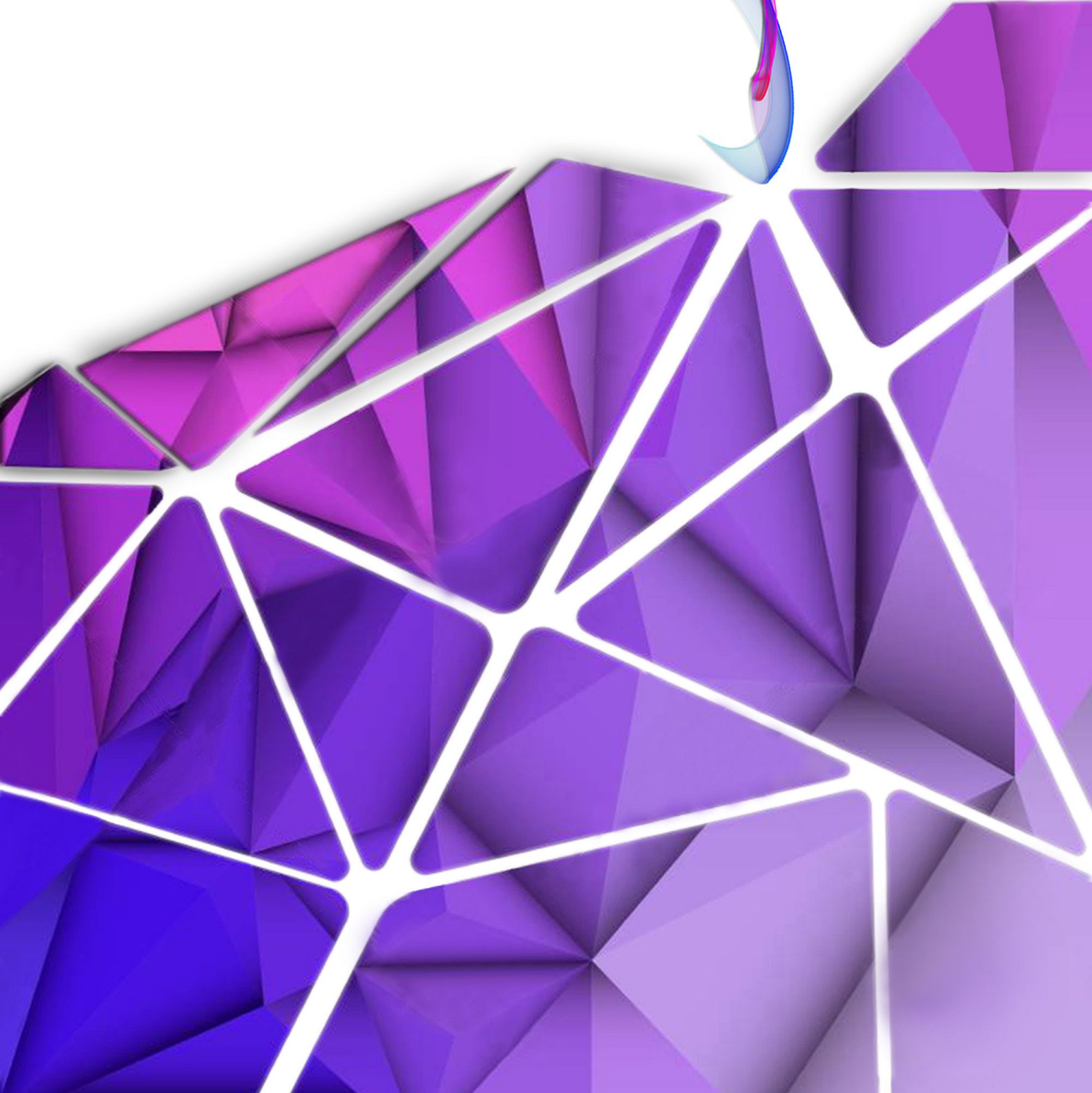


2022, Cilt 3 Sayı 1

e-ISSN 2717-9397

İLERİ MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARI VE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ



İÇİNDEKİLER

Fatih KAHRAMAN Gökçe Mehmet GENÇER Aytaç GÖREN	El Fonksiyonunu Kaybeden Kişiler İçin Bir Dış İskelet El Tasarımı ve Üretimi An Exoskeleton Hand Design and Manufacturing for Persons Losing Hand Function	1-12
Ercan ŞENYİĞİT Nuri YURTGÜLÜ	Değiştirilmiş Kriter Ağırlıklarına Dayanan Yeni Bir Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi A New Multi-Criteria Decision Making Method Based on Modified Criteria Weights	13-18
Büşra KAVURUCU Erdem EKMEK Ömer YAMAN Serkan Yılmaz YAZAN Nergiz KANMAZ Ümit ÜNVER	Türkiye’de Endüstriyel Su Tüketimi ve Arıtımı Industrial Water Consumption and Treatment in Turkey	19-33
Kaveh DEGHANIAN Esra SARIAY	Geosentetik Kil Örtülerin Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri Physical and Mechanical Properties of Geosynthetic Clay Covers	34-56

El Fonksiyonunu Kaybeden Kişiler İçin Bir Dış İskelet El Tasarımı ve Üretimi

Fatih KAHRAMAN^{*1}, Gökçe Mehmet GENÇER², Aytaç GÖREN³

^{1,2,3}Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35390, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 22.11.2021, Kabul Tarihi: 08.02.2022

Özet

Bu çalışmada, doğuştan veya sonradan meydana gelen inme gibi hastalıklar sonucunda elini ve parmaklarını kullanamayan hastaların fizik tedavisine yardımcı olabilecek ve eklem hareketlerini yönlendirebilecek bir dış iskelet el tasarlanmıştır ve üretilmiştir. Dış iskelet el tasarımı SolidWorks programı ile gerçekleştirilmiş ve kritik parçalarının statik analizi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Tasarlanan dış iskeletin parçaları 3B yazıcı ile basılarak üretilmiştir. 3B yazıcı ile üretimde ara yüz olarak Cura programı kullanılmıştır. Dış iskelet parçalarının birbirine montajı yapıldıktan gerekli fiziksel terapi hareketlerini sağlamak için iki adet birbirinden bağımsız servo motor kullanılmıştır. Her iki servo motor da arduino sürücüsü ile kontrol edilmektedir. Tasarlanan dış iskelet sisteminin prototipini üretmek için, 3D yazıcıda yazdırırken mümkün olan en kısa üretim süresi ve en iyi mukavemeti sağlayacak şekilde baskı parametresi seçilmiştir. Model PLA malzeme kullanılarak basılmıştır. PLA malzeme kullanılarak dış iskelet parçalarının üretilmesi ile hafif ve mukavemetli parçalar elde edilmiştir. Ayrıca küçük ebatlı ve düşük ağırlığa sahip yüksek kapasiteli servo motorlar, bataryalar ve kullanılarak sistem hafifletilmiştir. Kullanıcının kolay kullanımı için el ateli ve eldiven gibi kullanımı kolaylaştıracak aparatlar konstrüksiyona eklenmiştir. Tüm parçalar eklendiğinde toplam ağırlığı 450g civarında olan çok hafif ve kullanıcı dostu bir dış iskelet sistemi oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Dış iskelet el, Fizik tedavi, Statik analiz, 3B yazıcı.

An Exoskeleton Hand Design and Manufacturing for Persons Losing Hand Function

Abstract

This article is to design an exoskeleton hand that can assist physical therapy and direct joint movements of patients who cannot use their hands and fingers, such as congenital or acquired stroke, etc. The exoskeleton hand has been designed with SolidWorks program and static analysis has been made for the critical parts using the finite element method by SolidWorks. Parts of the designed exoskeleton were printed with a 3D printer, and the Cura program was used as the 3D interface. After the assembly of the exoskeleton parts, two separate servo motors were used to provide the necessary physical therapy movement. Both of the servomotors are controlled by the Arduino driver.

In order to produce the prototype of the designed exoskeleton system, it was chosen printing parameter for possible the shortest production time and in a way that provides the best strength while printing on the 3D printer. The model is printed using PLA material. Lightweight and durable parts were obtained by producing exoskeleton parts by using PLA material. In addition, the system has been lightened by using high-capacity servo motors, batteries, and low weight. Apparatuses such as hand splint and gloves are added to the construction for easy use of the user. When all the parts are added, a very light and user-friendly exoskeleton system has been produced with a total weight of around 450g.

Keywords: Exoskeleton hand, Physiotherapy, Static analysis, 3D printer.

*Sorumlu yazar fatih.kahraman@deu.edu.tr, ²mehmet.gencer@deu.edu.tr, ³aytac.goren@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Son yıllarda, giyilebilir robotik dış iskelet giderek daha çok araştırmacının ilgisini çekmekte ve özellikle insan hareket kabiliyetinin artırılması ve nöro-motor rehabilitasyonu gibi alanlarda kullanımı araştırılmaktadır (Marconi vd., 2019). Ancak rehabilitasyon ve destekleme amacıyla kullanılan dış iskelet el robot ve cihazları insanın yaradılıştan sahip olduğu motor ve algılayıcılara olan gereksinimleri nedeniyle kollar ve bacaklar için kullanılan dış iskeletler kadar hızlı bir şekilde ilerlememiştir (Heo vd., 2012). Günümüzde nöromüsküler hastalıklar veya yaşlanma nedeniyle el yeteneklerini kaybeden veya zayıflayan insanlar için dış iskelet teknolojilerini kullanarak el işlevlerinin geliştirilmesi giderek daha da önemli bir konu haline gelmiştir. Özellikle inme sonrası kas güçsüzlüğü, tonus bozukluğu, yüzeysel ve derin duyu kaybı nedeniyle el fonksiyonları bozulabilir. İnme hastalarında sıklıkla fleksör hipertoni ve parmak ekstansör zayıflığı vardır (Beydoğan, 2008) bu da etkilenen ellerini fonksiyonel kavrama için açmayı zorlaştırır. Bu bozulma nedeniyle, günlük yaşam aktivitelerinde herhangi birine olan bağımlılığın ortadan kaldırılmasını hedefleyen inme rehabilitasyonunda el rehabilitasyonu ağırlıklı olarak yer tutmaktadır (Başaran, 2009).

El fonksiyonunu kaybeden kişiler için başarılı bir rehabilitasyon sağlanabilmesi yoğun ve sürekli terapötik egzersiz yapılması çok önemlidir (Taub vd., 2002). Geleneksel manuel olarak gerçekleştirilen tedavide düşük verimliliğin aşılması için robotik rehabilitasyon ile aşılabileceği yapılan araştırmalarla ortaya konmuştur (Heller vd., 1987). Robotik tekrarlanan hareket eğitimi, özellikle bir yardım almaksızın tekrarlı hareket yapmakta zorluk çeken hastalar için çok daha önemli ve etkili bir tedavi imkânı sağlamaktadır.

Mevcut el rehabilitasyonu cihazları her ne kadar birbirlerine göre yapı ve mekanik özellikler bakımından büyük farklılıklar gösterse de hepsinin genel amacı parmak hareketlerine yardımcı olmaktır. Parmak hareketlerini sağlayan mevcut cihazların çoğu, elektrikli veya pnömatik motorlarla çalışan aktif sistemlerdir (Tablo 1). Motorların ve güç kaynaklarının büyük ağırlığı nedeniyle toplam cihaz ağırlığı daha da artar. Normal bir insanın elinin ağırlığına göre daha ağır olan bu yapı hastanın kullanımını zorlaştırmaktadır. Özellikle bu durum, proksimal kol zayıflığının yaygın olduğu inme hastaları ile günlük yaşam koşulları altında rehabilite edilmek istenen kişilerin bu sistemleri kullanılmasını engellemektedir (Brokaw vd., 2011). Bu sistemlerin bir

diğer dezavantajı da cihazlarının çoğu aşırı derecede iridir (hacimsel olarak büyük yer kaplar) ve bu nedenle de hareket kabiliyetini ve elin kullanım yönünü sınırlandırır.

Tablo 1. El rehabilitasyonu için yapılmış mevcut dış iskelet çalışmaları

Cihaz Adı/Çalışmayı	Aktüatör	Kuvvet iletimi yürüten
ExoGlove (Yap vd., 2015)	Pnömatik	
Thompson-Bean vd.,2015)	Pnömatik	Soft aktüatör
Polygerinos vd., 2015	Hidrolik	
Safe Glove (Ma ve Ben-Tzvi, 2015)	DC motor	
CyberGrasp (Turner vd.,1998)	DC motor	Kablo tahrikli
Park vd., 2018	DC motor	
AirExGlove (Stilli vd.,2018)	Pnömatik	
HEXOSYS (Iqbal vd., 2014)	DC motor	
HEXOTRAC (Sarakoglou vd., 2016)	DC motor	
Son ve Park, 2018	DC motor	Tahrik bağlantılı
Rutgers Master II (Bouzit vd., 2002)	Pnömatik	
Exok'ab (Sandoval-Gonzalez vd., 2016)	DC motor	
Jo ve Bae, 2017	DC motor	

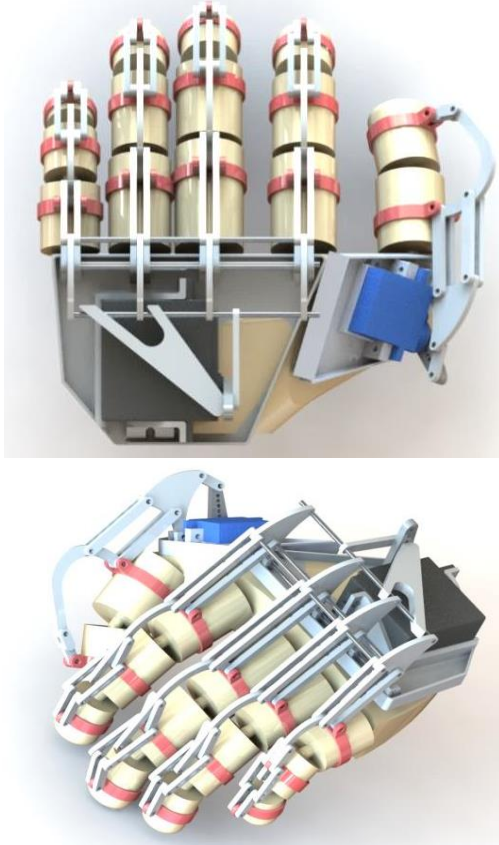
Yukarıda verilen tüm nedenler dolayısıyla bu çalışmanın amacı, el fonksiyonunu kaybeden kişiler için günlük yaşam aktivitelerinin gerçekleştirilmesi için el hareketi ve terapisine yardımcı olacak mevcutlardan çok daha hafif ve hacimsel olarak küçük, giyilebilir bir dış iskelet el geliştirmektir. Böylece kolay bir şekilde yanlarında taşıyabilir, başkasına ihtiyaç duymadan kendi kendilerine ellerine bağlayabilir ve istedikleri zaman istedikleri ortamda rahatça kullanabilirler.

2. DIŞ İSKELET EL TASARIMI

Dış iskelet el tasarımı tutma-kavrama hareketleri sırasında elin normal kinematik yörüngesini takip edecek, parmak fleksör hipertonusine iyi bir şekilde rehabilite etmesine yardım eden, gerekli tork profilini ayarlamayı sağlayan ve küçük bir kodlayıcı kullanarak (Arduino Uno) kavrama açısını ayarlayacak şekilde tasarlanmıştır.

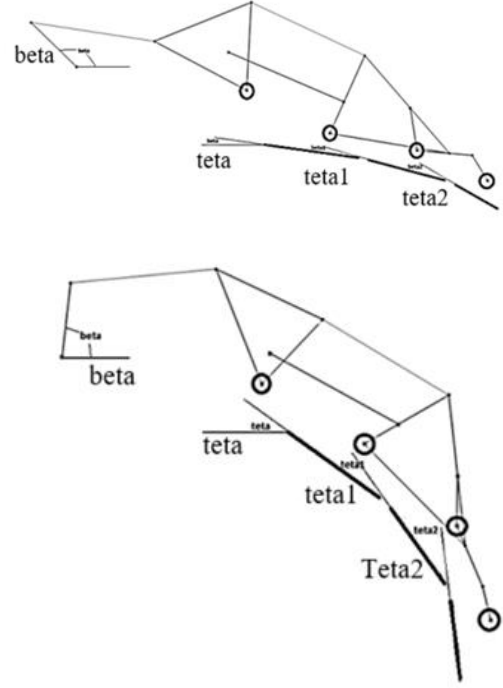
Dört parmağın kavramadaki hareketini koordineli çalışmaya zorlamak için 4 çubuklu bir bağlantı tasarlanmıştır. Başparmak ve diğer parmakların birbiri ile koordinasyonu için kodlama ve motor açısı ayarı yapılmıştır.

Servomotor bloğu içerisine yerleştirilecek servo motorun konumu, motorun verdiği hareketi iyi iletebilecek bir şekilde konumlandırılmıştır. Parçaların motordan aldığı yükü iletirken meydana gelen gerilmelerden dolayı hasara uğramaması (eğilmelerini önlemek) için kiriş parçalar çift olarak kullanılmıştır. Şekil 1'de oluşturulan 3B modelin görselleri verilmiştir.



Şekil 1. 3B Modelin a) üst görünüşü, b) perspektif görünüşü

Tasarım yapılırken ortalama bir insan için parmak boyutları (mekanizma için uzunluk değerleri), her bir parmağın (Serçe, Yüzük, Orta ve İşaret Parmaklarının) hareket mekanizması, bu parmakların hareketlerindeki sınırlar ve açı değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Şekil 2 ve Tablo 2 her bir parmak (Serçe, Yüzük, Orta ve İşaret Parmakları) için tam açık ve tam kapalı pozisyonlardaki mekanizmaya ait açı değerlerini göstermektedir.

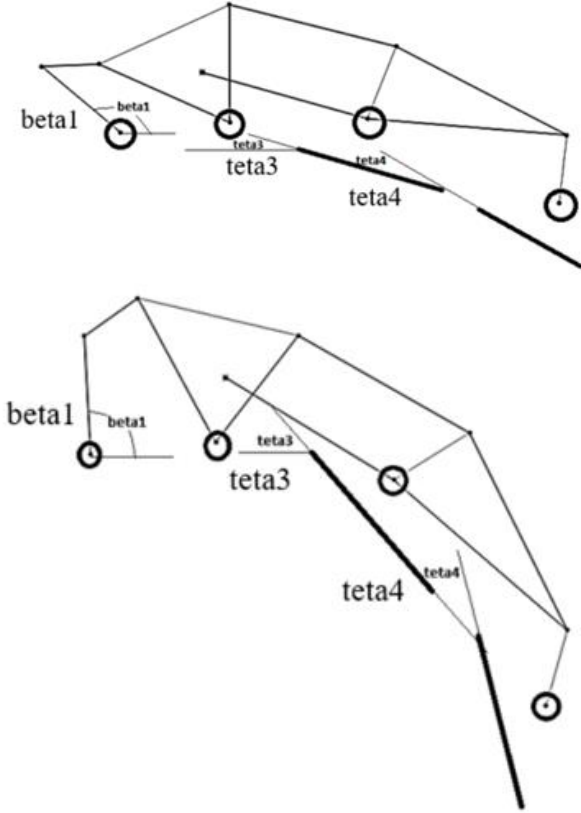


Şekil 2. Dört parmak (işaret orta yüzük serçe) için mekanizma açı değerleri a) Tam açık konumu için b) Tam kapalı konumu için

Tablo 2. Model mekanizmasının belirli konumları için Teta değerleri

	Parmak açık konumda açı değerleri	Parmak kapalı konumda açı değerleri
beta	105°	79°
teta	13,24°	20,52°
teta1	16,38°	39,44°
teta2	26,01°	42,52°

Başparmak diğer parmalardan farklı yönlerde ve açılarla çalıştığı için bu parmağa ait mekanizma farklı bir servo motor ile hareket ettirilmiştir (Şekil 3 ve Tablo 3).



Şekil 3. Başparmak için a) Mekanizma açı değeri tam açık konumu için b) Tam kapalı konumu için

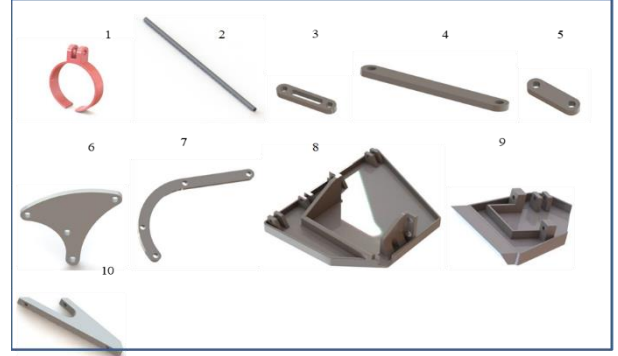
Tablo 3. Başparmak model mekanizmasının belirli konumları için Teta değerleri

	Parmak açık konumda açı değerleri	Parmak kapalı konumda açı değerleri
beta1	132°	85°
teta3	19,16°	41,21°
teta4	10°	33,79°

2.1. Modelde Kullanılan Parçalar

Dış iskelet genel olarak 12 adet Polilaktik Asit (PLA) malzemeden basılmış farklı tipte parçadan oluşmaktadır. Polilaktik Asit (PLA) yenilenebilir kaynaklardan yapılmış bir polimerdir. Petrol bazlı diğer termoplastiklerin aksine, PLA üretimi için kullanılan hammaddelerin bazıları mısır nişastası, tapyoka kökleri veya şeker kamışıdır. PLA Filament 3B Yazıcılarda en çok kullanılan filament malzemedir.

Modeldeki parmak boyutuna göre kullanılacak her bir parçanın boyutu serçe parmağa göre tasarlanmış, diğer parmaklar için kullanılacak parçalar ise daha sonra ölçülen parmakların ebatlarına göre büyütülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4. Yapılan tasarımda kullanılan tüm elemanlar (1. Yüzük, 2. Pim, 3. Kanallı link bağlantısı, 4. Uzun link bağlantısı, 5. Kısa link bağlantısı, 6. Dört nokta bayrak elemanı, 7. Kuvvet aktarım elemanı, 8. Motor montaj bloğu1, 9. Motor montaj bloğu2, 10. Destek elemanı, 11. M2 cıvata ve somunu)

Yapılan mekanizma çalışması sonrasında üç boyutlu yazıcı ile çıktı alınacak olan parçaların (3B) modelleri tasarlanmıştır. Parçaların ve montajın 3B katı modelini oluşturmak için Solidworks yazılımı kullanılmıştır. Dış iskeletin tüm parçaları, bunların montajları ve tüm hareket analizleri yine Solidworks kullanılarak oluşturulmuştur. Mesnet noktalarındaki parçalar arasında parçaların birbirine sürtünmelerini azaltmak için aralıkları 0,2 mm olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Servomotor montaj bloğu içerisine yerleştirilecek olan servomotorların konumu, parmaklara hareketi en iyi şekilde iletebilecek bir noktaya yerleştirilecek şekilde belirlenmiştir.

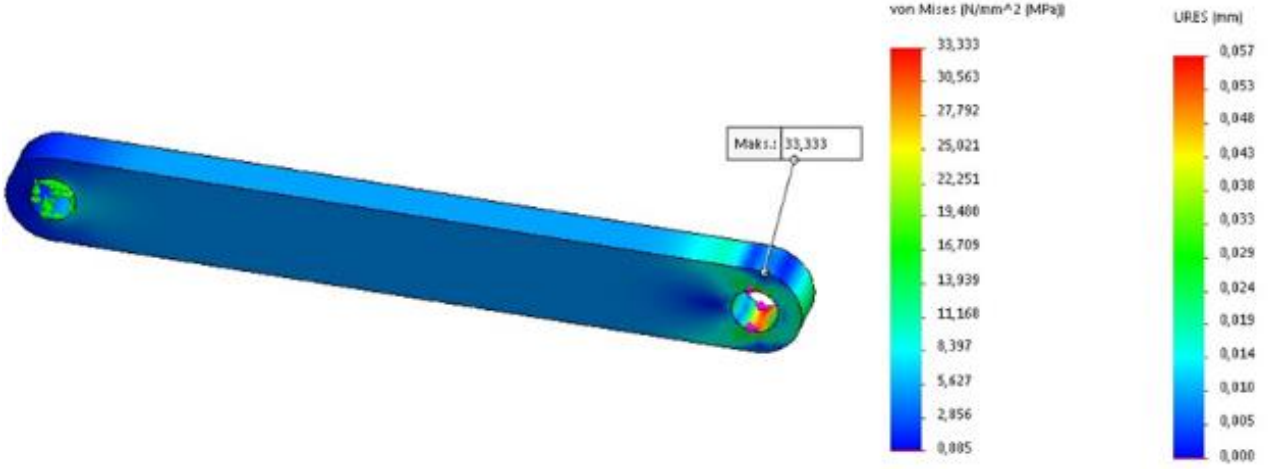
3. KRİTİK PARÇALARIN ANALİZ VERİLERİ

Parçanın üzerine gelen yüklere göre her parçada oluşan kritik gerilme bölgelerinin tespiti ve oluşan bu gerilmelere göre parçanın bu yükleri taşıyıp taşıyamayacağını tespitinin yapılması amacıyla her bir parça üzerine gelen yüklere göre gerilme analizleri yapılmıştır.

3.1. 30mm Taşıyıcı Parça

Şekil 5'te görüleceği üzere 30mm uzunluğundaki parçaya elin kapalı konumdan açık konuma gelebilmesi için gerekli olan kuvvetleri, sürtünmeden dolayı oluşan kayıpları ve emniyet faktörü (2) göz önünde bulundurarak 40N'luk bir çeki yükü uygulandığında maksimum gerilme minimum kesitte oluşmaktadır ve değeri 33,3MPa'dır. PLA malzemesinin akma gerilmesi yaklaşık 70MPa olduğundan malzeme 2 Factor of Safety (emniyet faktörü) ile çalışırsa SolidWorks'de yapılan

analiz verilerine göre uygulanacak maksimum kuvvet yaklaşık 42N'dur, dolayısıyla emniyetli bir şekilde çalışmaktadır.

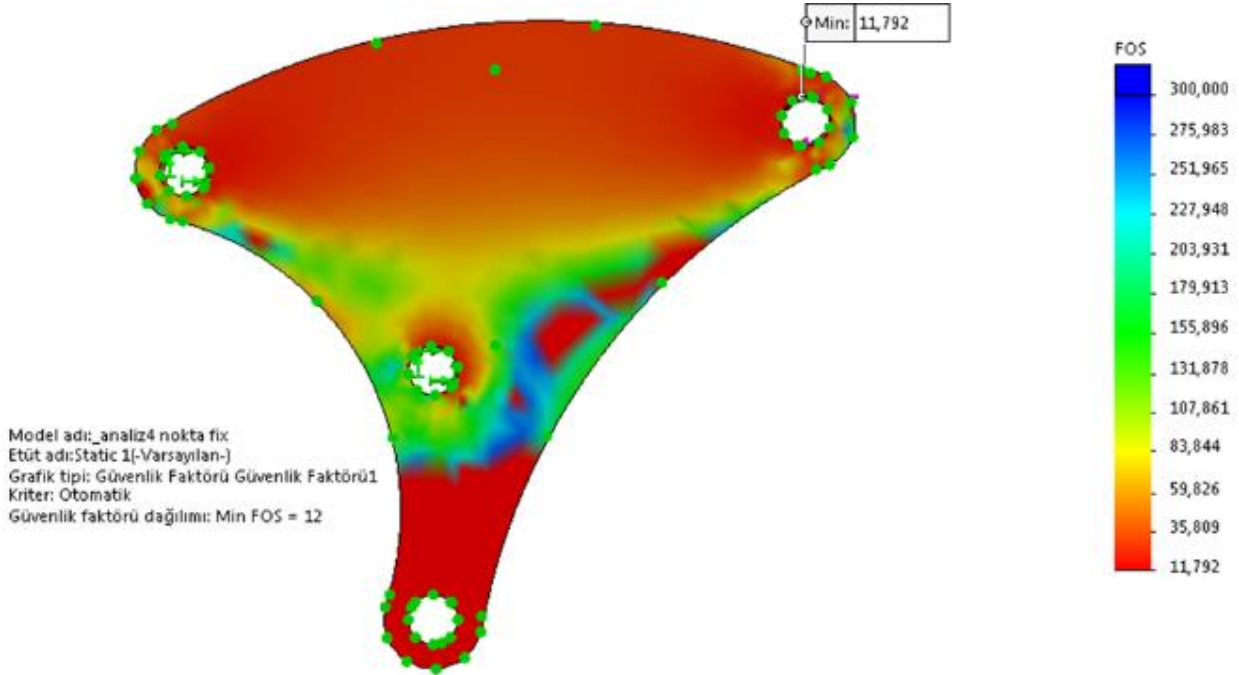


Şekil 5. 30mm taşıyıcı parçanın statik analizi

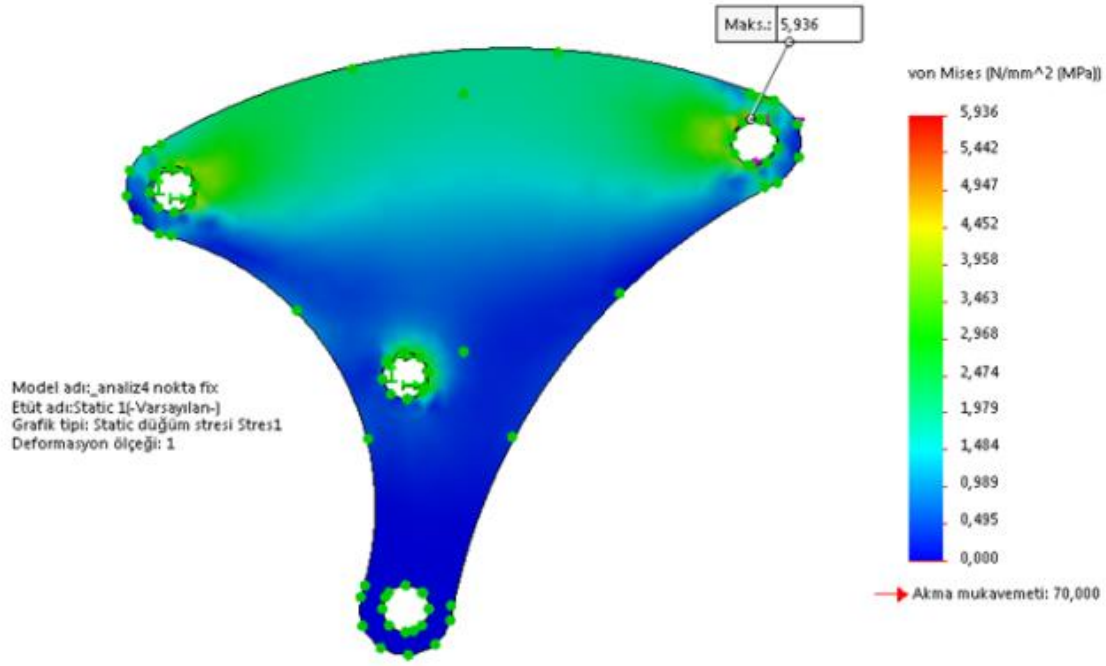
3.2. Dört Nokta Bayrak Elemanı

İki farklı tipte kullanılan dört Nokta Bayrak Elemanı aldıkları kuvvetleri iki ayrı noktaya ileterek parmaklarının birbirlerine göre hareket etmelerini sağlamaktadır. Bu parçalar, üzerlerine gelen kuvvetleri aktarabilecek ve bu kuvvet iletimini yaparken deforme olmayacak bir şekilde tasarlanmıştır. SolidWorks'de yapılan analiz için, servo motordan tahrik edilen taşıyıcı

parça ve destek elemanına gelebilecek olası ani döndürme momenti ve motorun maksimum aktarabileceği tork göz önünde bulundurularak 30N yük altında parçanın emniyet faktörü grafiği aşağıdaki gibidir Şekil 6. Bu emniyet grafiğinden anlaşılacağı üzere minimum emniyet yaklaşık 11 çıkmıştır. Analizden de anlaşılacağı gibi 30N yüke 11 emniyet faktörü göz önüne alırsak 175N yük altında parçanın güvenlik faktörü 2'nin üstündedir ve en yüksek gerilme değeri kuvvetin uygulandığı noktada meydana gelmektedir Şekil 7.



Şekil 6. Dört nokta bayrak elemanı emniyet faktörü verisi



Şekil 7. Dört nokta bayrak elemanı gerilim verisi

4. KONUM ANALİZİ

4.1. Serçe Parmak Konum Analizi

MG945 servo motorun başlangıç açısı olan ilk açı değeri yapılan prototip için 105° 'dir. Aşağıdaki tabloda motorun dönüşüne göre serçe parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir. 6. Konumdan 7. Konuma geçerken serçe parmağın açı değerleri incelendiğinde bu değerlerin serçe parmak için kritik bir değer olduğu gözükmemektedir (Tablo 4) çünkü beta değeri küçüldükçe yani parmak kapandıkça teta2 değerinin küçüldüğü ve parmağı ters olarak büktüğü gözükmemektedir.

