

Geocell Malzemesinin Özellikleri ve İnşaat Sektöründe Kullanımı

Kaveh DEHGHANIAN*¹, Rukiye ÖNDER²

^{1,2}*Istanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34295, Türkiye*

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 23.08.2021, Kabul Tarihi: 31.12.2021

Özet

Bu makale kapsamında, geosentetik malzeme türlerinden olan Geocell malzemesinin üretimi ve tarihi gelişimi ele alınmıştır. Bunun yanı sıra Geocell'in özellikleri, inşaat mühendisliği kapsamında kullanımı ve avantajları, sürdürülebilir yol inşasında tercih edilmesinin gerekçelerinden de bahsedilmektedir. 1970 yılında icat edilen Geocell, bal peteği formuna sahiptir. Geocell'ler inşaat mühendisliğinde çok sayıda uygulama bulmuştur. Betonarme zemin yapıları alanında büyük yankı uyandıran geocell'lerin en önemli uygulamalarından biri de çeşitli ulaşım geoteknik uygulamalarında kullanılmasıdır. Hücre içleri doğal agregalar ile doldurulur ve bu uygulama sayesinde istinat duvarlarında kuvveti daha geniş alana yayarak çözümler sunar, hidrolik yapılarda aşınmayı önler, daha yaygın olarak ise karayollarında ve demiryollarında tercih edilir. Karayollarında asfaltlı ve asfaltsız yollarda uygulanarak yol performansını ve hizmet ömrünü artırmaktadır. Bununla birlikte CO₂ emisyon problemine de çözüm sunarak çevreye verilen zararı minimum seviyeye düşürmektedir. Geocell kullanımı ile alternatif yöntemlerin karşılaştırılması yapıldığında ise Geocell malzemesinin daha ekonomik, daha pratik, zaman tasarrufu sağladığı ve çevre dostu olduğu görülmektedir. Bu makale, tüm bu sistemlerde geocell'in yararlı etkilerini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Geocell, Hücresel dolgu sistemi, Sürdürülebilir yol.

Properties of Geocell Material and Its Use in Construction Industry

Abstract

Within the scope of this article, the production and historical development of Geocell material, which is one of the geosynthetic material types, is discussed. In addition, the features of Geocell, its use in civil engineering and its advantages, and the reasons for its preference in sustainable road construction are also mentioned. Invented in 1970, Geocell has the form of a honeycomb. Geocells have found numerous applications in civil engineering. One of the most important applications of geocells, which has a great impact in the field of reinforced concrete soil structures, is its use in various transportation geotechnical applications. Cell interiors are filled with natural aggregates and thanks to this application, it provides solutions by spreading the force on the retaining walls to a wider area, prevents corrosion in hydraulic structures, and is more commonly preferred in highways and railways. It increases road performance and service life by being applied on asphalted and unpaved roads on highways. In addition, it provides a solution to the CO₂ emission problem and reduces the damage to the environment to a minimum. When the use of geocells is compared with alternative methods, it is seen that the Geocell material is more economical, more practical, time-saving and environmentally friendly. This article demonstrates the beneficial effects of geocell in all these systems.

Keywords: Geocell, Cellular filling system, Sustainable path.

*Sorumlu yazar kavehdeghanian@aydin.edu.tr, ²rukiyeonderr@gmail.com

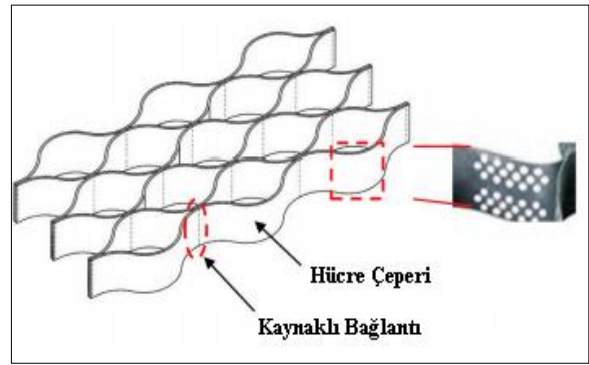
1. GİRİŞ

Kentleşme için sürekli artan yetkin arazi talebi, geoteknik mühendislerinin nispeten zayıf toprağı kabul edilebilir bir duruma dönüştürmek için optimize edilmiş bir yöntem geliştirmesi için bir zorluk olmuştur. Çoğu durumda yetersizlik, zeminin yetersiz taşıma kapasitesi ve/veya söz konusu geoteknik-yapının aşırı oturmasından kaynaklanmaktadır. Bunun ışığında, zeminin mukavemetini ve sertliğini artıran, sıkıştırılabilirliği ve sıvılaşmaya karşı kırılabilirliği azaltan, çevresel etkiler üzerindeki olumsuz fiziksel veya kimyasal değişiklikleri önleyen ve zeminlerin doğal öngörülemezliğini en aza indiren farklı teknikler icat edilmektedir (Biswas ve Krishna, 2017). Geocell; yüksek yoğunluklu polietilen alaşımlardan üretilmiş, petek formunda üç boyutlu bir yapıya sahip zemin güçlendirmede ve erozyon korumada kullanılan, U.V ışınlarına dayanıklı geosentetik bir malzemedir. Hüresel Dolgu Sistemleri (HDS) olarak da nitelendirilmektedir. Genellikle eğimli yüzeylerde su ve rüzgâr nedeniyle oluşabilecek toprak kaymalarının engellemek için kullanılmaktadır. Üç boyutlu bal peteği yapısı ile gözenekleri doldurarak çalışan Geocell hücre dolgu sistemleri, geosentetik bir malzeme olan geogrid malzemesine ekstra çözümler üretmektedir. Geogrid mantığı ile çalışan Geocell, geogridlerin zeminde güçlendirme ve istinat duvarlarında ki donatı görevini yerine getirmektedir. Farkı ise; hüresel dolgu sistemleri, hüresel dolguların içini doldurarak çalışmaktadır (Movea, 2021). Geocell'lerin birincil uygulaması, 1970 yılında kavramsallaştırılıp uygulamaya konulduğunda, ağır askeri araçların yumuşak yollarda hareketi için anında destek sağlamaktı. Yıllar içinde, geocell'ler temel güçlendirme, erozyon kontrolü, şev koruması, kanal koruması, taşkın duvarları ve patlama koruması gibi birçok başka uygulama bulmuştur. Bununla birlikte, jeo-hücrelerin yollar, setler ve istinat duvarları dâhil olmak üzere ulaşım ile ilgili çeşitli uygulamalarda kullanımı, diğer tüm uygulamalar arasında oldukça ileridedir. Günümüzde geocell'ler, zorlu zemin koşullarında az bakım gerektiren yollar inşa etmek için dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, jeo-hücrelerin yolları ve ulaşım altyapısının diğer bileşenlerini olumsuz hava koşullarına, depremlere ve sel baskınlarına karşı korumadaki başarılı performansını gösteren birçok vaka çalışması mevcuttur (Latha, 2021).

