-crete) olarak bilinen zemin-çimento karışımından oluşan kolonların zemin içerisinde teşkil edilmesi amaçlanmaktadır. Jet grout yönteminde, zemin özel bir delgi makinesi yardımıyla delinir ve ardından yüksek basınçlı (400-700 bar) çimento şerbeti (çimento-su karışımı; bazen ek olarak bentonit ve katkı maddeleri) ortama jetler ile püskürtülür, zemin yüksek basınçtan dolayı parçalanır ve çimento şerbetiyle karışarak toprakarme oluşur. Kullanılan özel ekipmanların belirli bir hızda döndürülerek yukarı çekilmesi yoluyla yüksek elastisite modüllü silindirik kolonlar imal edilir.



Şekil 8. Jet – Grout Yönteminin Şematik Gösterimi

Jet grout yöntemi, Şekil 8’de görüldüğü üzere, zeminde çok az bir deformasyona sebep olması, titreşim oluşturmaması, dar alanlarda çalışmaya uygun olması, istenilen derinliğe kadar zeminde iyileştirme yapılabilmesi gibi özellikleriyle diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca klasik enjeksiyon sistemlerinde zemin özelliklerinde büyük miktarlarda değişim yapılamazken, jet grout yönteminde ise zeminin, su-çimento karışımı ile karıştırılmasından dolayı bu özellikler üzerinde önemli değişiklikler sağlanabilmektedir. Jet grout uygulamasıyla, zeminin taşıma gücü ve elastisite modülü artarken aynı zamanda geçirgenliğini azalır. Jet grout yöntemi, geliştirildiği ilk zamanlarda kohezyonsuz zeminlerde kullanılmış olup teknolojinin gelişimi ile ince daneli zeminlerde de başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Dolayısıyla jet grout yönteminin, en önemli artılarından birisi değişik dane dağılımı gösteren zeminlerde uygulanabilirliğidir. Uygulama alanları, Şekil 9’da görüldüğü üzere diğer enjeksiyon türlerine kıyasla oldukça geniştir.



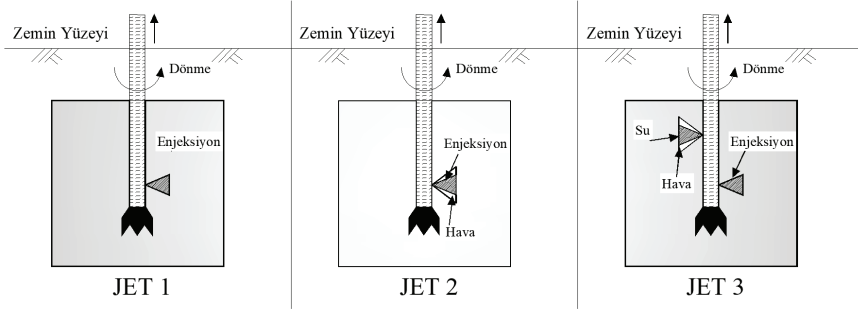
Şekil 9. Dane Dağılımına Göre Enjeksiyon Çeşitleri

Jet grout yöntemi aşağıdaki üstünlüklere sahiptir.

- Her türlü zemin için uygulanabilir olması
- Önceden belirlenebilecek geometrik ölçüler çerçevesinde uygulanması nedeniyle kullanılacak çimento miktarının yaklaşık olarak hesaplanabilmesi
- Çimento şerbeti kullanıldığı için kimyasal enjeksiyon gibi çevre kirliliği oluşturmaması
- Dar alanlarda enjeksiyon işinin başarıyla yapılabilmesi
- Yüksek riskli inşaatlarda can güvenliği sağlanması
- Jet grout kolonları istenilen derinlikten başlanıp istenilen derinliğe kadar imal edilebilmesi

3.8.1. Jet Grout Sistemleri

Jet grout sistemleri geleneksel olarak Şekil 10'da gösterildiği gibi jet 1, jet 2 ve jet 3 yöntemlerinden oluşmaktadır. Ayrıca son dönemlerde büyük yük kolon çapları üretimi yapılabilen süper jet yöntemi gelişim göstermiştir. Bu sistemlerden en uygun olanı, iyileştirilecek zeminin cinsine, imalat sonucunda istenilen jet grout kolonun geometrik ve mekanik özellikleri ile çevre şartlarına bağlı olarak seçilmektedir.



Şekil 10. Jet Grout Sistemleri

3.8.1.1. Jet 1 (Tek Akışkanlı Sistem)

Zemin ile enjeksiyon sıvısının karıştırılması amacıyla, çimento şerbeti kullanılarak zeminin parçalanması ve ayrıştırılması için yüksek enerjili tek akışkanlı su jetinin kullanılması esasına dayanır. Bu metotta enjeksiyon şerbeti 300-600 bar basınçla nozullardan zemine basılmaktadır. Elde edilen jet grout kolon çapları zemin türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Granüler zeminlerde 1 m'ye kadar kolon çapları oluşturulabilirken siltli ve kumlu yumuşak zeminlerde daha yüksek çaplarda kolonlar imal edilebilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde kullanımı ise olumlu sonuçlar vermeyebilir (Küsin, 2009).