Tablo 4. Serçe parmağın konum analizi

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	13,24	16,38	26,01
2	100	14,67	21,82	28,68
3	95	16,09	26,67	32,58
4	90	17,5	31,06	36,99
5	85	18,89	35,07	40,82
6	80	20,25	38,75	39,44
7	79	20,52	39,44	42,52

4.2. Yüzük Parmağın Konum Analizi

Tablo 5'te MG945 servo motorun dönüşüne göre yüzük parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 5. Yüzük parmağın konum analizi tablosu

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	22	4,41	28,65
2	100	23,4	8,49	28,89
3	95	24,79	12,23	29,59
4	90	26,17	15,67	30,67
5	85	27,52	18,86	32,06
6	80	28,85	21,82	33,67
7	79	29,11	22,38	34,07

1.1. Orta Parmağın Konum Analizi

Tablo 6'da MG945 servo motorun dönüşüne göre orta parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 6. Orta parmağın konum analizi tablosu

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	26,12	0	31,56
2	100	27,52	2,55	31,32
3	95	28,9	5,8	31,44
4	90	30,26	8,79	31,86
5	85	31,61	11,55	32,53
6	80	32,92	14,09	33,39
7	79	33,19	14,58	33,58

4.3. İşaret Parmağın Konum Analizi

Tablo 7’de MG945 servo motorun dönüşüne göre işaret parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 7. İşaret Parmak İçin Teta’nın Beta’ya Göre Değişimi

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	23,35	3,7	25,01
2	100	24,75	7,81	25,36
3	95	26,14	11,58	26,17
4	90	27,51	15,06	27,36
5	85	28,86	18,3	28,88
6	80	30,19	21,31	30,64
7	79	30,45	21,89	31,02

4.4. Başparmak Konum Analizi

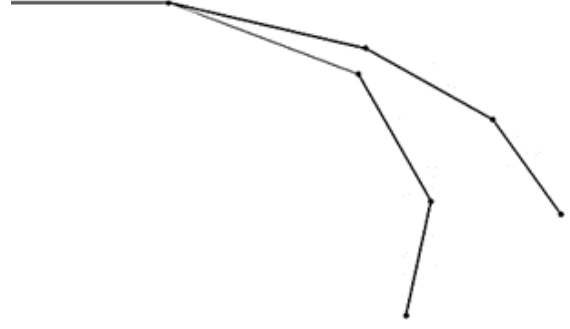
Tablo 8’de SG90 servo motorun dönüşüne göre işaret parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 8. Başparmak için Teta’nın Beta’ya göre değişimi

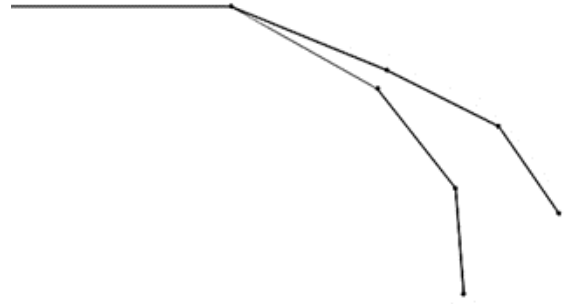
Konum	beta1	teta3	teta4
1	132	19,16	10
2	125	22,82	16,02
3	120	25,21	19,31
4	115	27,57	22,18
5	110	29,91	24,73
6	105	32,25	27
7	100	34,57	29,03
8	95	36,84	30,83
9	90	39,07	32,41
10	85	41,21	33,79

4.5. Parmakların Tam Açık ve Tam Kapalı Konumları

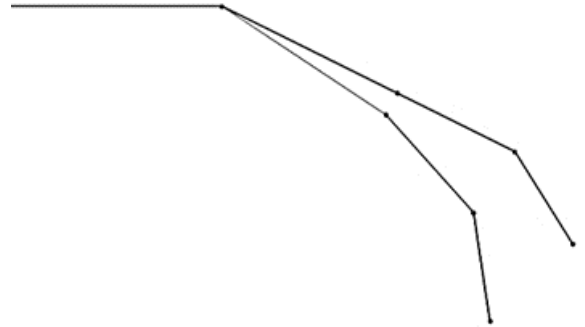
Her bir parmağın tam kapalı ve tam açık konumu için oluşturulan modellerde işaret, orta, yüzük ve serçe parmak ortalama aynı kapalı konuma gelmektedir ve her bir eklem noktasının hareketi sağlanmaktadır. Şekil 8, 9, 10, 11 ve 12 incelendiğinde, bu değerlerin 0,5 L’lik standart bir su şişesini tutabilecek kabiliyette olduğu açıkça gözlemlenmektedir.



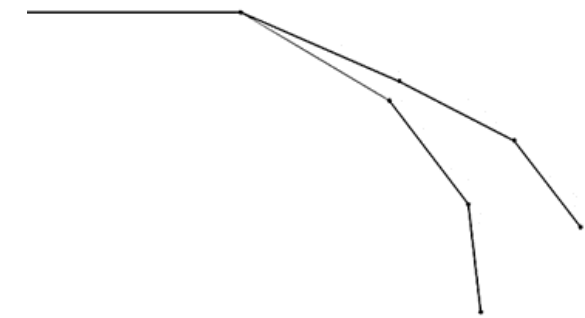
Şekil 8. Serçe parmağın açık ve kapalı konumu



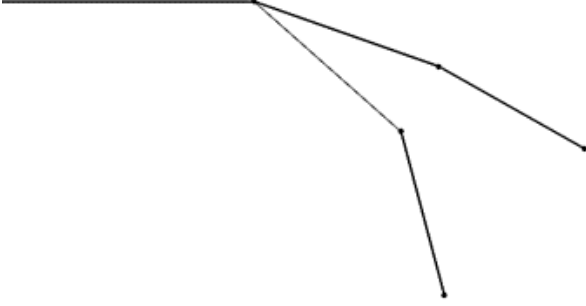
Şekil 9. Yüzük parmağın açık ve kapalı konumu



Şekil 10. Orta parmağın açık ve kapalı konumu



Şekil 11. İşaret parmağının açık ve kapalı konumu



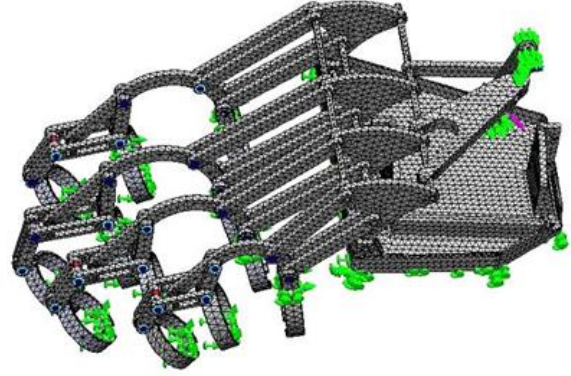
Şekil 12. Başparmağın açık ve kapalı konumu

Tablo 7 ve Şekil 12'den anlaşılacağı üzere başparmaktaki teta4 açısının beta1 açısına göre değişimi için kritik bir açı değeri mevcut değildir. Yani teta3 açısı ve teta4 açısı orantılı bir şekilde büyümektedir hiçbir şekilde beta1 açısı küçülmeye giderken teta3 ve teta4 açılarında ani bir azalış gözlenmez. Dolayısıyla Serçe Parmak mekanizmasında karşılaşılan istenmeyen kapanma olayına başparmak mekanizmasında rastlanmamaktadır. Tasarımda başparmak için kullanılan mekanizmanın diğer parmaklar için kullanılan mekanizmalardan farklı olmasının bu durum üzerinde etkisi büyüktür. Bu nedenle Teta4 değerinin veya diğer ilgili açıların belirli bir açıdan sonra küçülmeye gitmesi gibi bir durum söz konusu değildir. Çalışmamızda servo motorların dönüş açıları parçaların birbirlerine çarparak zarar görmesini engellemek sebebiyle başlangıç ve son durum için 55° ile sınırlanmıştır.

5. Elin Başlangıç Konumu İçin Statik Analizi

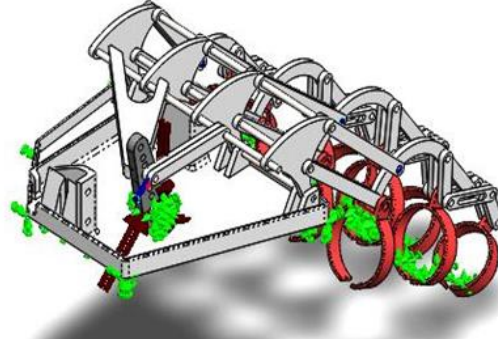
Elin başlangıç konumu servo motorun ilk hareket haline geçme konumudur. Parmakların üzerine gelen kuvvetler elini hareket ettiremeyen bir kişinin elini kapatmasına yetmek zorunda olduğu için çalışma titreşimi ve motorun verdiği ilk moment çok önemlidir. Bu nedenle hareket iletimi olabildiğince en kısa yoldan olmalıdır ve sürtünmeler minimize edilmelidir. Bu nedenle bu çalışmada yapılan tasarımda sürtünmeler azaltılmaya çalışılmış, böylece motordan alınan gücün azalması engellenmeye çalışılmıştır. Yüksek tork değerlerinin elde edilebilmesi için güç kaynağı (5V 2.1A) motora uygun seçilmiştir. MG945 servo motor kullanılan güç kaynağına göre verdiği tork değeri yaklaşık olarak 5kg.cm dir. Bu tork değeri dört parmağı birden hareket ettireceğinden dört parmağın hareketinin analizi bu değere göre yapılmıştır. Yapılan analiz işlemlerinde analiz sonuçlarını etkilemeyen fakat analizin oluşmasını yavaşlatan servo motorlar SolidWorks montajı içerisinde pasifleştirilmiştir. Montaj yapılırken parçalar arasında 0,1mm'lik boşluklar bırakılmıştır. Her bir birleşme

noktası için pim atanmış ve analiz yapılan konum için pimlerde rotasyon kapatılmıştır (Şekil 13).



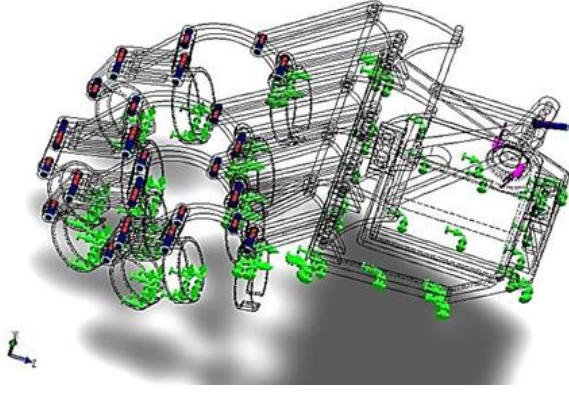
Şekil 13. Montajlanmış exoskeleton için yapılan mesh

Şekil 13'ten görüleceği üzere mesh boyu 2mm olarak seçilmiştir. Çalışmada parça kalınlıkları da 2mm olarak seçildiği için mesh kalitesi oldukça yüksektir. Ayrıca dört nokta bayrak elemanına bağlı pimlerdeki gerilme değerlerinin daha hassas çıkması için 1mm'lik mesh kontrolü uygulanmıştır.



Şekil 14. Montaj: sabit elemanlar ve tork

Motorun hareketini parmaklara iletecek olan yüzükler, iç yüzeylerinden sabitlenmiştir (Şekil 14). Böylece reaksiyon kuvvetleri ölçülebilmştir. Analizin daha basit ve anlaşılır olabilmesi için MG945 servo motor analizden çıkarılarak yerine torku ileten silindirik bir parça konulmuştur.



Şekil 15. Montaj pim bağlantısı

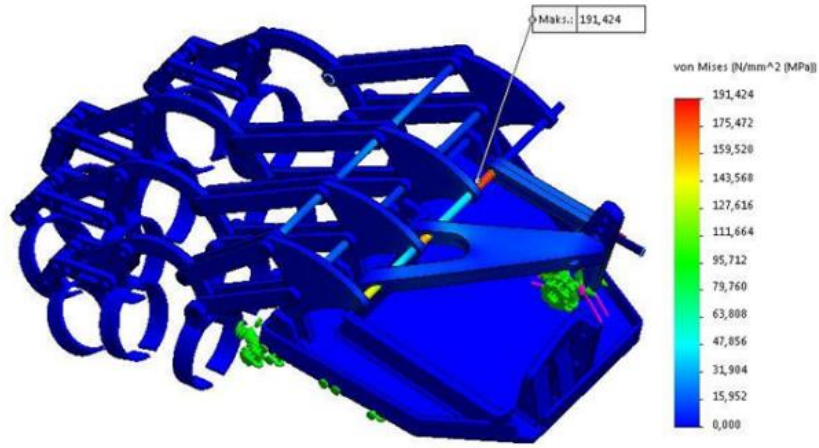
Ayrıca güvenlik faktörüne bakıldığında servo motorun uyguladığı 5kg.cm tork değeri için bütün parçalar en az emniyet katsayısı 2 olarak emniyetlidir. Bu durumda emniyetli çalışma söz konusudur. Çıkan analiz

Şekil 15'teki montaj üzerinde mavi renk ile gösterilen parçalar pim bağlantısını göstermektedir ve üzerlerindeki kırmızı renkler ise belirlenen konum için rotasyonun kapalı olduğunu belirtmektedir.

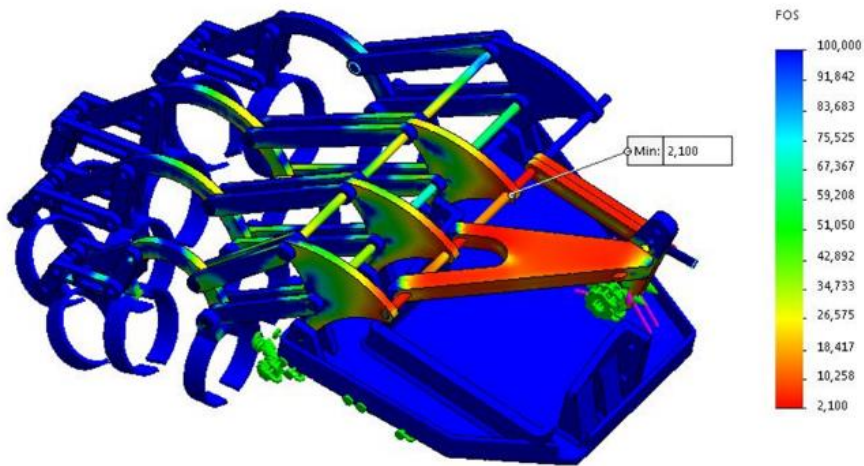
5.1. Analiz Sonuçları

Yapılan Statik analiz sonucunda taşıyıcı elemana bağlı olan ve motordan gelen kuvveti ileten büyük pim bağlantısında maksimum 191MPa gerilme tespit edilmiştir. Fakat Şekil 16'da gösterilen pimin mukavemet değeri bu değer üzerinde olduğu için emniyetli çalışmaktadır.

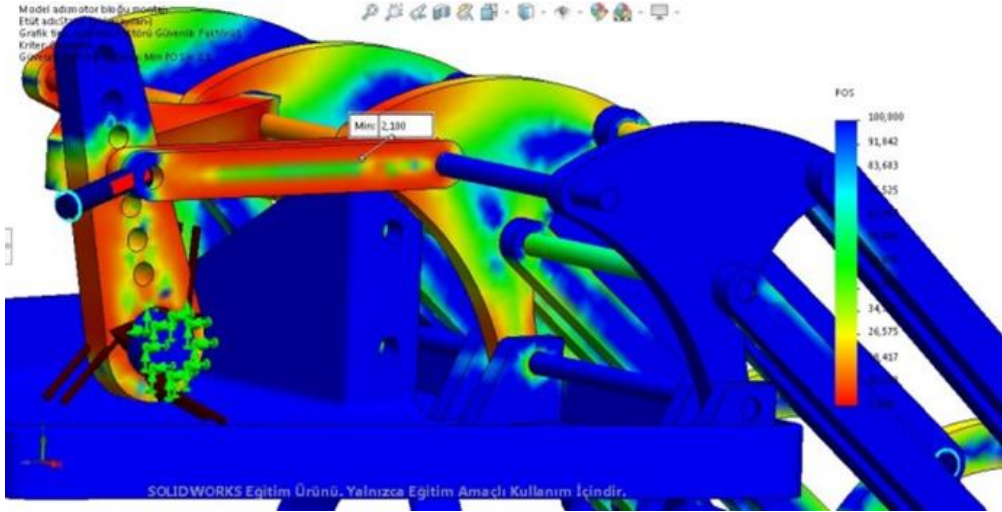
sonuçlarına göre minimum FOS (emniyet katsayısı değeri) 2,1 olarak taşıyıcı parçada bulunmuştur (Şekil 17, 18).



Şekil 16. Statik analiz Von Mises Gerilmesi



Şekil 17. Statik analizi güvenlik faktörü



Şekil 18. Statik analizi güvenlik faktörü detay

Statik analiz sonuçları incelendiğinde özellikle 30mm taşıyıcı parçada yüksek miktarda gerilme oluştuğu görülmektedir. Bu parça PLA malzemeden üretilmiştir (akma gerilmesi yaklaşık 70MPa). Emniyet faktörü 2 olarak seçilmesi durumunda SolidWorks’de yapılan analiz verilerine göre uygulanacak maksimum kuvvet yaklaşık 42N olacaktır, dolayısıyla emniyetli bir şekilde çalışacaktır. Ancak uzun süreli ve tekrarlı yüklerde bu parçanın ince kesitinden dolayı hasara uğraması mümkündür. Bu sorun bu parçanın 3B yazıcı ile kolay bir şekilde çıktı alınması ile çözülebilir.

6. 3B Yazıcı ile Parça İmalatı ve Dış İskeletin Montajı

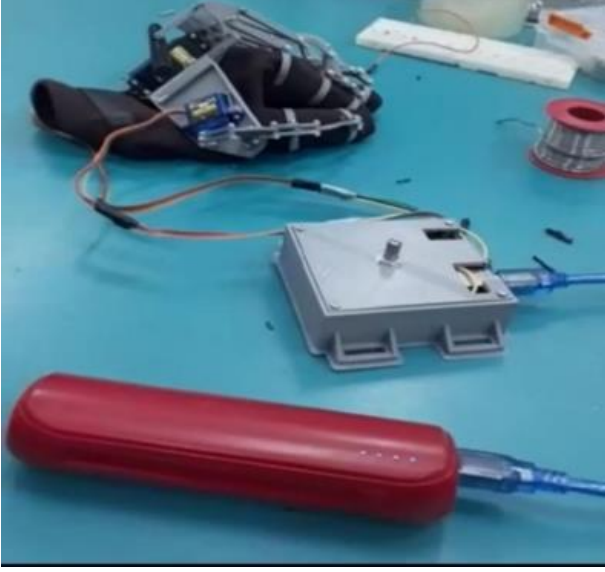
Katı modeli oluşturulan tasarımın 3B yazıcı ile imalatında tüm parçalar için doluluk oranı %100, çizgi aralığı olarak 0.15 mm, baskı sıcaklığı 212 °C, cam tabla sıcaklığı 79 °C ve baskı hızı 20 mm/s baskı parametreleri olarak seçilmiştir.

Katı modeli oluşturulan tasarımda motorlar hareketi sağlamaya uygun konumlara yerleştirilmiştir. Sonrasında elin doğal kapanma hareketinin simülasyonu yapılmıştır. Tam hareket aşağıdaki fotoğraf dizisinde gösterilmektedir.

Şekil 19 ve Şekil 20’de görüldüğü üzere, tasarımın el üzerinde kaymasını önlemek için servo motoru tutan ana şasi parçasının altına silikon parça yerleştirilmiştir. Servo motorlara sinyal gönderen ve gücünü sağlayan Arduino mikroişlemci kartını ve güç kaynağını tasarımın yakınında tutabilmek amacıyla el ateli kullanılmıştır.



Şekil 19. Üretilen prototipin parmaklar tam kapalı ve tam açık görüntüleri



Şekil 20. Prototip dış iskelet elin elektriksel bağlantıları

Kullanışlı bir tasarım olması için konstrüksiyon eldiveni ile tasarlanan dış iskelet el ile kullanacak olan kişinin eldiveni kolayca eline geçirip hızlı bir şekilde kullanabilmesi amaçlanmıştır. Bağlantı elemanları olarak cıvata kullanılmıştır. Cıvata kullanılarak eklemler arasındaki hareket iletimi ve sürtünmeden kaynaklanan olumsuz etkenlerin azaltılması hedeflenmiştir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada, doğal kapanma hareketi katı modelleme programı kullanılarak ile oluşturulan mekanizmalar kullanılarak dış iskelet el tasarımı gerçekleştirilmiş, elin doğal kapanma hareketi incelenmiştir. Tasarlanan prototipin, gerçek ele olabildiğince yakın bir hareketi olması gerektiğinden bu önemli bir noktadır. Kullanılan malzemeler ve üretim süreci sayesinde hafif bir dış iskelet el üretilmiştir. Pasif hareketi gerçekleştirmek için servo motorlar, katı modelde hareket analizi ile belirlenen yerlere montajlanmıştır. Her parmakta hareket analizi yapılmış, piyasadaki hafif ve boyut kısıtına uygun güçlü servolar kullanılarak sistemin fonksiyonel hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Tasarlanan mekanik sistemin prototipinin üretilmesi için 3B yazıcıda baskı alınırken mümkün olan en kısa üretim süresinde, en iyi mukavemet elde edilmeye çalışılmıştır. Model PLA malzeme kullanılarak basılmıştır. İşlem, tek bir adımda, tüm modeli bir adımda üretmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Yazım işlemi, toplamda bütün tasarım elemanlarıyla birlikte 30 saat sürmüştür. Baskı %100 doluluk oranıyla yapılmıştır. Yüzey kalitesi ve

mukavemet açısından en uygun baskı parametreleri seçilmeye çalışılmıştır.

Ayrıca kullanıcının kolay kullanımı için el ateli ve eldiven gibi kullanımı kolay ve bu nedenle de daha hızlı bir şekilde el üzerine yerleştirilmesi sağlanan aparatlar konstrüksiyona eklenerek kullanılmıştır.

Küçük ebatlı ve düşük ağırlığa sahip yüksek kapasiteli servo motorlar ve bataryalar kullanılarak sistem hafifletilmiştir. Ayrıca bu ağırlık azaltılmasına önemli bir katkı da 3B yazıcı kullanılarak dış iskelet parçalarının hafif ve mukavemetli PLA malzemeden üretilmesidir. Tüm parçalar eklendiğinde toplam ağırlığı 450g civarında olan çok hafif ve kullanıcı dostu bir dış iskelet sistemi oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

Başaran, P. Ö. Y., & Bölükbaşı, A. T. D. (2009). İnme sonrası hemiplejik el fonksiyonlarının geliştirilmesinde ayna karşısında nöromusküler elektrik stimülasyonunun etkisi (Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Anabilim Dalı).

Beydoğan, A., & Öneş, K. (2008). Serebrovasküler Olay Geçiren Hastalarda Volar Statik El-El Bileği Ortez Kullanımının Etkinliği. Uzmanlık tezi, İstanbul.

Bouzit, M., Popescu, G., Burdea, G., Boian, R. (2002, March). The Rutgers Master II-ND force feedback glove. In Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002 (pp. 145-152).

Brokaw, E. B., Black, I., Holley, R. J., & Lum, P. S. (2011). Hand Spring Operated Movement Enhancer (HandSOME): a portable, passive hand exoskeleton for stroke rehabilitation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 19(4), 391-399.

Heller, A., Wade, D. T., Wood, V. A., Sunderland, A., Hewer, R. L., & Ward, E. (1987). Arm function after stroke: measurement and recovery over the first three months. Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry, 50(6), 714-719.

Heo, P., Gu, G. M., Lee, S. J., Rhee, K., & Kim, J. (2012). Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(5), 807-824.

- Iqbal, J., Khan, H., Tsagarakis, N. G., Caldwell, D. G. (2014). A novel exoskeleton robotic system for hand rehabilitation—conceptualization to prototyping. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 34(2), 79-89.
- Jo, I., and Bae, J. (2017). Design and control of a wearable and force-controllable hand exoskeleton system. *Mechatronics*, 41, 90-101.
- Ma, Z., Ben-Tzvi, P. (2015). Design and optimization of a five-finger haptic glove mechanism. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7 (4), 041008 (8 pages), 10.1115/1.4029437
- Marconi, D., Baldoni, A., McKinney, Z., Cempini, M., Crea, S., & Vitiello, N. (2019). A novel hand exoskeleton with series elastic actuation for modulated torque transfer. *Mechatronics*, 61, 69-82.
- Park, Y., Jo, I., Lee, J., Bae J. (2018). A dual-cable hand exoskeleton system for virtual reality. *Mechatronics*, 49, 177-186, 10.1016/j.mechatronics.2017.12.008
- Polygerinos, P., Galloway, K. C., Savage, E., Herman, M., O'Donnell, K., Walsh, C. J. (2015, May). Soft robotic glove for hand rehabilitation and task specific training. In 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 2913-2919). IEEE.
- Sandoval-Gonzalez, O., Jacinto-Villegas, J., Herrera-Aguilar, I., Portillo-Rodriguez, O., Tripicchio, P., Hernandez-Ramos, M., Flores-Cuautle, A., Avizzano, C. (2016). Design and development of a hand exoskeleton robot for active and passive rehabilitation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(2), 66.
- Sarakoglou, I., Brygo, A., Mazzanti, D., Hernandez, N. G., Caldwell, D. G., Tsagarakis, N. G. (2016, October). HEXOTRAC: A highly under-actuated hand exoskeleton for finger tracking and force feedback. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 1033-1040). IEEE.
- Son, B., and Park, J. (2018, October). Haptic feedback to the palm and fingers for improved tactile perception of large objects. In Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (pp. 757-763).
- Stilli, A., Cremonesi, A., Bianchi, M., Ridolfi, A., Gerii, F., Vannetti, F., Wurdemann, H.A., Allotta, B., Althoefer, K. (2018). AirExGlove—a novel pneumatic exoskeleton glove for adaptive hand rehabilitation in post-stroke patients, 2018 IEEE international conference on soft robotics (RoboSoft). 579–584. 10.1109/ROBOSOFT.2018.8405388.
- Taub, E., Uswatte, G., & Elbert, T. (2002). New treatments in neurorehabilitation founded on basic research. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 228-236.
- Thompson-Bean, E., Steiner, O., McDaid, A. (2015). A soft robotic exoskeleton utilizing granular jamming. 2015 IEEE International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 165–170. 10.1109/AIM.2015.7222526.
- Turner, M.L., Gomez, D.H., Tremblay, M.R., Cutkosky, M.R. (1998). Preliminary tests of an arm-grounded haptic feedback device in telemanipulation. *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division DSC*, 64, 145-149.
- Yap, H. K., Lim, J. H., Nasrallah, F., Goh, J. C., Yeow, R. C. (2015, May). A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness. In 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 4967-4972). IEEE.
- Tsiftsis, K., and Choriantopoulos, A. (2009). Data mining techniques in CRM: *Inside Customer Segmentation*. John Wiley & Sons, Ltd.

İLERİ MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARI VE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ

Değiştirilmiş Kriter Ağırlıklarına Dayanan Yeni Bir Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi

Ercan ŞENYİĞİT*¹, Nuri YURTGÜLÜ²

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38030, Türkiye

²Konya Büyükşehir Belediyesi, Konya, 42000, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 21.03.2022, Kabul Tarihi: 09.06.2022

Özet

Literatürde var olan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kriter ağırlıklarını belirlerken kabul ettikleri varsayımlar gereği kriterlerin gerçek ağırlıklarını yansıtamayabilirler. Bu durum kriter ağırlıkları arasındaki değişkenliğin artmasına neden olarak kriter ağırlıkları doğru belirlenemediği için belirlenen alternatif en iyi alternatif olamayabilir. Bunun önüne geçebilmek için belirlenmiş olan kriter ağırlıklarının değiştirilmesine ihtiyaç duyulur. MOPA yöntemi değiştirilmiş kriter ağırlıklarını dikkate alan ilk çalışmadır. Bu kapsamda MOPA yönteminin performansı değişkenliğinin azalması ile değerlendirilmektedir. Bu çalışmada Değiştirilmiş Çok Amaçlı Performans Analizi (D-ÇAPA) yöntemi olarak adlandırılan yeni bir ÇKKV yöntemi sunulmuştur. Literatür araştırması sonucu belirlenen 15 farklı veri setleri kullanılarak MOPA ve D-ÇAPA yöntemleri birbirleriyle değişim katsayı (DK) değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu D-ÇAPA yöntemi 15 veri setinin 12'sinde daha az DK ile çözüm elde ederken, 2 veri setinde aynı DK çözümü elde etmiş, MOPA yöntemi sadece 1 veri setinde daha az DK ile çözüm bulmuştur. Karşılaştırmada dikkate alınan 15 veri setinin orijinal kriter ağırlıkları arasındaki ortalama DK değeri %61,32 iken MOPA yöntemi % 8,3 ortalama DK değeri ile çözüm üretirken D-ÇAPA yöntemi ise % 5,94 ortalama DK değeri ile çözüm üretmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok kriterli karar verme, Değiştirilmiş kriter ağırlığı, MOPA, D-ÇAPA.

A New Multi-Criteria Decision Making Method Based on Modified Criteria Weights

Abstract

Multi-criteria decision making (MCDM) methods available in the literature may not reflect the actual weights of the criteria due to the assumptions they accept while determining the weights of the criteria. This situation causes the variability between the criterion weights to increase and the alternative determined may not be the best alternative since the criterion weights cannot be determined correctly. In order to prevent this, it is necessary to change the weights of the determined criteria. The MOPA method is the first study to consider modified criterion weights. In this context, the performance of the MOPA method is evaluated by the decrease in its variability. In this study, a new MCDM method called Modified Multi-Objective Performance Analysis (D-ÇAPA) method is presented. Using 15 different data sets determined as a result of the literature research, MOPA and (D-ÇAPA) methods were compared with each other on coefficient of variation (CV) values. As a result of the comparison, while the (D-ÇAPA) method obtained a solution with less CV in 12 of 15 data sets, it obtained the same DC solution in 2 data sets, and the MOPA method found a solution with less CV in only 1 data set. While the average CV value between the original criterion weights of the 15 data sets considered in the comparison was 61.32%, the MOPA method produced a solution with an average CV value of 8.3%, while the D-ÇAPA method produced a solution with an average CV value of 5.94%.

Keywords: Multi-criteria decision making, Modified criterion weight, MOPA, D-ÇAPA.

*Sorumlu yazar senyigit@erciyes.edu.tr, 2yurtgulu.nuri@gmail.com

1. GİRİŞ

Endüstriyel ortamda yöneticiler, stratejik kararlar verirken her zaman doğru bir karar destek yardımı ararlar. Bu ihtiyaçtan çok kriterli karar verme yöntemleri doğmuştur. Ancak bu yöntemler uygulanırken kriter ağırlıklarının doğru belirlemek çok önemlidir. Genellikle kriter ağırlıklandırma uzmanın ya da uzmanların konuyla ilgili kendi görüşleri ile ikili karşılaştırmalar yapılarak kriter ağırlıkları belirlenmektedir. Eğer birden fazla uzmanın değerlendirilmesi ile oluşturulmuş ise daha karışık ve birbirleriyle çelişen durumlar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla kriterleri doğru bir şekilde değerlendirmek zor bir işidir.

Ayrıca, literatürdeki çok kriterli karar verme yöntemlerinden birçoğu kriter ağırlıklarının olmasına bağlıdır. Kriter ağırlıklarını belirlemek, ÇKKV yöntemlerinin birçoğunda hala problemdir. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Analitik Ağ Süreci (ANP), ENTROPI gibi yöntemler kriter ağırlıklarını belirlemek için kullanılmaktadır.

Kriter ağırlıkları nihai sonuca doğrudan etki etmektedir. Dolayısıyla doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Yukarıda bahsedildiği gibi kriter ağırlıkları değerlendirme aşamasında hata payı içermektedir. Bu hata paylarını azaltmak gerekmektedir. Bunun için kriter ağırlıklarının değiştirilmesi lazımdır. Araştırmanın amacı, literatürdeki çok kriterli karar verme yöntemlerinde karar verici uzmanlar tarafından kriter ağırlıklarının belirlenmesinde meydana gelen insani hataların etkilerini azaltacak çok kriterli karar verme yöntemi kullanmaktır. Kişinin öznel değerlendirmesinden kaynaklanan hatalar olarak ifade edilen insani hataların engellenmesi tutarlı sonuçlar elde etmek için gereklidir.

Bu makale çalışmasında birinci bölümde, literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. İkinci bölümde, MOPA yöntemi tüm adımlarıyla anlatılmıştır. Ayrıca çalışmada önerilen D-ÇAPA yöntemi sunulmuştur. Sonuçların analizinde ve karşılaştırılmasında kullandığımız değişim katsayısı, aralık katsayısı ve standart sapma performans istatistikleri de bu bölümde açıklanmıştır. Son bölümde ise literatürden belirlenmiş olan 15 farklı veri üzerinden MOPA ve D-ÇAPA yöntemleri karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Karar verme insanın hayatı boyunca yapmak zorunda kaldığı bir faaliyettir. Kişisel faaliyetler kadar kurum ve kuruluşlar çalışmalarında çok kriterli ve çok alternatifli karar süreçlerinde bu uygulamayı yapmak durumundalardır. Kriter çoğaldıkça sezgisel ifadelerin yanında matematiksel analizlere de ihtiyaç duyulmuştur. Matematiksel ve rasyonel analizler ile stratejik düzeyde karar verme yapılabilmektedir. Çok kriterli karar verme bu ihtiyaç neticesinde ortaya çıkmış ve analitik sonuçlar sunan yön temler sunmuştur. Uluslararası çok kriterli karar verme derneği çok kriterli karar vermeyi “çoklu ve aykırı kriterlerin dâhil olabildiği karar verme süreçleri yöntem ve işlemleri çalışmaları” olarak tanımlar (Şenyiğit ve Ünal, 2019). Çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemlere çok kriterli karar verme yöntemleri denilmektedir.