2. GEOCELL MALZEMESİNİN ÜRETİMİ

Geocell zemin hücresi dünya standartlarında, uluslararası normlara uygun olarak birinci sınıf polimerlerden imal edilmektedir. Hüresel dolgu sistemi U.V katkı HDPE şeritlerin ultrasonik ses sistemi ile yapıştırılması ile üretilmektedir. Bu şeritlerin yapıştırılma aralığı malzemenin kaynak mesafesi olarak adlandırılmaktadır (Inti ve Tandon, 2021).

Geocell'ler delikli bir yapıda imal edilmektedir. Bunun sebebi hızlı drenaj ve dolgu malzemesinin kolay sıkışabilmesidir. Fabrika ortamında özel ultrasonik kaynak sistemi ile yapıştırılan Geocell malzemesi hüresel şeritler halinde uygulanacak sahaya nakil edilmektedir (Inti ve Tandon, 2021).



Şekil 1. Geocell bileşenleri (Pokharel vd., 2018).

3. HÜCRESEL DOLGU SİSTEMİNİN (GEOCELL) TARİHİ SERÜVENİ

Hüresel hapsedme fikri ilk olarak Birleşik Devletler Ordusu Mühendisler Birliği tarafından 1970'lerde geliştirilmiştir. Geohücreler daha sonra suya dayanıklı reçine fenolik batırılmış kâğıttan yapılmıştır. Daha sonra, mukavemet gereksinimlerini karşılamak için metalik geohücreler seçilmiştir, ancak kullanım zorluğu ve yüksek maliyet nedeniyle uygulanabilir olmadığı kanıtlanmıştır. Geocell malzemesini andıran hüresel yapılar da kenarları ve diyaframları oluşturan geogridlerden yapılmıştır. Geocell malzemesi ayrıca bodkin çubuklarla birleştirilmiş geogrid levhalar kullanılarak yapılmıştır. Ticari olarak temin edilebilen geohücreler artık yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) ve Yeni Polimerik Alaşımdan (YPA) yapılmıştır. Buna ek olarak; Geocell farklı şekil ve boyutlarda sahaya getirilmektedir. Ancak Geocell'in en yaygın şekli neredeyse daireseldir (Işık vd., 2020).

4. GEOCELL MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ

Zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışı geosentetik elemanlarının çekme direncini yüksek oranda değiştirir. Ara yüzey sürtünme davranışı zeminin kayma mukavemeti parametrelerine (kayma mukavemeti açısı ve kohezyon) ve geosentetik donatı malzemesinin şekil olarak formuna bağlıdır. Elemanlar üzerinde oluşan deplasman ve şekil değiştirmeler eleman boyunca farklılık göstermekte ve eleman boyunca değeri düşmektedir.

Çekme deney sonuçlarına göre hücresel dolgu elemanların boyutlarının veya hücre sayısının artması ile çekme kuvvetlerinin değeri de artış göstermektedir. Çünkü hücre sayısının artması enine elemanlar üzerinde oluşan pasif dirençleri artıracığından çekme kuvvetlerinin değeri de yükselecektir. Ayrıca eleman boyutlarının artması eleman üzerinde oluşan sürtünme alanında artma gerçekleştireceğinden çekme kuvvetlerinde de artış görülecektir. Eleman boyunca oluşan deplasmanlar ve deformasyonlar tüm elemanlar için duvar önyüzünde en yüksek değerine ulaşmakta ve gömme derinliğince deplasman değeri düşmektedir. Hücresel eleman-zemin arasındaki ara yüzey sürtünme davranışını ifade eden ara yüzey sürtünme katsayısı, düşey basınç değeri yükseldikçe azaldığı bilinmektedir. Zemin-yüzeysel geosentetik elemanlar arasındaki ara yüzey sürtünme katsayıları ile zemin-hücresel dolgu elemanların ara yüzey sürtünme katsayıları genel olarak yakın oranlara sahip olduğu çalışmalar ışığında bilinmektedir (Işık vd., 2020).

5. GEOCELL'İN KULLANIM ALANLARI

Geocell malzemesinin kullanım alanlarını gruplandırmak gerekirse; karayollarında ve demir yollarında taşıyıcı bir platform olarak, zemin taşıma kapasitesini arttırmada, sulama kanallarında, eğimli yüzey stabilizasyonunda, istinat duvarı inşaatında, erozyon kontrolünde ve eğimli yüzeylerde hücresel dolgu sistemlerinin içlerini toprak doldurarak yeşillendirme amacıyla kullanılmaktadır.

5.1. Şevlerde Erozyon Koruması

Şev koruma uygulamalarında hücre içlerinde dolgu malzemeleri farklı tercih edilerek erozyon dayanım kuvveti değeri yükseltilebilir. Seçilen malzeme proje koşulları altında tercih edilir. Dik yamaçlar üzerine yerleştirilen Geocell, hücre içi dolgu malzemesini tutmak ve hareketini engellemek için üretilmiştir. Geocell malzemesinin hücre duvarları şevlerden aşağı

yönde akan suyun akış hızını azaltmaktadır. Geocell kullanımı, erozyonun önemli bir nedeni olan kılcal yarılmaların oluşumuna çözüm olmaktadır.