3.8.1.2. Jet 2 (İki Akışkanlı Sistem)

Tek akışkanlı sistemin modifiye edilmiş şekli olan bu sistemde çift çeperli bir boru takımı delici olarak kullanılmaktadır. Yüksek hıza sahip enjeksiyon jetinden, orta borudan enjeksiyon ve dış borudan 8-12 bar'la sıkıştırılmış hava birlikte püskürtülmektedir. Sisteme eklenmiş olan bu hava jeti sürtünme kayıplarını azalttığından çimento enjeksiyonunun parçalayıcı etkisi artmaktadır. Dolayısıyla bu sistemle elde edilen kolon çapları tek akışkanlı sistemde elde edilenlere göre yaklaşık %760-800 artış göstermektedir (Bakım, 2007).

Jet 2 yönteminde, kolon çapları orta sıkı kohezyonsuz zeminlerde 1 m'den, gevşek kohezyonsuz zeminlerde ise 1,8 m'den fazla kalınlığa ulaşabilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde ise jet 1'e kıyasla daha etkili sonuçlar elde edilmektedir.

3.8.1.3. Jet 3 (Üç Akışkanlı Sistem)

Üç akışkanlı sistem diğer jet grout sistemlerine göre daha karmaşık ve ileri bir sistemdir. İç içe üç çeperli bir boru takımının kullanıldığı bu sistemde, zeminin parçalanması 8-12 bar ile ara borudan gelen sıkıştırılmış hava ve orta borudan gelen su ile yapılmaktadır. Su jetinden birkaç

desimetre aşağıda, aynı ekseninde yerleştirilmiş püskürtme ağzından 30-80 bar basınçlı en dış borudan gelen çimento enjeksiyonu tek başına püskürtülmektedir (Fırat, 2001). Böylece, hava ve su basıncı ile önü açılan çimento enjeksiyonunun daha uzak mesafeye kadar etki etmesi sağlanmakta ve zeminde çapları 2 m'den daha fazla boyutlara sahip kolonlar oluşturulabilmektedir (Küsin, 2009). Ayrıca kohezyonlu zeminlerde yapılacak olan jet grout imalatlarında jet 3 sistemi en etkili yöntemidir.

3.8.1.4. Süper Jet Yöntemi

Jet grout yönteminde kullanılan makine ve ekipmanın gelişmesi ile zeminde daha düşük maliyetlerle daha büyük çapta kolonlar imal edilebilme ihtiyacı doğmuştur. Bu amaçla geleneksel iki akışkanlı sisteme dayanarak geliştirilen süper jet sisteminde, 3.0-5.0m arasında çaplarda zemin ve çimento karışımı (soilcrete) içeren kolonlar imal edilebilmektedir. Kolonun yapım aşaması ilk olarak 15 cm çapındaki tijin tasarım derinliğine indirilmesi ile başlamaktadır. Tijin ucundaki nozullardan çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçta püskürtülür ve zemin parçalanarak yüksek basınçlı enjeksiyon kolonları oluşturulur. Bu yöntem, yatay zemin suyu hareketlerinin kontrolünde, sıvılaşmayı engellemek için, geçirimsiz perde duvar imalatında, kazı yan yüzeylerinin desteklenmesinde kullanılmaktadır (Küsin, 2009).

3.9.ENJEKSİYON

Enjeksiyon ile zemine enjekte edilen materyalin zeminin kayma mukavemetini arttırması ve permeabilitesini azaltması amaçlanır (Balkıs, 2009). Genel olarak zemindeki aşırı oturmaları, sızıntıyı kontrol etmek ve boşlukları doldurmak, zeminlerin mukavemetini arttırmak ve deforme olabilirliğini azaltmak, zeminin erozyon tehlikesini azaltmak, zeminin sıvılaşma riskini azaltmak, tarihi ve yığma yapıları rehabilite etmek ve güçlendirmek, patlama metoduyla gevşeyen temel kayasını sağlamlaştırmak, komşu temelleri güçlendirmek, geçirimsizlik perdeleri teşkil etmek amacıyla kullanılır.