Literatürde çok sayıda çok kriterli karar verme tekniği bulunmaktadır. Fakat bu yöntemler, uzmanların değerlendirdikleri ağırlıkların olası hatalarını ihmal etmektedir. Olası hatalar öznel değerlendirme de kriterlerin yanlış değerlendirilebilme durumudur ve kaçınılmazdır. Azaltılması gerekmektedir. Bundan dolayı bu hatayı büyük ölçüde azaltacak bir metodolojiye ihtiyaç vardır. Bu açığı hafifletmek için yeni karar verme yaklaşımı Çok Amaçlı Performans Analizi (MOPA) önerilmiştir (Dey ve ark., 2016). Orijinal kriterler arasındaki değişkenliğe göre daha düşük değişkenlikle yeni kriter ağırlıklarının belirlenmesi felsefesi MOPA yönteminin temelini oluşturmaktadır. MOPA yönteminde, ağırlıkların doğrudan kullanımının doğusunda var olan hataların etkilerini azaltmak için kriterlerin ağırlıklarını değiştiren yenilikçi bir değiştirilmiş ağırlık konsepti kullanılmaktadır. Değiştirilmiş ağırlık ve normalize edilmiş performans derecesi, değiştirilmiş ağırlıklı performansı hesaplamak için entegre edilmiştir. Alternatiflerin tüm değiştirilmiş ağırlık performansları, alternatifin nihai seçim endeksi olarak düşünülen fayda maliyet oranını değerlendirmek için belirlenmiştir (Şenyiğit ve Ünal, 2019).

Literatürde MOPA yönteminin kullanıldığı bir diğer çalışmada tedarik seçimi problemi dikkate alınmıştır. Çalışmada tedarikçilerin teknik özelliklerinin önem dereceleri kalite evi matrisi ile belirlenmiş ve teknik özelliklerin her biriyle hedef değer sapmasının performans derecesini belirlemek için Taguchi kayıp fonksiyonu kullanılmıştır (Zanjirani, Zolfani ve Prentkovskis, 2019). MOPA yönteminin dikkate alındığı bir diğer çalışmada askeri amaçlı trenlerde kuplör merkezleme pimi tasarımında en iyi malzemenin seçimi

problemine odaklanılmıştır. Çalışmada SWARA, BEST WORST, CRITIC, DEMATEL, AHP ve ENTROPI kriter ağırlıklandırma yöntemleri ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş daha sonra belirlenmiş olan bu kriter ağırlıkları kullanılarak CRITIC ve MOPA yöntemleri ile en iyi alternatifler belirlenerek karşılaştırılmıştır (Şenyiğit ve ark., 2020). Özdağoğlu vd. (2021) çalışmalarında motorsiklet seçimi üzerine yoğunlaşmışlardır. MOPA yöntemine alternatif yeni bir yöntem Değiştirilmiş Çok Amaçlı Performans Analizi yöntemi (D-ÇAPA) literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmada değişkenlik performans göstergesine göre MOPA ve D-ÇAPA yöntemleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada D-ÇAPA yönteminin MOPA yöntemine göre daha az değişkenlikle performans gösterdiği belirlenmiştir (Şenyiğit ve Yurtgülü, 2022; Yurtgülü, 2022).

3. ANALİZ METODU

Bu çalışmada MOPA ve D-ÇAPA yöntemleri dikkate alınmıştır. Çalışmanın bu bölümünde yöntemlerin adımları aşağıda gösterilmiştir. MOPA ve D-ÇAPA yöntemleri sadece 3. Adımda farklılık göstermektedir. Diğer adımlar aynıdır. Şekil 1'de MOPA yönteminin iş akışı şekil ile gösterilmiştir. MOPA yönteminin adımlarının daha detaylı anlatımı Yurtgülü (2022) çalışmasında verilmiştir.

MOPA ve D-ÇAPA yöntemlerinin adımları:

Adım-1: Karar verici veya vericilerin belirlenmesi

Adım-2: Dikkate alınan problem için kriter ve alternatiflerin belirlenerek karar matrisinin oluşturulması

Adım-3: Başlangıç kriter ağırlıklarının değiştirilmesi

Adım-4: Değiştirilmiş kriter ağırlıklarının performansının belirlenmesi

Adım-5: Fayda ve Maliyet değiştirilmiş kriter ağırlıklarının performansının ayrı ayrı toplanması

Adım-6: Her bir alternatif için performans göstergesinin hesaplanması

Adım-7: Bir önceki adımda hesaplanmış olan alternatiflerin performans göstergelerinin büyükten küçüğe doğru sıralanması

Adım-8: En yüksek performans göstergesine sahip olan alternatifin belirlenmesi.

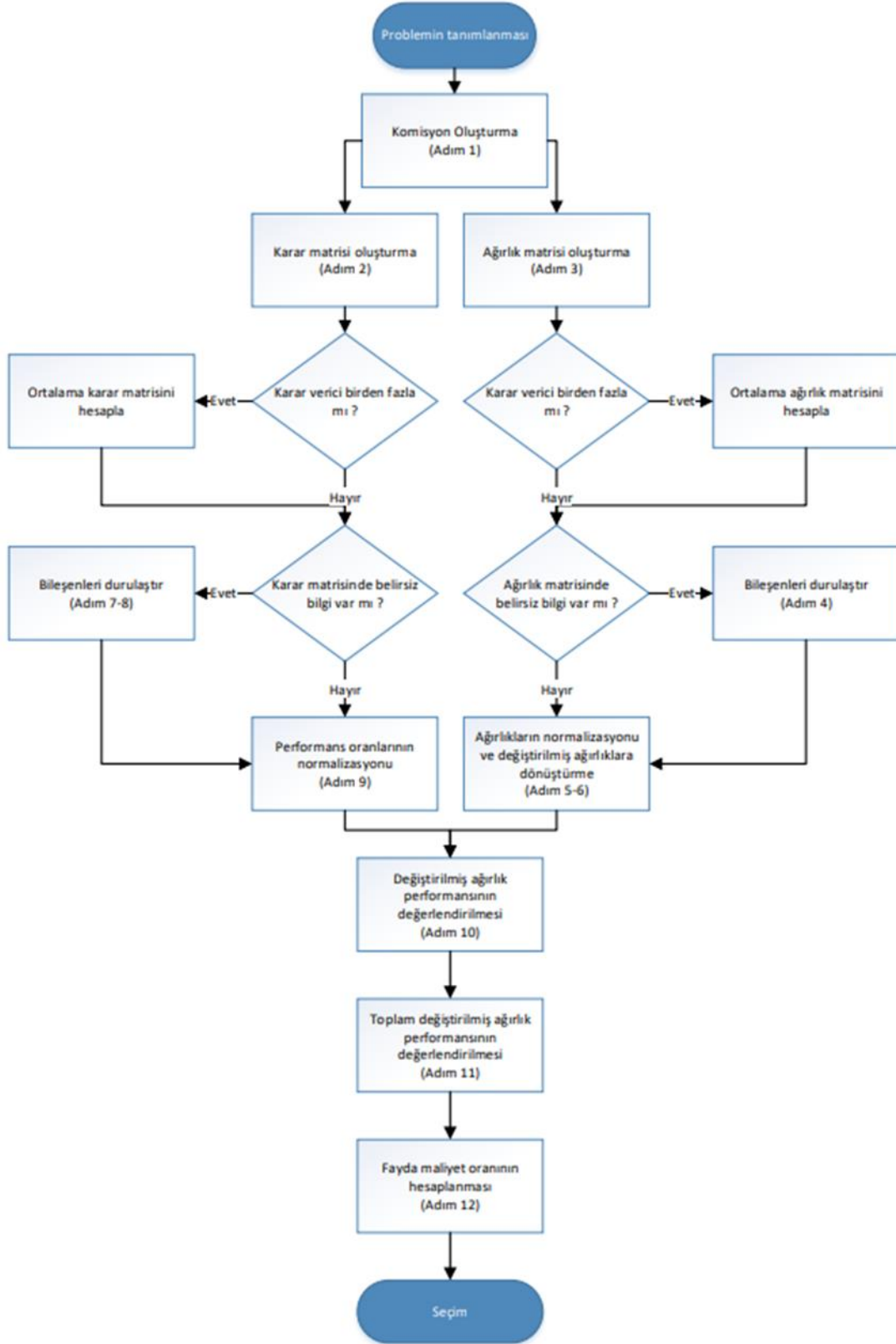
Şenyiğit ve Yurtgülü yapmış oldukları araştırmalarda kriter ağırlıklarının değiştirilmesinin yöntem performansını etkilediğini belirlemişlerdir. Dey ve ark. Çalışmalarında 1 nolu denklemi kullanarak kriter ağırlıklarını değiştirmektedirler. 1 nolu denklemde negatif üs kullanılırken Şenyiğit ve Yurtgülü pozitif üs kullanılmasını önererek D-ÇAPA yöntemini sunmuşlardır.

$$w_j^m = (1 - w_j^N)^{-w_j^N} \quad (1)$$

$$w_j^m = (1 - w_j^N)^{w_j^N} \quad (2)$$

Çalışmada yöntemler arasındaki performansı gösteren temel istatistik değişim katsayısıdır (DK) (Şenyiğit ve Yurtgülü, 2022; Yurtgülü, 2022).

$$DK = \frac{S}{\bar{x}} \quad (3)$$



Şekil 1. MOPA yöntemi iş akışı algoritmasının gösterilmesi

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

MOPA ve D-ÇAPA yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmak için literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırma sonucu 15 farklı veri seti belirlenmiştir. Bu veri setlerine MOPA ve D-ÇAPA yöntemleri ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Veri setlerinin DK değerlerinin gösterilmesi

Veri Seti	Orjinal	MOPA	D-ÇAPA	Değişim
1	68,79	9,84	8,77	Azalma
2	51,35	3,85	3,74	Azalma
3	71,19	5,93	5,70	Azalma
4	81,58	3,27	3,15	Azalma
5	44,90	2,28	2,24	Azalma
6	52,54	5,66	5,47	Azalma
7	44,72	7,50	7,23	Azalma
8	35,34	5,21	5,25	<i>Artma</i>
9	32,77	1,55	1,54	Azalma
10	33,84	0,71	0,71	<i>Aynı</i>
11	19,21	0,87	0,87	<i>Aynı</i>
12	52,54	5,66	5,47	Azalma
13	200,39	56,68	24,82	Azalma
14	63,25	8,00	7,49	Azalma
15	67,36	7,50	6,66	Azalma
Ortalama	61,32	8,30	5,94	

Bu tabloda orijinal sütünü ile veri setlerinin orijinal kriter ağırlıklarının değişim katsayı değerleri gösterilmiştir. MOPA sütünü ile MOPA yöntemi ile elde edilen değiştirilmiş kriter ağırlıklarının değişim katsayıları gösterilmiştir. Benzer şekilde D-ÇAPA sütünü ile D-ÇAPA yöntemi ile elde edilen değiştirilmiş kriter ağırlıklarının değişim katsayıları gösterilmiştir. Değişim sütünü ile MOPA yöntemine göre D-ÇAPA yöntemi ile elde edilen değişim gösterilmiştir. 15 veri setinin orijinal

kriter ağırlıklarının değişim katsayıları incelendiğinde en düşük kriter ağırlığının değişim katsayısının 11 nolu veri setinde yer alan 19,21 değişim katsayısı olduğu, en yüksek değişim katsayısının ise 13 nolu veri setinde yer alan 200,39 değişim katsayısı, orijinal ortalama değişim katsayısının ise 61,32 olduğu belirlenmiştir. MOPA yönteminin uygulanması ile veri setlerinin ortalama değişim katsayısı değeri 8,3’e düştüğü belirlenmiştir. En düşük değişim katsayısı değeri 10 nolu veri setinde (0,71)

ve en yüksek değişim katsayısı ise 13 nolu veri setinde (56,68) tespit edilmiştir. D-ÇAPA yönteminin uygulanması ile ortalama değişim katsayısı değeri 5,94'e düşmüştür. MOPA yöntemine benzer şekilde en düşük değişim katsayısı değeri 10 nolu veri setinde (0,71) ve en yüksek değişim katsayısı ise 13 nolu veri setinde (24,82) tespit edilmiştir. D-ÇAPA yöntemi dikkate alınan 15 veri setinin 12'sinde MOPA yöntemine göre daha düşük değişim katsayısı ile sonuç bulurken, 2 veri setinde (10 ve 11 nolu veri setleri) aynı sonuçları bulmuşlardır. Sadece 1 veri setinde ise D-ÇAPA yöntemi daha yüksek değişim katsayısı (8 nolu veri seti) ile sonuç bulmuştur. Genel olarak D-ÇAPA yöntemi MOPA yöntemine göre ortalama %28 daha az değişkenlikle veri setlerinde çözüm bulmuştur. D-ÇAPA yöntemi orijinal kriter ağırlıklarına göre ise ortalama %90 daha az değişkenlikle veri setlerinde çözüm bulmuştur. Sonuç olarak performans göstergesi olan değişim katsayısı istatistiğine göre D-ÇAPA yöntemi MOPA yöntemine göre daha iyi performans göstermiştir (Şenyiğit ve Yurtgülü, 2022; Yurtgülü, 2022).

Bu çalışma ile literatüre D-ÇAPA çok kriterli karar verme yöntemi kazandırılmıştır. İleriki çalışmalarda D-ÇAPA yönteminin performansını test amacıyla daha çok sayıda veri setine uygulanması planlanmaktadır. Ayrıca D-ÇAPA çok kriterli karar verme yönteminin kullanıldığı örnek çalışmaların yapılması planlanmaktadır. Çok kriterli karar verme literatüründe kriter ağırlığı değiştirme konusu ile ilgili yeni çalışmaların yapılması planlanmaktadır. Çok kriterli karar verme literatüründe kriter ağırlığı değiştirme konusu ile ilgili yeni çok kriterli karar verme yöntemlerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Dey, B., Bairagi, B., Sarkar, B., ve Sanyal S. K. (2016). Multi objective performance analysis: A novel multi-criteria decision making approach for a supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 105-124.

Özdağoğlu, A., Keleş, M.K., Altınata, A., Ulutaş, A., 2021. Combining different MCDM methods with the Copeland method: An investigation on motorcycle selection, *Journal of process management and new technologies*, 9(3-4):13-27.

Şenyiğit, E. ve Ünal, Z. (2019). Determination of the best RFID System by BWM-MOPA Method. *European Journal of Science and Technology*, (Özel Sayı), 9-14.







Şenyiğit, E., Yurtgülü, N., Demirel, E., Gökkuş, Ö. (2020). "Askeri Amaçlı Trenlerde Kuplör Merkezleme Pimi Tasarımında En İyi Malzemenin Seçimi". 3.Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumu, Adana, Türkiye, 19 – 20 Haziran 2020, s.1-6.

Şenyiğit, E., Yurtgülü, N., 2021. "Yeni Bir Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi: Değiştirilmiş Çok Amaçlı Performans Analizi ve Örnek Bir Uygulama". 5.Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumu, Malatya, Türkiye, 3 – 5 Aralık 2021, s.683-688.

Yurtgülü, N., 2022. Çok kriterli karar verme yöntemleriyle en iyi tasarımın seçilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi.

Zanjirani, D. M. Hashemkhani Zolfani, S. Prentkovskis, O., 2019. L.A.R.G. supplier selection based on integrating house of quality, Taguchi loss function and M.O.P.A., *Economic Research – Ekonomiska Istraživanja* 32(1): 1944–1964.

Türkiye’de Endüstriyel Su Tüketimi ve Arıtımı

Büşra KAVURUCU¹ , Erdem EKME² , Ömer YAMAN³ , Serkan Yılmaz YAZAN⁴ 
Nergiz KANMAZ*⁵ , Ümit ÜNVER⁶ 

^{1,2,3,4}Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye

⁵Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye

⁶Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye

Derleme Makalesi, Geliş Tarihi: 03.01.2022, Kabul Tarihi: 16.04.2022

Özet

Su kullanımı günümüzde artan endüstriyelleşme ile doğru orantılı olarak artış göstermekte olduğundan sanayide suyun verimli kullanılması adına yapılacak çalışmalar öncelikle su tüketiminin sektörel bazda kullanımının incelenmesini gerekli kılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda sanayide su kullanım oranları %39,3 kimya sektörü, %19,3 tekstil ve %14,5 gıda sektörü olarak belirlenmiştir. Kullanılmış suyun arıtılıp tekrar kullanım alanı bulacağı proseslere sevk edilebilmesi veya arıtıldıktan sonra ekosisteme güvenli bir şekilde deşarj edilmesi su verimliliği konusunun kapsamına girmektedir. Çalışma kapsamında, sanayide kullanılan su arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi ve arıtılan suyun m³ başına düşen enerji maliyetinin azaltılması üzerine literatüre kazandırılmış çalışmalar derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Su verimliliği, Atık su arıtma, Endüstriyel su.

Industrial Water Consumption and Treatment in Turkey

Abstract

Since the use of water is increasing in direct proportion with the increasing industrialization, the studies to be carried out for the efficient use of water in the industry make it necessary to examine the use of water consumption on a sectoral basis. As a result of the studies, the water usage rates in the industry were determined as 39.3% in the chemical sector, 19.3% in the textile and 14.5% in the food sector. The subject of water efficiency includes the transfer of used water to processes where it will be treated and reused, or its safe discharge to the ecosystem after treatment. Within the scope of the study, studies that have been brought to the literature on the development of water treatment technologies used in the industry and the reduction of the energy cost per m³ of treated water have been compiled.

Keywords: Water efficiency, Wastewater treatment, Industrial water.

*Sorumlu yazar nergizkanmaz@gmail.com, ¹kavurucubusra@gmail.com, ²ekmn.erdm@gmail.com, ³omeryamanzz@gmail.com, ⁴seryilyaz@gmail.com, ⁶umitunver@gmail.com

1. GİRİŞ

Geçen yüzyılda, su yönetimi araştırmaları ile yasal, çevresel, ekonomik ve sosyal konulardan bağımsız şekilde, birçok hükümet tarafından, bakanlıklar aracılığıyla, su bir insan hakkı olarak, kanun kapsamında tanınmıştır (Wingfield, Martínez-Moscato, Quiroga, & Ochoa-Herrera, 2021). Artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji ile birlikte su kullanımı da artış göstermektedir. Su kaynakları, bir ülkenin veya bölgenin ekonomik kalkınması için gereklidir. Ekonomik küreselleşmenin gelişimi ve küresel nüfustaki sürekli artışın ortasında, su kıtlığı çeşitli ülkelerde sosyoekonomik kalkınma için bir kısıtlama haline gelmektedir (Chen, Yin, & Liu, 2021). Su yönetiminin verimliliğinin artırılması, suyun doğal döngüsüne uyumlu olacak şekilde sosyal, ekonomik ve ekolojik boyutlarını içeren bütüncül organizasyonun sağlanması, suyun stratejik önemi ile korunması, su kaynaklarının verimli bir şekilde değerlendirilip, projelendirilerek su tesislerinin işletilmesi ve su yönetimindeki tüketici bilincinin artırılması sürdürülebilirlik politikaları açısından önem taşıyan adımlardır (Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2018).

Türkiye’de de su tüketimi, nüfus artışı, kentleşme ve endüstrileşmeye bağlı olarak artmaktadır. Bu eğilimler yenilenebilir su kaynaklarının miktarının ve kalitesinin azalmasına neden olmaktadır. Ülkelerin su politikaları, su potansiyeli ve yağış rejimiyle ilgilidir. Sahip olduğu coğrafi çeşitlilikler sebebi ile Türkiye, farklı özellikteki iklim tipleri ve yağış rejimlerine sahiptir. Bu da Türkiye’nin su politikasına yön veren ana bileşenlerdendir ve yarı kurak iklim bölgesinde yer almasından dolayı, iyileştirilmiş su kalitesi, kullanılabilir su miktarının artırılmasının yanında koruma ve kullanma dengesinin sürdürülebilirliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Su stresi, tatlı su kaynaklarından sağlanan içme ve kullanma suyunun seviyesini belirten bir terimdir. Kişi başına 1600 m³/yıl su kullanım potansiyeli ile Türkiye, su stresi yaşayan ülkeler arasında bulunmaktadır (Özlem Durmuş, 2013).

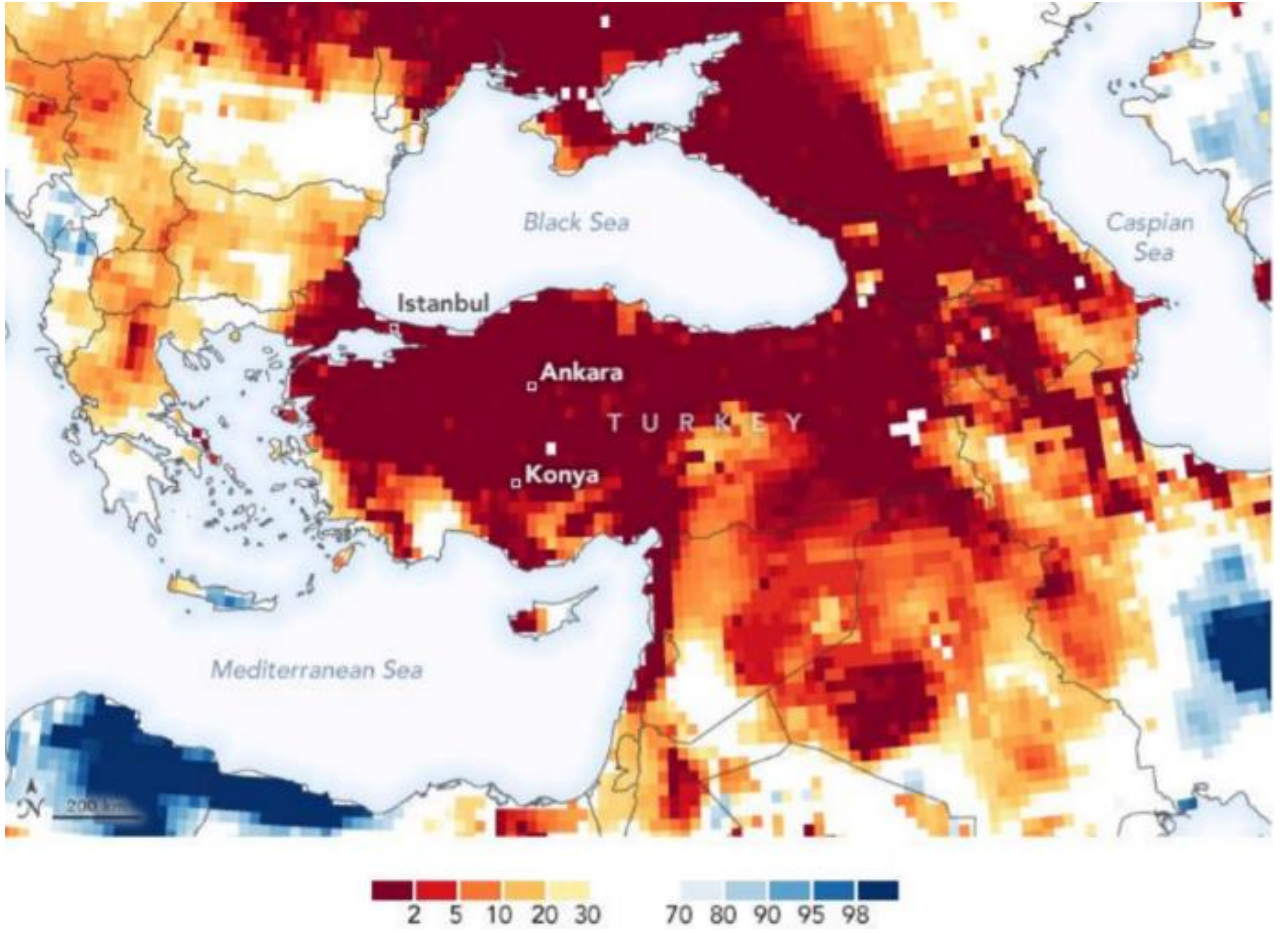
Türkiye’nin yeraltı su kaynakları ile ilgili durumu NASA’ya (Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi) ait GRACE-FO uyduları tarafından 2020 yılında kaydedilen görüntülerden gözlemlenmektedir. Şekil.1’de, GRACE-FO uydu görüntülerinden temin edilen, Türkiye için sırasıyla yeraltı su kaynaklarına ve topraktaki nem miktarına ilişkin ölçümlere ait haritalar sunulmuştur. Haritalara göre mavi renkliliğin şiddetlendiği bölgeler normalden fazla (%50 üzeri nem) su olan, sarıdan kırmızıya renkliliğin koyulaştığı bölgeler normalden az (%50’nin altında nem) su olan kısımları ifade etmektedir (Patel, 2021). Türkiye haritasındaki kırmızı renkliliğin

baskın olması, yeraltı su kaynaklarımız açısından su stresinin ciddi boyutlarda olduğunu belirtmektedir.

İmalat sanayindeki rekabet gücünün artırılması ve çevresel kirliliklerin azaltılması amacıyla kaynaklarının verimli kullanımı önem arz etmektedir. İmalat sürecindeki kaynak tüketimi ve atık oluşumu minimum seviyede tutularak, temiz çevre üretim prensibinin yaygınlaşması sağlanmalıdır. Her sektör için imalat aşamasındaki kaynak kullanımı farklılıklar gösterebilmektedir ve sınırlı kaynaklardan dolayı sektörel bazda verimlilik uygulamaları yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Su tüketiminde sektör başına düşen su miktarları belirlenerek bu bağlamda çözüm metotları incelenmelidir. Su arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi ve arıtılan suyun m³’ü başına düşen proses maliyetinin azaltılması uygulanacak su arıtma metodu seçilirken göz önünde bulundurulmalıdır. Tarımsal sulamaya ait Devlet Su İşleri (DSİ) verileri, diğer su tüketimleri için Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerinden yararlanılarak Türkiye’de 2018 yılından itibaren kullanılan suyun %71,5’i tarımsal sulamada, %17,8’i sanayide, %10,7’si içme ve kullanma suyu olarak tüketilmiştir (Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, 2020).

Sanayide suyun verimli kullanımı ile ilgili yeterli kaynak bulunamaması verimlilik çalışmalarının da izlenebilirliğini etkilemektedir. Bu derlemede, Türkiye’de sanayi alanında su temini ve atık su arıtma ihtiyacının belirlenmesi, atık suyun geri kazanılmasına yönelik tesislerin planlanmasında takip edilecek adımların belirlenmesi, mühendislik açısından alternatiflerin değerlendirilmesi ve maliyet analizi konusunda yeterli seviyeye gelinmesi adımları incelenmiş ve mevcut veriler derlenerek sunulmuştur.



Şekil 1. Türkiye için yeraltı su kaynakları haritası (Patel, 2021)

2. Türkiye’de Su ve Atık Su Üretimi

Atık su oluşumu incelemelerinde ilk adım olarak yüzey sularının potansiyel kalite değerleri göz önünde bulundurulmalıdır. Yüzey suyu kaynakları ise literatürde 4 farklı kalitede sınıflandırılmıştır (Nayan, Hashim, Saleh, Mahat, & See, 2018):

1.sınıf su kaynakları: İçme suyu olma potansiyeli yüksek olan, rekreasyonel amaçlar ve alabalık üretimi için uygun olan yüzeysel sularıdır.

2.sınıf su kaynakları: İçme suyu temini için iyi bir kaynak olarak nitelendirilmekte ve 20.3.2010 tarih ve 27527 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği”, 7. Bölüm, Madde 22 Ek 7’de artırılmış atık suların sulama suyu olarak kullanımına ilişkin sınıflandırılması verilen sulama suyu kriterlerini sağlaması koşulu ile sulama suyu olarak kullanılabilir.

3.sınıf su kaynakları: Orta sınıf suları temsil etmektedir. İçme suyu kalitesini elde etmek için fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma adımlarını içeren tam arıtma prosesleri gereklidir.

4.sınıf su kaynakları: Çok kirlenmiş olarak nitelendirilir ve drenaj kullanımları için uygundur.

2016 yılında yapılan araştırmalara göre Türkiye’de toplam kaynakların %33’lük kısmı en düşük kalite olan 4.sınıf olarak nitelendirilmiştir. Takip eden en yüksek orana sahip kaynak miktarı %21 ile 3.sınıf ve %20 ile 2.sınıf su kaynakları olmuştur. Bu durum Türkiye’de bulunan su kaynaklarının yaklaşık %74 oranında doğrudan kullanım imkânı olmayan sulardan oluştuğunu göstermektedir. 2016 yılında açıklanan 158 yüzey su kaynağı arasından sadece 42 kaynağın doğrudan içme suyu kalitesinde olduğu açıklanmıştır (TMMOB, 2019).

2018’de yapılan incelemelere göre endüstriyel su tüketimi 2,9 milyar m³ olarak gerçekleşmiştir. Tüketilen suların 2,2 milyar m³ soğutma suyu, 489,7 milyon m³ proses suyu, 52,9 milyon m³ kazan suyu ve 87 milyon m³ kadar kullanım suyu olarak tüketilmiştir. Diğer kullanımların miktarı ise 52,6 milyon m³ olarak gerçekleşmiştir. Suların yaklaşık %71,2’si denizlerden, %15,5’i kaynak ve kuyu sularından ve %4,8’i organize sanayi bölgelerine (OSB) ait şebekelerden, %3,6’sı barajlardan, %1,5’i şehir şebekesinden, %1,4’ü

akarsulardan ve %2'si diğer su kaynaklarından çekilmiştir. Atık suların %81,3'ü denizlere, %2,6'sı şehir kanalizasyonlarına, %6,8'i oranında ise akarsulara, aynı oranda OSB kanalizasyonlarına ve %2,5'i diğer alıcı ortama deşarj edilmiştir. Soğutma suları haricinde tüketilen 466 milyon m³ endüstriyel atık suların %54,6'sı artırılmıştır. Endüstriyel atık suların farklı yöntemlerle arıtılmasına karşılık kapasite değerleri Tablo.1'de verilmiştir. Mikrofiltrasyon, nanofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve ters ozmoz gibi ileri arıtma tekniklerinin geleneksel arıtma sistemlere göre daha üstün arıtma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmektedir (TUİK, 2019).

Tarımda ise kısaca su verimliliği açısından, su yönetimi ve suyun sürdürülebilirliği göz önüne alındığında, tüketimi azaltmak için damla sulama ve yağmurlama

sistemleri gibi verimliliği artırılmış çözümlerin uygulamaya geçirilmesi önerilmektedir. Damla sulamada, su tasarrufu ile yüksek verim sağlanırken, yağmurlama sistemlerinde ise suyun araziye yerleştirilen muhafazalı borularla iletilmesi ve belirlenen basınç oranıyla toprağa ulaşması sağlanmaktadır (Ekinci, 2015).

Ülkelerin sahip oldukları su varlığını değerlendirmek ve su kıtlık seviyesini belirlemek için Falkenmark Su Stres Göstergesi ve Shiklomanov Göstergesi en yaygın kullanılan referanslardır. Falkenmark İndisine göre, bir ülkede kişi başına su arzı 1700 m³/yıl'ın üzerinde ise su arzı yeterlidir, 1000-1700 m³/yıl arasında ise su stresi yaşanmaktadır, 1000 m³/yıl'ın altında ise su kıtlığı yaşanmaktadır (Çiçek & Ataol, 2009). Tablo.2'de kişi başına Shiklomanov Göstergesi'ne ait sınıflandırmalar sunulmuştur (Kinaci, 2017).