Buna ek olarak, şevlerde Geocell kullanımı hücrelerin içinde biriken suların dolgu toprağından aşağıya sızarak, bitkilerin köklerine ulaşmasına ve büyümesine katkıda bulunmaktadır (Khorsandiardabili ve Ghazavi, 2021).

5.1.1. Geocell Takviyeli Şevlerin Statik Stabilitate Analizi

Yatay Geocell katmanlarını simüle etmek için Yatay Dilim Yöntemi (HSM) olarak adlandırılan yöntem kullanılır. Her Geocell tabakası, eksenel mukavemete ek olarak eğilme ve kesme direnci sağlayan bir kiriş görevi görür. Farklı özelliklere sahip eğimler için Geocell yüksekliğini artırmanın ve Geocell'leri çeşitli yüksekliklere sahip Geocell'ler ile değiştirmenin etkilerini değerlendirmek için parametrik çalışmalar yapılmaktadır. Sonuçlar, bu tür eylemlerin, takviye tabakalarının gerekli gerginliğini ve uzunluğunu makul ölçüde azaltacağını, yani stabilite koşulunun iyileştirildiği ve daha az uzun takviye kuvvetlendirme sisteminin oluştuğunu göstermektedir. Geosentetikler; son yıllarda zemin yapılarının, özellikle eğimlerin ve duvarların güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, güçlendirilmiş şev ve duvarları inceleyen birkaç çalışma bulunmaktadır. Analitik teknikler, özellikle limit durum yöntemleri, basitlikleri ve işlevsellikleri nedeniyle araştırma çalışmalarında kullanılmıştır. Güçlendirilmiş zemin şevlerinin göçme sınırı durumu için yeni bir gerilime dayalı tasarım yaklaşımı geliştirmiştir. Donatılara paralel dilimlerin denge değerlendirmesinden türetilen denge denklemlerini ve yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem daha sonra diğer araştırmacılar tarafından Yatay Dilimleme Yöntemi (HSM) olarak kullanılmaktadır.

Güçlendirilmiş zemin yapılarının sismik kararlılığını değerlendirmek için sözde-statik limit denge analizini temsil ederek parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Geosentetik takviyeli şevlerin göçme mekanizmaları belirlenmiştir. Hem düzgün hem de doğrusal olarak güçlendirilmiş eğimleri araştırmış ve limit analizi kinematik yaklaşımını kullanarak donatı için gerekli mukavemet ve uzunluk üzerinde çalışmış ve pratik tasarım çizelgeleri sunulmuştur.

Tablo 1. Geocell malzemesinin özellikleri (Pokharel vd., 2016).

Açıklama	Değer
Geocell materyal	Polimerik nano-Kompozit alaşım
Akma mukavemeti	21,5 kN/m
Geocell hücre yüksekliği	150 mm
Kaynak dikişleri arasındaki mesafe	330 mm
Toprak hücresi sürtünme verimliliği katsayısı	0,95
Isıl genleşme katsayısı	<115 °C
Gevrek sıcaklık	<-70 °C
65 °C 'de uzun vadeli plastik deformasyon	<1,3 % deformasyon
Akma anında malzeme dayanımı	24 PA

Geosentetik tabanlı zemin takviyesinin yeni bir yaklaşımı olarak, üç boyutlu bir hücresel hapsedme sistemi olan hücre dolgu sistemi, çeşitli geoteknik uygulamalarda kullanılmış ve karşılık gelen tepkilerini ve mekanizmalarını incelemek için çeşitli çalışmalarla değerlendirilmiştir. Bir kiriş elemanı olarak Geocell şilte, çekme mukavemetine ek olarak eğilme ve kesme direnci sağlamaktadır. Bunu ve Geocell performansının diğer somut faydalarını göz önünde bulundurarak yamaçları ve duvarları güçlendirmedeki uygulaması haline gelmektedir. Geoteknikte Geocell'ler büyüleyici bir konudur. Geocell'lerle güçlendirilmiş şevlerin ve duvarların göçme mekanizmasını ve stabilite koşullarını analiz etmek, bu alanda çok az çalışma olmasına rağmen, geoteknik mühendislikte çok önemli bir durumdur. Geocell ile güçlendirilmiş şevlerin stabilite analizi üzerine sayısal bir parametrik çalışma gerçekleştirmiş, Geocell yatağı kiriş olarak modelleyerek sistemin güvenlik faktörünü üretmiştir. Sonuç olarak; gerekli gerilme veya uzunlukta görülen iyileştirme derecesinin, eğimi (β) ve zemin sürtünme açısı (ϕ) dahil olmak üzere eğim özelliklerine bağlı olduğu belirtilmektedir.

Çeşitli özelliklere sahip kohezyonsuz şevlerde artan donatı yüksekliğinin stabilite koşullarına etkisini değerlendirmek için parametrik çalışmalar yapılmaktadır. Bunlar takviye olan gerekli gerilimi ve uzunluğuna dayalı olarak araştırılmış, şevlerin stabilitesini korumak için gerekli katmanlarının ve denge değerlendirmesinden türetilmiştir.

Geocell takviyeli şevlerde, artan ve azaldıkça, gerekli toplam gerilme kuvveti, geogrid takviyeli şevlerde

eğilim ve genellikle Geocell takviye katmanlarının uzunluğu artar. Geogrid'in Geocell ile değiştirilmesi ve Geocell yüksekliğinin artırılması, gerekli toplam gerilme için daha küçük değerler elde edilmesini sağlar. Bu nedenle, bu tür hareketlerin, güçlendirilmiş şevlerin stabilite koşullarını iyileştirmek için uygun çareler olabileceği görülmektedir. Bu gelişme, karşılık gelen değerlerde bir azalma olarak ortaya çıkar ve iyileştirmenin derecesi, temel göreceli iyileştirme faktörleri kullanılarak farklı eğim özellikleri için ölçülür. Ortalama 5 cm yüksekliğindeki Geocell katmanları ile güçlendirilmiş bir eğim verildiğinde, geogridlere göre gerekli toplam gerilimlerinde önemli gelişme oranları görülmektedir. Gerekli gerilime gelince, oranlar sırasıyla %20 ila %90, mutlak ve gelişme faktörleri 0,02 ila 0,13 arasındadır, bu da stabilite koşulunun makul ölçüde iyileştirildiğini gösterir. Ayrıca gerekli uzunlukta %15 ila %40 arasında değişen miktarlara ve 0,25 ila 1,15 m ulaşılmakta, bu da daha az uzun bir sistemin oluştuğunu göstermektedir. Bu aynı zamanda, eğimleri güçlendirmek ve stabilitelelerini iyileştirmek için Geocell katmanlarını geogridlere göre kullanmanın ekonomik avantajını da kabul etmektedir (Khorsandiardebılı N., Ghazavı M., 2021).