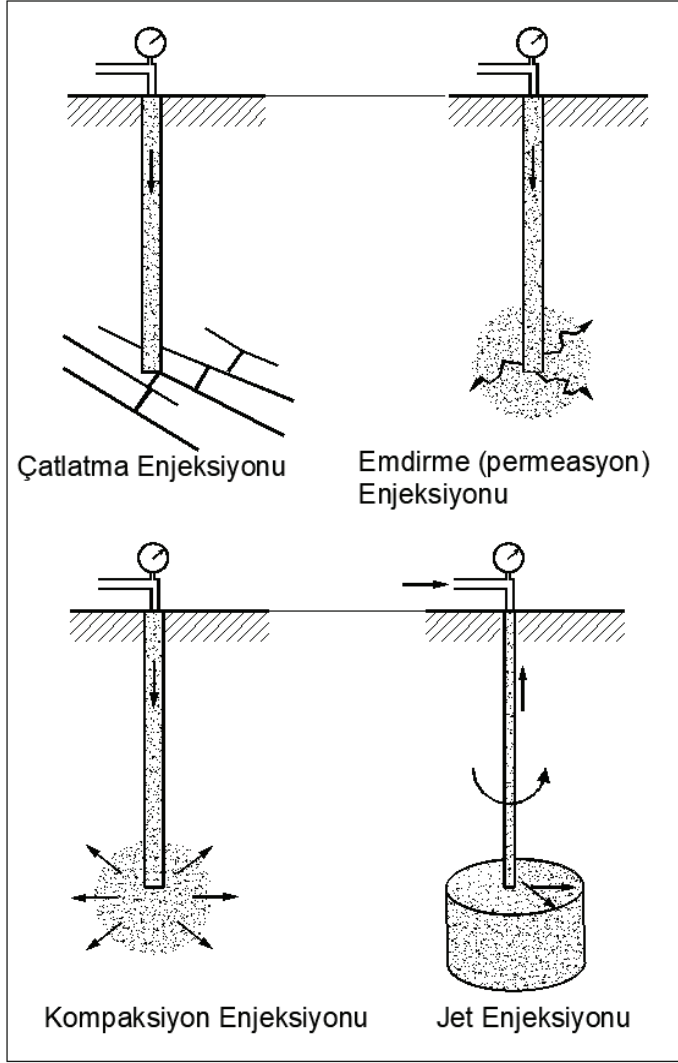
Emdirme (permeasyon) enjeksiyonunda düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesi, düşük basınçlarla zemin içerisindeki boşluklara nüfus eder ve zeminin hacminde ve yapısında bir değişiklik meydana getirmez. Permeasyon enjeksiyonu, en eski ve en yaygın kullanılan enjeksiyon yöntemidir. Bu teknik, zemin geçirgenliğini düşürmek, yeraltı su akışını engellemek, granüler zemin daneleri arasında bağlayıcı kuvvet oluşturmak ve taşıma gücünü arttırmak için kullanılır. Enjeksiyon malzemesi zemin içerisinde zamanla sertleşir ve zemini iyileştirir. Bu metotta çimento şerbeti veya kolit yapıdaki kimyasal çözeltiler kullanılabilir. Fakat zemin geçirimsizliği azaldıkça, hem teknik hem de ekonomik zorluklar nedeniyle enjeksiyon

yapılması imkansız hale gelmektedir. Permeasyon enjeksiyonu Şekil 11 de görüldüğü gibi neredeyse sadece çakıllı zeminlere yapılabilir.

Aksoy ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada aynı granülometriye sahip dere kumu ve kırma taş agregaların enjeksiyon sonrası dayanımlarını incelemişlerdir. Kötü derecelenmiş kum (SP) sınıfındaki kırmataş ve dere kumu zemin türleri aynı rölatif sıkılıkta, aynı granülometride hazırlanmıştır. Bu zeminlere, sabit bir basınç altında (150 kPa) çimento şerbeti ile enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon işleminde kullanılan çimento şerbetinin su/çimento oranı 0.8 dir. Enjeksiyon numuneleri, 7 ve 28 gün boyunca kür şartlarında bekletildikten sonra serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Dere kumu kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinin, kırmataş kullanılarak üretilen enjeksiyon numunelerinden daha yüksek dayanıma sahip oldukları tesbit edilmiştir.

Çatlatma enjeksiyonunda zemine kararlı ve düşük viskoziteli çimento yüksek basınçla verilerek zeminin çatlatılması amaçlanır. Bu enjeksiyon yöntemi, genellikle permeasyon enjeksiyonu yapılamayan düşük geçirimsiliğe sahip ince daneli zeminlerde uygulanır. Çatlatma enjeksiyonunun gelişimi tünel veya kazı uygulamaları sırasında oluşan oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır (Tunçdemir,2004).

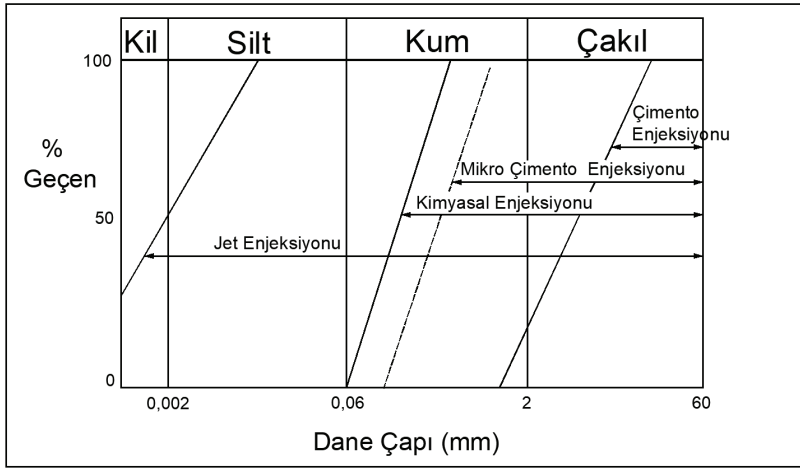
Çatlatma enjeksiyonunun sonucunda zemine ağaç dallarına benzer çimento kanalları oluşur. Başlangıçta yüksek basınçla enjekte edilen çimento kanalları yine çimento ile doldurulur. Çoğunlukla çimento şerbeti kullanılarak yapılan bu yöntemin asıl amacı permeabiliteyi azaltmaktır ancak bina oturmalarını durdurmak ve yeraltı çalışmalarının neden olduğu hareketleri önlemek içinde kullanılmaktadır.



