

Geosentetik Kil Örtülerin Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri

Kaveh DEGHANIAN*¹, Esra SARIAY²

^{1,2}*İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 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

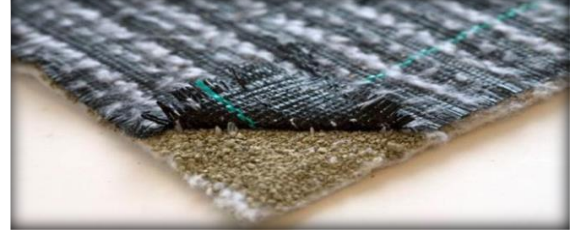
Geosentetik malzemeler geleneksel yöntemlere göre maliyeti düşürüp estetik çözümler sunmaktadır. Bu malzemelerin farklı çeşitleri de mevcuttur. Bunlardan bazıları; geogrid, geotekstil, geomembran, geosentetik kil örtüler (GCL), geokompozitler, geomatlar, drenaj levhaları ve geotüplerdir. GCL'nin avantajı; 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).



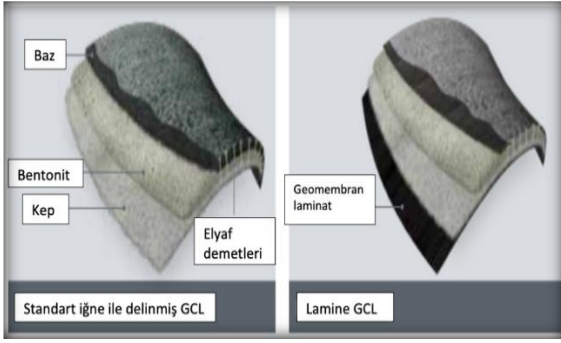
Şekil 1. Geosentetik kil örtü (Aydın ve Gelberi, 2018)

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).



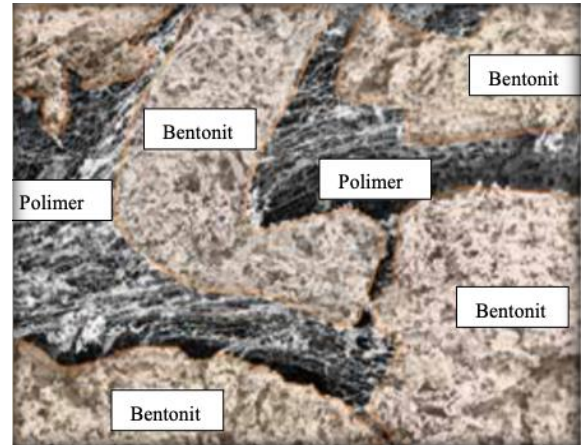
Şekil 2. Standart iğne ile delinmiş GCL ve lamine GCL (Ceto, 2017)

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				
Kirlenici 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 (Kommu 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 (Kommu 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 Mavisini 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

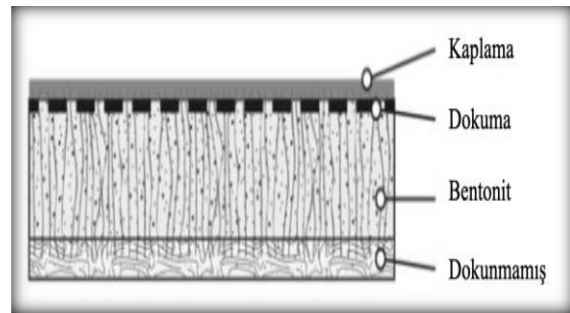
Su potansiyeli topraktaki kılcal basınç (emme) ile toprak hacimsel su içeriği veya doyumluk derecesi arasındaki ilişki ile tanımlanabilen temel bir hidro-fiziksel toprak özelliğidir. Bu ilişki aynı zamanda toprak suyu karakteristik eğrisi (SWCC) olarak da adlandırılır ve doymamış toprakların davranışını 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 değerlerdedir. Kuru bentonit son derece negatif bir su potansiyeline sahiptir ve toprak ile bentonit arasındaki su potansiyeli dengelenene veya dengeye ulaşmaya 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 geliştirilmesinin 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 incelmeye 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 geotekstillere özellikleri (Viana vd. 2011).

GCL'lerin geotekstillere 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 alkalın 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

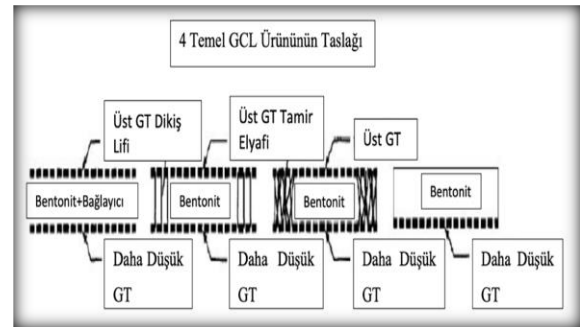
- Hidratlanmış bentonitin düşük kesme dayanımı (işlenmemiş GCL'ler için) vardır.
- GCL'ler kurulum sırasında veya sonrasında delinebilir.
- Yerleştirme sırasında olası bentonit kaybı olabilir.
- Gaz geçirgenliği düşük nemli bentonittir.
- Diğer malzemelerle ara yüzlerde potansiyel güç sorunları olabilir.
- 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 (Bouzza 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 (Bouzza, 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).