5.2. Zemin Güçlendirme

Hücresel dolgu sistemi üstün taşıma kapasitesine sahip üç boyutlu hücreleri ile zayıf zeminlerde oturma sorununu çözer. Temel dolgu ihtiyacını %50'ye varan oranda düşürür. Dolgu miktarında ve işçilikte önemli bir azalma olurken güvenli bir zemin sıkışması yaratır. Uygulama yapılacak zeminin özellikleri ve zemine gelen yükler dikkate alınarak hücre tipine karar verilmektedir. Kullanılacak Geocell malzemesinin tipi hücre boyutu seçiminde önemli bir faktördür (Keif vd., 2017).

5.2.1. Geocell Takviyesinin Zeminin Davranışı Üzerindeki Etkisi

Güçlendirilmiş toprak, geoteknik mühendisliğinin birçok alanında ekonomi, kurulum kolaylığı, performans ve güvenilirlik sunmaktadır. Pek çok araştırmacı, temellerin taşıma kapasitesini ve oturmasını iyileştirmek için "Geocell ile güçlendirilmiş yataklar" olarak adlandırılan hücresel geosentetik yatak yapılarının yararlı yetenekleriyle ilgi araştırılmalar yapmıştır. Örneğin, kurucu tabakaların özelliklerini, Geocell dolgu toprağını, Geocell şiltenin geometrisini, eğim açısını ve setten gelen yükü göz önünde bulundurarak Geocell takviyeli zeminlerin taşıma kapasitesini tahmin etmek için bir denklem önerilmiştir.

Ayrıca gömülü boruları korumak için hendek güçlendirilmesi için Geocell kullanılmıştır. Güçlendirilmiş setler alanında birçok deneysel çalışma, ölçek etkilerinin nadiren tam olarak dikkate alındığı küçük veya büyük ölçekli fiziksel modelleme ile gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, güçlendirilmiş temellerin tepkisi üzerindeki ölçek etkisinin önemli rolüne odaklanmaktadır.

Geocell takviyesinin zemin üzerinde etkileri;

- Geocell takviyeleri, temellerin taşıma kapasitesini artırmak için güçlü bir yöntem olarak pek çok umut vaat etmektedir. Uygun etkin parametrelerin seçildiği koşullarda, Geocell takviyesi, takviyesiz dolguyu 5,24 kata kadar güçlendirebilir.
- Geocell ile hücre boyutunun orta tane boyutundaki dolgu malzemelerine oranının 15 ile 1 arasında seçilmesi tavsiye edilir.
- Geocell takviyesinden en yüksek faydayı elde etmek için temel genişliği 13-27 aralığında olmalıdır (Ortalama 20 kat orta tane büyüklüğünde dolgu malzemesi).
- Daha kararlı ve güvenilir Geocell ile güçlendirilmiş dolgu sağlamak için, yer hücrelerinin hücre boyutlarının temel genişliğinin 0,67 katından daha küçük seçilmesi önerilir (Mehrijardı vd., 2019).

5.2.2. Geocell ile Güçlendirilmiş Zeminlerde Donma-Çözülme Davranışı

Donma-çözülme döngüleri, soğuk bölgelerdeki kaplamaların dengesini bozmanın başlıca nedenidir. Donma-çözülme hasarlarına yönelik karşı önlemler arasında, döşeme temellerini güçlendirmek için Geocell kullanılması pratikte etkili bir çözümdür. Bununla birlikte, yaygın uygulamaların aksine, Geocell ile güçlendirilmiş tabanların donma-çözülme davranışına ilişkin araştırmalar, muhtemelen deneysel testleri yürütmek için uygun cihazların bulunmamasından dolayı sınırlıdır. Toprakların buzlanması bölgede hacim artışına neden olur. Faz değişimi donma-çözülme (FT) döngüleri, toprakta don kabarması ve çözülmenin zayıflamasıyla sonuçlanan doğal bir olaydır ve mevsimsel don bölgelerinde kaplama hasarının başlıca nedenidir.

Donma-çözülme ile ilgili hasar, asfaltsız yollarda daha ciddidir, çünkü oluşan yüzey tabakası, bağlanmamış granüller temel malzemelerden ağır trafik yükleri tarafından su sızmasına ve sıkıntıya daha yatkındır.

FT döngülerinin toprağın özelliklerini değiştirmede önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Örneğin, sıkıştırılmış topraklar, topraktan elden edilen mikro yapısal değişiklikler nedeniyle daha gevşek hale gelebilir. Deneysel araştırma, kapalı bir sistemde beş FT döngüsünden sonra, FT algılanamayan çakılların bile California Taşıma Oranında (CBR) (yaklaşık %40) dikkate değer bir düşüşe maruz kalabileceğini göstermektedir. FT hasarı, esas olarak, su fazının değişmesi ve suyun yeniden dağılımının neden olduğu toprağın donma ve çözülme zayıflamasına sebep olur. Dondurma işlemi sırasında su bulunan gözeneginde arkasında donmuş bir saçak oluşur. Su, suyu donmuş saçaklara doğru göç etmeye zorlayan bir emme oluşturur. Çözdürme işlemi sırasında donmuş bölgedeki buz yavaş yavaş erir ve erimiş su, kalan donmuş bölgenin üzerinde çözülen topraklarda birikir ve dolayısıyla toprağı zayıflatır. Bu nedenle, kaplama hasarının çoğu zaman ilkbaharda kar erimesinde meydana gelir ve çözülme mevsimlerinin sonunda taban ve alt zemin modülünde önemli bir azalma bulunur. Uygulamada dona duyarlı ince tanelerin çakıllarla değiştirilmesi, yol yüzeylerine kalsiyum klorür püskürtülmesi, alt zeminin çimento gibi kimyasal katkılarla stabilize edilmesi, alt zeminin agrega kolonları ile boşaltılması, tabanların geosentetiklerle güçlendirilmesi dahil olmak üzere yolların FT hasarını hafifletmek için birçok önlem alınır. Emici geotekstiller ile taban katmanlarının boşaltılması ve geokompozit ile drenaj tabakası ve kılcal bariyer oluşturulmasını sağlar. Özel bir geosentetik türü olan Geoceller, kapsüllenmiş toprakların etkili bir şekilde hapsedilmesini sağlayan petek benzeri birbirine bağlı geosentetik hücrelerin üç boyutlu formlarıdır. Pratik uygulamalardan artan kanıtlar, geohücrelerin mevsimsel don bölgelerindeki kaplamaların dayanıklılığını artırmada etkili olduğunu göstermiştir.