Şekil 11. Enjeksiyon Tekniklerinin Şematik Gösterimi

Şekil 11’de şematik olarak gösterilen kompaksiyon enjeksiyonu, yüksek viskoziteli bir enjeksiyon malzemesinin yüksek basınç altında zemini deforme etmesini sağlayarak enjeksiyon yapılması işlemidir. Kompaksiyon enjeksiyonunu diğer enjeksiyon yöntemlerinden ayıran temel fark, zemin boşluklarına nüfuz etmeden veya zemine karışmadan gerçekleşmesidir. Bunun yerine zemini sıkıştırarak, zemindeki boşlukların azalmasını ve zeminin daha sıkı hale gelmesini sağlamaktadır. ASCE (1980)’e göre; 25 mm’den daha az çökme değeri olan, yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar da kum içeren harç kıvamındaki enjeksiyon malzemesinin, zemin boşlukları içerisine girmeksizin en-

jeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturacak ve bu sayede etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştıracak şekilde yüksek basınçlarla enjekte edilmesi yöntemiyle uygulanmaktadır. Kompaksiyon enjeksiyonunda çok katı bir enjeksiyon malzemesi çok yüksek basınçla enjekte edilir. Bu nedenle emdirme enjeksiyonunun aksine zemin yapısı bozulur. Bunun yanında kompaksiyon enjeksiyonu her zemin tipinde uygulanabilirken, emdirme enjeksiyonunun uygulanabilirliği zeminin ve enjekte edilecek malzemenin dane çapına göre değişmektedir. Jet enjeksiyonu tasarım derinliğine kadar belirli çapta ve boyda silindirik kolon oluşturularak yapılır. Şekil 12’de çeşitli enjeksiyonlarının dane çapına göre uygunluğu ile ilgili tablo görülmektedir.



Şekil 12. Çeşitli Enjeksiyonlarının Dane Çapına Göre Uygunluğu

Enjeksiyon işlemi tek kademe de ya da kademeli olarak yapılabilir. Eğer yüzeysel derinlikte bir enjeksiyon işlemi varsa tek kademede yapmak mümkündür. Daha derin zeminlerde kademeli enjeksiyon uygulanır. Kademeli enjeksiyon işleminde, belli bir derinlikte enjeksiyon kuyusu açılır, enjeksiyon yapılır, ardından enjeksiyon malzemesi katılaştıktan sonra kuyunun derinliği artırılarak tekrar enjeksiyon yapılır.

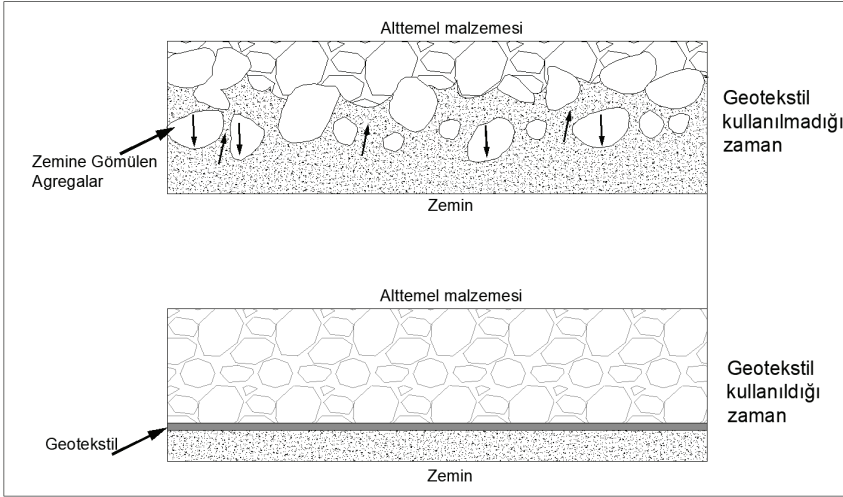
3.10. GEOTEKSTİL ve GEOGRİD SERME

ASTM, geotekstili “bir inşaat projesi, yapı veya sistemin parçası olarak zemin, kaya, toprak veya diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili bir malzeme ile beraber kullanılan geçirimli tekstil ürünü” olarak tanımlamıştır (D4439-20, 2020). Geosentetik malzemeler, sentetik malzemelerden üretilen geçirimli ve geçirimsiz tekstil ürünleri ile benzer ham mad-