Tablo 1. Endüstriyel atık su arıtma yöntemlerine göre 2018 kapasite değerleri (TUİK, 2019)

Kapasite / Yöntem	Fiziksel/Kimyasal		
	Arıtma	Biyolojik Arıtma	İleri Arıtma
Aritılan Atık su Miktarı (m ³)	108.422	182.678	41.290
Tesis Sayısı (adet)	1.386	1.323	118
Tesis Kapasiteleri (m ³ /yıl)	223.503	368.568	83.946

Tablo 2. Shiklomanov Göstergesi (Kinaci, 2017)

Sınıflandırma	Su Miktar (m ³ /yıl)
Çok Az	<2.000
Az	2.000-5.000
Orta	5.000-50.000
Yüksek	>50.000

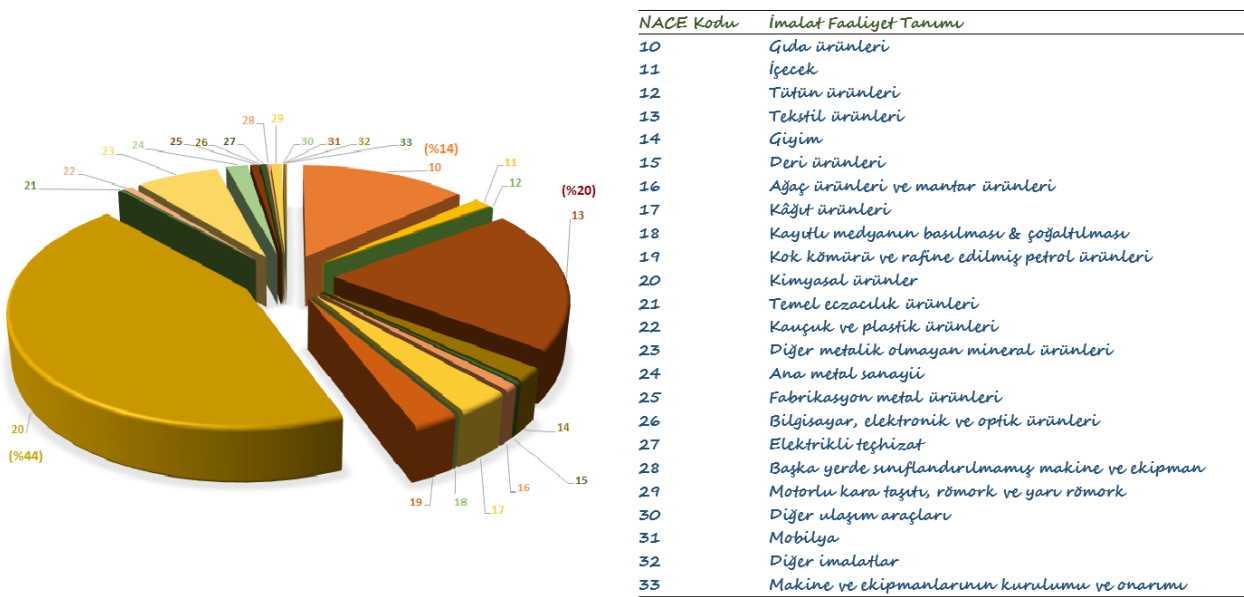
3. Sanayide Su Verimliliği

Türkiye geliştirmekte olan ülkeler seviyesinde olduğu için sanayide kullanılan suyun 2012’de yapılan bir araştırmada %17,2 olmasıyla İspanya’dan sonra geldiği ve 2030 yılında %20’ye ulaşılması beklenmektedir (Eurostat, 2018), Avrupa’daki gelişmiş ülkeler için bu oran %40 civarlarındadır. 1980’ler ve 1990’larda

Avrupa’da su tüketiminin azaltılması için verimli teknolojiler geliştirilmiştir (Çapar & Yetiş, 2018), bu yeni yaklaşımlar ile sulama sistemlerinde kullanılan hortum başlıkları, ayarlanabilir otomatik kapatma sistemleri, az su harcayan spreyley ve ultrasonik temizlik

gibi uygulamalarla suyun sürdürülebilirliği desteklenmektedir (Krinner et al., 1999).

Ülkemizde sanayide proseslerde kullanılan su verileri TÜİK tarafından yayınlanmaktadır. NACE kodlarına göre proseslerde sektörlere göre su tüketimi Şekil.2’de sunulmuştur (BSTB VGM, 2017). Tüketilen proses suyu miktarlarının en yüksek olduğu sektörler; kimyasal ürünlerin imalatı (%44), gıda (%14), tekstil (%20), diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı (%7), kok kömürü ve rafine edilmiş petrol ürünleri (%3), kâğıt ürünleri (%3), giyim eşyaları (%2) ve ana metal sanayii ürünlerinin (%2) imalatıdır.



Şekil 2. NACE kodlarına göre sanayide su tüketimi (BSTB VGM, 2017)

3.1. Ticari/endüstriyel Su Tüketimi

Su kullanımının önemli bir bölümü sanayide gerçekleştiğinden, endüstriyel alanlardaki su tüketiminin hesaplanabilmesi önem arz eder. Endüstriyel tesislerdeki su tüketiminin hesaplanabilmesi için (Kavaklı ve Civan, 2000) tarafından, ortalama su gereksinimini, ton başına üretim için su gereksinimini ve günlük üretimi göz önünde bulunduran denklemler verilmiştir (Kavaklı & Civan, 2000).

3.1.1. Gıda Endüstrisi

Gıda tesislerinin devamlı olarak kullandığı temel maddelerden biri olarak suyun yüksek kalitede kullanılması ve sürekliliği ile ilgili endişe duyulmaktadır. Suyun yeniden kullanımı, gıda

endüstrisi açısından da önemli bir konu haline gelmiştir (Önal & Ötleş, 2015).

Proses suyu, gıda endüstrisinde katkı maddesi, imalatın bir parçası, ürüne doğrudan veya dolaylı teması gibi birçok amaçla kullanılmaktadır. Gıda imalatında, hammadde hazırlık, temizleme, parçalama, pompalama, şekil verme, kaplama gibi birim işlemlerin gelişimi için suyun daha az kullanımı ve suyun yeniden kullanımı gibi stratejilerle su tasarrufu sağlanmaktadır. Gıdada suyun tekrar kullanılabilirliğinde, başta mikrobiyolojik riskler olmak üzere, yasal engeller bulunmaktadır. Tekrar kullanılabilir suyun mikrobiyal kalitesi izlenmelidir. Bu bağlamda, ülkemizde, gıda endüstrisinde Kritik Kontrol Noktaları ve Analizi Yönetim sisteminin (HACCP) uygulanması zorunludur (Notermans, Zwietering, & Mead, 1994). İçme suyu kalitesi izlenmesinde, HACCP ilkelerini 1994’te Havelaar tanımlamıştır ve bu çalışma ile gıda

sanayisinde su tekrar kullanılabilir kalitede elde edilebilmektedir (Havelaar, 1994). İzlenmesi istenen parametrenin belirlenmesi için analitik yöntemler seçilirken sıralanan değerlendirmeler yapılmaktadır (Casani & Knöchel, 2002):

- Sınır parametrelerinin ihtiyaç duyduğu saptama limitleri,
- Doğrulama gerekliliği, kesinlik ve hız durumu,
- Kullanılan ekipmanların ve yöntemlerin uygulanabilir olması,
- Analiz personelinin tecrübeli olması,
- Laboratuvar ve analiz ekipmanlarının maliyeti,

- Prosedürlerin uygulanabilir olması.

Balık sektörü

Balık sektöründeki su verimliliği su tüketim miktarları, işlenen balık türünün çeşidine, işlemin büyüklüğüne ve kullanım proseslerinin tüketimlerine göre hesaplanmaktadır (Santonja, Karlis, Stubdrup, Brinkmann, & Roudier, 2019). Tablo.3'te Türkiye'de bir balık işleme tesisine ait proses adımlarında kullanılan ortalama su miktarları ve atık suda oluşan kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) değerleri verilmiştir. Verilen değerlerden, 1 ton balık temizlemede 3,3-10 m³ aralığında değişebilen miktarlarda su tüketildiği görülmektedir (Alkaya, Böğürücü, Ulutaş, & Demirer, 2010)

Tablo 3. Su tüketimi ve atık su (Alkaya et al., 2010)

Proses	Su tüketimi (m ³ /ton balık)	KOİ (kg/ton balık)
Temizleme	3,3 – 10	95'e kadar
Çözdürme	9,8	-
İşleme	23-32	100-130

Balık temizleme tezgâhlarının altındaki atık su borularındaki su filtrelendikten sonra pompa ile çökertme tankına gönderilerek içerisindeki hafif ve ağır maddeler ayrışmaktadır. Ağır maddeler atılırken, hafif maddeler tank yüzeyinden deşarj edilir ve bir sonraki tankta ozonlama yöntemi ile dezenfeksiyon yapılarak kan rengi giderilir. Bir pompa kullanılarak temizleme alanına temizleme suyu geri kazandırılır. Bu kapsamda yıllık %36-41 oranlarında tasarruf edilebilmektedir (Jespersen, Christiansen, & Hummellose, 2000). Bir başka yöntem olarak basınçlı uygulama yöntemi ile su kullanımında yaklaşık %40 oranında azalma sağlanabilir. Benzer şekilde, su akış hatlarının otomasyonu ve suyun devridaimi, su kullanım alışkanlıklarının sürekli izlenmesi ve balık temizlemede kuru işlem gibi su optimizasyon tekniklerinin endüstride benimsenmesi de su kullanımındaki verimlilik getirecektir (Murali et al., 2021).

İçecek sektörü

İçecek endüstrisinde en çok tüketim parametresine sahip olan meyve suyu imalatı için EPI (Environment Policy Index) standartları temel alınarak Türkiye'de bulunan bir içecek üretim tesisine ait su tüketim miktarları Tablo.4'te verilmiştir (Alkaya et al., 2010).

Tablo 4. Bir pilot tesise ait içecek üretiminde yıllık su tüketim miktarı (Alkaya et al., 2010)

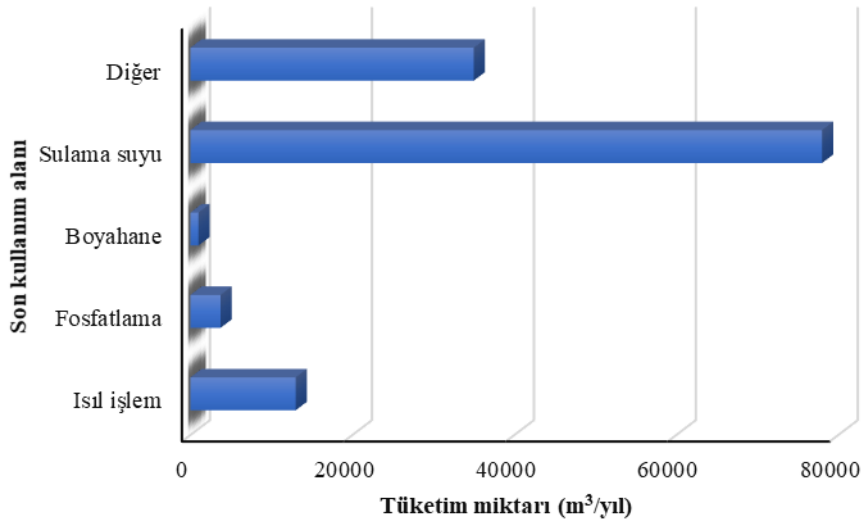
Proses (İçecek üretimi)	Tüketim Miktarı (m ³)
Yıkama	8.600-14.400
Soğutma	317.000-346.000
Proses işlemleri	13.800
Soğutma	138.000-173.000
Ürün içinde	55.000
Toplam	750.000-850.000

Sistemde soğutma suyunun fazla kullanıldığı gözlenmektedir. Çözüm olarak açık halde bulunan soğutma suyunu iki farklı kapalı soğutma suyu sistemiyle değiştirerek su tüketimi azaltılır (Hsine, Benhammou, & Pons, 2005). Verim artırma çalışmaları sonucunda toplam su tüketiminde yıllık %41-47 arasında tasarruf sağlanmaktadır (Alkaya et al., 2010). Son birkaç yılda, IoT (nesnelerin interneti) tabanlı sistemler, gıda dışı imalat sektöründe kaynak verimliliğini artırma konusunda kabul görmektedir ve suyun soğutma kulesi ve kazan için yeniden kullanılması yoluyla yaklaşık %11 oranında su tasarrufu

sağladığını göstermiştir (Jagtap, Skouteris, Choudhari, Rahimifard, & Duong, 2021).

3.1.2 Makine/İmalat Endüstrisi

Bir metal işleme (ısıl işlem)-makine üretimi üzerine faaliyet gösteren firma için üretim prosesleri ve bu proseslere karşılık gelen su tüketimleri Şekil.3'te ifade edilmiştir. Yıllık ısıl işlem için 13.000 m³, fosfatlama için 3.700 m³, boyama işlemleri için 1.000 m³, sulama suyu için 78.000 m³ ve vulkanizasyon, yıkama tezgahı, indüksiyon tezgahı ve dövme banyosu gibi diğer prosesler için 35.000 m³ su tüketimi olduğu ifade edilebilmektedir (Alkaya et al., 2010).



Şekil 3. Bir pilot tesise ait su tüketimi (Alkaya vd., 2010)

Verimlilik çalışmalarıyla birlikte ısıl işlemlerden çıkan soğutma suyu tesise su sağlayan genel havuza gönderilerek tekrar kullanılmaktadır, fosfatlama prosesine özel optimizasyon geliştirilmiştir. Bir pilot tesis için yapılan verimlilik çalışması sonrasında yıllık su tüketiminde %15 tasarruf sağlanması beklendiği ifade edilmiştir.

3.1.3 Kâğıt Endüstrisi

Kâğıt endüstrisi, su kaynaklarının dünya çapında en büyük endüstriyel tüketicilerinden biridir (IFC, 2014). Bir kâğıt fabrikasının ana girdilerinin başında selüloz elyafı, su ve enerji gelmektedir. İmalat sonrasında açığa çıkan atık su miktarı ve atık suyun içerdiği kirlilik miktarı oldukça yüksektir; bu kirlilik büyük ölçüde üretimde kullanılan hammaddelerden, katkı maddelerinden ve imalat yönteminden kaynaklanmaktadır (Özçelep, 2009). Kâğıt üretim prosesi, ilk basamak olan hamur çürütmeden hamur

Bulamaçlarına ve kâğıt üretim makinelerinin yıkanmasına kadar her adımda yüksek miktarlarda atık su ve çamur atığı da üretmektedir. Kâğıt prosesi atık suyunda %80 oranında askıda katı madde, KOİ, ağır metaller, klor içeren organik bileşikler, biyolojik oksijen ihtiyacı, boya ve diğerlerinin yanı sıra bakteriler bulunabilmektedir (Yarar, 2019).

Köken ve Büyükkamacı tarafından, kâğıt endüstrisinde orta kirlilik yüküne sahip atık suyun kimyasal arıtma ve anaerobik biyolojik arıtma işlemlerinin işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Kimyasal arıtmada yer verilen kimyasal madde bileşenlerine bağlı olarak çamur işleme ve bertaraf ünitelerinin maliyetlerinin de arttığı; öte yandan anaerobik arıtma işleminde az miktarda çamur oluşumu, maliyet hesaplamalarında da belirgin fark oluşturmuştur. Aynı debideki kâğıt endüstrisi atık suyu yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör ve klasik aktif çamur sistemi ile arıtıldığında kimyasal arıtma ve klasik aktif çamur sisteminin kullanılmasına

oranla %37,9 daha az işletim maliyeti oluşturmuştur (Köken & Büyükkamaci, 2010).

4. Suyun Analizi

İçme suyu açısından en önemli kaynak yeraltı sularıdır. Bu sebeple suyun verimli kullanılması yapılabilecek en önemli adımlardan biridir. Bu adımı gerçekleştirebilmek adına doğal su korunması sağlanır (Geçer, Şentürk, & Büyüküngör, 2019). Atık suyun bir kirletici olmadığı, yeniden dönüştürülerek kullanılması tavsiye edilmektedir (Polat, 2013). Suyun kirlilik derecesine göre ayrılması ve ayrılan her suyun özelliklerine uygun işlemlerden geçmesi ile tekrar kullanımı sağlanır. Bu şekilde suyun kullanım verimi artırılır (Karahan, 2009).

Su üretim aşamaları şu şekilde listelenebilir.

1. Suyun çıkarılması,
2. Suyun arıtılması,

3. Suyun dağıtımı,

4. Atık suyun toplanması,

5. Atık suyun arıtılması ve uzaklaştırılması (Çalcalı, 2014).

Evsel atık su, DIN EN 1085 Standardına göre, mutfaktan, çamaşır makinesinden, banyodan, tuvaletten ve benzer amaçlı kullanılarak kanalizasyona atılan atık sularıdır. Siyah su, içerisinde tuvalet rezervuarlarından gelen suyun ve fosseptik atıklarını bulunduran suya denir (Kantaroğlu, 2011). Gri su, atık suyun duş, lavabo ve mutfak gibi alanlardan gelen, içerisinde siyah su olmayan sudur (Şekil.4) (Üstün & Tırpancı, 2015). Kullanım suyu, birçok sanayi, endüstriyel, tarımsal amaçlı kullanımı olan, suyun kullanımında içme suyu kalitesinin gerekmediği alanlarda kullanılacak sulardır (Karahan, 2009).

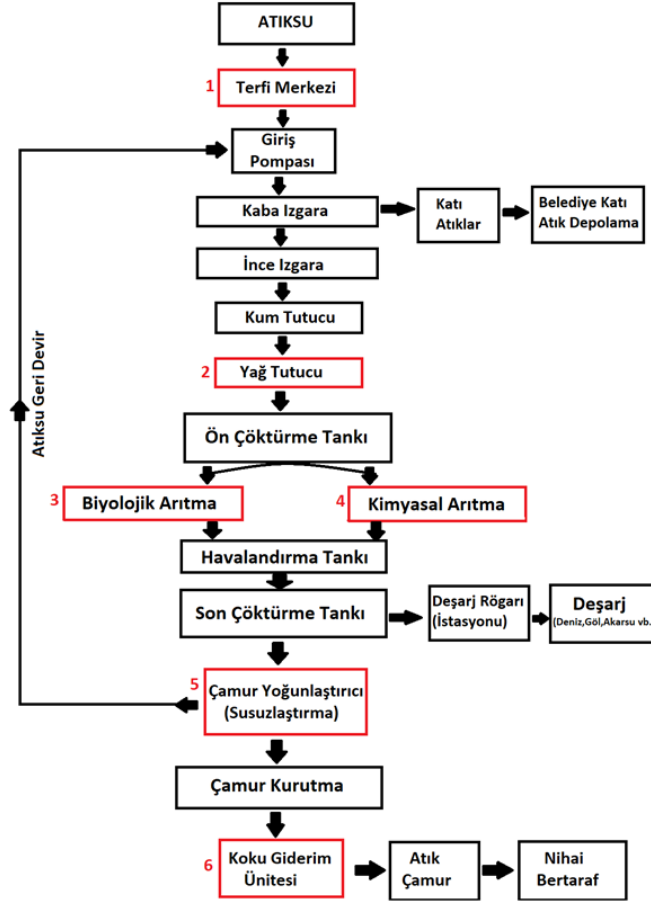


Şekil 4. Temiz su, gri su, siyah su özellikleri

4.1. Atık Su Arıtımı

Atık su arıtımı, fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemler uygulanarak, kirleticilerinden arındırılmış suların tamamının veya bir kısmının doğaya deşarjı ile alıcı ortam şartlarını değiştirmeden kazandırma proseslerini kapsamaktadır (Kavaklı & Civan, 2000). Atık su arıtma tesis tasarımı yapılırken bölgenin seçiminde başlıca altyapı kalitesine ve tesisin kurulacağı bölgenin deniz seviyesine olan yüksekliği göz önünde bulundurulmaktadır (Koyuncu et al., 2013). Atık suyun oluştuğu noktalardan toplanması, daha sonra kanallar vasıtasıyla terfi merkezlerine iletilmesi gerekmektedir (Gül, 2019) Yani, oluştukları kaynaktan alınıp altyapı kanalları vasıtasıyla ilk toplanma noktalarına getirilir olmasıdır (Ulutaşdemir, Özmusul, & Çopur, 2019). Tesise gelen atık sular, fiziksel ayırıştırıma tabi

tutulurak, parça boyutu büyük katı atıklar giderilir, böylelikle hem kanal giderlerinin tıkanması hem de tesise suyu basacak olan pompaların tıkanması önlenir (Tanyol & Uslu, 2013). Bu nedenle, örnek bir tesise ait atık su arıtma akış şemasının verildiği Şekil.5'te 1 numaralı kırmızı kutu olarak gösterilen terfi merkezleri ihtiyaca göre sisteme dahil edilebilmektedir. Özellikle şehirlerde evsel atık suların işlendiği arıtma tesisleri merkezi yerleşimden uzak bölgelerde olduğundan terfi merkezleri ile desteklenmektedirler (Üstün & Solmaz, 2007). Eğer arıtma tesisine olan uzaklık artarsa bu durumda birden fazla terfi merkezine ihtiyaç duyulabilmektedir (Çetiner & Keskin, 2019). Ancak ikinci terfi merkezinin rakım olarak daha alt bölgelerde bulunması halinde pompa gücü çok düşük uygulanabilir veya tamamen suyun cazibesi ile iletim sağlanabilmektedir (Çavuş, Kilit, & Saplıoğlu, 2018).



Şekil 5. Geleneksel atık su arıtma akış şeması (Ahi, 2019; Arık, 2012; Aydın, 2004; Erşahin, Dereli, Özgün, Akmırza, & Öztürk, 2017; Koyuncu et al., 2013; Özmen, 2016; Topaç & Acar, 2020; Türkmenler, 2017; Üstün, 2006)

Geleneksel su arıtma tesislerinde, arıtma işleminin başlangıcında tesise alınan atık suların debisi sürekli olarak takip edilir. Yıl boyunca değişim gösteren su miktarı ($m^3/gün$) olarak izlenir. Yaz ve kış aylarında üretime bağlı olarak ciddi değişimler olabilmektedir (Üstün, Solmaz, & Kestioğlu, 2004). Debisi ölçülen atık su katı atıkların hızlıca uzaklaştırılacağı ön arıtma işlemine gelir ve burada ızgara biçimindeki oluktan geçirilir. Tıkanma ihtimaline karşı gerekli önlemler belirli aralıklarla devreye giren devir daimli demir taraklı yapılar ızgaraları süpürür ve konveyör banda aktarılır (Cerit, 2011). Kaba atıklar henüz arıtma işlemlerine başlanılmadan alınıp çöp konteynırlarına iletilmiş olur. Kaba ve ince ızgaraların ardından gelen su kum tutuculara doğru ilerler. Su içerisinde bulunan kum ve toprak tanecikleri burada çöker ve çöken tanecikler gezici köprü sistemi ile atık sudan toplanarak sistemden uzaklaştırılır. Kum ayırıcı gezer köprü sisteminde prostenen uzaklaştırılan kum taneciklerine uygulandığı gibi ihtiyaca göre 2 numaralı yağ tutucu (sıyırıcı) köprü düzenekleri de bulunmaktadır. Yağ tutucu eklenmesiyle birlikte yağlar suyun içerisinde sıyırılır ve sistemden uzaklaştırılmış olur (YASKİ, 2017). Bu yağlar farklı

sanayi üreticileri tarafından işlenmek üzere alınmaktadır. Kum ve yağ birikiminden ayrılan atık su dalgıç pompalar vasıtasıyla ön çöktürme havuzlarına doğru basılır. Ön çöktürme ile kum ve yağ tutucudan gelen su dinlendirilmiş olur. Daha sonra tesis tasarımına göre 3 numaralı biyolojik veya 4 numaralı kimyasal arıtmaya doğru aktarılır (Arık, 2012). Örneğin gıda sanayisinin yoğun olduğu bir alanda oluşan atık sular için genellikle biyolojik arıtma tercih edilmektedir (Aşık & Katkat, 2005). Tekstil sanayisi gibi boyar maddelerin yoğun kullanıldığı alanlarda kimyasal arıtma tercih edilmektedir. Kâğıt endüstrisinin atık sularının işlenmesinde her iki arıtımında uygulanması söz konusudur (Köken & Büyükkamaci, 2010). Eğer ön çöktürmeden gelen su yalnızca kimyasal arıtmaya tabii tutuluyorsa suya flokülasyonu sağlayan kimyasallar eklenerek, suda askıda bulunan küçük yapıları partiküllerin çökelti oluşturması sağlanır. Oluşan çökelti katı hale geldiğinden kolaylıkla sistemden arındırılarak uzaklaştırılır (Namal, 2017). Ön çöktürmeden gelen su tesis tasarımına göre yalnızca biyolojik arıtmaya tabii tutuluyorsa biyolojik arıtma bölümüne beslenir. Burada suya çeşitli bakteriler eklenir. Canlı organizmalar

olduğundan düzenli olarak suyun pH değeri kontrol edilmektedir (Uyanık & Özkan, 2016).

Bunun nedeni ise canlı bakterilerin yaşam şartlarının korunmasıdır. Fakat tesislerde bakteri popülasyonunun azalması gibi ortaya çıkabilecek acil durumlarda tanklara bakterilerin ilavesi gibi farklı doğal teknikler uygulanarak bakteri popülasyonunun artması sağlanabilmektedir (Aydın, 2004). Bir arıtma tesisinin toplam elektriğinin %60 kadarı burada harcanmaktadır. Bu nedenle en büyük enerji tüketim noktalarından biri havalandırma kısmıdır (Üstün, 2006). Yöntem sayesinde atık suyun dibe çökmesi engellenirken azot ve fosfor gibi gazların uzaklaştırılması sağlanır (Arık, 2012). Havalandırma tanklarında arıtmadan gelen suyun oksijen miktarı, pH değeri ve iletkenliği gibi çeşitli parametrelerin incelenmesi için örnekler alınıp laboratuvar ortamında analizleri yapılmaktadır (Demirci, Pekel, Altınten, & Alpbaz, 2016). Atık su son çökeltme tankına doğru devam eder. Dinlenmekte olan suyun içerisindeki katı partiküller dibe doğru çökmeye başlar ve dipte bulunan sıyrıcılar tarafından çamurların toplandığı kanallara doğru itilir (Aydın, 2004). Toplanan çamurlar bir sonraki aşamaya doğru giderken son çökeltme tankından çıkan temiz su savaklardan geçer ve deşarj ünitesine doğru akar. Deşarj rögarına dolan su buradan pompalar vasıtasıyla açık denizlere veya istenen baraj, göl, akarsu, nehir gibi noktalara basılır (Üçüncü, 2019). Oluşan dip çamurlar ise 5 numaralı çamur yoğunlaştırma veya bir diğer adıyla susuzlaştırmaya ünitesine aktarılır. Çamur

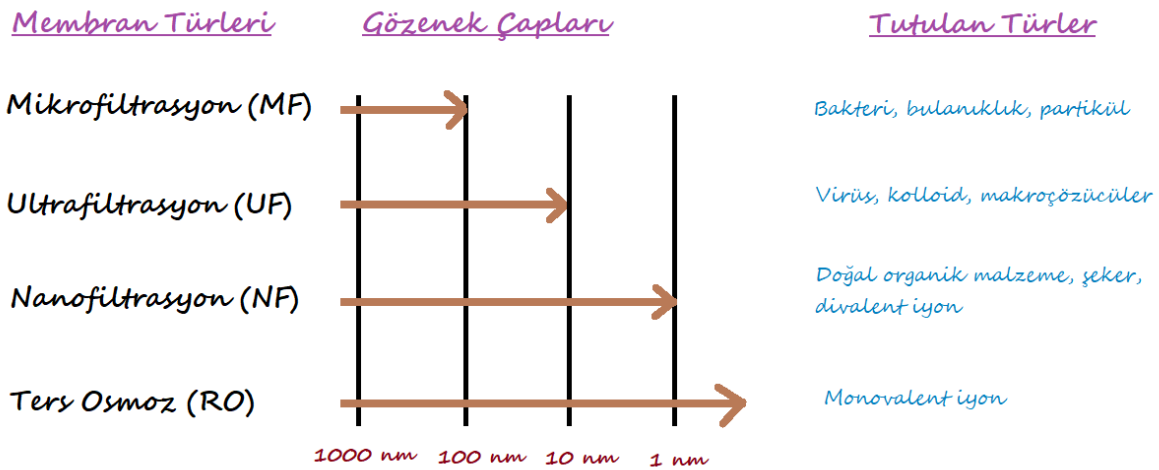
susuzlaştırmaya gelen atık çamurdan sızmakta olan sızıntı suları atık su geri devir ile tesis giriş pompasına basılır. Nemli çamurlara ise kapalı evaporatörlerde ısı işlem uygulanır. Susuzlaştırılan çamur konveyör bantlarla çamur tankına aktarılır (Erşahin et al., 2017). Atık su arıtma tesisinin yerleşim alanlarına yakın olması durumunda 6 numaralı koku giderim ünitesi de sisteme dahil edilebilmektedir (Kara, Akbulut, & Topak, 2018). Son ürün olarak ortaya çıkan çamur ise artık nihai bertaraf için kamyonlarla tesisten uzaklaştırılmaya hazırdır (Yüksekdağ, Gökpinar, & Yelmen, 2020).

4.2. İleri Su Arıtma Teknikleri

Geleneksel arıtma sistemlerinde arıtılmış atık suda bulunan askıda katı madde, çözünmüş formdaki maddeler, organik madde türevindeki kirliliklerin arıtımı ileri seviyede arıtma sistemlerini gerektirmektedir.

Membran Teknolojileri

Membran filtrasyon, çözünmüş maddeleri ve ince parçacıkları çözeltilerden uzaklaştırmak için kullanılmaktadır. Membran teknolojisinin diğer ayırma proseslerine göre başlıca avantajları düşük enerji tüketimi, basitlik ve çevre dostu olmasıdır. Şekil.6'da farkları sunulan dört yaygın membran ayırma işlemi vardır: mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (RO) (Madsen, 2014).



Şekil 6. Yaygın kullanılan membran türleri ve özellikleri (Madsen, 2014)

MF: Gözenek çapı aralığı 0,1-3 µm arasındadır. Moleküler ağırlığı ayırma sınırı (MWCO) >1000 Da olan makromolekülleri ve askıda katı maddeleri ayıran bir sistemdir (Singh & Purkait, 2019).

UF: Gözenek boyutu 0,005-0,1 µm arasındadır ve MWCO 1000-500 Da olan makromolekül içeren sıvıların saflaştırılmasında, fraksiyonlanmasında veya konsantre edilmesinde tercih edilmektedir (Lutz, 2015).

NF: Gözenek çapı yaklaşık olarak 0,001 µm ve MWCO 180-500 Da arasındadır (Cheng, Oatley, Williams, & Wright, 2011). Yüzeyleri hafif yüklü olarak çalıştırılan NF membranlarında uygulanan basınç aralığı 3-40 bar'dır. Ayırma prosesinde yüklü yüzeyden kaynaklı yük etkileşimi önemli rol oynamaktadır (Bruggen, Everaert, Wilms, & Vandecasteele, 2001).

RO: Yüksek basınç uygulanarak çalıştırılan sistemde, düşük molekül ağırlığında organik maddeler ve tuzlar konsantre olurken, su ve çözücüler geçmektedir. Yoğun olarak, deniz suyunun ve kuyu suyunun arıtılmasında kullanılmaktadır (İbrahim, Isloor, & Farnood, 2020).

Membran Biyoreaktörler

Membran biyoreaktör (MBR) teknolojisi biyolojik ve membran filtrasyonunu içerir (Deng et al., 2022). Katı fazdaki kirliliklerin giderimi, fiziksel dezenfeksiyon kapasitesi, yüksek oranda organik madde giderimi, geleneksel sistemlerden daha az alan kaplaması ve çeşitli atık suların arıtımını gerçekleştirmesi MBR'nin avantajlarından. Son dönemlerde, belediye ve endüstriyel atık su arıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır (Gürel & Büyükgüngör, 2011).

Elektrokoagülasyon

Metal elektrot yüzeyinde gerçekleşen elektrolitik reaksiyonlar sonucu metalik iyonlar oluşur ve koloidal haldeki partiküller adsorpsiyon, koagülasyon, sedimentasyon veya flotasyon mekanizmaları ile giderilir (Barrera-Diaz, Balderas-Hernandez, & Bilyeu, 2018). Elektrokoagülasyon prosesi ağır metal gideriminde, koloidal katıların gideriminde, yağ emülsiyonlarının gideriminde, yağ ve gres gideriminde, kompleks organiklerin gideriminde ve mikroorganizmaların gideriminde kullanılmaktadır (Vepsäläinen & Sillanpää, 2020).

Yapay sulak alan

Yapay sulak alanlar, bitki topluluklarının, mikroorganizmaların ve doğal olarak gelişen omurgasızların oluşturduğu dolgu malzemesiyle doldurularak hazırlanan havuz sistemleridir. Atık suda bulunan kirlilikler, sedimentasyon ve filtrasyon gibi

fiziksel, bitki, toprak ve organik substratla adsorpsiyon gibi biyokimyasal ve fizikokimyasal indirgenme, çürüme, nitrifikasyon ve denitrifikasyon gibi biyolojik prosesler ile arıtılmaktadır (Temel, 2017).

Döner biyolojik diskler

Üzerinde mikroorganizmaların üremesi ve çoğalmasına uygun bir yüzey oluşturulmak için tasarlanan sistemlere döner biyolojik disk veya biyodisk denmektedir. Diskler halinde plastik malzemelerin döner bir shaft üzerine yerleştirilmesiyle veya delikli tambur şeklindeki silindirik bir yapının içi dolgu malzemesi ile doldurulmasıyla oluşmaktadır. Sistem içerisinde biyolojik reaksiyonlarla organik madde ve mikroorganizma giderimi sağlanmaktadır (Üstün & Tırpancı, 2015).