Geocell takviyesinin donma-çözülme olayına etkileri;

- Geocell takviyeli kumların ve takviyesiz kumların sıcaklık gelişimi ve izotermeleri benzerdir. Bu da kumlara Geocell'lerin eklenmesinin kumlardaki ısı transferini değiştirmede önemsiz bir etkiye sahip olduğunu gösteriyor.
- Toprak ve alüminyum arasındaki ara yüzde bir sıcaklık süreksizliği gözlemlenir. Bu, toprak-alüminyum ara yüzünde ısı temas direncinin varlığını gösterir.
- Her FT döngüsü içinde donma ve çözülme sonlandırma eşik sıcaklığı sırasıyla -5 °C ve 10 °C olarak bilinmektedir.

- Sert bir taban üzerinde duran kumlar için, Geocell kullanımı, FT döngüsünden sonra en yüksek don kabarma ve çözülme yerleşimini sırasıyla yaklaşık %18 ve %34 azaltmıştır. Takviye edilmemiş ve takviye edilmiş kum kalıntıları FT döngüleri ile artar, bu da sıkıştırılmış kumların FT hareketi ile gevşediğini göstermektedir (Huang vd., 2021).

5.3. İstinat Duvarları

Hücresel dolgu sistemi ile dik ve kararsız yamaçlarda beton istinat duvarının da ulaşamayacağı yükseklikte, uzun ömürlü ve düşük maliyetli istinat duvarları inşa edilebilir. Hücresel dolgu sistemleri ile inşa edilen istinat duvarları; içinde beton, demir buldurmayan, çevre ile uyumlu, estetik, günümüzün doğa dostu istinat duvarlarıdır. Hücre yüzeyleri duvarın ön yüzünde dolgu malzemesini çevreleyerek dışarı çıkmasını önler ve bu sayede Geocell ile inşa edilen yeşil istinat duvarları deprem yüküne ve zemin oturmalarına karşı mükemmel bir çözüm sunar (Pokharel vd., 2015).

5.4. Karayollarında ve Demir Yollarında

Geocell karayolları, demiryolları ve benzeri uygulamalarda statik ve hareketli tekerlek yüklerini desteklemek için taneli toprakların güçlendirilmesi için uygundur. Alt zeminin taşıma kapasitesinin artırılması ve dolgu malzemesinin modülünün iyileştirilmesi, kaplama yapısında Geocell kullanılmasının tek faydası değil, aynı zamanda gerekli dolgu malzemesi miktarını azaltarak ilk proje maliyetini de düşürecek, projenin yapım süresini kısaltacak ve ayrıca gerekli bakım ve onarımı en aza indirecektir. Buna ek olarak, Geocell dolgu malzemesinin uzun bir mesafeden şantiyeye taşınması ihtiyacını ortadan kaldırarak yerel olarak mevcut alt dolgu ile doldurulabildiğinden, yol yapımı daha çevre dostu olacaktır. Bu sonuçlar, nihayetinde daha az yakıt tüketimi, kirlilik ve karbon ayak izine yol açacak olan nakliye işlemlerinin ve kamyonların kullanımının azalmasına neden olacaktır. Geosentetik takviyeleri, 40 yılı aşkın süredir asfaltsız ve asfalt kaplı yolların performansını iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu takviyeler, taşıma kapasitesini arttırmak için alt sınıfların üzerine veya yük dağıtım kapasitesini arttırmak için temel tabakanın içine yerleştirilebilir. Bu uygulama ise azaltılmış taban tabakası kalınlığı ve daha uzun hizmet ömrü ile sonuçlanır (Pokharel vd., 2015).

5.4.1. Demir Yollarında Balast Setlerinin Geocell ile Güçlendirilmesi

Teknoloji ilerledikçe trenler daha hızlı hareket eder, demiryolları uzar, daha ağır malları taşır ve daha sıkı güvenlik standartları, daha uzun tasarım süreleri için daha yüksek seviyede ray altı hizalamasını zorunlu kılar. Bununla birlikte, balast seti olarak adlandırılan ana ray altı balast tabakası, balast kırılması ve yeniden düzenlenmesinden dolayı yanlış hizalanmış hale gelir. Sonuç olarak, set, rayların güvenliğini zayıflatan çökme ve yanal yayılmaya eğilimlidir. Setin hasar görmesi, trenin büyük merkez kaç kuvvetleri oluşturduğu keskin hat eğrilerinde daha belirgindir. Bu da ray setinde önemli ölçüde oturmaya neden olabilir ve rayın yanlış hizalamasını şiddetlendirir. Zayıf rota geometrisi, balast muayenesi, bakımı ve bazen yeniden yapılanma nedeniyle önemli harcamalara neden olur. Örneğin, Avustralya'nın en büyük demiryolu ağı sahiplerinden biri olan Australian Rail Track Corporation (ARTC), 30 Haziran 2016 yılında sona eren demiryolu altyapısı bakım çalışmaları için toplam gelirinin %22,3'ünü hesaba katarak, 188 milyon Avustralya Dolar'ından fazla harcadı. Aynı yıl bu harcamayı en aza indirmek adına, dolguları güçlendirmek için geosentetik takviyesi başarıyla uygulamıştır. Mevcut geosentetikler grubundan Geocell'ler, demiryolu setlerini güçlendirmek için umut verici bir yol sağlar. Geocell malzemesi, gerilimi balast setlerinin içinde daha eşit bir şekilde dağıtır. Güçlendirilmiş balast setleri ayrıca güçlendirilmemiş balast setlerinden daha az dikey yer değiştirme ve yanal yayılma sergiler. Tamamen gerildiğinde ise panel genellikle birkaç metre genişliğindedir.