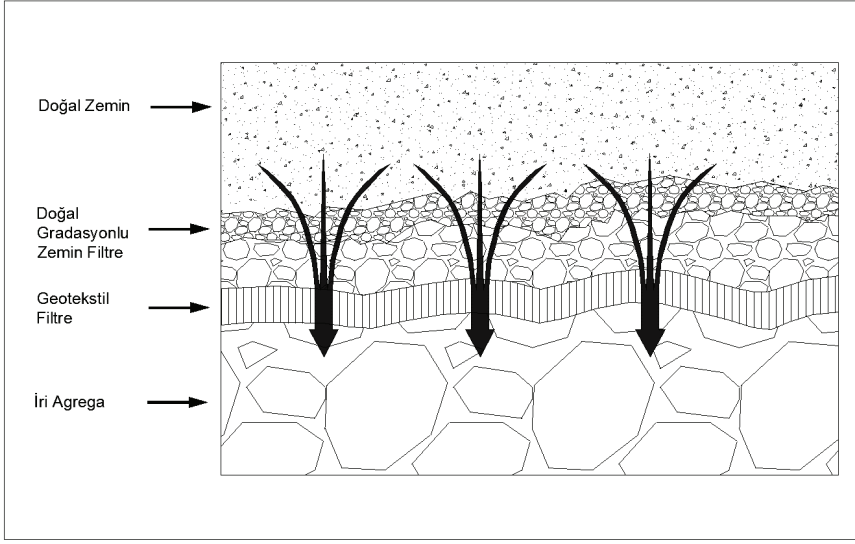
delerden üretilen ağ, ızgara, şerit, hücre ve tabaka gibi ürünlerin genel adıdır. Geosentetiklerin hammaddeleri, elastisite modülü, sünme gibi pek çok özellikte değişiklik gösteren polyester, polimerler, poliolefin, poliamid, polipropilen, cam-mineral veya karbon fiberleri ve PVC gibi farklı karakterlerdeki malzemelerden oluşmaktadır. Geosentetik malzemelerin bazı çeşitleri geotekstil, geogrid, geomembran, geonettir.

Geo tekstillerin pek çok farklı uygulama alanı olmasına rağmen genellikle aşağıdaki 6 farklı fonksiyonları göz önüne alınarak kullanılırlar.

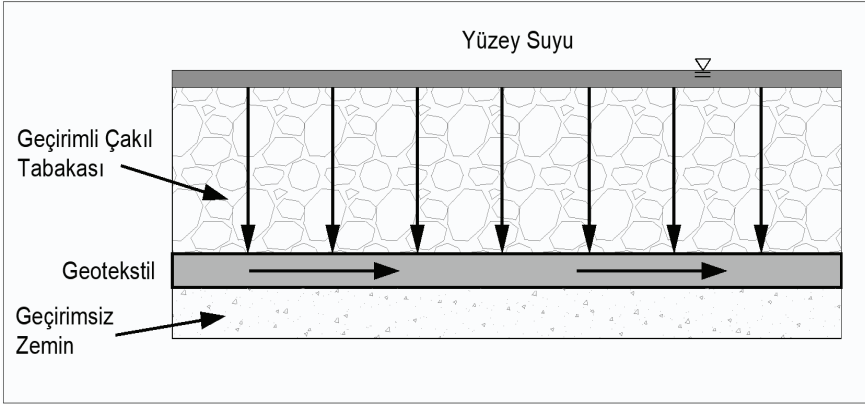
- Koruma
- Ayırma (Şekil 13)
- Filtrasyon (Şekil 14)
- Drenaj (Şekil 15)
- Güçlendirme (Şekil 16)
- Yalıtım (Şekil 17)



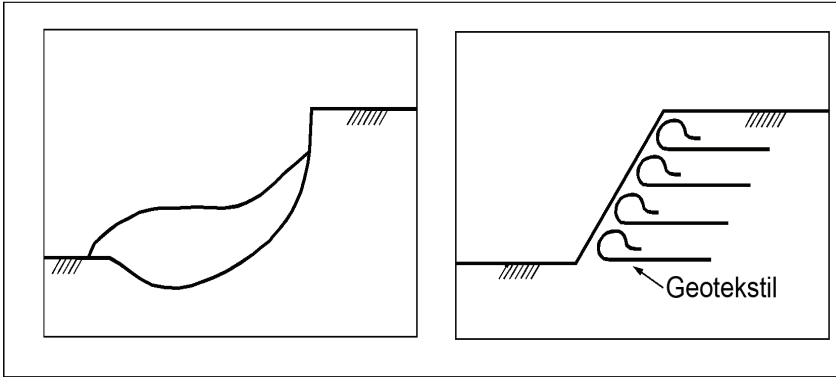
Şekil 13. Ayırma Amaçlı Geotekstil kullanımı



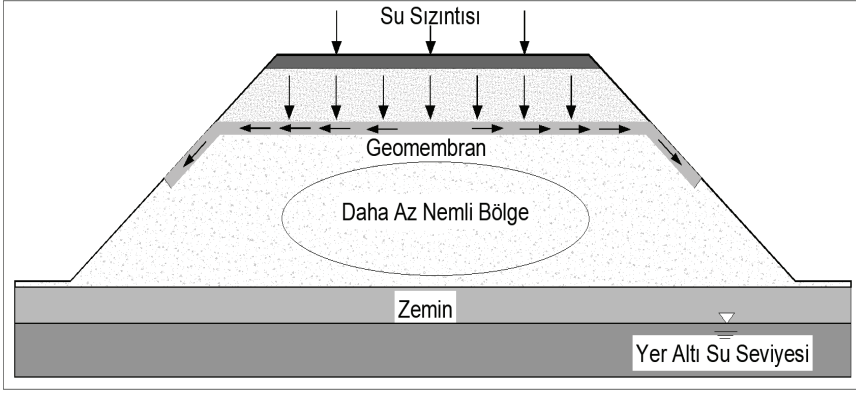
Şekil 14. Filtrasyon Amaçlı Geotekstil kullanımı



Şekil 15. Drenaj Amaçlı Geotekstil kullanımı



Şekil 16. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil kullanımı



Şekil 17. Yalıtım Amaçlı Geotekstil kullanımı

Geoteksiller kıyı koruması, zemin ve taşların sıkıştırılması, su altı şev ve dalga tesirlerinden koruma, düşey perde, kapiler koruma, erozyon kontrolü, hendek drenajı amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca geoteksiller, geomembranlarla birlikte kullanılarak geomembranın yırtılmasını engeller ve geomembranın amacına uygun çalışmasını sağlarlar.