4.3. Arıtılmış Suyun Endüstride Yeniden Kullanımı

Atık suyun belirli işlemlerden geçirilip tekrar kullanılması sanayinin su ihtiyacını kısmen karşılarken, daha az atık üretilmesiyle hem atık bertaraf maliyetleri azalmaktadır hem de çevreyle dost bir uygulama gerçekleştirilmektedir. Birçok endüstriyel işlemde içme suyu kalitesindeki suya gereksinim olmamasından dolayı, sanayisi gelişmiş ülkelerde, kullanılmış suyun arıtılarak yeniden kullanılması oldukça yaygındır. İşletmedeki atık suyunun arıtılarak sisteme döngüsü proses adımlarından biri olarak uygulanır (Asan, 2013). Geri kazanılan su, soğutma suyu, proses suyu, radyoaktif atıkları seyreltme suyu, kül havuzlarını sulama suyu, kazan besleme suyu olarak tesislerde kullanılabilir. Soğutma suları, endüstriyel su tüketiminde başlıca sebeplerden biri olmakla, arıtılan suyun en yaygın kullanım yöntemidir (Başkan, 2006). Atık suların yüksek miktarlardaki tüketimi, yeniden kullanımı ile ilgili potansiyele sahip olduğunu; bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Demir, Yıldız, Sercan, & Arzum, 2017).

5. MALİYET

Enerji maliyetlerinin artışıyla atık su arıtma tesislerinde enerji yönetimi, toplam maliyetleri de etkilemektedir. Atık su arıtma tesislerinde enerjinin verimliliğinin sağlanması için tesisin hidrolik proses planı, gerekli standartlarda arıtım için prosesin ve ekipmanların seçimi önem taşımaktadır. Atık su arıtma tesislerinde maliyetlerin %11,5 aktif çamur, %7 damala filtresi, %7 döner biyolojik kontaktör, %6,5 havalandırılmış lagün, %5,5 sulak alan ve %4,5 atık stabilizasyon havuzları olmak üzere toplam %47'sini işletme maliyetleri

oluşturur (Johnson, Camargo Valero, & Mara, 2007). Arıtılan atık suyun ise m³'ü başına yaklaşık 0,3-2,1 kWh aralığında bir enerji sarfiyatına sahip olduğu görülmektedir (Venkatesh & Brattebø, 2011). Gelişen teknoloji ile işlemlerde harcanan enerji azalır ve dolaylı olarak enerji kayıpları da azalma gösterir. Bu ilerlemelerle arıtılan suyun m³'ü başına harcanması gereken enerjinin de zaman içerisinde azalacağı tahmin edilmektedir. Bazı tesislerde çamurdan biyogaz üretimi ile geri kazanım sağlanırken bazı tesislerde

elektrodializ yöntemiyle işletme maliyetlerinin geri kazanım enerjisiyle başabaş noktalara getirilmesine çalışılmaktadır (Baran, 2020).

Marmara denizindeki atık su kirliliğini önlemek amacıyla kurulmuş Ataköy İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisinin 2012 yılının Ocak-Eylül aylarına ait ortalama geri kazanım verileri Tablo.5'te verilmiştir (Türkmenler, 2017).

Tablo 2. Geri kazanım verileri (Türkmenler, 2017)

Toplam elektrik tüketimi (MWh/ay)	Şebekeden alınan elektrik (MWh/ay)	Toplam elektrik üretimi (MWh/ay)	Enerji geri kazanımı (%)	Arıtılan atık su miktarı (m ³ /ay)	1 m ³ atık su için elektrik tüketimi (kWh)
3.221,93	1.652,90	1.568,03	46,34	9.762.735	0,33

Hidro enerji su akışından yararlanılarak elde edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak bilinmektedir (Ak, Kentel, & Kucukali, 2017). Atık su arıtma tesislerinin (AAT) hidroelektrik güç üretecek şekilde tasarlanmasıyla da geri kazanım sağlanması mümkündür. 15 metre düşüde yılda 172,68 GWh, 30 metre düşüde yılda 345,36 GWh üretilebilir olduğu tahmin edilmektedir (Baran, 2020).

6. SONUÇ

Son yıllarda nüfusun artışı ve iklim değişiklikleri nedeniyle insanoglu su kaynaklarının yok olma ihtimali ile karşı karşıyadır. Su kaynakları Türkiye için bilinen yaklaşımın aksine bol değildir. Gelecekte suyun miktarı kadar kalitesi de büyük önem taşıyacaktır. Bu sebeple, su kaynaklarının korunmasının ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için su tasarruf yöntemlerinin araştırılması önem arz etmektedir. Su tüketim oranları incelendiğinde, sanayi kuruluşlarında tüketilen su miktarları önemli bir paya sahiptir. Kimyasal, gıda ve tekstil üretimi gibi yoğun su tüketen sektörlerde tüketilen su miktarını azaltmak ve su verimliliğini arttırmak adına her bir endüstrinin kendi içerisinde verimlilik çalışması yapması ve işleyişte istikrar göstermesi gerekmektedir. Gıda sektöründe kullanılan HACCP uygulamaları sayesinde suyun daha verimli ve kontrollü kullanımı öne çıkmaktadır. Bunun yanında balık temizleme prosesinin su verimlilik analizi yapıldığında yıllık %40 oranında su tasarrufu sağlayabildiği gözlemlenmiştir. İçecek, makine ve kâğıt sektörlerinde ise yapılan verimlilik çalışmalarında sırasıyla %41, %15 ve %38 oranlarında verimlilik sağlanabilmiştir. Birim üretim başına

kullanılan su miktarlarının her sektör için bilinmesi ile su verimliliği değerlendirmesi yapılabilecek ve suyun sürdürülebilirliği açısından olumlu adımlar atılabilecektir.

KAYNAKLAR

- Ahi, V. K. (2019). Endüstriyel Arıtma Çamurlarından Enerji Kazanılması. İskenderun Teknik Üniversitesi.
- Ak, M., Kentel, E., & Kucukali, S. (2017). A fuzzy logic tool to evaluate low-head hydropower technologies at the outlet of wastewater treatment plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 727–737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.010>
- Alkaya, E., Böğürücü, M., Ulutaş, F., & Demirer, G. N. (2010). Sanayide İklim Değişikliğine Uyum:Ekoverimlilik Yaklaşımı ile Su Tasarrufuna Yönelik Pilot Uygulamalar. "International Sustainable Water and Wastewater Management Symposium" 26-28 October 2010 - Konya/Turkey Aydın, (October), 21–29.
- Arık, K. S. (2012). Organize Sanayi Bölgeleri Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Geri Kullanımının Araştırılması. Uludağ Üniversitesi.
- Asan, C. (2013). Gri Suların Yeniden Kullanımında Membran Biyoreaktör (MBR) Uygulamaları. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Aşık, B. B., & Katkat, A. V. (2005). Gıda Sanayii Arıtma Tesisi Atık Suyu ' nun Sulama Suyu Olarak Kullanım Olasılığı. *Uludağ Üniv.Zir.Fak.Derg.*, 19(2), 23–31.
- Aydın, S. (2004). Atıksu Arıtma Tesisi Çamurlarının Değişik Amaçlarla Kullanımının Araştırılması. İstanbul Üniversitesi.

- Baran, B. (2020). Atıksu Arıtma Tesisleri nden Elde Edilen Hidroelektrik Üretim in Türkiye Mesken Elektrik Talebini Karşılama Oranı. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8(1), 139–145. <https://doi.org/10.21541/apjes.503355>
- Barrera-Diaz, C. E., Balderas-Hernandez, P., & Bilyeu, B. (2018). Electrocoagulation: Fundamentals and Prospectives. In *Electrochemical Water and Wastewater Treatment* (pp. 61–76). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1>
- Başkan, T. (2006). Arıtılmış Evsel Atıksuların Tarımda Sulama Amaçlı Yeniden Kullanılması. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Bruggen, B. Van Der, Everaert, K., Wilms, D., & Vandecasteele, C. (2001). Application of nanofiltration for removal of pesticides , nitrate and hardness from ground water: rejection properties and economic evaluation. *Journal of Membrane Science*, 193, 239–248.
- BSTB VGM, T. C. B. S. ve T. B. V. G. M. (2017). Sanayide kaynak verimliliği potansiyelinin belirlenmesi projesi sonuç raporu.
- Çalcalı, Ö. (2014). Su Sektörünün Kamusal Niteliğinin Dönüşümü:Türkiye’deki ŞEbeke Suyu Endüstrisi için Bir Değerlendirme. *Journal of Academic Researches and Studies*, 6(10), 111–129.
- Çapar, G., & Yetiş, Ü. (2018). Sanayide Su Verimliliğinin Ülkemizdeki Durumu. *Anahtar Dergisi*, 19–24. Retrieved from <http://suyonetimi.ankara.edu.tr/wp-content/uploads/sites/88/2018/10/Anahtar-Dergisi-Sanayide-Su-Verimliliğinin-Ülkemizdeki-Durumu.pdf>
- Casani, S., & Knöchel, S. (2002). Application of HACCP to water reuse in the food industry. *Food Control*, 13, 315–327.
- Çavuş, U. Ş., Kilit, M., & Saphioğlu, K. (2018). Sürdürülebilir Çevre Yönetimi için Atıksu Arıtma Tesisi İşletilmesi Afyonkarahisar İli Atıksu Arıtma Tesisi Örneği. *International Symposium on Urban Water and Wastewater Management October 25-27, 2018, Denizli, (December)*. Denizli.
- Cerit, D. (2011). Atıksu Arıtma Tesisi Ekipmanları. *Teknik*, 32–35.
- Çetiner, H. İ., & Keskin, T. E. (2019). Bilgisayar Yazılımları Kullanılarak İçme Suyu, Atık Su ve Taşkın Debi Hesaplarının Yapılması ve Projeye Esas Alanların Kübaj Hesaplamalarının Gerçekleştirilmesi: Çankırı Örneği. *1st International Potable Water and Waste Water Symposium December 6-7, 2018 Afyonkarahisar, (December 2018)*. Afyonkarahisar.
- Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, Ç. E. ve B. Y. D. B. (2020). Çevresel göstergeler. Ankara.
- Chen, Y., Yin, G., & Liu, K. (2021). Regional differences in the industrial water use efficiency of China: The spatial spillover effect and relevant factors. *Resources, Conservation and Recycling*, 167(October 2020), 105239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105239>
- Cheng, S., Oatley, D. L., Williams, P. M., & Wright, C. J. (2011). Characterisation and application of a novel positively charged nanofiltration membrane for the treatment of textile industry wastewaters. *Water Research*, 46(1), 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.011>
- Çiçek, İ., & Ataoğlu, M. (2009). Türkiye’nin Su Potansiyelinin Belirlenmesinde Yeni Bir Yaklaşım. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 7(1), 51–64. https://doi.org/10.1501/cogbil_0000000094
- Demir, Ö., Yıldız, M., Sercan, Ü., & Arzum, C. Ş. (2017). Atıksuların Geri Kazanılması ve Yeniden Kullanılması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 02, 1–14.
- Demirci, Y., Pekel, L. C., Altınten, A., & Alpbaz, M. (2016). Elektrokoagülasyon reaktöründe bulanık kontrol metodu ile pH , iletkenlik ve sıcaklığın eş zamanlı kontrolü. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 987–996. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278454>
- Deng, L., Guo, W., Hao, H., Zhang, X., Chen, C., Chen, Z., ... Wang, Q. (2022). Recent advances in attached growth membrane bioreactor systems for wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 808, 152123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152123>
- Ekinci, B. (2015). Su Kaynaklarının Verimli Kullanılmasına Yönelik Örnek Ülke Uygulamaları ve Ülkemizde Bu Çalışmaların Uygulanabilirliği. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- Erşahin, M. E., Dereli, R. K., Özgün, H., Akmırza, Z. A., & Öztürk, İ. (2017). Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliğinin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 380–387. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.78149>
- Eurostat. (2018). *The EU in the world 2018 edition-Statistical Books* (P. W. Helene Strandell, Ed.). Luxembourg.
- Geçer, E., Şentürk, İ., & Büyükgüngör, H. (2019). Yeşil Bina Tasarımında Su ve Enerji Yönetimi Üzerine Uygulama Örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9, 332–343. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.413915>
- Gül, E. (2019). Arıtma Tesislerinde Meydana Gelen Kazalar ve İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden Alınması Gerekli Tedbirler. *Mali Çözüm İSMMMO*, 29(151), 241–254.

- Gürel, L., & Büyükgüngör, H. (2011). Atıksu arıtımında membran biyoreaktörler. *İTÜ Dergisi*, 21(1), 13–23.
- Havelaar, A. H. (1994). Application of HACCP to drinking water supply. *Food Control*, (3), 145–152.
- Hsine, E. A., Benhammou, A., & Pons, M. (2005). Water Resources Management in Soft Drink Industry-Water Use and Wastewater Generation. *Environmental Technology*, 26, 1309–1316. <https://doi.org/10.1080/09593332608618605>
- Ibrahim, G. P. S., Isloor, A. M., & Farnood, R. (2020). Fundamentals and basics of reverse osmosis. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 141–163). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816777-9.00006-X>
- IFC, I. F. C. Müşteri Vaka Çalışması. , (2014).
- Jagtap, S., Skouteris, G., Choudhari, V., Rahimifard, S., & Duong, L. N. K. (2021). An Internet of Things Approach for Water Efficiency: A Case Study of the Beverage Factory. *Sustainability*, 13, 3343. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13063343>
- Jespersen, C., Christiansen, K., & Hummelose, B. (2000). Cleaner Production Assessment in Fish Processing. Denmark.
- Johnson, M., Camargo Valero, M. A., & Mara, D. D. (2007). Maturation ponds, rock filters and reedbeds in the UK: Statistical analysis of winter performance. *Water Science and Technology*, 55(11), 135–142. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.364>
- Kantaroglu, Ö. (2011). Yüksek Performanslı Binalarda Su Stratejileri. *TMMOB Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 32–43.
- Kara, G., Akbulut, Z., & Topak, A. N. (2018). Türkiye’deki Atıksu Arıtma Tesislerinde Koku Problemleri. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(4), 185–188.
- Karahan, A. (2009). Gri suyun değerlendirilmesi. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 1155–1164.
- Kavaklı, M., & Civan, Z. (2000). Türkiye’de Su Kullanımı, Atıksuları Geri Kazanma ve Yeniden Kullanma Uygulamaları. Kocaeli.
- Kinaci, C. (2017). Su Yönetiminde Temel Kavramlar ve Bileşenler; Türkiye’de Su Yönetimi.
- Köken, E., & Büyükkamaci, N. (2010). Kağıt endüstrisi atıksu arıtma tesislerinde çamur işleme ünitelerinin toplam maliyete etkisi. *İtüdergisi/E*, 20(1), 66–76.
- Koyuncu, İ., Öztürk, İ., Aydın, A. F., Alp, K., Arıkan, O. A., İnsel, G. H., ... Özdoğru, A. (2013). Atıksu arıtma tesisleri tasarım rehberi.
- Krinner, W., Lallana, C., Estrela, T., Nixon, S., Zabel, T., Laffon, L., ... Cole, G. (1999). Sustainable water use in Europe-Part 1: Sectoral use of water. Copenhagen.
- Lutz, H. (2015). Membranes. In *Ultrafiltration for Bioprocessing* (pp. 7–30). <https://doi.org/10.1016/B978-1-907568-46-6/00002-1>
- Madsen, H. T. (2014). Membrane Filtration in Water Micropollutants. In *Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water* (pp. 199–248). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53178-0.00006-7>
- Murali, S., Krishnan, V. S., Amulya, P. R., Alfiya, P. V., Delfiya, D. S. A., & Samuel, M. P. (2021). Energy and water consumption pattern in seafood processing industries and its optimization methodologies. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100242. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100242>
- Namal, O. Ö. (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Proseslerin Araştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 388–396. <https://doi.org/10.17100/nevbittek.322169>
- Nayan, N., Hashim, M., Saleh, Y., Mahat, H., & See, K. L. (2018). Effect of Monsoon Flood to Groundwater Quality in Kuala Krai, Kelantan, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 145(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/145/1/012112>
- Notermans, S., Zwietering, M. H., & Mead, G. C. (1994). The HACCP concept: identification of potentially hazardous micro-organisms. *Food Microbiology*, 11(3), 203–214.
- Önal, B., & Ötleş, S. (2015). Gıda endüstrisinde suyun yeniden kullanımı ve HACCP uygulamaları. *Plastik&Ambalaj Teknolojisi*, (April 2015), 76–83.
- Özçelep, Z. B. (2009). Kağıt Endüstrisi Atık Sularının Membran Prosesleriyle İleri Arıtımı. İstanbul Üniversitesi.
- Özel İhtisas Komisyonu Raporu. (2018). Su Kaynakları Yönetimi ve Güvenliği. Ankara.
- Özlem Durmuş. (2013). Su verimliliği. Ankara.
- Özmen, E. (2016). Akaryakıt Depolama Tesislerinde Oluşan Atıksuların Geri Kazanımı İçin Sıfır Deşarj Yaklaşımlı Arıtma Teknolojilerinin Geliştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Patel, K. (2021). Turkey Experiences Intense Drought. NASA Earth Observatory. Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147811/turkey-experiences-intense-drought>
- Polat, A. (2013). Su Kaynaklarının Sürdürülebilirliği İçin Arıtılan Atıksuların Yeniden Kullanımı. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 6(1), 58–62.
- Santonja, G. G., Karlis, P., Stubdrup, K. R., Brinkmann, T., & Roudier, S. (2019). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries.

- Singh, R., & Purkait, M. K. (2019). Microfiltration Membranes. In *Membrane Separation Principles and Applications* (pp. 111–146). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812815-2.00004-1>
- Tanyol, M., & Uslu, G. (2013). Tunceli Evsel Atıksu Arıtma Tesisinin Arıtma Etkinliğinin Değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(June), 24–29.
- Temel, F. A. (2017). Endüstriyel atıksuların arıtımında yapay sulak alanların kullanımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 213–225.
- TMMOB, Ç. M. O. (2019). Dünya Çevre Günü Türkiye Raporu.
- Topaç, F. O., & Acar, Ö. Ö. (2020). Paket Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Sulama Suyu Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 858–865. <https://doi.org/10.31590/ejosat.748395>
- TUİK, T. İ. K. (2019). İmalat sanayi su, atıksu ve atık istatistikleri, 2008. Retrieved from www.tuik.gov.tr
- Türkmenler, H. (2017). Atık Su Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 495–502.
- Üçüncü, O. (2019). Atıksu Arıtımı , Atıksu Deşarji ve Su Kirliliği : Trabzon İli Örneği. *Türk Hidrolik Dergisi*, 3(2), 14–29.
- Ulutaşdemir, N., Özmuşul, B., & Çopur, E. Ö. (2019). Gaziantep’te Merkez Atıksu Arıtma Tesisinde Üç Yıllık Risk Değerlendirmesi Analizi. *Sağlık Akademisi Kastamonu*, 4(1), 22–33.
- Üstün, G. E. (2006). Bursa Organize Sanayi Bölgesi (BOSB) Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Geri Kazanılabilirliğinin Araştırılması. *Uludağ Üniversitesi*.
- Üstün, G. E., & Solmaz, S. A. K. (2007). Bir Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtma Tesisinden Çıkan Atıksuların Tarımsal Amaçlı Sulama Suyu Olarak Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Ekoloji*, 62, 55–61
- Üstün, G. E., Solmaz, S. K. A., & Kestioğlu, K. (2004). Organize Sanayi Bölgelerinde Atıksu Arıtımı: Bursa’dan Bir O.S.B. Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9(1), 65–70.
- Üstün, G. E., & Tırpancı, A. (2015). Gri suyun arıtımı ve yeniden kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 20(2), 119–139. <https://doi.org/10.17482/uujfe.79618>
- Uyanık, İ., & Özkan, O. (2016). Organize Sanayi Bölgesi Atıksularının Yeniden Kullanım Seçeneklerinin Değerlendirilmesi. *Su ve Çevre Teknolojileri*, 44–48.
- Venkatesh, G., & Brattebø, H. (2011). Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway). *Energy*, 36(2), 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.040>
- Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2020). Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. In *Advanced Water Treatment* (pp. 1–78). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819227-6.00001-2>
- Wingfield, S., Martínez-MoscOSO, A., Quiroga, D., & Ochoa-Herrera, V. (2021). Challenges to Water Management in Ecuador: Legal Authorization, Quality Parameters, and Socio-Political Responses. *Water*, 12(8), 1017. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13081017>
- Yarar, B. (2019). Kağıt ve Karton Fabrikası Atık Su Arıtma Tesisinin Enerji Analizi. *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi*.
- YASKİ, Y. A. S. ve K. A. T. İ. B. (2017). Yalova Atık Su ve Kanalizasyon Altyapı Tesislerini İşletme Birliği 1 Yalova Atık Su ve Kanalizasyon Altyapı Tesislerini İşletme Birliği.
- Yüksekdağ, M., Gökpınar, S., & Yelmen, B. (2020). Atıksu Arıtma Tesislerinde Arıtma Çamurları ve Bertaraf Uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 895–904. <https://doi.org/10.31590/ejosat.699952>

Geosentetik Kil Örtülerin Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri

Kaveh DEGHANIAN*¹, Esra SARIAY²

^{1,2}*İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 34295, Türkiye*

Derleme Makalesi, Geliş Tarihi: 18.01.2022, Kabul Tarihi: 08.06.2022

Özet

Geosentetik Kil Örtüleri (GCL); genellikle bir geotekstil veya geomembran olan bir geosentetik malzemenin iki katmanı arasına konan ince bir granüler toz veya sodyum bentonitten oluşan malzemedir. GCL'ler; her iki taraftaki geotekstillerin içerdiği bentonit ile bir yapıştırıcı, iğneyle delme veya dikiş bağlama ile yapıştırılır. İğne delme işlemi, üstteki geotekstildeki bazı liflerin tüm yapıyı birbirine bağlayarak bentonit ve alt geotekstile uzanmasına neden olur. Alt geotekstilde delinen lifler ya GCL'yi bir arada tutmak için doğal dolanma ve sürtünmeye dayanır ya da ısıtılarak alttaki geotekstile kaynaşarak potansiyel olarak iki geotekstil ve bentonit arasında daha güçlü bir bağ oluşturur. Bentonit GCL'lerin en önemli bileşenidir ve yüksek oranda adsorbe eden volkanik küllerden oluşan (genellikle sodyum bentonittir) granüler kildir. Bu malzeme yüksek su tutma ve şişme potansiyeline sahiptir. GCL'lerin hidrolik özellikleri ve iletkenliği kullanılan kilin kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Bentonit kilinin özellikleri başka katkı maddeleri de eklenerek güçlendirilebilir. Bu makale kapsamında, geosentetik malzeme türlerinden olan Geosentetik Kil Örtüsü malzemesinin fiziksel ve mekaniksel özellikleri ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geosentetik kil katmanlar, Geokompozit, Sıkıştırılmış kil katmanlar, Geotekstil.

Physical and Mechanical Properties of Geosynthetic Clay Covers

Abstract

Geosynthetic Clay Liners (GCL); is a material consisting of a fine granular powder or sodium bentonite placed between two layers of a geosynthetic material, usually a geotextile or geomembrane. GCLs; The bentonite contained in the geotextiles on both sides is bonded with an adhesive, needle punch or suture bonding. Needle punching causes some fibers in the upper geotextile to extend into the bentonite and lower geotextile, binding the entire structure together. Fibers pierced in the lower geotextile either rely on natural entanglement and friction to hold the GCL together, or are heated and fused to the underlying geotextile, potentially creating a stronger bond between the two geotextiles and bentonite. Bentonite is the most important component of GCLs and is a granular clay composed of highly adsorbing volcanic ash (usually sodium bentonite). This material has high water retention and swelling potential. The hydraulic properties and conductivity of GCLs vary depending on the quality of the clay used. The properties of bentonite clay can be enhanced by adding other additives. In this paper, the physical and mechanical properties of GCL has been studied.

Keywords: Geosynthetic clay liners (GCL), Geocomposite, Compressed clay layers (CCL), Geotextile (GT).

*Sorumlu yazar kavehdeghanian@aydin.edu.tr, ²esrasariay@icloud.com

1. GİRİŞ

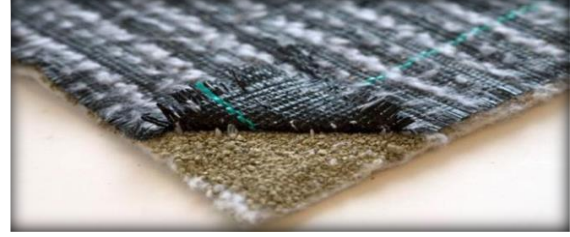
Geosentetik malzemeler geleneksel yöntemlere göre maliyeti düşürüp estetik çözümler sunmaktadır. Bu malzemelerin farklı çeşitleri de mevcuttur. Bunlardan bazıları; geogrid, geotekstil, geomembran, geosentetik kil örtüler (GCL), geokompozitler, geomatlar, drenaj levhaları ve geotüplerdir. GCL'nin avantajı; uygulanmasının kolay olması, ekonomik olması, üretiminin kolay olması, basınç altında dolgu içinde iyi bir yalıtım sağlamasıdır. GCL'ler arasında temel farklar vardır. Bunlar; GCL'de kullanılan bentonitin mineralojisi ve formu, geotekstilin türü veya bir geomembran eklenmesidir. Son yıllarda geosentetik kil örtüler (GCL'ler), örtü sistemlerinde ve kompozit alt örtülerde sıkıştırılmış kil örtülerin yerine geçerek yaygın bir popülerlik kazanmıştır. GCL'nin ana avantajları; sınırlı kalınlık, alttaki toprak veya atığın farklı çökelmeleriyle iyi uyum, kolay kurulum ve düşük maliyettir.

GCL'ler sıkıştırılmış kil yerine bentonit tabakalarının kullanılmasıyla kesme performansı ve maliyet açısından Sıkıştırılmış Kil Örtüler (CCL'ler) gibi geleneksel örtüler ve nihai kaplamalara göre daha avantajlıdır. Bentonitin düşük geçirgenliği vardır ve son derece emme özelliği onu delikler için tercih edilen bir malzeme yapmaktadır. GCL'lerin hidrolik performansı bentonitin hidrolik iletkenliğine bağlıdır. GCL'ler genellikle su dışındaki sıvıları tutmak için kullanılır. Hidrolik iletkenliği etkileyen GCL özellikleri; agrega boyutu, montmorillonit içeriği, adsorbe edilmiş tabakanın kalınlığı, mineral bileşenin önhidrasyonu ve boşluk oranıdır. GCL'ler genellikle eni 5 m boyu da 40 m olacak şekilde rulolar halinde üretilmektedir. Uygulanmasında sadece ek yerleri üst üste bindirilir ve dolayısıyla başka bir işlem gerektirmediğinden uygulanması daha hızlı ve kolaydır. Bu doğal sodyum bentonit malzemesi volkanik kökenli kil olduğundan su ile teması halinde jel haline dönüşerek 18-30 katına kadar şişmektedir. Bu şişme işlemi basınç etkisiyle engellendiğinde bu malzeme suyun geçmesini engelleyerek geçirimsiz bir jel haline dönüşür.

2. GEOSENTETİK KİL ÖRTÜLER (GCL)

Geosentetik kil örtüler (GCL); bir geosentetik katman veya katmanlara bağlanmış ince bir sodyum veya kalsiyum bentonit katmanından oluşmaktadır. Geosentetikler ya geotekstildir ya da bir geomembrandır. Geotekstil bazlı GCL'ler her iki tarafta geotekstillerin içerdiği bentonit ile bir yapıştırıcı, iğneyle delme veya dikiş bağlama ile yapıştırılır. İğneyle delme işlemi üstteki geotekstildeki bazı liflerin tüm yapıyı birbirine bağlayarak bentonit ve alt geotekstile uzanmasına neden

olur. Alt geotekstilde delinen lifler ya GCL'yi bir arada tutmak için doğal dolanma ve sürtünmeye dayanır ya da ısıtılarak alttaki geotekstile kaynaşması sağlanarak potansiyel olarak iki geotekstil ve bentonit arasında daha güçlü bir bağ oluşturur (bu durumda olabilirler) ve " termal kilitli GCL'ler " olarak da anılır. Alternatif olarak takviye geotekstil-bentonit kompozitin paralel sıralı dikişle bağlanmış ipliklerle birlikte dikilmesiyle gerçekleştirilebilir (Bouazza, 2002).



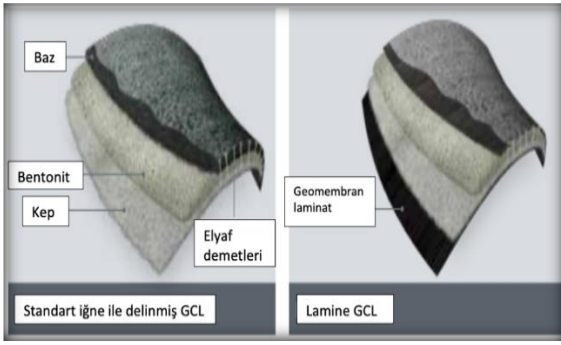
Şekil 1. Geosentetik kil örtü (Aydın ve Gelberi, 2018)

Geomembran destekli GCL için bentonit geomembranı kirletmeyen bir yapıştırıcı kullanılarak bağlanır ve kurulum sırasında koruma amacıyla bentonite ince bir açık örgü şeklinde bağlanmış geotekstil yapıştırılır. Üretim esnekliği ve hızlı yenilenmesinden dolayı farklı GCL türlerinin performansı önemli ölçüde değişebilir. GCL'ler arasındaki temel farklar; GCL'de kullanılan bentonitin mineralojisi ve formu (örn. granüle karşı toz, kalsiyuma karşı sodyum vb.), Geotekstil türü (örn. dokumaya karşı dokuma olmayan geotekstillere) veya bir geomembran eklenmesidir (Bouazza, 2002).

GCL'ler fabrikalar tarafından kompozit sodyum bentonit katmanları (doğal veya sentetik), geotekstillere veya geomembran katmanları (HDPE, LDPE, PVC vb.den oluşturulmuş) arasına yerleştirilmiş diğer yüksek düzeyde emici düşük geçirgen malzemeler kullanılarak üretilir. GCL'nin kullanımı mucidi Arthur J. Clem tarafından 1982 yılına dayanıyor ve o zamandan beri de toprağı ve yer altı suyunu sızıntı suyundan korumaya yönelik bir dizi çevresel sınırlamada dünya çapında kabul görmüştür. GCL'ler sıkıştırılmış kil yerine bentonit tabakalarının kullanılmasıyla kesme performansı ve maliyet etkinliği sayesinde Sıkıştırılmış Kil Örtüler (CCL'ler) gibi geleneksel örtüler ve nihai kaplamalara göre benzersiz bir şekilde avantajlıdır. Bentonit düşük geçirgenliği ve son derece emici kalitesi onu delikler için tercih edilen bir malzeme yapar (Kommu ve Asadi, 2020). Kil tabakasının koruma örtüleri sistemi 1982'den önce ABD'de yaygın olarak kullanılıyordu. GCL adı verilen yeni tip geosentetikler 1987'de bir Almanya şirketine tarafından ortaya çıkmıştır. 1989'da GCL'ler ABD'deki düzenli depolama sahalarında yaygın olarak uygulanmıştır. Ve 1995'ten beri 1999'da da tamamen

bitirilen yeni tip astar malzemesinin ulusal kodu hazırlanmaya başlanmıştır. 2000'den önce literatür taraması sırasında tek bir hizmet içi astar olarak kurulduğunda GCL'lerin performansını tartışan yalnızca bir belge bulunmuştur (Xiong vd. 2009).

Geçtiğimiz on yılda geosentetik kil örtüler (GCL'ler) örtü sistemlerinde ve kompozit alt örtülerde sıkıştırılmış kil örtülerin yerine geçerek yaygın bir popülerlik kazanmıştır. Ayrıca nakliye tesislerinde veya depolama tanklarında çevre koruma bariyerleri olarak ve kanallar, göletler veya yüzey su tutmaları için tek astar olarak kullanılırlar. Sonuç olarak özellikle hidrolik ve difüzyon özellikleri, kimyasal uyumlulukları, mekanik davranışları, dayanıklılıkları ve gaz çıkışları açısından yoğun bir şekilde araştırılmaktadır (Bouazza, 2002).



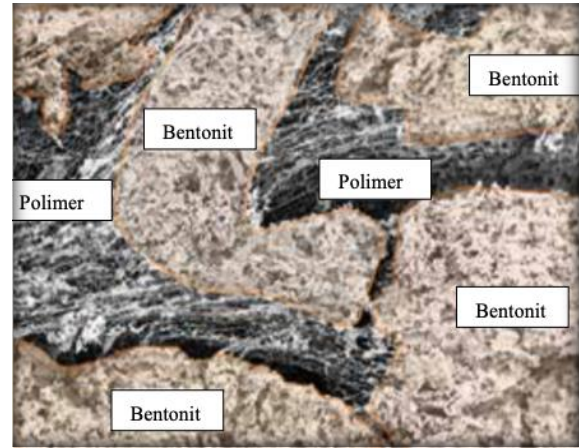
Şekil 2. Standart iğne ile delinmiş GCL ve lamine GCL (Ceto, 2017)

Geçtiğimiz on yılda, tasarım mühendisleri ve çevre ajansları örtü sistemlerinde sıkıştırılmış killere alternatif olarak geosentetik kil örtülerin (GCL) veya bazı durumlarda atık toplama tesislerinin alt kaplamalarının genellikle çok düşük olması nedeniyle artan bir ilgi gösterdiği hidrolik iletkenlik (10^{-10} m/s) ve nispeten düşük maliyetlidir. Çevresel uygulamadan ayrı olarak örneğin katı atık muhafazasında astar veya kaplama sistemlerinin bir bileşeni olarak kullanıldığında GCL'ler ayrıca nakliye tesislerinde (yollar ve demiryolları) çevre koruma bariyerleri olarak ve yer altı katmanlarının kazara dökülmelerden ve trafik kazalarından kimyasal sızıntılardan kirlenmesini en aza indirmek gibi geoteknik uygulamalarda kullanılır. GCL'ler ayrıca yer altı suyu koruması için yakıt istasyonlarındaki yer altı depolama tanklarında ikincil örtüler olarak ve kanallar, göletler veya yüzey su tutmaları için tekli örtüler olarak kullanılır (Bouazza, 2002).