Geocell, granüler dolguları güçlendirmek için geliştirilmiş bir hücresel hapsetme sistemidir. Sistem, katlanmış bir biçimde tedarik edilir ve kullanımdayken, bal peteği benzeri, üç boyutlu (3D) bir panele uzatılır. Panel, dolgu malzemelerini barındırmak ve sınırlamak için bir alan sağlar ve birleştirmeyi kolaylaştırır. 20 m uzunluğa kadar, yaklaşık 250 mm kare ayrı hücre boşluğu, genişlikte ve 75 ila 200 mm arasında derinliğe sahiptir. Panel boyutu ve hücre alanı, bireysel gereksinimlere uyacak şekilde üretim sürecinin bir parçası olarak değiştirilebilir. Yaklaşık 5 mm kalınlığındaki hücre duvarı, genellikle yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) veya diğer polimer malzemeden oluşur ve su drenajına izin vermek, hücreler arasında kök büyümesini kolaylaştırmak ve dolgu ile kenetlenmeyi sağlamak için deliklidir. Daha yakın zamanlarda, yapılan çalışmalar ile güçlendirilmiş bir demiryolu setinde bir prototip testi ve sonlu eleman

(FE) analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, Geocell'in balast setin güçlendirilmesindeki üstünlüğünü doğrulamıştır.



Şekil 2. Demiryollarında Geocell kullanımı (Tarsu, 2021)

5.4.2. Asfaltsız Yollar İçin Geocell Takviyesi

Asfaltsız yollarda Geocell malzemesinin kullanımına dair dünyadan bazı örnek projeler;

- MEG Enerji- Ana Erişim Yolu (MEG J-Hook)
- CANFOR- Ağaçlandırma Bahçesine Erişim Yolu
- İlçe Yolu- Lac St Anne
- İlçe yolu- Long Run Exploration

Tüm bu projelerden edinilen bilgilere göre Geocell kullanımının sonucunda;

- Yol Geocell ile güçlendirildiği için herhangi bir ek çakıl malzemesi eklemesi gerekmemektedir.
- Tahmin edilen ve ölçülen iz derinliği arasındaki bir karşılaştırma yapılabilmektedir.
- Yolların belirli ESAL sayısı için tekerlek izi tasarım kriterleri için yeterli olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, tasarım yöntemi asfaltsız yollar için iyi sonuç verir ve küçük bir güvenlik faktörü marjına sahiptir. Ancak MEG J-Hook yolundaki başarısızlık, yolun tasarım sınırı aşıldıktan hemen sonra başarısız olabileceğini göstermiştir.

Bazı durumlarda tasarım tahmin edilenden daha iyi performans göstermektedir. Bu, özellikle CBR değeri açısından inşaat katmanlarının sağladığı gelişmeye bağlanabilir. Tüm çift katmanlı durumlarda, yapı veya alt katman, alt zemini iyileştirir, böylece tasarımda kullanılan alt zemin mukavemeti, daha büyük güvenlik marjı ile tasarım üretir. Sonuç olarak, gerçek uygulamada ilk kez uygulanan tasarım yönteminin geçerli ve güvenilir olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, tasarım hesaplamalarında iyileştirme ve yapı

performansının daha doğru bir şekilde izlenmesi için alan vardır (Pokharel vd., 2015).



Şekil 3. Asfaltsız yollarda Geocell takviyesinin uygulanması (Emersleben vd., 2008)

5.4.3. Asfaltlı Yollar İçin Geocell Takviyesi

Yurtiçi yüksek dereceli otoyolun asfalt kaplaması, genellikle yol yapım malzemelerinin standartların altında kalması, araçların aşırı yüklenmesi ve kanalizasyon edilmesi ve trafik hacminin artması nedeniyle asfaltın bozulmasını hızlandıran, hizmet ömrünü kısaltan hastalıklardan mustarıdır. Asfalt karışımının gerilme mukavemeti yeterli değilse, araç yükü altında kaplama yapısındaki aşırı çekme gerilmesi, kaplamada çatlaklara yol açacaktır. Buna ek olarak, yüksek sıcaklıkta, asfalt karışımı akış kayması deformasyonuna daha yatkındır ve sonunda izler oluşturur. Bir diğer hasar olan su hasarı; yapının genel performansı önemli ölçüde düşürür ve kaplamanın yaşam döngüsü maliyetini artırır. Ayrıca, yukarıdan aşağıya çatlaklar suyun girmesine izin veren asfalt kaplama hizmetlerinde karşılaşılan kaçınılmaz bir sorundur. Su, çatlaklar gibi çeşitli yollardan asfalt kaplamanın iç yapısına girer ve boşlukları birleştiren kanallarda serbestçe akar. Su, asfalt kaplamanın dayanıklılığını etkileyen ana faktörlerden biridir ve asfalt filminin soyulmasını hızlandırmak için asfalt tabakasını ıslatır. Geocell ile asfalt karışımı arasındaki yapışma azalacak veya hatta ayrılacak, böylece asfalt karışımının iç yapısının bütünlüğünü bozacak ve takviye etkisini kaybedecektir. Geocell ise yapının yüzeyine ve yapıların arasına yerleştirilerek yapıyı güçlendirip koruyabilen ve temelde kaplama tabanının mukavemetini artırmak, özel alt zemini işlemek için uygulanır. Geocell ile yolun yapısal performansın iyileştirilmesi üzerine araştırmalar yapan birçok bilim insanı vardır, ancak Geocell şu ana kadar asfalt kaplamaya uygulanmamıştır. Geocell'in yapısı büyük yanal kısıtlama ve sınırlayıcı bir etki sağlar. Geocell yan duvarı ile dolgu maddesi arasında

belirli bir sürtünme vardır. Bu özellik sayesinde, Geocell takviyeli asfalt karışımı, asfalt kaplamanın taşıma kapasitesini ve deformasyon direncini iyileştirmek için daha yüksek sertliğe ve mukavemete sahip bir kompozit yapı tabakası oluşturabilir. Böylece asfalt karışımının çeşitli performanslarını iyileştirebilir. Su stabilitesi göz önüne alındığında, donma-çözülme döngüsü sudan zarar gören asfalt karışımının özelliklerini daha iyi yansıtabilir.