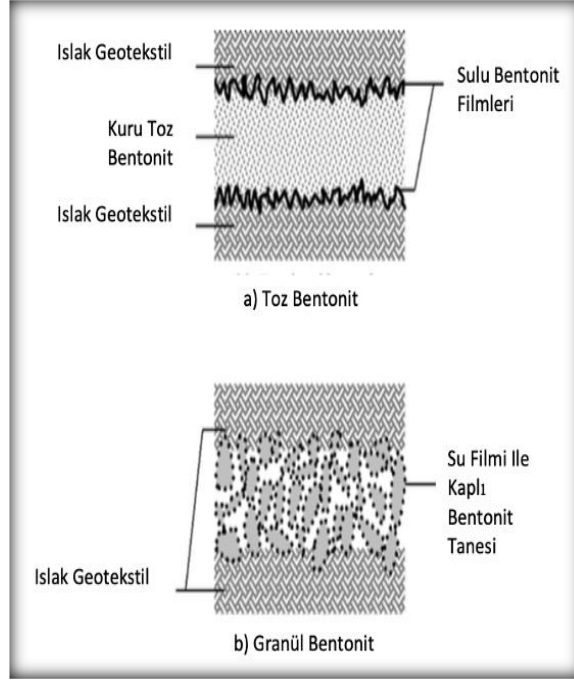
GCL'lerin maksimum hidrolik performansına ulaşma yeteneği doyumluk derecelerine bağlıdır. GCL'ler herhangi bir sıvı kirletici için bir engel astar sistemi olarak işlev görmek için tipik olarak su kullanılarak yeterince hidratlanmalıdır. Bentonit parçacıkları hidratlandıktan sonra şişecek ve birbirine 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

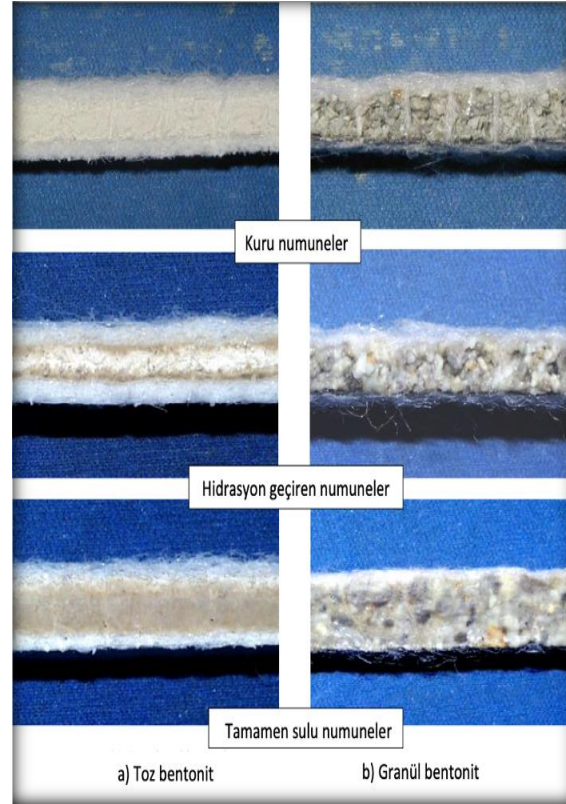
davranışını yönetmede katı-sıvı etkileşiminin öneminin açık bir göstergesidir (Bouzza vd. 2006).



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. Difüzyif 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 doygunluk derecesine sahip toprak katmanları oksijen için sıvı faz difüzyon katsayısı gaz fazı difüzyon katsayısından daha düşük büyüklükte olduğundan oksijen difüzyonunu sınırlayabilir. Özellikle doygunluk 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 sıyrılmaya 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 kütlesine (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 kütlesinin/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 dahili 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.

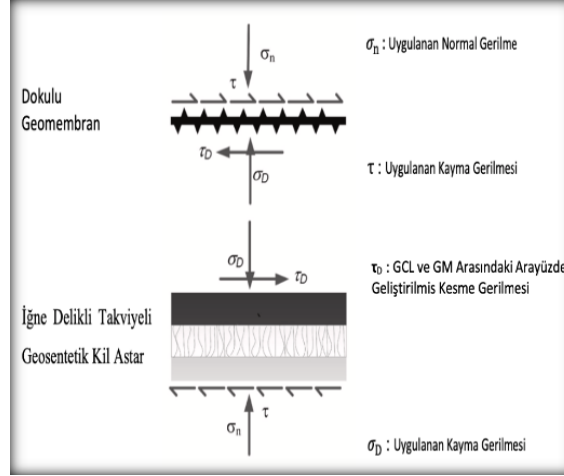
8.3. Geosentetik Kil Astar ve Dokulu Geomembran Kompozit Sistemlerin Başarısızlık Mekanizmaları

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 dolunur. 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 ısı işlem görmüş bir ND GCL oluşturmak için taşıyıcı geotekstil ile termal olarak birleştirilebilir veya elyaflar termal olarak kaynaşmazsa GCL ısı 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 arayışı 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 sıyrılma mukavemeti gibi GCL/GM ara yüz kesme mukavemetini etkileyen faktörlere bağlıdır. Yüksek sıyrılma 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 kütesindeki 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 kütesinin 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 sıyrılma 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 sıyrılma 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.

ATİK 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).