GCL'nin ana avantajları; sınırlı kalınlık, alttaki toprak veya atığın farklı çökelmeleriyle iyi uyum, kolay kurulum ve düşük maliyettir. Diğer yandan bu bariyerin sınırlı kalınlığının neden olabileceği sorunlar;

- Mekanik kazalara karşı savunmasızlık,
- Sınırlı emme kapasitesi,
- Altta yatan bir zayıflatma mineral tabakası sağlanmadıysa yaygın yayılmada beklenen önemli bir artıştır. Ayrıca saf su yerine bazı sızıntı suyu türleri ile sulandırıldığında bentonit hidrolik bariyerin veriminin düşmesine neden olacak küçük bir şişme gösterecektir (Bouazza, 2002).

GCL'ler atık suyun yer altı suyuna sızmasıyla altta yatan toprak ve yer altı sularının kirlenmesini önlemek için belediye/endüstriyel katı atık depolama sahalarında, kül havuzlarında, rezervuar inşaatlarında, kanalizasyonda, yağmur suyu depolama su çukurlarında, tünel sisteminde vb. sızıntı önleyici astar olarak kullanılır. GCL'ler su sızmasına karşı bir hidrolik bariyer veya su geçirmez katman oluşturması nedeniyle alt örtüler ve son kaplamalar olarak yaygın bir şekilde kabul görmektedir (Kommu ve Asadi, 2020). GCL tasarım hususları şunları içerebilir: hidrolik iletkenlik ve uyumluluk, ara yüz kesme dayanımı, iç kesme dayanımı, donma/çözülme ve ıslak/kuru döngüleri ve difüzyondur (Salemi vd. 2016).



Şekil 3. Bentonit ve polimerin görünümü (Bouazza, 2002)

Tablo 1. Geosentetik kil örtüler (GCL'ler) ve sıkıştırılmış kil örtüler (CCL'ler) arasındaki potansiyel eşdeğerlik (Bouazza, 2002)

Kategori	Değerlendirme kriteri	GCL'nin CCL'ye eşdeğerliği			
		GCL muhtemel en üstün	GCL muhtemel en eşdeğeri	GCL muhtemel en daha düşük	Site veya ürüne bağlı
İnşaat sorunları	Yerleştirme kolaylığı	X			
	Malzeme mevcudiyeti	X			
	Delinme direnci			X	
	Kalite güvencesi	X			
	İnşaat hızı	X			X
	Alt zemin koşulu	X			
	Su gereksinimleri				X
	Hava kısıtlamaları				
Kirletici taşıma sorunları	Zayıflatma kapasitesi			X ^a	X
	Gaz geçirgenliği				X
	Çözünen akı ve geçiş zamanı	X ^b		X ^a	
Hidrolik sorunlar	Uyumluluk	X ^b		X ^a	
	Konsolidasyon suyu	X			
	Sabit su akışı		X		
	Su geçiş zamanı				
Fiziksel/Mekanik sorunlar	Taşıma kapasitesi				X
	Erozyon				X
	Dondur-çöz	X			
	Yerleşim-toplam		X		
	Yerleşim-diferansiyel				
	Eğim stabilizesi				X
	Islak kuru	X			

(a) Yalnızca toplam değişim kapasitesine dayanmaktadır, TEC.

(b) Yalnızca geomembranlı GCL'ler için.

2.1. Kil Malzemesi

Sodyum Bentonit/Kalsiyum Bentonit; Bentonit adını Amerika da keşif ve kullanım yeri olan Fort Benton'dan alan oldukça genişleyebilen bir kil mineralidir. Bentonitin çoklu özellikleri hidrasyon, şişme, su adsorpsiyonu ve viskozitedir. Bu da onu çeşitli endüstriler için çoklu kullanım ürünü yapmaktadır. Öncelikle iki çeşit bentonit mevcuttur. Bunlar; sodyum bentonit (yüksek şişme, jelleşme ve termal dayanıklılık) ve kalsiyum bentonit (daha az şişme ile ancak dünya çapında daha yaygın olarak bulunur). Bentonit kilinin hidrolik özellikleri başka katkı maddelerinin de eklenmesiyle güçlendirilmiştir (Kommu ve Asadi, 2020).

Bentonit çeşitli minerallerin bir karışımıdır ve baskın minerali de smektit kilidir. Bentonite şişme özellikleri ve düşük hidrolik iletkenlik kazandıran simektittir (başlıca montmorillonit). Smektit, sodyuma göre iki değerlikli katyonlar (esas olarak kalsiyum ve magnezyum) için daha güçlü bir termodinamik etkiye sahip olduğundan bir GCL'nin bentoniti GCL'nin temas ettiği sıvılarda mevcutsa sodyumunu diğer katyonlarla değiştirebilir (Guyonnet vd. 2009). GCL'lerin hidrolik özellikleri ve iletkenliği çoğunlukla kullanılan kilin kalitesine bağlı olarak değişir. Bentonit; yüksek oranda adsorbe eden volkanik külden oluşur (genellikle sodyum bentonit). GCL'lere kendine özgü özelliklerini veren doğal

olarak bulunan bir granüler kildir. Bentonit hidrofilik kapasitesi nedeniyle suya, sızıntı sularına, sıvılara veya neme maruz kaldığında hızla hidratlanır. Bentonit GCL'nin bariyer kaplamasını hidrasyon yoluyla "kendini iyileştirmesi" delikleri onarır ve sızıntıyı önler. Bentonit üzerinde yapılan laboratuvar testlerinde araştırmacılar tarafından 35-75 milimetre boyutuna kadar olan deliklerin kendi kendini onararak GCL'leri sızıntıya karşı etkili bir bariyer sistemi haline getirdiğini göstermiştir. Bentonitin karakteristik özellikleri; GCL'yi sızıntılara karşı etkili bir bariyer olarak tanımlayan ana kriteri onu geçirimsiz kılan hidrolik iletkenliğidir. Hidrolik iletkenliğini, hasar direncini ve belirli depolama sahalarıyla ilgili diğer özelliklerini sağlamak için bariyer sistemlerini seçmeden önce GCL'lerin teknolojisi dikkate alınmalıdır. Altta yatan kili (çoğu durumda bentonit) hidratlamak için GCL'lerin önce toprak altı suyunu alarak belirli bir miktara kadar doymasına izin verilmelidir. Bu bariyer performanslarını kolaylaştırır ve kurulumdan sonra atık su yönetimi işlevine sokulmadan önce yapılmalıdır (Kommun ve Asadi, 2020).

Sızıntı sularından gelen potasyum (K), Magnezyum (Mg) veya Kalsiyum (Ca) gibi katyonlara maruz kaldığında GCL katmanının Sodyum (Na) kısmında bir iyon değişimi meydana gelebilir. Bu nedenle GCL'lerin hidrolik iletkenlik performansını etkileyerek şişme kapasitesi olumsuz etkilenmektedir (Kommun ve Asadi, 2020). Sodyum bentonit genellikle suya maruz kaldığında doğal hacminin birkaç katı şişebilme özelliği ile ayır edilir.

Tablo 2. Bentonitin kimyasal bileşimi (Von Maubeuge vd. 2014)

Bentonitin kimyasal bileşimi	
SiO ₂	72,3
Al ₂ O ₃	11,1
Na ₂ O	1
K ₂ O	0,5
CaO	3,1
Fe ₂ O ₃	2,8
MgO	1,1
LOI	6,03

Tablo 3. Sodyum bentonit için bentonit gereksinimleri (hidrolik iletkenlik $<5 \times 10^{-11}$ m/s) (Von Maubeuge vd. 2014)

Gereklilik	Standart	Değer
Birim alan başına kütle	ASTM D5993	$>3.500 \text{ g/m}^2$ (% 10 nem içerik)
Şişme indeksi	ASTM D5890	24 ml
Sıvı kaybı	ASTM D5891	$<18 \text{ ml}$
Enslin Neff	DIN 18132	$>550 \%$
Metilen Mavisi içeriği	CUR 33	$>300 \text{ mg/g}$

GCL'lerin inceliği ve tipik olarak sıkıştırılmış kil örtülerin yerini almaları amaçlanmasından dolayı GCL'lerde kullanılan bentonit yüksek kalitede olmalıdır (Bouazza vd. 2006). Doğal sodyum bentonit GCL'lerde tercih edilen malzemedir. Doğal sodyum bentonitler yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nin Wyoming Güney Dakota ve Montana eyaletlerinde bulunan geniş yataklarda ve Yunanistan, Türkiye, Hindistan ve İran'daki birkaç genel olarak izole edilmiş yataklarda bulunur. Bu nedenle kalsiyum bentonitin sodyum aktivasyonu (değiştirilebilir kalsiyum katyonlarının sodyum iyonları ile değiştirildiği) GCL'lerde yaygın bir materyaldir. Sodyum aktivasyonu genellikle bentonitin şişme, dispersiyon, hidrasyon ve jelleşme özelliklerini artırmak için yapılır. Normal Ca²⁺ formunda alt optimal özelliklere sahip olacaktır. Genelde bentonitlerin yüksek şişme ve iyi dağılması daha düşük boşluk oranları ile ilişkilidir ve bu da daha düşük hidrolik iletkenlikle sonuçlanır. Unutulmamalıdır ki birçok GCL sodyum ile aktive olan bentonitlerden ziyade "sodyum bentonitler" olarak pazarlanmaktadır. Kalsiyum bentonit de GCL'lerde kullanılmıştır ancak kalsiyum bentonitin hidrolik iletkenliği sodyum bentonitinkinden yaklaşık bir derece daha yüksek olduğundan bunlar yaygın olarak kullanılmamaktadır. Kullanıldıkları yerde kalsiyum bentonit içeren GCL'ler tipik olarak optimum altı performansın üstesinden gelmeye yardımcı olmak için sodyum bentonitli GCL'lere göre birim alan başına çok daha büyük bir kütleye sahiptir (Bouazza vd. 2006).

2.2. Bentonitin Su Potansiyeli

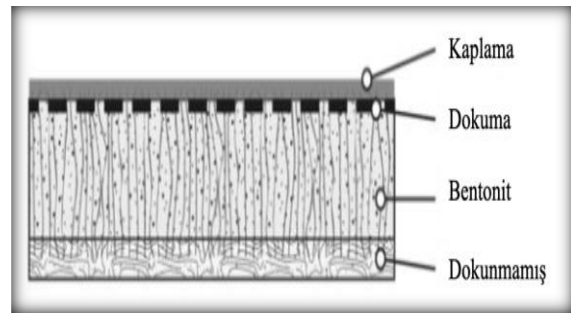
Su potansiyeli topraktaki kılcal basınç (emme) ile toprak hacimsel su içeriği veya doygunluk derecesi arasındaki ilişki ile tanımlanabilen temel bir hidro-fiziksel toprak özelliğidir. Bu ilişki aynı zamanda toprak suyu karakteristik eğrisi (SWCC) olarak da adlandırılır ve doymamış toprakların davranışını yöneten temel kurucu ilişkidir. Toplam su potansiyeli, ozmotik potansiyel, matrik potansiyel, yerçekimi potansiyeli, basınç potansiyeli ve aşırı yük potansiyelini içerir. Bununla birlikte matrik potansiyel, çoğu doymamış topraklardaki en büyük bileşendir. Bu nedenle normalde ölçülen su potansiyeli matrik potansiyeldir. Topraktaki su potansiyeli özelliklerinin bilinmesi topraktaki infiltrasyon, drenaj çözünen madde hareketi ve bitkiler için su mevcudiyeti gibi birçok sürecin incelenmesi için gereklidir (Bouazza vd. 2006).

Bentonitin çevreden örneğin bozulmamış topraktan ve atmosferden su emme yeteneği çok yüksektir. Bir GCL'deki bentonit toprağa yerleştirilirse su yüksek potansiyelden düşük potansiyele doğru hareket ederken topraktaki su potansiyeline ve bentonite bağlı olarak ya topraktan suyu emebilir ya da toprağa su verebilir. Saf serbest suya sıfır su potansiyeli atanır ve doymamış topraklardaki suyun potansiyel enerjisi negatif değerlerde olur. Kuru bentonit son derece negatif bir su potansiyeline sahiptir ve toprak ile bentonit arasındaki su potansiyeli dengelenene veya dengeye ulaşıncaya kadar topraktan suyu emme eğilimindedir. Atık içindeki organik materyalin ayrışması nedeniyle ısıtılmış kompozit astardan genel olarak daha soğuk çevreleyen toprağa termal gradyanların varlığı GCL'lerde emme basıncı ve nem içeriği değişikliklerini de indükleyebilir. GCL'ler bir geotekstil katmanına veya katmanlarına bağlanmış ince bir bentonit katmanından oluştuğundan bunların su potansiyeli davranışları her iki bileşenin (bentonit ve geotekstil) su potansiyeli davranışının yanı sıra bunların bağlama yönteminin (örneğin iğne ile delme, dikiş yapıştırma, yapıştırıcı) işlevi olacaktır. Sonuç olarak toprak örtüsü veya alt bariyerdeki sıkıştırılmış kil astar ve GCL dengelenirken GCL su potansiyelindeki değişikliklere karşı savunmasız hale gelir. Bu nedenle su potansiyeli farklı iklim veya çalışma koşullarına maruz kalan bir GCL'deki bentonitin nem içeriğini tahmin etmek için de kullanılabilir. Ayrıca deneysel verileri sayısal modellemede bir temel olarak kullanmak için su karakteristik eğrisini sayısal olarak tanımlayan

temsili parametrelerin elde edilmesi gerekir (Bouazza vd. 2006).

2.3. Geosentetik Kil Örtüleri İçin Birim Alan Başına Bentonit Kütlesi Gereksinimleri

Kompozit astar sistemlerinin yaygın olarak kullanılmasından önce geomembranlar olarak kullanılması veya sıkıştırılmış kil örtülerin düzenli depolama temel örtüleri için tek hidrolik bariyer ve kapanışları yaygındır. Bu yaklaşım bazı durumlarda hala kullanılsa da CCL genellikle bir GCL bileşeni ile değiştirilir. Kil bileşeni için birden fazla seçenek olduğunda hangi ürünün projenin ihtiyaçlarını en uygun şekilde karşılayacağını belirlemek için seçeneklerin incelenmesi gerekir. Temel bir karşılaştırmadan bile önemli faydaların çoğu açıktır. GCL'ler tipik olarak kullanılarak geçirgenlik değeri veya indeks akı değerine dayalı olarak seçilir. ASTM D5887 ve/veya EN 16416 ancak genellikle bentonit kilinin birim alan başına kütlesini özellikle geçirgenlik oranının belirlenmesinde daha önemli bir rol oynar. Genellikle bir GCL'nin geçirgenlik değeri bir GCL'yi belirlemek için önemli bir değer olarak iyi bir performansa izin verip vermeyeceği kabul edilir. Bununla birlikte bentonit sızdırmazlık tabakasının su yükü, sınırlayıcı gerilmesi ve kalınlığı gibi koşullar bilinmeden bu değer anlamsızdır. Özellikle GCL'ler diğer mineral sızdırmazlık karşılaştırılırsa sistemleriyle sızdırmazlık sisteminden geçirgenlik değeri en önemlisidir (Von Maubeuge vd. 2014).



Şekil 4. Kaplamalı iğneyle delinmiş çok bileşenli bir GCL'nin tipik enine kesiti (Von Maubeuge vd. 2014)

Ayrıca açık bir şekilde artan kütle göstergesi akı ve geçirgenlik varyasyonu birim alan başına daha yüksek bentonit kütlesi ile biraz daha geçirgenliğin azalmadığını göstermiştir. Birim alan başına o kadar ve hemen hemen sabit kalırken indeks akı değeri yani geçirgenliği birim alan başına kütle arttıkça azalır.

Darcy yasası ile belirlenen geçirgenlik oranı saha performansı için en iyi göstergedir (Von Maubeuge vd. 2014).

Tablo 4. GCL'lerin özellikleri (Ghazizadeh vd. 2021)

Geosentetik kil örtülerin özellikleri				
Kategori	Karakteristik	GCL1	GCL2	GCL3
Genel	Soyulma mukavemeti (N/m) ^a	980	2180	3850
	Isıl işlem yöntemi	ISG	ISG	ISG
Geotekstil	Polimer tipi	PP	PP	PP
	Taşıyıcı geotekstil türü	ND	D	ND
	Örtü geotekstil türü	ND	ND	ND
	Taşıyıcı geotekstil kütle/alan (g/m ²) ^b	260	130	360
	Örtü geotekstil kütlesi/alan (g/230 m ²) ^b	230	230	280
Bentonit	Bentonit türü	Granül	Granül	Granül
	Alan başına bentonit kütlesi (g/m) ^c	4220	4910	5570

NOT:
 ISG = Isıl işlem görmemiş
 PP = Polipropilen
 D = Dokuma
 ND = Dokunmamış

(a) Üreticiler tarafından bildirilmiştir, ASTM D6496 / 6496M.

(b) 20 ölçüme dayalı, ASTM D5261.

(c) 20 ölçüme dayalı, ASTM D5993.

Tablo 5. Dokulu geomembranların özellikleri (Ghazizadeh ve Bareither 2021).

Dokulu geomembranların özellikleri			
Karakteristik	Standart	GM1	GM2
Üretim süreci	-	Yapılandırılmış	Yapılandırılmış
Polimer tipi ^a	-	LLDPE	LLDPE
Ortalama çekirdek kalınlığı (mm) ^a	ASTM D5994	1,5	1,5
Ortalama sertlik yüksekliği (mm) ^a	ASTM D7466	0,5	0,5
Sivri uç yoğunluğu (No. Sivri Uçlar/100 cm ²)	-	340	840

(a) Üreticiler tarafından bildirilmiştir

2.4. Geotekstil Bileşenleri

Bir GCL için birim alan başına geotekstil kütlesi incelendiğinde GCL'nin altta yatan taşıyıcı geotekstil bileşeni için birim alan başına kütlenin 300 ile 800 g/m² GCL geliştirmenin ilk günlerinde çok daha ağır olduğu görülebilir. Her durumda bu ürünün taşıyıcı tabakasına ince dokulu kumaş (yarık film dokuma) takviyesi eklenmiştir. Bu konsept (yarık film dokuma kullanımı) ince dokumasızlardan daha iyi bentonit kaybını önleyen bir ince dokuma ile güçlendirilmiş dokumanın bentonit kaybını daha iyi önlediğini gösteren yüksek hidrolik yüklemeyi simüle etmek için türbülans testlerinden geliştirilmiştir. Aynı nedenden ötürü bir üretici genellikle yarık filmli dokuma veya kanaviçe ile güçlendirilmiş dokuma olmayan geotekstilin aşağı eğimli olarak döşenmesini tavsiye eder. Genel olarak tüm bentonit ekstrüzyonunun iki olası nedeni vardır. Birincisi bentonitin basit şişme basıncı nedeniyle ince geotekstil bileşenlerinden bentonit ekstrüzyonudur. Bu durumda ekstrüzyon yüzey yağlanmasına neden olabilir ve EPA Cincinnati kesme testi çizimleri ile kanıtlandığı üzere bir geomembran gibi bitişik yüzeylere ve hatta topraklara arayüz sürtünme açısını azaltabilir. Bu tür bentonit ekstrüzyonu tipik olarak çok küçük miktarlarda bentonit ile sınırlıdır ve hidrasyonun ilk birkaç ayında gerçekleşir. Oluşturulan sadece yapışkan bir "film" olduğundan hidrolik iletkenlik üzerinde bir etki beklenmez (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

Bentonit ekstrüzyonunun ikinci kategorisinin daha yüksek hidrolik gradyanlar nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Bu durumlarda ekstrüzyon yalnızca alttaki katman çok gözenekli toprak, kaba kum veya çakıl olduğunda gerçekleşecektir. Ekstrüzyon alttaki bileşenin geotekstil veya geokompozit drenaj ağı gibi bir drenaj tabakası olduğu durumlarda da mümkündür. Bu nedenle alt zemin topraklarının ve geotekstillerin dikkatli seçimi tavsiye edilir. Gradyan tahrikli bentonit ekstrüzyonu bentonit incelmesine ve hatta hidrolik iletkenlikte bir artışa neden olabileceğinden doğrudan sonuçlara sahip olma eğilimindedir. Daha kalın dokumasızlar veya ince dokulu kumaş (yarık film dokuma) takviyeli taşıyıcı katmanlar açıklanan her iki durumda da bentonit ekstrüzyonunu önleyebilirken alt zemin olarak kumlu çakıl, kum veya kil, toprak alt sınıfları üzerine bir GCL yerleştirirken kullanılabilir. Standart GCL ürünlerinin hâlihazırda kullanılan geotekstil bileşenleri nonwoven bileşenler için 220 g/m² ve dokuma bileşenler için 110 g/m² aralığındadır. Birim alan başına bu kütle arayüzlerin kayma mukavemetini gerektiren kompozit astar uygulamaları ve tüm orta ile yüksek gradyan

uygulamaları için tolere edilebilir en düşük seviyeler olarak kabul edilebilir (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

Tablo 6. GCL'lerin geotekstillerinin özellikleri (Viana vd. 2011).

GCL'lerin geotekstillerinin özellikleri		
Özellik	Dokunmuş	Dokunmamış
Polimer tipi	Polipropilen	Polipropilen
Birim alan başına kütle (g/m ²)	110	350
Çekme mukavemeti (kN/m ²) (1)	10/10 (2)	17/14 (2)
Filtrasyon açıklığı boyutu (mm) (3)	NA (5)	1,2x10 ⁻⁵
Geçirgenlik (s ⁻¹) (4)	NA	1,31

- (1) ASTM D4595'e göre geniş şerit çekme testleri, (2) Soldaki sayı çözgü yönü boyunca gerilme mukavemeti, sağdaki sayı atkı yönü boyunca gerilme mukavemeti, (3) NF EN ISO 12956'ya göre, (4) ASTM D4491'e göre, (5) Mevcut değil.

2.5. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)

HDPE geomembranlar sentetik kauçuk veya plastikten yapılmış geçirimsiz ince film tabakalarıdır. Bunlar sızıntıya karşı oldukça dayanıklıdır ve geniş bir uygulama yelpazesine veya muhafaza kaplamasına ve son kapaklara sahiptir. HDPE petrolün termoplastik bir polimeridir ve borular için kullanıldığında alkaline veya polietilen olarak adlandırılır. HDPE geomembranlar bulunabilirliği ve nispeten düşük malzeme maliyetleri nedeniyle en yaygın şekilde kullanılmaktadır. UV, Ozon ve kimyasal direnç sağlayan mükemmel bir ikamedir ve daha geniş alanlarda bu tür uygulamalar için uygundur. Ürün montaj esnasında tarlalarda ısı kaynağı ile 22,5 m genişliğinde büyük rulolar halinde taşınmaktadır. Bu geomembranlar büyük açık kaplama projelerinde oldukça uygun maliyetli olmaktadır ve atık su arıtma tesisleri, lagünler, madencilik uygulamaları, çöplükler, kül havuzları için uygundur. HDPE kalınlığı 40–120 mil arasında değişmektedir. HDPE geomembranlar pürüzsüz, dokulu ve iletken yüzey kaplamalarıyla mevcuttur. Pürüzsüz HDPE katmanların kaymasına karşı yüksek sürtünme açısı düşük geçirgenlikle projeler için uygunken dokulu olanlar ise dik yamaçların astarlanması

için uygundur. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve türevi termogravimetri (TG/DTG) HDPE'nin termal stabilitesinde ve kristallik derecesinde bir artış ortaya çıkarmıştır (Kommu ve Asadi, 2020).

3. GCL'LERİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI (BOUAZZA, 2002)

3.1. Avantajları

- Hızlı kurulum, daha az vasıflı işçilik, düşük maliyet vardır.
- Düzgün kurulursa suya karşı çok düşük hidrolik iletkenlik vardır.
- Büyük farklı yerleşimlere dayanabilir.
- Kendi kendini iyileştirebilen mükemmel özellikleri vardır.
- Yerel toprakların mevcudiyetine bağlı değildir.
- Onarımı kolay donma/çözülme döngülerinin etkilerine karşı direnci vardır.
- Daha küçük kalınlıktan kaynaklanan daha fazla hava boşluğu bulunur.
- Saha hidrolik iletkenlik testi gerekli değildir.
- Sulu GCL etkili bir gaz bariyeridir.
- Sıkıştırılabilir alt tabaka üzerindeki aşırı yük baskısını azaltır.

3.2. Dezavantajları

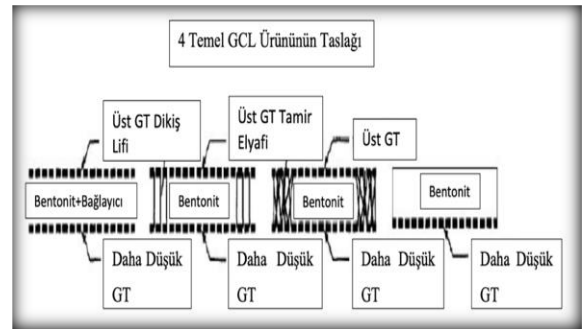
- Hidratlanmış bentonitin düşük kesme dayanımı (işlenmemiş GCL'ler için) vardır.
- GCL'ler kurulum sırasında veya sonrasında delinebilir.
- Yerleştirme sırasında olası bentonit kaybı olabilir.
- Gaz geçirgenliği düşük nemli bentonittir.
- Diğer malzemelerle ara yüzlerde potansiyel güç sorunları olabilir.
- Daha küçük sızıntı suyu zayıflatma kapasitesi olabilir.
- Olası pik sonrası kesme mukavemeti kaybı olabilir.
- Uygulanan normal gerilme altında bentonit kalınlığındaki azalma nedeniyle olası daha yüksek uzun vadeli akı uyumlu su kaynağı ile ön hidratlanmamışsa kirletici ile uyumluluk sorunları nedeniyle hidrolik iletkenlikte olası artış olabilir.
- Sıkıştırılmış kil örtülere kıyasla daha yüksek kirletici madde akışı olabilir.

- İyon değişimine yatkındır (sodyum bentonit içeren GCL'ler için).
- Düzgün örtülmemişse kurumaya meyillidir (en az 0,6 m toprak ile).

4. GCL'LERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

GCL'ler tipik olarak kilin hazır olmadığı veya hava boşluğunun korunmasının önemli bir faktör olduğu alanlarda kullanılır. GCL'ler GM'ler veya CCL'ler için mevcut olan uzun vadeli saha performans verilerine sahip değildir çünkü GCL'ler yakın zamanda geliştirilmiştir (1986) ve tipik olarak bir kompozit astar sisteminde GM ile birlikte kullanılırlar. Son yıllarda GCL'ler farklı türdeki sızıntı önleme projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu alanda kullanılabilirliği mühendisler tarafından giderek daha önemli kabul edilmektedir. GCL'lerin anti-sızıntı etkinliği mühendislik uygulama koşulları altında GCL'lerin Hidrolik iletkenliği ve sıvı geçirgenliği sırasında GCL'lerde bentonitin absorpsiyon yeteneği gibi en az iki yönü içerir. Dört temel GCL ürünü vardır. Bunlar;

- bentonit ve bağlayıcı maddeli iki GT/GM tabakası,
- bentonit ve dikiş elyafı iki tabaka GT/GM,
- iki tabaka bentonit ve tamir elyafı GT/GM,
- bentonitli bir GT/GM tabakası (bentonitin altında) vb. (Xiong vd. 2009).



Şekil 5. 4 Temel GCL ürününün taslağı (Xiong vd. 2009)

GCL'lerin sızıntı önleyici etkinliği en az üç yönü içerir;

- GCL'lerin hidrolik iletkenliği,
- Sıvı geçirgenliği sırasında GCL'lerde bentonitin absorpsiyon kabiliyeti,
- Sızıntı önleyici sistemde kullanıldığında GCL iç kesme dayanımı (Xiong vd. 2009).

Bentomat'ın kimyasal bileşenleri şunlardır: SiO₂ %57.23; Al₂O₃ % 18.45; Fe₂O₃ %57; FeO % 1.19; MgO %2.22; CaO %1.53; Na₂O % 2.55; K₂O % 0.61; H₂O⁺ % 4.30; H₂O⁻ % 7,9; Cr₂O₃ %0.0044; ZnO % 0.028; NiO % 0.0037; Li₂O % 0,0038; TiO₂ % 0.24; P₂O₅ % 0.034; Mn %0.016; Buring % 0.41; Toplam % 99.30 (Xiong vd. 2009).

Tablo 7. GCL katmanlarının bazı özellikleri (Rouhollah vd. 2013)

GCL katmanlarının bazı özellikleri	
Katmanın ticari adı	Bentomat
Bentonit malzemesi	Tane bentonit sodik
Bentonit kütlesi (g/m ²)	5000
Üst mat polimer tabakanın malzemesi	Dokuma polipropilen
Üst mat polimer tabakasının kütlesi (g/m ²)	110
Alt mat polimer katman malzemesi	Polipropilen dokuma değil
Alt mat polimer katman kütlesi (g/m ²)	220
Toplam katman kütlesi (g/m ²)	5330
Kuru durumda toplam tabaka kalınlığı (mm)	6

Tablo 8. GCL'nin özellikleri (Lu vd. 2018)

GCL'nin özelliklerinin özeti	
Montmorillonit içeriği	≥ ağırlıkça %80 (XRD)
Karbonat içeriği	≤ ağırlıkça %1-2
Bentonit formu	Doğal Na-bentonit
Parçacık boyutu	Toz haline getirilmiş (yani %80'i 75 µm elekten geçerek)
Katyon değişim kapasitesi	≥ 70 meq/100g (veya cmol/kg)
Serbest şişme indeksi	≥ 24 ml/2g
Sıvı kaybı	≤ 18 ml
Birim alan başına kütle, toplam GCL (@%0 Nem) (g/m ²)	4200
Toplam GCL kalınlığı (mm)	≥ 5,4 mm
Soyulma mukavemeti (N/m)	≥ 360
Statik delinme gücü (N)	1800
Hidrolik iletkenlik (m/s)	≤ 2*10 ⁻¹¹
Birim alan başına kütle, dokunmamış örtü (g/m ²)	≥ 200
Birim başına kütle, taşıyıcı dokuma (PP) (g/m ²)	≥100
Birim alan başına kütle, toz sodyum bentonit tabakası (@%0 Nem) (g/m ²)	3700
* Birim alan başına ölçülen GCL kütlesi (g/m ²)	4138 ile 4452
* 2 kPa Gerilme altında ölçülen kalınlık (mm)	5,8 ile 6,4
* Doğal gravimetrik su içeriği (%)	6,56 – 9,01

NOT: * laboratuvarında ölçülen değer anlamına gelir.

4.1. Hidrolik İletkenlik, Kimyasal Uyumluluk ve Difüzyon

GCL'lerin hidrolik performansı çoğu durumda bentonitin hidrolik iletkenliğine bağlıdır. Bunun tek istisnası inşaat sırasında dikildiği bir geomembranı içeren GCL'lerdir (örneğin bir kapak şeridi ile). Genel olarak farklı tipteki geotekstil destekli GCL'lerin suya hidrolik iletkenlikleri laboratuvarında uygulanan sınırlandırma stresine bağlı olarak yaklaşık 2×10^{-12} m/s ile 2×10^{-10} m/s arasında değişir. Bir GCL'nin hidrolik iletkenliği nemlendirme koşullarına ve nüfuz etme sırasında uygulanan etkili strese büyük ölçüde bağlıdır (Bouzza, 2002).

GCL sistemi düşük hidrolik iletkenliğe (yani düşük geçirgenliğe) sahip bariyerler sağlar. GCL ürünlerinin geçirgenliği bentonitin miktarı ve türü, geosentetik malzemesi, katkı maddeleri ve ürün organizasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Kommu ve Asadi, 2020).

GCL'ler genellikle su dışındaki sıvıları tutmak için kullanılır bu durumda GCL'lerin hidrolik iletkenliğinin kimyasal çözeltiler tarafından harekete geçirildiğinde değerlendirilmesi büyük önem taşır. Gerçek geçirgen sıvıya hidrolik iletkenlik genellikle numunenin içerilecek sıvı veya beklenen sıvıyı simüle eden bir sıvı ile nüfuz ettiği bir "uyumluluk testi" ile değerlendirilir. Su dışındaki sıvılarla hidrolik iletkenliklerini etkileyen GCL özellikleri şunlardır;

- agrega boyutu,
- montmorillonit içeriği,
- adsorbe edilmiş tabakanın kalınlığı,
- mineral bileşenin önhidrasyonu,
- boşluk oranıdır (Bouazza 2002).