Şekil 4. Geocell ile güçlendirilmiş asfalt (Lee vd., 2021)

- Geocell'in üç boyutlu yapısı ve asfalt karışımının kapalı numune oluşturma yöntemi göz önüne alındığında, Geocell takviyeli asfalt karışımı için yeni bir numune oluşturma yöntemi önerilmektedir. Deneysel sonuçlardan yola çıkarak, prizma numuneleri kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen yük değeri, mevcut formülle daha fazla dayanıma dönüştürülemez de asfalt karışımının Geocell takviyesinden önceki ve sonraki performansını da yansıtabilir.
- Güçlendirilmiş katmanlar incelendiğinde Geocell takviyesinden sonra asfalt karışımının bütünlüğünün bozulmayacağı ve Geocell şeridinin asfalt karışımına iyi yapışmayı sürdürdüğünü gösterir ki bu da Geocell'in asfalt karışımındaki rolünü oynamasının temelini oluşturur.
- Yüksek sıcaklığa dayanıklı Geocell takviyeli asfalt karışımı, üç ana güçlendirme mekanizması ile asfalt karışımının basınç dayanımını, yarıma gerilme mukavemetini ve kesme özelliğini geliştirmiştir. Ayrıca sıcaklığın artması ile asfalt karışımının basınç dayanımı ve yarıma dayanımı artar. Bu da Geocell'in asfalt karışımı üzerindeki takviye etkisinin yüksek sıcaklıkta daha belirgin olduğunu, Geocell malzemesinin yanıl kısıtlama etkisinin ise asfalt karışımının akış

deformasyonunu daha iyi sınırlayabildiğini göstermektedir.

- Donma-çözülme döngüsünden sonra, Geocell ile güçlendirilmiş numunelerin donma-çözülme yarıma mukavemeti oranı daha yüksektir. Bu da Geocell takviyesinin asfalt karışımının su stabilitesini iyileştirebileceğini gösterir. Dahası, su Geocell şerit ile asfalt karışımı arasındaki yapışmayı aşırı derecede bozamaz ve Geocell yine de bir rol oynayabilir.
- Geocell varlığı nedeniyle, asfalt karışımının geri kazanılamaz deformasyonu, her döngüsel yük döngüsünde azaltılır, bu da asfalt karışımının sınır deformasyona ulaşması için gerekenden daha fazla döngüye yol açar, yani yolculuk ömrü artar.
- Geocell takviyeli asfalt karışımı, aynı Geocell yüksekliğinde kompozit bir tabaka yapısı oluşturacaktır. Kompozit katman, asfalt karışımının taşıma kapasitesini ve deformasyon direncini iyileştirmek için ana faktör olan daha fazla mukavemete ve sertliğe sahiptir ve bu nedenle asfalt karışımının performansını etkili bir şekilde artırabilir (Lee vd., 2021).

5.4.3.1 Geocell ile Güçlendirilmiş Asfalt Kaplamaların Deformasyonlarını Etkileyen Faktörler

Ulusal Asfalt Kaplama Birliği'ne (UAKB) göre, Amerika Birleşik Devletleri 2,7 milyon km'den fazla asfalt yola sahiptir ve bunların %94'ü esnek kaplamalardır. Hizmet ömürlerinin sonuna ulaşan esnek kaplamalar, mevcut asfalt yüzeyleri kaldırılarak ve çıkarılan kısımlar yeni sıcak karışım asfalt (YSKA) ile değiştirilerek sıklıkla rehabilite edilir. Mevcut esnek kaplamaların rehabilitasyonu ve yeniden inşası sırasında her yıl büyük miktarda geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (DAK) malzemesi oluşturulur. DAK, frezeleme veya tam derinlikli geri kazanım yöntemiyle elde edilir. Frezeleme, 50 mm kalınlığa kadar asfalt kaplamanın tek bir geçişte mekanik olarak kaldırılmasını içerirken, tam derinlikli bir kurtarma yöntemidir ve asfalt kaplamanın tamamını çıkarmak için bir buldozere bağlı bir kaldırım kırıcı veya gergedan boynuzu kullanılır. YSKA 'ya göre, Amerika Birleşik Devletleri her yıl yaklaşık 500 milyon ton asfalt kaplama malzemesi üretmekte ve kaplama yapımında işlenmemiş agrega ve asfalta alternatif olarak DAK kullanımını desteklenmektedir. Kaplama yapımında granül bir temel malzeme olarak DAK kullanımının, kaplama inşaatı için sürdürülebilir bir seçenek

olabileceğini bilinmektedir. Literatür %100 DAK kullanımının yüksek kalitede temel üretmediğini ortaya koymaktadır. Geçmişte, DAK malzemesini işlenmemiş agregalarla harmanlayarak ve kimyasal katkı maddeleri kullanarak stabilize ederek, yolları iyileştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, geosentetiklerle, özellikle de Geocell ile stabilize edilmiş DAK malzemesinin performansını araştırmak için sınırlı araştırma yapılmıştır. Performanstaki iyileşme, kalıcı yüzey deformasyonunun azalması ve esnek deformasyonun artması açısından sunulmuştur. Kalıcı deformasyondaki azalma, göreceli iyileştirme faktörü cinsinden sunulmuştur. Bunlar;