Geogridler, özellikle soğuk işleme yöntemindeki gelişmeler sayesinde geosentetikler arasında kullanımı giderek artan bir türdür. Geogridlerin en önemli özelliği, arasından zeminin geçebileceği şeritler arasındaki enine ve boyuna mesafelerdir. Geogridler özellikle güçlendirme için kullanılır.

4. İYİLEŞTİRİLMİŞ GRANÜLER ŞİLTE UYGULAMASI

İyileştirilmiş granüler bir zemin kullanılarak daha alttaki kohezyonsuz zemin tabakalarına etkiyen basınç değerlerinin azaltılmasının amaçlandığı bu yöntemde doğal zeminin üzerine geoteknik özellikleri iyileştirilmiş bir başka kohezyonsuz zemin yerleştirilir.

Granüler dolgu zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi için pek çok yöntem ve katkı maddesi kullanılmaktadır. Atık maddeler, kullanımlarının teşvik edilmesi, her yerde bulunabilmeleri ve ekonomik olmaları gibi sebeplerle en çok tercih edilen katkı maddeleri haline gelmiştir. Zehirli olmayan atıkların zemin iyileştirme amacıyla kullanımı her geçen gün artmaktadır. Atık araç lastikleri ve diğer plastik esaslı maddelerin kohezyonsuz zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanımı konusunda literatürde pek çok çalışma mevcuttur.

Birçok araştırmacı, atık lastik parçalarının ve lastik talaşlarının eklenmesinin, kayma mukavemeti, geçirgenlik, sıkıştırılabilirlik, sıkıştırma özellikleri, Poisson oranı ve elastisite modülü gibi farklı tipteki zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için büyük çaba sarf

etmiştir. Lastik talaşlarının hafif olmaları nedeniyle istinat duvarlarının ve dolguların geri doldurulması için iyi bir malzeme olduğunu bildirmişlerdir (Ahmed ve Lovell, 1993; Lee ve diğerleri, 1999; Tweedie ve diğerleri, 1998; Youwai ve Bergado, 2003; Cabalar, 2011; Edincliler ve diğerleri, al., 2010; Rahgozar ve Saberian, 2016). Öğütülmüş atık araç lastiklerinin kumlu zeminlerin dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen Aksoy ve diğ. (2021) kumlu zemine ağırlıkça %2,5 ile %10 arasında değişen oranlarda öğütülmüş araç lastiği ekleyerek, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su muhtevası değerleri standart Proktor deneyi ile belirlenmiştir. Ardından Proktor sıkılığında hazırlanan numuneler, üç farklı eksenel gerilme altında kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, içsel sürtünme açısının öğütülmüş araç lastiği yüzdesi %5'e ulaştığında %13,8 artış gösterdiğini ve kohezyonun ise öğütülmüş araç lastiği yüzdesi % 5'e ulaştığında %66.4 azaldığını göstermiştir. Ağırlıkça %5 araç lastiği oranı aşıldıktan sonra içsel sürtünme açısı azalmış ve kohezyon ise düşük bir oranda artmıştır.

Zeminde rastgele dağılan Polipropilen elyaf (PPF), donatısız zemine göre donatılı zeminin sünekliğinin artmasına neden olur ve zemine eklenen lif içeriği nedeniyle zemin matrisindeki çekme kuvveti arttırılır. PPF'nin geoteknik mühendisliğindeki en popüler uygulamaları; dolgu, dolgu, temel, alt temel ve şev stabilite problemleridir (J Li ve Ding 2002, Tang ve diğerleri 2007, Unnikrishnan ve diğerleri 2002). İbrahim ve Fourmont (2007), PPF ilavesinin çok ince kumun kesme mukavemeti özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için kesme kutusu deneyleri yapmışlardır. Bu amaçla ince kuma çeşitli yüzdelerde PPF eklemişler ve farklı relatif sıkılıklarda kum ve PPF takviyeli kum ile testler gerçekleştirilmiştir. Maksimum grilme değerine ulaşmak için gereken deformasyonun arttığını ve ayrıca PPF ile güçlendirilmiş kumun maksimum kesme mukavemetinin arttığını bulmuşlardır. Attom ve Al-Tamimi (2010), dört farklı PPF içeriğinde (%0, %1, %2, %3 ve %4) iki tip ((L_f/D_f) oranları farklı) PPF'nin kumlu zeminin kesme mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, (L_f/D_f) oranı daha büyük olan liflerin, zeminin kesme mukavemeti özelliklerini daha iyi bir şekilde iyileştirdiği belirlenmiştir.