Öte yandan hidrolik iletkenliği etkileyen geçirgenlikle ilgili ana faktörler şunlardır; tek değerlikli ve iki değerlikli katyonların konsantrasyonu (iyonik kuvvet, katyon ve anyon valansı, viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimidir). Bu testleri gerçekleştirirken nüfuz eden giriş ve çıkış suyundaki kimyasal bileşimin izlenmesi ve kimyasal dengeye ulaşıldığından emin olmak için numuneden yeterli permanent gözenek hacimlerinin (yani >10) numuneden geçtiğinden emin olmak önemlidir. Ayrıca bu tür testleri sonlandırmadan önce GCL yüksekliğinin sabit olması önerilir (Bouazza, 2002).

Hidrolik iletkenlik mineral esaslı gömleklerle ilgili olarak kullanılan en yaygın performans kriteridir. Nemlendirme koşulları, nüfuz etme sırasında uygulanan etkili stres, üretim yöntemi, boşluk oranı, bentonitin

kütlesi ve türü bir GCL'nin hidrolik iletkenliğini etkileyebilecek önemli faktörlerdendir. Son yıllarda GCL'lerin su dışındaki atık sularla kimyasal uyumluluğu incelenmiştir. Örneğin, yüksek kalsiyum içeren bir çözelti aslında yığın boşluk oranını artırabilir ve GCL'nin hidrolik iletkenliğini artırabilir (Lange vd. 2004).

Difüzyon, herhangi bir ters su akışı olmadığında bile bir çözünen maddenin daha yüksek konsantrasyonlu alanlardan daha düşük konsantrasyonlu alanlara kitlesel hareketle göçünü içeren kimyasal bir süreçtir (Bouzza vd. 2006).

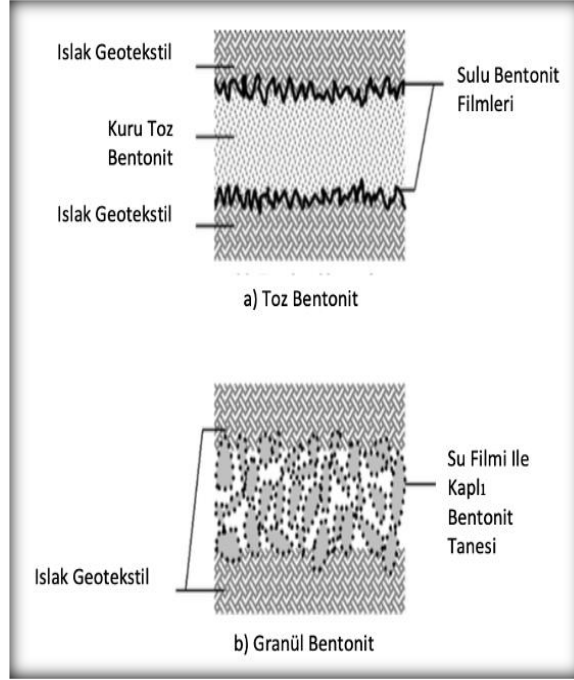
GCL'lerin maksimum hidrolik performansına ulaşma yeteneği doyumluk derecelerine bağlıdır. GCL'ler herhangi bir sıvı kirletici için bir engel astar sistemi olarak işlev görmek için tipik olarak su kullanılarak yeterince hidratlanmalıdır. Bentonit parçacıkları hidratlandıktan sonra şişecek ve birbirine yapışacaktır. GCL'lerin hidrasyon süreci toprak gibi su içeren alt zemin üzerine yerleştirildikten hemen sonra gerçekleşebilir. Alt zemin yeterli nem içeriğine sahip olduğu sürece GCL'lerin sulanması gerekli değildir. Hidrasyon işlemi sırasında GCL alt katmandaki suyu emecek, şişecek ve GCL'lerden su geçirmez hale getirecektir (Budihardjo vd. 2012).

4.2. GCL'lerin Hidrasyon Mekanizmaları ve Şişme Özellikleri

Bentonitin suya olan düşük iletkenliği öncelikle küçük partikül boyutundan, geniş yüzey alanından ve buna bağlı olarak düşük boşluk oranından kaynaklanmaktadır. Bunlar çeşitli kısa menzilli ve uzun menzilli hidrasyon mekanizmaları yoluyla gözenek suyunu adsorbe etme ve etkin bir şekilde hareketsizleştirme kabiliyetiyle sonuçlanır. Bu hidrasyon mekanizmalarını anlamak GCL uygulamaları için bentonitin genel hidrolik performansını daha iyi anlamak için bir temel sağlar (Bouzza vd. 2006).

GCL'lerin düşük seviyelerde hidrolik iletkenlik sağlamanın en baskın nedenleri çift katman etkisi ve ozmotik şişmedir. Çift katman etkisi genellikle kil parçacıkları arasında meydana gelirken şişmenin ozmotik fazı belirli bir smektit olgusudur. Genel olarak smektitler ve özellikle montmorillonitler su ile önemli etkileşime girebilirler. Katı-sıvı (mineral-gözenekli su) etkileşimleri dış partikül yüzeyinde ve kil minerallerinin şişmesi için ara katman yüzeylerinde de meydana gelir. Kil mineralinin yüzey alanı ve yüzey yükü özellikleri katı-sıvı etkileşimlerinin kapsamını ve aralığını belirler. Smektitin geniş özgül yüzey alanı genel sistem

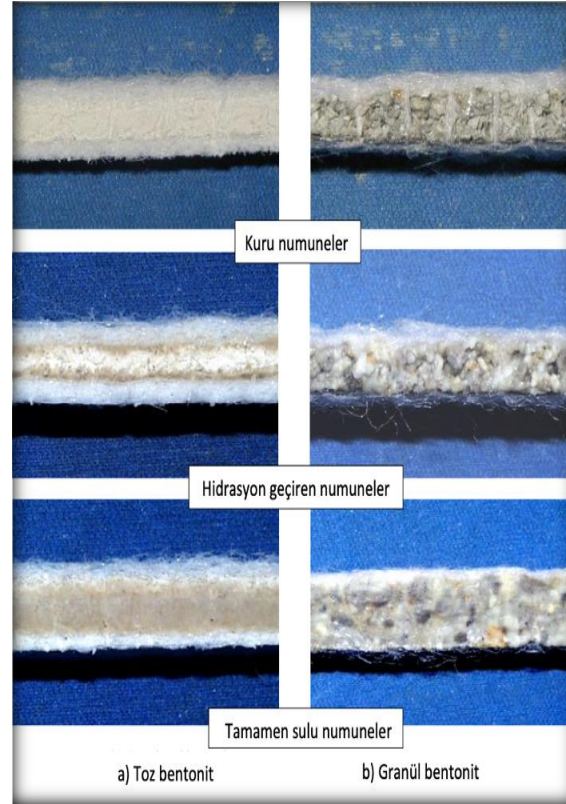
davranışını yönetmede katı-sıvı etkileşiminin öneminin açık bir göstergesidir (Bouzza vd. 2006).



Şekil 6. Bentonitin farklı formlarının hidrasyon mekanizmaları (Bouzza vd. 2006)



Şekil 7. Sulu dikişle bağlanmış GCL sınırlı bir şişme hidrasyonu için düz yüzeyi (solda) ve serbest bir şişme hidrasyonu için pürüzlü yüzeyi (sağda) gösterilmiştir (Bouzza vd. 2006)



Şekil 8. Toz ve granüler bentonitin hidrasyon mekanizmalarının gösterimi (Bouzza vd. 2006)

Geosentetik Kil Astar (GCL) sistemleri tehlikeli belediye atıklarının bertarafı için düzenli depolama alanlarında verimli hidrolik bariyerler olarak kullanılır. Geotekstillere birlikte bentonit malzemelerinin yüksek su tutma, adsorpsiyon ve şişme kapasiteleri nedeniyle GCL'lerin ana bileşenlerinden biri olarak seçilmiştir. GCL'ler yüksek bir toplam emiş gücünde bentonitler kullanılarak üretilir ve kurulur kurulmaz alt topraktan ve kapalı malzemenin sıvı alımı yoluyla hidratlanır. Bentonitler ıslanma üzerine önemli hacim değişikliği gösterebilirler. Hapsedilme stresine bağlı olarak boşluk oranı özellikle daha yüksek doygunluk derecelerinde emmede bir azalma ile önemli ölçüde artabilir. GCL'lerin hidrolik performansını iyileştirmek için GCL'ler düşük emme değerlerine ulaştığında hidrasyonun neden olduğu bentonitlerin şişmesi sınırlandırılmalıdır. Hidratlı boşluk oranındaki değişiklik bentonitlerin farklı hidrasyon seviyelerinde gözenek yapısı evrimi ile ilgilidir. GCL sistemlerinin uygulamalarına özel önem verilerek şişme sırasında bentonit malzemelerinin su tutma ve boşluk oranı gelişiminin daha iyi anlaşılması gerekmektedir (Seiphooi vd. 2016).

GCL'ler ilk önce toprak altından su alımı yoluyla belirli bir doygunluk derecesine hidratlaşmalıdır. Tipik olarak

hidrasyon süreci kurulduklarında başlar ve belediye atıklarının yerleştirilmesinden önce tamamlanmalıdır. GCL'lerin "üretildiği gibi" başlangıç durumundaki su içeriği genellikle düşüktür (%5-10 aralığında) ve bu nedenle bentonit bu aşamada çok yüksek toplam emiş (60-100 MPa aralığında) sahiptir. Su değişimi başlangıçta alt zeminde gerçekleştiğinden GCL'nin hidrolik dengesi bitişik zemin katmanlarının su içeriğine ve hidrolik özelliklerine (örneğin su tutma davranışı ve hidrolik iletkenlik) bağlıdır (Seiphooi vd. 2016).

GCL'lerin hidromekanik davranışını analiz etmedeki kilit noktalardan biri emme ve doygunluk derecesi arasında bir ilişki kurmaktır. Bu tür bir ilişki su tutma eğrisi olarak adlandırılır. GCL sistemleri için su tutma geniş bir toplam emme aralığında analiz edilerek hapsedilmenin etkisine ve boşluk oranına özel dikkat gösterilmelidir. Ayrıca bentonitin farklı emme değerlerinde şişme potansiyelinin hidratlı boşluk oranı açısından değerlendirilmesi önemlidir (Seiphooi vd. 2016).

4.3. Delinmeler, Bentonit İncelmesi, İç Erozyon, İyon Değişimi

GCL'ler kullanım ve kurulum sırasında meydana gelebilecek kazara delinmelere karşı hassastır. Bu bakımdan meydana gelen hasarın seviyesine bağlı olarak hidrolik performanslarından ödün verilebilir. Küçük penetrasyonların veya kusurların sağlam örneklerle kıyasla hasarlı numunenin hidrolik iletkenliğinde küçük bir artışla GCL'deki sodyum bentonit tarafından etkili bir şekilde kapatılabileceği gösterilmiştir. 30 mm çapa kadar açık deliklerin iyileşme kinetiği kusuru tamamen iyileştirmek için sadece 15 gün gibi kısa bir süre gerektiğini göstermektedir. Sodyum bentonit GCL'lerinin kendi kendini iyileştirme kapasitesinin yüksek olduğu tespit edilmiş olmasına rağmen son zamanlarda yayınlanan deneysel kanıtlar kendi kendini iyileştirme sürecinin iyon değişimi ile birleştirilirse bu kapasitenin engellenebileceğini göstermektedir (Bouazza, 2002).

Geotekstil destekli GCL'lerin hidrolik performansı malzeme içindeki bentonit kütlelerinin/alanının dağılımına da bağlıdır. Bentonit hidratlandıktan sonra çok düşük bir kesme dayanımına sahiptir. Bu durumda gerilme konsantrasyon aktiviteleri ve kalıcı yapısal yükler bentonitin yanal olarak sıkışmasına neden olabilir ve bu da daha yüksek bir sıvıya neden olabilecek kalınlıkta yerel bir azalmaya yol açabilir. Yerel bentonit yer değiştirmesini ve bunun sonucunda bir GCL'nin hidrolik performansı üzerindeki olası etkiyi önlemek için hidratlanmadan ve konsantre yüzey yüklerine maruz kalmadan önce bir GCL üzerine uygun kalınlıkta ve partikül boyutunda bir örtü toprağı yerleştirilmelidir. Bir GCL'yi örten çakıl gibi iri taneli malzemenin varlığı da stres konsantrasyonundan dolayı bentonit göçünün başka bir nedeni olabilir. Bununla birlikte hidrolik iletkenlik üzerindeki etkinin yüksek sınırlandırma geriliminde bile önemsiz olduğu bulunmuştur. Bir başka potansiyel stres konsantrasyonu kaynağı üzerini örten bir geomembran içindeki kırışıklıkların varlığıdır. Bunlar altta yatan bir GCL'deki bentonitin içine geçebileceği bir boşluk veya azaltılmış stres alanı yaratabilir. Alt sınıf seçimi GCL'lerin kurulumu için bir başka önemli husustur. Örtü toprağı gibi GCL'nin üzerine kurulduğu alt zemin de partikül boyutuna göre uygun olmalıdır (Bouazza, 2002).

Dahili erozyon süreci yüksek bir hidrolik eğimin varlığı nedeniyle ince partiküllerin hareketini içerir (tipik olarak sıvı muhafaza tesislerinde) (Bouazza, 2002).

4.3.1. İyonik Değişim

Çevreleyen topraktan bir GCL'nin sodyum bentonitine serbest bir kalsiyum veya magnezyum kaynağı varsa bentonit içinde bir iyonik değişim yaklaşık olarak 2 yıl gibi bir sürede meydana gelebilir. Bununla birlikte son yıllarda düzenli depolama alanlarını simüle eden çeşitli saha çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bentonitin iyonik değişiminin eğer düzenli depolama alanı uygun şekilde tasarlanmışsa bir GCL'nin performansını kritik bir şekilde etkilemediğini göstermiştir. Bu en az 0.75 m'lik bir minimum kaplama toprağı kalınlığını ve sızdırmazlık sistemine kök penetrasyonunun azaltılmasını içerir. Kentsel atıklar için düzenli depolama sahası kapakları durumunda tipik olarak bir HDPE geomembran GCL'nin üzerini kaplar ve bu nedenle bir kök bariyeri kuruma ve iyonik değişim koruması olarak işlev görür ve bu nedenle kapak sızdırmazlık sistemi performansını artırır. GCL bağımsız bariyer sistemi durumunda GCL'ler üzerindeki örtü toprağının hidrolik iletkenlik üzerindeki herhangi bir etkisinin yakından araştırılması veya artırılmış bir örtü zemini kalınlığının sağlanması tavsiye edilir (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

4.3.2. İç Bentonit Erozyon

Çöp sahaları için kompozit astar sistemlerinin bir parçası olarak ve göletler ve lagünler için tek astar olarak geosentetik kil örtülerin artan kullanımı iç erozyon potansiyeli ile ilgili soruları gündeme getirmektedir. Bu kısmen uygulamanın doğasından ve kısmen de GCL'lerin nispeten ince olmasından ve astarın üzerinde önemli bir sıvı derinliği varsa büyük hidrolik gradyanların meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Yetersiz bir şekilde filtrelenebilen killi topraklarla birleştirilmiş büyük hidrolik gradyanların varlığı dahili erozyon (yani ince parçacıkların kil astarından dışarı göçü) ve astarın olası hidrolik arızası için potansiyel yaratır. Nispeten az araştırma GCL'ler için alt sınıf gereksinimlerini ele almıştır ve kurulum özellikleri genellikle tüm GCL'ler için aynı koşulları rapor etmektedir. Bununla birlikte mevcut birçok farklı ürün göz önüne alındığında tüm ürünlere ortak bir spesifikasyon uygulamanın uygun olup olmadığı konusunda bazı sorular vardır (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

4.3.3. GCL'nin Dahili Erozyonu

GCL'ler bir çöp sahası için kompozit astar sistemi veya bir gölet ve lagün için tek astar olarak uygulamaları sırasında astar üzerinde biriken sızıntı suyu veya sıvının

neden olduğu büyük hidrolik gradyanla karşılaştıklarında dahili erozyon sergileme potansiyeline sahiptir. Birbirinden ayrılan ve akan su tarafından uzaklaştırılan bentonit parçacıklarının kaybı GCL'lerin performansını düşürebilir ve hidrolik iletkenliklerini artırabilir (Budihardjo vd. 2012).

GCL'ler kullanım ve kurulum sırasında meydana gelebilecek kazara delinmelere karşı hassas olduğu için meydana gelen hasarın seviyesine bağlı olarak hidrolik performanslarından ödün verilebilir. Küçük penetrasyonların veya kusurların sağlam örneklerle kıyasla hasarlı numunenin hidrolik iletkenliğinde küçük bir artışla GCL'deki sodyum bentonit tarafından etkili bir şekilde kapatılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca 30 mm çapa kadar açık deliklerin iyileşme kinetiği kusuru tamamen iyileştirmek için sadece 15 gün gibi kısa bir süre gerektiğini göstermektedir. Daha da önemlisi Didier ve ark. (2000b) kendi kendini iyileştirme alanının stabilitesinin hidrolik yüke bağlı olduğunu bulmuştur. Kendi kendini iyileştiren alanın arızasının hidrolik yükü 1 m'yi aştığında (10 kPa hapsedilme altında) meydana geldiği gözlemlenmiştir. Sodyum bentonit GCL'lerin kendi kendini iyileştirme kapasitesi yüksek olmasına rağmen deneysel kanıtlar kendi kendini iyileştirme süreci iyon değişimi ile birleştirilirse bu kapasitenin engellenebileceğini göstermektedir (Bouazza vd. 2006).

Geotekstil destekli GCL'lerin hidrolik performansı malzeme içindeki bentonit kütesinin/alanının dağılımına da bağlıdır. Bentonit hidratlandıktan sonra çok düşük bir kesme dayanımına sahiptir bu durumda gerilme konsantrasyon aktiviteleri ve kalıcı yapısal yükler bentonitin yanal olarak sıkışmasına ve su içeriği (%) kalınlıkta yerel bir azalmaya yol açar ve bu da bu konumlarda daha yüksek bir sıvı akışına neden olabilir. Yerel bentonit yer değiştirmesini ve daha sonra bir GCL'nin hidrolik performansı üzerindeki olası etkiyi önlemek için hidratlanmadan ve konsantre yüzey yüklerine maruz kalmadan önce bir GCL üzerine uygun kalınlıkta ve partikül boyutunda bir örtü toprağı yerleştirilmelidir. Bir GCL'yi örten çakıl gibi iri taneli malzemenin varlığı da stres konsantrasyonundan dolayı bentonit göçünün başka bir nedeni olabilir. Bununla birlikte hidrolik iletkenlik üzerindeki bu etkinin yüksek sınırlama geriliminde bile önemsiz olduğu gözlenmiştir. Bir başka potansiyel stres konsantrasyonu kaynağı üzerini örten bir geomembran içindeki kırışıklıkların varlığıdır ve bunlar altta yatan bir GCL'deki bentonitin içine geçebileceği bir boşluk veya azaltılmış stres alanı yaratabilir. Alt sınıf seçimi GCL'lerin kurulumu için bir başka önemli husustur (Bouazza vd. 2006).

5. GAZ GEÇİRGENLİĞİ VE DİFÜZYON

Gazın atık toplama tesislerine veya bu tesislerden kapak sistemlerine taşınması son zamanlarda büyük ilgi görmüştür. GCL'lerin kapatmanın bir parçası olarak giderek daha fazla kullanılmasıyla gaz performansları giderek artan bir incelemeye tabi tutulmuştur. Düzenli depolama sahalarında gaz göçü için birincil itici güç özellikle örtü sistemleri yoluyla atmosferik basınçtaki doğal dalgalanmalardan (barometrik pompalama) kaynaklanan basınç farklarıdır. Yüksek bir sızıntı suyu/su tablosu ve sıcaklık gradyanı da basınç farklılıklarına yol açarak gaz göçüne neden olabilir. Difüzyon yoluyla gaz hareketi moleküler etkileşimler nedeniyle de meydana gelebilir. Gaz karışımının bir bölgesinde diğerinden daha fazla yoğunlaştığında bu gazın daha az konsantre bölgeye yayılması muhtemeldir. Bu nedenle moleküller gazın kısmi bir basınç gradyanına veya konsantrasyon gradyanına yanıt olarak hareket eder. Bu sızıntı suyunun asitleşmesini önlemek için sülfidik minerallerin atmosferik oksijen ile temas etmemesi gereken atıkların ve maden çıkarılmış kayaların öğütülmesi için kaplama sistemlerinin performansındaki önemli bir konudur (difüzyon) (Bouazza, 2002).

Kapak sistemlerinin değerlendirme sürecinin bir parçası olarak GCL'lerin hidrolik özellikleri ana faktörler olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte gaz bariyerleri olarak performansları son zamanlarda giderek artan bir incelemeye tabi tutulmuştur. Gaz emisyonu ile ilgili büyük çevresel kaygılar nedeniyle çöp gazının kontrolü halk sağlığı ve güvenliğinin korunması için önemli bir konu haline gelmektedir. Diğer durumlarda örtüler atmosferdeki oksijenin aksi takdirde asit oluşturabilecek sülfidik atıklar gibi reaktif malzemelerle temas etmesini önlemek zorunda kalabilir (Bouazza vd. 2006).

Çöp sahası hücre gazı emisyonları ve koku kontrolü artık bir katı atık depolama alanı kapağı tasarlarken veya bir izin alırken dikkate alınması gereken faktörlerdir. Geçtiğimiz yıllarda gaz geri kazanım ve kullanma teknolojisi çöplük kapakları için önemli bir konu haline gelmiştir. Kompozit bir kaplama sisteminde (bir GCL'yi kaplayan geomembran) büyük miktarda gaz geçirgenliği konusunda daha az endişe vardır. Tek başına bir GCL bariyeri olması durumunda GCL'ler kapatma durumlarında sıkıştırılmış kile göre birçok avantaj sunar. Daha yüksek gerilim toleransı daha az kuruma ve çatlama potansiyeli ve yağış sızıntısının iyileştirilmiş kontrolüdür. Bir kapak bariyer sistemindeki bir GCL'nin normal yerinde nem içeriğinin ağırlıkça %80'den fazla

olacağı unutulmamalıdır (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

5.1. Avantajlı Gaz Akışı

Olumsuz akışta gaz toplam basınçtaki bir gradyana yanıt olarak hareket eder. Basıncı eşitlemek için bir gaz kütlesi daha yüksek basınçlı bir bölgeden daha düşük bir bölgeye hareket eder. Düzenli depolama sahaları bağlamında gaz göçü için birincil itici güç olarak özellikle örtü sistemleri yoluyla atmosferik basınçtaki doğal dalgalanmalardan (barometrik pompalama) kaynaklanan basınç farklarıdır. Düşen basınçlar yüzey katmanlarının yakınındaki gaz konsantrasyonunu artırarak çöp sahasından gazı çekme eğilimindedir. Tersine yüksek veya artan barometrik basınç atmosferik havayı çöp sahasına zorlama eğilimindedir. Yakın yüzeydeki toprak gazını seyreltir ve gazı çöp sahasının derinliklerine doğru sürükler. Sızıntı suyu/su tablası konumundaki veya sıcaklıktaki bir değişiklik de basınç farklılıklarına ve gaz göçüne neden olabilir. Yakın zamanda yapılan araştırmalar GCL'lerin gaz geçirgenliğinin hidrasyon işlemi sırasında üretim sürecine nem içeriğine ve aşırı yük basıncına bağlı olarak değişebileceğini göstermiştir (Bouazza vd. 2006).

5.2. Difüzyf Akış

Difüzyon yoluyla gaz hareketi moleküler etkileşimler nedeniyle oluşur. Gaz karışımının bir bölgesinde diğerinden daha fazla yoğunlaştığında gaz daha az konsantre bölgeye yayılacaktır. Bu nedenle moleküller gazın kısmi bir basınç gradyanına veya konsantrasyon gradyanına yanıt olarak hareket eder. Nihai örtülerin bazı uygulamaları belediye katı atık tesisleri veya kirlenmiş toprakların kapatılması için kullanılanların ötesinde özel hususlar gerektirir. Bu uygulamalar maden atıkları tesislerini içerir (örneğin, sülfütlü maden kayası ve atıkları veya uranyum değirmeni atıkları). Reaktif maden atıkları için örtüler altta yatan atığın oksidasyonunu en aza indirmek için su veya oksijen girişini engellemelidir. Süzülme sınırlandırılacak kapakları tasarlamak için geleneksel ilkeler kullanılabilir. Bununla birlikte oksijen taşınmasının sınırlandırılması özel hususlar gerektirir. Oksijen taşınması oksijen difüzyonunu engelleyen bir bariyer katmanı dahil edilerek sınırlandırılabilir. Yüksek doyumluk derecesine sahip toprak katmanları oksijen için sıvı faz difüzyon katsayısı gaz fazı difüzyon katsayısından daha düşük büyüklükte olduğundan oksijen difüzyonunu sınırlayabilir. Özellikle doyumluk derecesi arttıkça oksijen difüzyonu azalır (Bouazza vd. 2006).

5.3. Geosentetik Kil Kaplamaları Aracılığıyla Sıvı ve Gaz Akışını Etkileyen Faktörler

Bentonite eklenen olası yapıştırıcılara ek olarak geçirgenliğin daha da azaltılması için kompozit malzemeye çok ince polimer filmler (~0.10 mm kalınlığında) eklenmiştir. Bu tür filmler üretildiği durumda geçirgenliğini azaltmak için kapak geotekstilin üstüne veya altına yerleştirilir. Çok düşük hidrolik iletkenlik elde etmede farklı bir yaklaşım üretildiği haliyle geçirgenliğini azaltmak için başlık geotekstilini polimerle işlemektir. Moleküler yapıları içinde bentonit partiküllerini polimer modifiye etmek veya polimerleri plakaların dışına yapıştırmak da mümkündür. Bununla birlikte bu tür işlemler yaygın değildir ve şu anda GCL'lerin düşük hidrolik iletkenlik bileşeni tamamen bentonit tarafından sağlanmaktadır (Bouazza vd. 2006).

6. ŞEV STABİLİTESİ

Bir atık toplama tesisi astarı veya kaplama sistemi yalnızca sağlam bir hidrolik/gaz bariyeri sağlamalı aynı zamanda belirli bir projenin tüm aşamalarında (yani inşaat sırasında atığın yerleştirilmesi sırasında ve sonrasında) yapısal olarak stabil olmalıdır. Bu bağlamda kararlılık değerlendirmesi tasarım için kritik bir husustur. GCL'lerin şevlerde kompozit kaplamaların bir parçası olarak potansiyel kullanımı onları karmaşık uzun vadeli bir stres durumuna maruz bırakabilir. GCL'ler diğer geosentetiklere veya topraklara karşı yerleştirildiğinde birincil tasarım endişesi tesisin ömrü boyunca oluşabilecek kesme gerilimlerini iletmek için yeterince yüksek olması gereken ara yüz sürtünmesidir. Diğer bir endişe GCL'nin olası dahili başarısızlığıdır (bentonitte veya GCL'deki bentonit ve geosentetikler arasındaki ara yüzde). Kaplama sistemlerinin daha dikkatli bir tasarımına duyulan ihtiyaç astar ara yüzleri boyunca kayma yüzeylerinin neden olduğu son arızalarla vurgulanmıştır (Bouazza, 2002).

7. GCL'İN KENDİ KENDİNE İYİLEŞMESİ

Sızıntı suyu veya sıvı bariyerleri olarak çalışmak için hidrasyon, dahili erozyon ve kendi kendini iyileştirme gibi bazı temel faktörler GCL'lerin hidrolik iletkenlik performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Düzenli depolama astarı olarak uygulanması sırasında GCL'lerin hasarını tetikleyen ve sızdırmazlık performanslarını düşüren bazı durumlarla başa çıkabilir. GCL'lerin kalınlığı, homojen olmayan bir şekilde incelmeye neden olan statik basınçlara maruz kalır. Keskin malzemeler GCL'leri delebilir ve sıvı bariyeri olma kapasitesini azaltabilir. Anderson vd. rehidrasyon

sırasında bazı yapay delikler oluşturarak bentonitin kendi kendini iyileştirme özelliklerini araştırmış ve bentonitin 25 mm'ye kadar bir deliği kapatabileceğini ancak 75 mm'lik deliği doldurmayı başaramadığını bildirmiştir. Sivakumar Babu ve ark. 30 mm çapında bir deliği kapatmak için sadece 15 gün gerektiğini ancak geri kazanılan alanın dayanıklılığının sınırlı olduğunu ve hidrolik kafanın en fazla 1 m kadar su tutabildiğini bildirmiştir (Budihardjo vd. 2012).

GCL bileşenlerini bağlama yönteminin (dikişle bağlama veya iğne ile delme) GCL'lerin kendi kendini iyileştirmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu iddia edilmiştir. Geçirgenlik testi GCL'lerin şişme aşamasından ve kendi kendini iyileştirmesinden sonra da yapılmıştır. GCL'lere katı bir nesne yerleştirildiğinde hidrolik performansı üzerinde herhangi bir etkisi olmadan bir boşluğu kapatmayı da başarmıştır. GCL'lerin delindiklerinde veya herhangi bir çatlak oluştuğunda kendi kendini iyileştirme kabiliyetine sahip olduğu oldukça açıktır. Ek olarak iğneyle delinmiş ve dikişle bağlanmış GCL'ler yapışkan bağlama gibi diğer GCL bağlama yöntemlerinden daha iyi kendi kendini iyileştirme performansına sahiptir. GCL'lerin performansının hidrasyon dahili erozyon oluşumu ve kendi kendini iyileştirme gibi bazı faktörlere dayandığı özetlenebilir. GCL'lerin hidrasyonu GCL'ler belirli nem içeriğiyle alt zemin üzerine döşendikten hemen sonra başlayabilir. Hidrasyon sürecini etkileyebilecek günlük termal döngünün etkisini en aza indirmek için toprak gibi bir koruma tabakasının uygulanması da önerilmiştir. Ek olarak GCL'ler hidrolik iletkenlikte herhangi bir artış olmadan numuneye katı bir nesne zımbalandığında bir boşluğu tamamen kapatabilir (Budihardjo vd. 2012).

GCL'lerin fiyatı; geosentetik kil örtüler (GCL) proje ihtiyaçlarına göre farklı özelliklerde üretilebilirler. Dolayısı ile tek bir fiyatı yoktur. 2,5 Euro/m² ile başlayıp özelliklerine göre fiyatı artmaktadır. Fiyatı belirleyen en önemli etken ise malzeme içine konulan bentonitin birim ağırlığıdır. Türkiye'de birçok madende ve çöp toplama alanlarında geomembran ile birlikte ikincil bir yalıtım sağlamak amacı ile Geosentetik kil örtüler kullanılmaktadır. Türkiye'de de bu geokompoziti üreten firmalar mevcuttur.

8. GEOSENTETİK KİL ÖRTÜLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

8.1. Kesme Mukavemeti

Bir üreticinin kendi ürününü ürettiğinde özellikle elyaflara ek olarak termal olarak alt geotekstil bileşenine kilitlenmişse daha yüksek miktarda iğne delme işleminin iğnelenmiş elyafların katkısı nedeniyle GCL'de daha yüksek bir tepe kesme mukavemeti ile sonuçlanması mantıklıdır. Güçlendirilmiş bir GCL'nin kalınlığına nüfus eden iğneli lifler geotekstil yüzeyler farklı şekilde birbirinden uzaklaştıkça kesme mukavemetine katkıda bulunur. Düşük gerilmelerde lifler tarafından eklenen kayma mukavemeti miktarı liflerin geotekstillere ankracı veya gerilmesinden de etkilenebilir. İğneli takviye liflerinin katkısı tüm normal yükler için çok önemlidir. Ek olarak test koşulları kayma mukavemeti sonuçlarını büyük ölçüde etkileyebilir. Tasarımcılar yeterli ve tutarlı iğnelemeyi sağlamak için tipik olarak minimum bir soyulma mukavemeti belirlemelidir. Bir GCL'nin sıyrılma mukavemeti ASTM D6496 kullanılarak değerlendirilir. Ancak kesme testi için tüm koşulların belirtilmesi de önerilir (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

GCL'ler özellikle yamaçlarda iç kesme dayanımı çok önemlidir. Kısa vadeli iç kesme mukavemetinin belirlenmesi uzun vadeli iç kesme mukavemetine kıyasla kolaydır. GCL'ler eğimli arazilerdeki uzun vadeli uygulamalar örneğin çöplük kapak contaları için son zamanlarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Katman yapısının temas düzlemlerindeki kesme dayanımının yanı sıra GCL'nin uzun vadeli iç kesme dayanımını bilmek gereklidir. Bu GCL'nin dahili arızasının bir sonucu olarak uzun vadede toplam eğim yapısının kırılmasını önleyebilir. Geokompozit GCL'deki bentonit tabakası çok düşük bir kesme dayanımına hidratlı bentonitin $\phi = 5$ ile 7° 'lik bir sürtünme açısına sahiptir. Buna göre GCL tipine bağlı olarak iç kesme mukavemeti dikiş (form-kapalı), iğneleme (gerdirme) veya yapıştırma (yapıştırıcı) ile artırılır. Uzun süreli teğet yük altında GCL'nin davranışı malzemeye ve güçlendirme türüne, sürtünme eğilimine, kullanılan liflerin ve ipliklerin uzun vadeli direncine bağlıdır. Önceden dahili uzun vadeli kesme mukavemeti azaltma faktörleri ile birlikte kısa vadeli kesme kutusu testleri veya devirme plakası testlerinin sonuçlarından tahmin ediliyordu. Mevcut bilgi birikimimizle kayma sünme testleri kullanılarak GCL'nin uzun vadeli izin verilen kesme yükü hakkında sağlam ve güvenilir bir tahmin yapmak mümkündür. GCL'lerin uzun vadeli

kesme davranışına ilişkin hiçbir ifadenin yalnızca kısa süreli kesme testlerinden mümkün olmadığı açıktır. Eğimli plakalarla yapılan uzun süreli testler veya saha testleri bile yardımcı olmayacaktır. Testler zorlanan bir kesme sürünme hatasıyla gerçekleştirilmelidir. Bu geosentetik takviye malzemesi için standart uygulamada olduğu gibi GCL'lerin uzun vadeli kesme dayanımı için bir tahmin üretmesini mümkün kılar. İlmikle bağlanmış bir GCL her biri 1.000 saatin üzerinde olan 11 farklı testte 20 kPa'lık normal bir gerilimde güç kontrollü kayma sünme testlerinde çeşitli teğetsel gerilimlere tabi tutulur. Sünmeye bağlı uzun vadeli kayma mukavemeti, çekme sünme testlerinden bilinen (ve tanınan) ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak belirlenir (Zanzinger ve Alexiew, 2000).