Polipropilen elyaf (PPF) ilavesinin, sıkıştırılmış kumlu zeminin kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini araştıran Aksoy ve diğ (2021). Kuru kuma ağırlıkça %0.5, %1,0 ve %1,5 oranında PPF ilave etmişlerdir. Katkısız kumun ve PPF ile güçlendirilmiş kumun maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) ve optimum su muhtevaları (w_{opt}) standart Proktor deneyi ile belirlenmiştir. Proktor sıkılığında hazırlanan karışımlar üzerinde üç farklı düşey basınç altında kesme kutusu deneyi

yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre; PPF yüzdesi %1 olduğunda, içsel sürtünme açısının maksimum ve kohezyonun ise minimum değere ulaştığını belirlenmiştir. Artan PPF oranı ile içsel sürtünme açısı azalmış ve kohezyon artmıştır.

Ayrıca çeşitli doğal maddeler kullanılarak, granüler şiltinin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi de oldukça yaygın bir uygulamadır. Aksoy ve Gör (2017) yaptıkları çalışmada kohezyonsuz bir zemini Astragalus isimli bir biyopolimer kullanarak iyileştirmişlerdir. Astragalus, en çok Türkiye, İran, Türkmenistan, Irak, Çin, Kore, Japonya, Suriye, Moğolistan ve Kuzey Afrika vb. ülkelerde yetişen bir bitkiden elde edilen bir biyopolimerdir. Maksimum mukavemet parametrelerine ulaşmak için gereken Astragalus oranını belirlemek için Astragalus içeriği ağırlıkça %0 ile %10 arasında değişen on farklı zemin numunesi hazırlanmıştır. Tüm karışımlar için optimum su muhtevası (w_{opt}), maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}), mukavemet parametreleri ve California Bearing Ratio (CBR) değerleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, kumlu zeminlere %1 oranında Astragalus eklenmesinin, mukavemet parametreleri, ekonomiklik ve CBR değerleri açısından ideal oran olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca Dünyanın bazı bölgelerinde rüzgarla hareket eden kumlu zeminler bulunmaktadır. Bu zeminler “kumul” olarak adlandırılmaktadır. Kumul zeminler Acatay (1959) tarafınca; içerisinde humus, kil gibi bağlayıcı maddeleri olmayan veya az olan, taneleri çok küçük ve kuru halde iken rüzgar vasıtası ile harekete geçerek bir yerden diğer bir yere taşınan kumlar olarak tanımlanmıştır. Aksoy ve Gör (2011) de yaptıkları çalışmada kumul zeminleri farklı katkı maddeleri kullanılarak stabilize edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla kumul zemine ağırlıkça %0- %3- %5- %10 oranında Portland Çimentosu (PÇ), silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) ayrı ayrı ilave edilerek karışımlar hazırlanmış ve stabilize edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda en başarılı karışımın %10 silis dumanı katılarak elde edilen karışım olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, “kohezyonsuz zeminlerin iyileştirilmesi” konusu üzerinde durulmuştur. Son yıllarda, artan dünya nüfusu ile beraber şehirlerde yaşayan nüfusun da oranı da artmıştır. Bunun sonucunda, şehirler gittikçe daha çok nüfusu barındırmak durumunda kalmıştır. Her şehirde yüksek katlı yapılar inşa edilmeye başlanmıştır (Bilgen & Afşar, 2021). Artan bina yükleri ile birlikte, oturma ve taşıma gücü sorunları da artmıştır. Bu nedenle, zemin iyileştirme uygulamaları gün geçtikçe daha da popüler olmaktadır. Sunulan çalışma kapsamında detaylı olarak belirtildiği üzere özellikle kohezyonsuz zeminlerde kullanılan Kompaksiyon Kazığı, Kum

Sıkıştırma Kazığı, Vibro Kompaksiyon, Taş Kolonlar, Patlatarak Kompaksiyon, Elektrik Şoku ile Kompaksiyon, Dinamik Kompaksiyon, Jet Grout, Enjeksiyon, Geotekstil ve Geogrid Serme ve sıkıştırılmış granüler şilte uygulaması konularında genel bilgiler ve literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Mühendislik uygulamalarında, sıklıkla kohezyonsuz zeminlerde taşıma gücü, oturma ve/veya sıvılaşma sorunlarıyla karşılaşmaktadır. Derlenen bu bilgilerin, inşaat mühendisleri için yol gösterici bir rehber olacağını ümit edilmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahmed, I., & Lovell, C. W. (1993). Rubber soils as lightweight geomaterials. *Transportation research record*, (1422).
- Acatay, A., (1959), "Orman Korunması, İ.Ü. Orman Fakültesi Yayınları, No:62 İstanbul, 313-318.
- Aksoy, H. S., Edan, O. M. E., & Taher, N. (2021). Shear Strength Parameters of Sand Reinforced with Polypropylene Fiber. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(4), 900-907.
- Aksoy, H. S., & Gör M. (2011). Kumul Zeminlerin Farklı Malzemeler Kullanılarak Stabilize Edilmesi 4. *Geoteknik Sempozyumu Çukurova Üniversitesi, Adana*
- Aksoy, H. S., & Gor, M. (2017). High-speed railway embankments stabilization by using a plant based biopolymer. *Fresenius Environ. Bull*, 25, 7626-7633.
- Aksoy, H. S., Taher, N., & Awlla, H. A. (2021). Shear strength parameters of sand-tire chips mixtures. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3), 713-720.
- ASCE, Committee on Grouting of the Geotechnical Engineering Division. (1980). Preliminary Glossary of Terms Relating to Grouting. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(7), 803-815.
- Attom, M. F., & Al-Tamimi, A. K. (2010). Effects of polypropylene fibers on the shear strength of sandy soil. *International Journal of Geosciences*, 1(01), 44.
- Bakım, M. A. (2007). Enjeksiyon yöntemleriyle zemin iyileştirilmesi (*Doctoral dissertation, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*).
- Balkıs, A. P., (2009) Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirmesi, 3. *Geoteknik Sempozyumu Çukurova Üniversitesi, Adana*
- Bilgen, G. (2004). *Yüksek Fırın Cürufu ile Zemin Stabilizasyonu*. Kocaeli Üniversitesi.
- Bilgen, G. (2011). *Öğütülmüş çelikhane cürufu, kireç ve deniz suyun killerin iyileştirilmesinde kullanımı*. Kocaeli Üniversitesi.
- Bilgen, G. (2020a). Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 3163–3173. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>
- Bilgen, G. (2020b). Utilization of powdered glass in lime-stabilized clayey soil with sea water. *Environmental Earth Sciences*, 79(19), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09195-w>
- Bilgen, G. (2021). *Sürdürülebilir çevre kavramı çerçevesinde inşaat ve yıkım atıkları (Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar)* (A. Güllü & S. Yalçinkaya, Eds.). Güven Plus Gurup A.Ş. Yayınları.

- Bilgen, G. (2022). Long - term compressive strength and microstructural appraisal of seawater , lime , and waste glass powder – treated clay soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(895), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10167-6>
- Bilgen, G., & Afşar, E. (2021). Diaphragm wall construction cost by the well method on cohesive and non-cohesive soils. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(2), 283–289. <https://doi.org/10.46810/tdfd.1015264>
- Bilgen, G., Aksoy, S. H., & Cana, Ö. (2013). Effect of marble dust on consistency limits and compressibility of a clayey soil (in Turkish). 5. *Geotechnical Symposium, Adana, Turkey*.
- Bilgen, G., Houlihan, M., Ryoo, S., Wang, Y., & Aydılek, A. H. (2020). Hydraulic and environmental compatibility of RCA with filters and subgrades in highways. *Environmental Geotechnics*, 1–13. <https://doi.org/10.1680/jenge.20.00040>
- Bilgen, G., & Kavak, A. (2010). Effects of seawater on geotechnical properties of a clay soil. *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(8), 1623.
- Bilgen, G., Kavak, A., & Çapar, Ö. F. (2012). Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane curufunun kullanılması ve kireç ile etkileşiminin araştırılması. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 2(2), 30–38. <https://doi.org/10.7212/zkufbd.v2i2.92>
- Cabalar, A. F. (2011). Direct shear tests on waste tires–sand mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(4), 411–418.
- Ciancio, D., Beckett, C. T. S., & Carraro, J. A. H. (2014). Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, 53, 59–65.
- Dagli, E., & Capar, Ö. F. (2022). Engineering Performance of Fly Ash Stabilized Çatalağzı Clay. *European Journal of Science and Technology*, (34), 267–272. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1081214>
- Diamond, S., & Kinter, E. B. (1965). Mechanisms of soil-lime stabilization an interpretive review. *Highway Research Record*, (92), 83–102.
- Edinçiler, A., Cabalar, A. F., Cagatay, A., & Cevik, A. (2012). Triaxial compression behavior of sand and tire wastes using neural networks. *Neural Computing and Applications*, 21(3), 441–452.
- Eren, Ş., & Filiz, M. (2009). Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Dari{dotless}dere material. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2473–2480.
- Ibrahim, E., & Fourmont, S. (2007). Behaviour of sand reinforced with fibres. In *Soil stress-strain behavior: Measurement, modeling and analysis (pp. 807-818)*. Springer, Dordrecht.

- Japan International Cooperation Agency. (1994). Soil Improvement Techniques. Japan: *Japan International Cooperation Agency*, 106.
- Küsin, C. C. (2009). Jet grout yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizi (*Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü*).
- Li, J., & Ding, D. W. (2002). Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 22(9-12), 977-983.
- Saberian, M., & Rahgozar, M. A. (2016). Geotechnical properties of peat soil stabilised with shredded waste tyre chips in combination with gypsum, lime or cement. *Mires and Peat*, 18(16), 1-16.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- Tunçdemir, F., 2004, Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi, *Türkiye Mühendislik Haberleri (Sayı 430)*, Ankara, 59 – 64s.
- Tweedie, J. J., Humphrey, D. N., Sandford, T. C., & New England Transportation Consortium. (1998). Tire Chips as Lightweight Backfill for Retaining Walls--Phase II (No. *NETCR-8*). *New England Transportation Consortium*.
- Unnikrishnan, N., Rajagopal, K., & Krishnaswamy, N. R. (2002). Behaviour of reinforced clay under monotonic and cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(2), 117-133.
- Youwai, S., & Bergado, D. T. (2003). Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire sand mixtures. *Canadian geotechnical journal*, 40(2), 254-264.