Hidratlanmış bentonit oldukça sıkıştırılabilir ve özellikle düşük etkili gerilim altında çok düşük kesme dayanımına sahiptir (Shan ve Chen, 2003).

Geotekstil destekli geosentetik kil örtülerin hidrolik performansı bentonitin kalitesine, su içeriğine ve birim alan başına kütesine (kütle/alan) ve bentonitin ürün içindeki dağılımına bağlıdır. Bentonit hidratlandıktan sonra çok düşük bir kesme dayanımına sahiptir ve bu durumda gerilim yoğunlaştırma faaliyetleri ve kalıcı yapısal yükler bentonitin yanal olarak sıkışmasına neden olabilir bu da kalınlıkta yerel bir azalmaya neden olabileceğinden dolayı bu yerlerde daha yüksek sıvı akışı oluşur (Salemi vd. 2016).

Düşük hidrolik iletkenlik ve kendi kendini iyileştirme kapasitesinin yanı sıra GCL ürünlerinin iç kesme mukavemeti özellikle hidratlandığında bentonitin düşük kesme mukavemeti nedeniyle şevlerde kaplama sistemlerinin tasarımında çok önemlidir. Bir GCL'nin iç kayma mukavemeti bentonit kesme mukavemetine ve kaplamasını ve taşıyıcı tabakalarını sabitlemek için kullanılan liflerin mukavemetine ve ayrıca kullanılan imalat işlemine (dikiş veya iğne delme) bağlıdır (Viana vd. 2011).

Bazı malzemeler GCL maliyetini düşürmenin bazı ilgili özelliklerini iyileştirmenin ve atık malzemeler söz konusu olduğunda bu tür malzemeler için daha iyi ve çevre dostu hedef sağlamanın bir yolu olarak bentonite karıştırılabilir. Örneğin bentonite ince kum karışımı düşük hidrolik iletkenliğinden ödün vermeden iç kesme mukavemetini deliklere ve kesilmelere karşı direncini artırabilir. Bununla birlikte imalat süreci ve maliyetleri bentonite karıştırılan kumun varlığından etkilenebilir. Ayrıca alternatif GCL'nin genişletilebilirliği ve dolayısıyla geçirgenliği genişlemeyen bir materyalin

eklenmesi nedeniyle etkilenebileceğinden uygun bir şekilde değerlendirilmelidir (Viana vd. 2011).

GCL'lerin iç kesme mukavemeti hidratlanmış sodyum bentonitin düşük iç kesme mukavemeti dikkate alınarak dikişli bağlama ve iğne delme adı verilen süreçlerle artırılır. İğne ile delme işlemi üstteki dokumasız geotekstilden bir dizi elyaf bentonit tabakasından delinir ve alt dokuma veya dokuma olmayan taşıyıcı geotekstil içine dolanır (Ghazizadeh ve Bareither, 2021).

GCL'ler kesme yüklerine karşı dirençlerini artırmak için yaygın olarak polipropilen (PP) liflerle güçlendirilir. Eğimlerin tasarımında kayma direnci sıklıkla kullanıldığından donatının uzun vadeli özellikleri eğimin hizmet ömrünü etkileyen belirleyici faktör olabilir. Bu nedenle güçlendirilmiş GCL'lerin uzun vadeli davranışını anlamak önemlidir. Güçlendirici lifler için iki olası kırılma mekanizması sürünme kopması ve oksidasyondur. Yapılan testler sonucunda GCL'ler için ömür tahmini 560 yıla çıkmıştır (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

Geotekstil destekli GCL'lerin hidrolik performansı malzeme içindeki bentonit kütesinin/alanının dağılımına da bağlıdır. Bentonit hidratlandıktan sonra çok düşük bir kesme dayanımına sahiptir bu durumda gerilme konsantrasyon aktiviteleri ve kalıcı yapısal yükler bentonitin yanal olarak sıkışmasına neden olabilir. Bu da daha yüksek bir sıvıya neden olabilecek kalınlıkta yerel bir azalmaya yol açabilir (Bouazza, 2002).

GCL'ler diğer geosentetiklere veya topraklara karşı yerleştirildiğinde birincil tasarım endişesi tesisin ömrü boyunca oluşabilecek kesme gerilimlerini iletme için yeterince yüksek olması gereken ara yüz sürtünmesidir. Diğer bir endişe GCL'nin olası dahili başarısızlığıdır (bentonitte veya GCL'deki bentonit ve geosentetikler arasındaki ara yüzde). Kaplama sistemlerinin daha dikkatli bir tasarımına duyulan ihtiyaç astar ara yüzleri boyunca kayma yüzeylerinin neden olduğu son arızalarla vurgulanmıştır (Bouazza, 2002).

Nem alt zemin toprağı ve agrega katmanlarını zayıflatarak bir kaplama yapısına zarar verir. Bu da malzemenin daha düşük kesme mukavemetine ve yüklenme/boşaltma döngülerini sürdürmek için yetersiz alt zemin taşıma kapasitesine neden olur (Elseifi vd. 2001).

8.2. Kayma

Hem iğneli lifler hemde bentonit ile ilişkili polimerler uzun süreli yüklemelere maruz kaldıklarında deforme olabilirler. Ara yüz kesmesi tasarım için bir GCL'nin iç kesme mukavemetinin yanında dış yüzeyleri ve bitişik malzemeler arasındaki ara yüzeylerin yanı sıra diğer bitişik astar bileşenlerinin diğer tüm ara yüzleri ve bunların iç kesme mukavemetinin de dikkate alınması gerektiği açıktır. Zirveye karşı artık mukavemet GCL'nin tepe noktasını mı yoksa kalan mukavemetini mi kullanarak tasarlanacağı sıklıkla tartışılır. GCL türü genel sistem davranışı ve GCL'nin kullanılacağı özel koşullar dikkate alınmalıdır. Tasarım GCL ürününün iç mukavemetini dış yüzeyleri ile bitişik malzemeler arasındaki ara yüzleri hem kısa hem de uzun vadeli koşulları dikkate alan diğer bitişik kaplama bileşenlerinin ara yüzlerini ve diğer kaplama bileşenlerinin iç kuvvetlerini dikkate almalıdır. Uygulama aynı zamanda tasarım gücü değerlerinin seçimini de etkileyecektir. Tipik olarak bitişik malzemelerle güçlendirilmiş bir GCL'nin tepe ara yüz gücü GCL'nin tepe dahili gücünden daha azdır. Bu malzemeler sızdırmazlık sistemini oluşturmak için birbirine sıkıştırılırsa ve sistemi bir kesme gerilimine maruz bırakılırsa uygulanan kesme gerilimi en zayıf malzemenin veya ara yüzün tepe kuvvetini aştığında kayma hatası meydana gelecektir. Başarısızlık başladığında yer değiştirme o kayma düzlemi boyunca devam edecektir. En düşük pik gücü kullanan tasarım ara birimlerin ve malzemelerin pik gücünün zamanla değişmediğini varsayar (Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014).

Kesme testlerinden elde edilen veriler birkaç saat içinde elde edilir. Gerilimdeki polimerik malzemelerin kısa vadeli gerilme mukavemetlerinden daha düşük gerilimlerde sünme sırasında başarısız olabileceği bilinmektedir. Yaşlanmada da meydana gelebilir. Güçlendirilmiş zemin uygulamalarında malzemelerin tepe gerilme mukavemetine indirgeme faktörleri uygulanarak yerleştirilen polimerik malzemelerin sürünmesi ve yaşlanması ele alınır. Toprağın veya atığın ağırlığı altındaki katmanlar üzerinde bir aşağı kayma kuvveti oluşturacaktır. Geomembranlar ve GCL'ler gibi geosentetikler olarak hizmet edebilir tercihi bir kayma düzlemidir. Bu durumlarda zorluk itici gücün astarı sabit tutan dirençli kuvvetlerden daha büyük olmamasını sağlamaktır. CCR uygulamaları için iki tür şev stabilitesi değerlendirmesi önemlidir. Atık kütesinin astar sisteminin tabanı boyunca kaymasının değerlendirildiği küresel stabilite ve astar sisteminin

üstündeki ince örtü toprak tabakasının kaymasının olduğu kaplama stabilitesi değerlendirilmiştir. Her iki tür şev stabilitesi değerlendirmesi şev geometrisinin atıkların birim ağırlıklarının ve kesme dayanımlarının toprakların ve astar malzemelerinin gözenek basınçlarının ve inşaat araçları veya sismik olaylar gibi harici yüklerin anlaşılmasını gerektirir. GCL'leri değerlendirirken GCL'lerin dâhili ve ara yüz kesme özellikleri de dikkate alınmalıdır (Athanasopoulos, 2011). GCL'nin iç kayma mukavemeti bentonit kesme mukavemetine ve kaplamasını ve taşıyıcı tabakalarını sabitlemek için kullanılan liflerin mukavemetine ve ayrıca kullanılan imalat işlemine (dikiş veya iğne delme) bağlıdır (Viana vd. 2011). İlmikle bağlanmış bir GCL her biri 1.000 saatin üzerinde olan 11 farklı teste 20 kPa'lık normal bir gerilimde güç kontrollü kayma sünme testlerinde çeşitli teğetsel gerilimlere tabi tutulur. GCL'nin kayma sürünme hatası elde edilmemiştir. Sünmeye bağlı uzun vadeli kayma mukavemeti çekme sünme testlerinden bilinen (ve tanınan) ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak belirlenir.

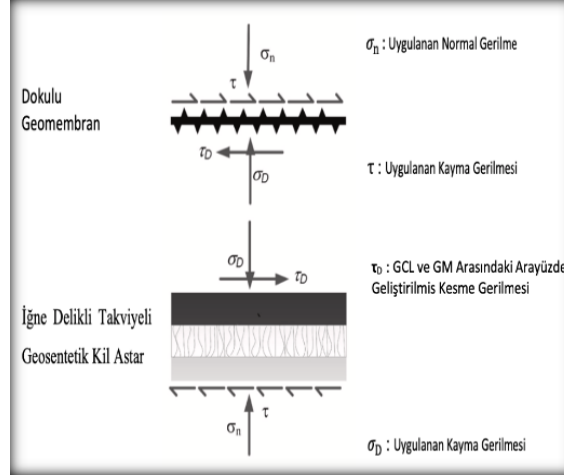
8.3. Geosentetik Kil Astar ve Dokulu Geomembran Kompozit Sistemlerin Başarısızlık Mekanizmaları

GCL'ler hidrolik performansları, ekonomik avantajları, kurulum kolaylığı ve kendi kendini iyileştirme özellikleri nedeniyle atık tutma bariyer sistemlerinde kullanılmaktadır. Muhafaza sistemlerinin yan eğimli ve taban astar sistemlerinde GCL'ler genellikle dokulu geomembranlarla (GM) birleştirilir. Bir GCL/GM kompozit sistemi bariyer sisteminin arızalanmasını önlemek için GCL içinde ve GM ile GCL'nin geotekstili arasındaki ara yüz boyunca dahili olarak direnç gösterilmesi gereken kesme ve normal gerilimlere maruz kalır. Burada GCL iç kesme dayanımı ve GCL/GM ara yüz kesme dayanımının minimum değeri olarak tanımlanan GCL/GM kompozit sisteminin kritik kesme dayanımının (τ_{cr}) belirlenmesi bariyer sistemlerinin tasarımı için önemlidir.

GCL'lerin iç kesme mukavemeti genellikle iğne ile delme yoluyla artırılır bu sayede dokumasız örtü geotekstilinden elyaflar bentonit tabakasından delinir ve GCL'nin taşıyıcı geotekstiline dolanır. İğne ile delinmiş yeniden sıkıştırılmış GCL'lerin (ND GCL'ler) iç kesme mukavemeti takviye liflerinin gerilme mukavemetinden ve elyaflar ile taşıyıcı geotekstil arasındaki bağlantı mukavemetinden gelen katkılar nedeniyle artar. Elyaflar ısıtılma işlem görmüş bir ND GCL oluşturmak için taşıyıcı geotekstil ile termal olarak birleştirilebilir veya elyaflar termal olarak kaynaşmazsa GCL ısıtılma işlem görmemiş bir

ND GCL'dir. GCL'lerin iç ve ara yüz kesme mukavemeti genellikle doğrudan kesme ve burulma halkası kesme testleri ile değerlendirilir. Araştırmacılar hidrasyon ve konsolidasyon prosedürlerinin, normal gerilmenin, yer değiştirme oranının, takviye türünün

(yani iğne ile delmeye karşı dikişli bağlama), ısıtma işlem yönteminin, numune boyutunun, soyulma mukavemetinin, dinamik yüklemenin, sıcaklığın, standart çözümler ve GCL'lerin iç kesme mukavemetinde sürünmedir.



Şekil 9. Dokulu bir geomembran (GM) ve iğne ile delinmiş geosentetik kil astarından (GCL) oluşan bir kompozit sistem içindeki şematik kayma ve normal gerilmeler (Ghazizadeh ve Bareither, 2021)

GCL'lerin dahili kesme dayanımını değerlendirmek için kesme testi arızayı GCL içinde dahili olarak meydana gelmeye zorlar. Bununla birlikte bir GCL/GM kompozit sistemindeki bir GCL'nin dahili arızası, dahili kesme direnci, GCL/GM ara yüzü boyunca mobilize edilmiş kesme direncinden daha büyükse meydana gelmeyebilir. Aksine GCL/GM ara yüz kayma mukavemetine odaklanan çalışmalar GCL'lerin iç kayma deformasyonunu ve arızasını gözlemleyebilir. GCL/GM kompozit sistemlerinin hem GCL dahili hem de GCL/GM ara yüz kayma mukavemetinin değerlendirilmesi yoluyla kesme davranışı yalnızca seçili çalışmaların odak noktası olmuştur. Bu nedenle GCL/GM kompozit sistemlerin kesme davranışını ve başarısızlığını daha fazla değerlendirmeye ihtiyaç vardır. GCL/GM ara yüzünün kayma direnci (i) GM ve GCL'nin geotekstili arasındaki sürtünme direncinden ve (ii) geomembran pürüzlülüğü (örneğin sivri uçlar) ve geotekstil lifler arasındaki kenetlenmeden (yani cırt cırt mekanizması) gelişir. Birbirine kenetlenme mukavemeti, geotekstil özelliklerinin (örneğin elyafın gerilme mukavemeti), geotekstil tipinin (yani dokuma ve dokuma olmayan) ve geotekstil içindeki GM'la iç içe geçmesinin bir fonksiyonudur (Ghazizadeh ve Bareither, 2021).

Ara yüzey kayma mukavemetini ve τ_D 'nin büyüklüğünü kontrol eden kayma direnci mekanizmaları σ_n 'ye bağlıdır. Düşük σ_n 'de birbirine geçme GM pürüzleri ve geotekstil

lifleri arasında yüzeysel olarak meydana gelir ve τ_D öncelikli olarak sürtünmeye bağlıdır. Σn arttıkça GCL'nin geotekstil GM ile daha yakın temas sağlar (yani iç içe geçme) ve GM'in birbirine kenetlenmesi geotekstil yapısı içinde gerçekleşir. Geotekstilin GM ile iç içe geçmesi artan temas alanı nedeniyle sürtünme direncini de artırabilir. Geliştirilmiş kenetlenme ve artan sürtünme direnci σ_n arttıkça τ_D 'yi artırır. Belirli bir σ_n altında τ ve τ_D bir GCL/GM kompozit sistemindeki farklı arıza modlarına karşılık gelen üç senaryonun meydana gelebileceği bir noktaya yükselir. Senaryo 1'de τ_D , GCL/GM ara yüzünde maksimum mobilize kayma gerilimine ($\tau_{D_{MAX}}$) ulaşır ve GM ile GCL'nin geotekstili arasında kayma başlar. Zirve dahili GCL kesme dayanımının (τ_{P-IN}) $\tau_{D_{MAX}}$ 'tan daha büyük olduğu varsayıldığında takviye liflerinin ihmal edilebilir dahili deformasyonu GCL/GM kompozit sisteminin arıza modu tam ara yüz arızası olacak şekilde gelişir. Senaryo 2'de $\tau_{D_{MAX}}$ GM ve GCL arasında kayma başlayacak şekilde Senaryo 1'e benzer bir şekilde mobilize edilir. Bununla birlikte, Senaryo 2'de $\tau_{D_{MAX}}$ bir miktar dahili GCL deformasyonu sağlamak için yeterlidir ve potansiyel olarak bazı takviye liflerinin bozulmasına yol açar. Bu dahili GCL deformasyonuna rağmen $\tau_{D_{MAX}}$ τ_{P-IN} 'den daha düşük kalır ve tam GCL dahili hatası oluşmaz. Senaryo 2'deki hata modu kısmi ara yüz/dahili hatadır. Senaryo 3'te τ_D GCL/GM arabirimi boyunca $\tau_{D_{MAX}}$ 'ın tam

mobilizasyonundan önce dahili GCL hatası oluşacak şekilde GCL'nin τ_{P-IN} ile karşılaştırılabilir hale gelmek üzere artar. Bu nedenle GCL ve GM arasında ihmal edilebilir bir kayma meydana gelir ve arıza modu tam bir dahili başarısızlıktır. Bir GCL/GM kompozit sisteminin kesme davranışı ve arıza modu GCL iç kesme mukavemetini ve σ_n geotekstil ve GM özellikleri ve GCL sıyırılma mukavemeti gibi GCL/GM ara yüz kesme mukavemetini etkileyen faktörlere bağlıdır. Yüksek sıyırılma mukavemetli GCL'lere sahip kompozit sistemlerde eğer taşıyıcı ve örtü geotekstil GCL/GM kompozit sistemine uygulanan kesme gerilimini GCL'nin iç bölgesine transfer etmek için yeterince güçlü değilse tam iç arıza gelişmeyebilir. GM sivri uç yoğunluğundaki artış (yani tekstüre etme) arıza modu tamamen dahili arıza olmadığı sürece tüm normal gerilmelerde GCL/GM kompozit sistemlerinin kritik kesme mukavemetini artırabilir. Spike yoğunluğu GM ve GCL arasında geliştirilen ara yüz kayma gerilimini artırmak için hem sürtünmeyi hem de kenetlenme mekanizmalarını geliştirir. GM ile temas halindeki GCL'nin dokumasız bir geotekstiline alan başına kütledeki artış eğer ara yüz kayma gerilimi geliştirmek için kilitlemenin baskın bir mekanizma olması durumunda bir GCL/GM kompozit sisteminin kritik kesme mukavemetini artırabilir. Alan başına geotekstil kütlelerinin kritik kesme dayanımı üzerindeki etkisi daha yüksek normal gerilimde daha belirgindir. Dokuma bir geotekstil ile bir GCL'nin birleştirilmesi bir GCL/GM kompozit sisteminde düşük bir kritik kesme dayanımı ile sonuçlanabilir. GM ve örülmüş geotekstil arasındaki yüzey kenetlenme geliştirilen ara yüz kayma gerilimini sınırlar. Bu nedenle dokuma geotekstiller içeren GCL'ler yüksek kesme gerilimi olan uygulamalar için tavsiye edilmez. Bir GCL'nin sıyırılma mukavemeti bir GCL/GM kompozit sisteminin kritik kesme mukavemetini ancak dahili kayma direncinin çoğunluğu harekete geçirildiğinde etkileyebilir. Tam dahili arızanın genellikle yüksek normal gerilimde (örneğin ≥ 1000 kPa) meydana geldiği dikkate alındığında sıyırılma mukavemetindeki bir artış yüksek normal gerilimde bir GCL/GM kompozit sisteminin kritik kesme dayanımını daha derinden etkiler (Ghazizadeh ve Bareither, 2021).

9. SONUÇ

Dünyanın ekosistemi bozulmuş durumdadır. Bu bozulma rahatsızlıklar ve ksenobiyotik (insan yapımı) kimyasalların eklenmesi sonucunda doğal toprak ortamı dünyanın ekosisteminde son derece sorun yaratmaktadır. Yanlış atık bertarafı endüstriyel atıklar ve tarımsal kimyasallar bu tür bozulmalara sebep olmaktadır. Tehlikeli etkilere neden olan en yaygın kimyasallar çoğunlukla sanayileşmenin ve artan kimyasal kullanımın etkisiyle oluşan kirleticiler olan ağır metaller, hidrokarbonlar, çözücüler, petrol hidrokarbonları, kurşun, pestisitler, naftalin ve benzoatlar vb.

GCL'lerin hidrolik iletkenliğinin kimyasal çözeltiler tarafından harekete geçirildiğinde değerlendirilmesi büyük önem taşır. Gerçek geçirgen sızıya hidrolik iletkenlik genellikle numunenin içerilecek sıvı veya beklenen sıvıyı simüle eden bir sıvı ile nüfuz ettiği bir "uyumluluk testi" ile değerlendirilmektedir. Kimyasal uyumluluk hidrolik performansı etkileyebileceğinden bir başka önemli tasarım konusu olmaktadır. Bentonit şişmesinin miktarı ve dolayısıyla GCL geçirgenliği iki değerlikli katyonların (örneğin, kalsiyum ve magnezyum) ve yüksek iyonik kuvvetli çözeltilerin varlığından etkilenmektedir. GCL düzenli depolama bariyer uygulamaları için önemli avantajlar sunabilir. Örneğin sıkıştırılmış kil gömlekler, rekabetçi maliyet vb. ile karşılaştırıldığında uygulama kolaylığı sunar ancak depolama sahası operatörlerinin teslimattan sonra belirli bir ürünün belirli bir uygulama için uygun olup olmadığını kontrol etmelerine yardımcı olacak araçlara ihtiyacı vardır. Zaman kısıtlamalarının bariz nedenlerinden dolayı sahada teslim edildiği an ile kurulduğu an arasındaki hidrolik iletkenliği kontrol etmek için geçirgenlik testlerinin kullanılması pek mümkün olmamaktadır.

Açığa çıkan atıklar için ayrılmış depolama alanlarında toplanmaktadır. Bu depolarda biriken katı atıklardan oluşan sızıntı suyu depolama alanının zemininden sızarak yer altı suyuna karışması su ve toprak kirliliğine sebep olduğundan bu durum çevresel bir sorun oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu sorunu kontrol altında tutabilmek için atık depolama alanlarının zeminlerine geçirimsiz ya da geçirimsizliği çok az olan malzemelerin kullanılması gerekmektedir.

Günümüzde hem kalınlığının ince olmasından hem de geçirimsizliğinin az olmasından dolayı geosentetik kil örtüler kullanılmaktadır. Sızıntı suyunun yer altı suyuna sızmasını kontrol edebilmek için kil veya sentetik örtüler kullanılarak alt tabakanın kaplanması gibi önlemler alınmaktadır. Son yıllarda GCL sistemi verimliliği ve maliyeti nedeniyle dünya çapında ilgi görmektedir. Bentonit ile birlikte Geotekstiller/Geomembran katmanları kompozit olarak bir GCL sistemi oluşturur. GCL'ler yüksek hidrolik tutma, adsorpsiyon, şişme kapasitesine vb. sahiptir.

ATIK bertarafı arazi kullanımını içerir ve bu eğilim onlarca yıl öncesinden beri böyle olmaktadır. Atıkların düzenli depolama alanlarına atılması çevre üzerindeki ciddi etkiyi önlemek veya ortadan kaldırmak için tasarlanmış kirletici kısıtlama tesislerinden ayrılması gereken gazlar ve sızıntı suları/kirleticiler üretmektedir. Bu sebeple toprak ve yer altı su kaynaklarının düzenli depolama sahası sızıntılarından korunması için genellikle geokompozit bariyer sistemleri kullanılmaktadır. Geomembran/mineral kompozit bariyerler genellikle tasarlanmış kirletici kısıtlama tesislerinde kullanılır. Bu açıdan geokompozit astarın bir parçasını oluşturan geomembran imalat, kurulum veya eskime nedeniyle saha içi veya dışı kusurlar nedeniyle başarısız olabilmektedir. Bu nedenle bir mineral/toprak bariyerinin üzerindeki kusurlu geomembran yoluyla sızıntı suyunu tespit etmek muhafaza tesislerinin tasarımları için çok önemli olmaktadır. Bu tür tesislerin değerli su kaynakları etrafında inşa edilmesi bazı durumlarda kaçınılmaz olmaktadır. Bu gibi durumlarda atık kütle ile yer altı suyunun uygun ve etkili bir şekilde ayrılması gerekir. Bu sıkıştırılmış kil örtüler (CCL'ler) kusurlu astara yani geomembran (GM) veya geosentetik kil astar (GCL) içine sızabilecek sızıntı suyunu kontrol etmek için kompozit bariyer sisteminin bir parçası olarak kullanılabilir. Bu sebeple Geomembran/toprak kompozit örtüler atık toplama tesislerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve mühendislik ürünü depolama tesislerindeki çoklu sistemlerin çoğu için önemli bileşenler oluşturacaktır.

CCR'ler uçucu kül (FA), dip külü (BA), kazan cürufu ve baca gazı kükürt giderme (FGD) kalıntılarını içerebilmektedir. Bu farklı CCR'ler ya ayrı ayrı yönetilebilir ya da birlikte karıştırılıp yönetilir. GCL'lerin bileşenleri arasında sülfat, sodyum, kalsiyum ve magnezyum vardır. Subbitümenli ve linyit kömürlerle ilişkili CCR sızıntı suları sodyum bakımından zengin olabilmekte ve bitümlü kömürle ilişkili sızıntı sularına kıyasla daha yüksek iyonik mukavemete sahiptir.

GCL'ler yüksek bir toplam emiş gücünde bentonitler kullanılarak üretilir ve kurulur kurulmaz alt topraktan ve kapalı malzemeden sıvı alımı yoluyla hidratlanmaktadır. Bentonitler ısladıklarında önemli hacim değişikliği gösterebilmektedirler. Hapsedilmeye bağlı olarak boşluk oranı özellikle daha yüksek doygunluk derecelerinde emmede bir azalma ile önemli ölçüde artabilir. GCL'lerin hidrolik performansını iyileştirmek için GCL'ler düşük emme değerlerine ulaştığında hidrasyonun neden olduğu bentonitlerin şişmesi sınırlandırılmalıdır. Hidratlı boşluk oranındaki değişiklik bentonitlerin farklı hidrasyon seviyelerinde gözenek yapısı evrimi ile ilgili olmaktadır. GCL sistemlerinin uygulamalarına özel önem verilerek şişme sırasında bentonit malzemelerinin su tutma ve boşluk oranı gelişiminin daha iyi anlaşılmasını gerektirmektedir. GCL'ler kullanım ve kurulum sırasında meydana gelebilecek kazara delinmelere karşı hassas olmasından dolayı meydana gelen hasarın seviyesine bağlı olarak hidrolik performanslarından ödün verilebilmektedir. Küçük kusurların sağlam örneklerle kıyasla hasarlı numunenin hidrolik iletkenliğinde küçük bir artışla GCL'deki sodyum bentonit tarafından etkili bir şekilde kapatılabilmektedir. 30 mm çapa kadar oluşan deliklerin iyileşmesi sadece 15 gün gibi kısa bir süre gerekmektedir. Sodyum bentonit GCL'lerinin kendi kendini iyileştirmesinin yüksek olmasına rağmen son zamanlarda yayınlanan deneysel kanıtlar kendi kendini iyileştirme sürecinin iyon değişimi ile birleştirildiğinde bu kapasitenin de engellenebileceğini göstermektedir. GCL'lerin delindiklerinde veya herhangi bir çatlak oluştuğunda kendi kendini iyileştirme kabiliyetine sahip olduğu açıktır. Ek olarak iğneyle delinmiş ve dikişle bağlanmış GCL'ler yapışkan bağlama gibi diğer GCL bağlama yöntemlerinden daha iyi kendi kendini iyileştirme performansına sahip olmaktadır.

KAYNAKLAR

Athanassopoulos, C. (2011). Geosynthetic clay liners in coal combustion residual containment applications. In World of Coal Ash (WOCA) Conference, Denver, CO, USA <http://www.flyash.info>.

Aydın, M. C., & Gelberi, G. (2018). Morgedik Barajı Geçirimsizlik Problemi ve Çözüm Uygulaması. Su Kaynakları, 3(2), 1-7.

Budihardjo, M., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2012). A review of key factors on Geosynthetic clay liners' performance as liner system. International Journal of Biological, Ecological and Environmental Sciences, 1(3), 117-119.

- Bouazza, A. (2002). Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 3-17.
- Bouazza, A., Gates, W. P., & Abuel-Naga, H. (2006). Factors impacting liquid and gas flow through geosynthetic clay liners. *Geosynthetics—Recent Developments. Commemorating Two Decades of Geosynthetics in India*, 119-146.
- Elseifi, M. A., Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., & Wilkes, J. (2001). Performance of geocomposite membrane as pavement moisture barrier. *Transportation research record*, 1772(1), 168-173.
- Guyonnet, D., Touze-Foltz, N., Norotte, V., Pothier, C., Didier, G., Gailhanou, H., ... & Warmont, F. (2009). Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5), 321-331.
- GCL Brochure Cetco. (2017) "solutions for containment and remediation".
- Ghazizadeh, S., & Bareither, C. (2018). Critical strength of high peel strength geosynthetic clay liners at low normal stresses. *Tailing and Mine waste 2018*.
- Ghazizadeh, S., & Bareither, C. A. (2021). Failure mechanisms of geosynthetic clay liner and textured geomembrane composite systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3), 789-803.
- Maubeuge, K.P., Coulson, J.P., & Hedrich, F. (2006). *Landfill Cap Design With Geosynthetic Clay Liners*, Proceedings of the International Symposium, Nuremberg, Germany, 16-17 April 2002.
- Kommu, S., & Asadi, S. S. (2020, February). Suitability Of Geocomposite Layer For Fly Ash Ponds. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1455, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.
- Lange, K., Rowe, R. K., & Jamieson, H. (2004). Metal migration in geosynthetic clay liners. In *Proceedings of the GeoQuebec2004 (October) Conference Quebec*.
- Lu, Y., Abuel-Naga, H., Leong, E. C., Bouazza, A., & Lock, P. (2018). Effect of water salinity on the water retention curve of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6), 707-714.
- Rouhollah, S. G., Fazlollah, S., & Bahador, A. (2013). Study of geosynthetic clay liner layers effect on decreasing soil pollution in the bed of sanitary land fills. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 5(8), 452-457.
- Shan, H. Y., & Chen, R. H. (2003). Effect of gravel subgrade on hydraulic performance of geosynthetic clay liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(6), 339-354.
- Salemi, N., Abtahi, S. M., Rowshanzamir, M., & Hejazi, S. M. (2016). A study on the hydraulic performance of sandwich geosynthetic clay liners reinforced with nano-clay particles. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 18(6), 693-711.
- Seiphoori, A., Laloui, L., Ferrari, A., Hassan, M., & Khushefati, W. H. (2016). Water retention and swelling behaviour of granular bentonites for application in Geosynthetic Clay Liner (GCL) systems. *Soils and Foundations*, 56(3), 449-459.
- Von Maubeuge, K. P., & Ehrenberg, H. (2014, September). Investigation of bentonite mass per unit area requirements for Geosynthetic Clay Liners. In *Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics*, Berlin, Germany (pp. 21-25).
- Viana, P. M. F., Palmeira, E. M., & Viana, H. N. L. (2011). Evaluation on the use of alternative materials in geosynthetic clay liners. *Soils Rocks*, 34, 65-77.
- Xiong, X. B., Gui, G. Q., & Ma, S. Z. (2009). Research on anti-seepage properties of geosynthetic clay lines in landfills. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 2(04), 254.
- Zanzinger, H., & Alexiew, N. (2000). Prediction of long term shear strength of geosynthetic clay liners with shear creep tests. In *Proceedings of the 2nd European Geosynthetic Conference*, Bologna (pp. 567-571).