- Kalıcı deformasyon miktarı ve oranı yüklemeye döngülerinin sayısı ile artmıştır.
- Geocell takviyesi ile güçlendirilmiş tabanlarının kalıcı deformasyon performansını, güçlendirilmemiş tabanlara kıyasla 1,1-11,4 kat artırmaktadır.
- DAK taban kalınlığının 150 mm artması DAK temel bölümünün kalıcı deformasyon performansını 1,1-2,7 kat artırmaktadır.
- Temel katman ve alt zemin katmanlarının güçlü yönleri temel bölümlerinin performansını etkilemektedir.
- Alt zemin CBR'nin %2'den %5'e yükseltilmesi, temel bölümlerinin kalıcı deformasyon performansını 1,2-17,2 kat artırmaktadır.
- Daha kalın donatısız ve güçlendirilmiş bölümler, karşılık gelen daha ince bölümlerden daha iyi performans gösterir ve yüksek taban ve taban kat mukavemetine sahip bölümler, düşük taban ve taban kat dayanımlarına sahip ilgili bölümlerden daha iyi performans göstermektedir.
- Alt zemin mukavemetindeki Geocell takviyesindeki ve taban tabakasının kalınlığındaki artış, kalıcı yüzey sıkışması ve kabarma miktarını azaltır.
- Geocell temellerin esnek davranışını iyileştirir ve iyileştirme derecesi zayıf alt tabanın üzerindeki bölümler için orta alt tabakanın üzerindeki bölümlere göre daha yüksektir.
- Geocell ile güçlendirilmiş taban bölümleri ve orta alt tabaka üzerindeki taban bölümleri sabit bir tepki gösterirken, zayıf alt tabaka üzerindeki takviye edilmemiş taban kararsız bir tepki göstermektedir.

Esnek kaplama rehabilitasyon projelerinden önemli miktarda geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesi üretilmektedir. DAK, sürdürülebilir kaplama inşası için temel malzeme olarak kullanılabilir. Bir kaplamanın performansı büyük ölçüde, alt zemin ve temel katman katmanlarından oluşan temelinin gücüne bağlıdır. Geocell sınırlamasının, güçlendirilmemiş tabanlara kıyasla kalıcı yüzey deformasyonlarını azaltarak ve esnek deformasyon yüzdelere artırarak güçlendirilmiş DAK tabanlarının performansını iyileştirmektedir. Alt zemin mukavemeti, temellerin özellikleri üzerinde Geocell sınırlamasından daha belirgin bir etkiye sahiptir. Geocell hapsi, zayıf alt tabakanın üzerindeki bazlar için, orta dereceli alt tabakanın üzerindeki bölümlere göre daha yararlıdır. Yükleme çevrimlerinin sayısı ile kalıcı deformasyon artmaktadır (Thakor, 2016).

5.5. Geocell Takviyesi ile Sürdürülebilir Yol İnşası

Gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden ödün vermeden günümüzün ihtiyaçlarını karşılayan gelişme, sürdürülebilir kalkınmadır. Sürdürülebilir inşaat, sürdürülebilir teknoloji ve bilgi kullanımı yoluyla sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı amaçlamaktadır, ancak inşaat endüstrisi hala geleneksel uygulamayı takip etmekte önemli çevresel ve karbon ayak izi bırakmaktadır.^[13] Doğal çevremiz üzerindeki etkiye neyin sebep olduğunun anlaşılması ile CO₂ emisyonu bir projenin sürdürülebilirliğini tanımlayan nicel önlemlerden biri olarak kabul edilmiştir. Yol inşaatı faaliyetleri, CO₂'e büyük katkıda bulunmaktadır. Konvansiyonel uygulamalar, tartışıldığı gibi sonuç odaklıdır ve sadece beklenen trafik durumu için yolların ve otoyolların gerekli yapısal kapasitesini sağlamaya odaklanırlar. Günümüzde yolları inşa etmek için gereken daha az miktarda malzeme ve aktivite kullanırken aynı yapısal kapasiteyi sunan yenilikçi teknolojiler vardır ve bu da daha az CO₂ emisyonu ile sonuçlanmaktadır.

Yüksek mukavemetli Geocell'in takviyesinin kullanılmasıyla hem yol yapım maliyetinin hem de karşılık gelen CO₂ emisyonlarının, geleneksel inşaat alternatifine kıyasla büyük ölçüde azaldığını göstermektedir. Yenilikçi geosentetik alternatiflerin kullanılmasının yol altyapısının yaşam döngüsü boyunca CO₂ emisyonlarında %20'ye kadar tasarruf sağlayabileceği günümüzde bilinmektedir.

Yol inşaatı, pahalı ve büyük miktarda kaynak gerektirdiğinden inşaat sektörüne değiştirilmesi gereken ve çevresel açıdan en büyük etkenlerden biridir. Bu etkenler; inşaat malzemesinin kullanılması (özellikle

madencilik işlenmemiş agregaların), malzemenin şantiyeye taşınması ve çevreye karbondioksit ve diğer kirleticiler yayan ağır inşaat ekipmanlarının kullanıldığı yerinde inşaat süreci gibi konularla sürdürülebilir kalkınmaya meydan okur. Sürdürülebilir kalkınmanın üç temel unsuru olan çevre, ekonomi ve toplum ele alınmadan sürdürülebilirlik elde edilemez. Sürdürülebilirliğin çevresel yönleri son dönemlerde diğer faktörler arasında en çok dikkati çekmiştir. CO₂ emisyonu, bir projenin ne kadar çevre dostu olduğunun somut bir ölçüsü olarak incelenir. Eylemlerin mümkün olan en adil ve mali açıdan mantıklı bir şekilde gerçekleştirilmesini gerektiren sürdürülebilirliğin ekonomik ayağı da yıllar içinde dikkatleri üzerine çekmiştir. Ancak, en ekonomik yol her zaman en sürdürülebilir yol değildir (Norouzi vd., 2017).

5.5.1. Geocell Kullanılmasıyla Elde Edilen Ekonomik Faydalar

Konvansiyonel tasarıma kıyasla doğrudan inşaat maliyetlerinde %5,8 tasarruftur. Geleneksel 20 yıllık beklenen kaplama bakım maliyetlerinden %50 tasarruf edilir. Beklenen geleneksel yaşam döngüsü maliyetinden %21,5'lik toplam tasarruf sağlanır. Daha düşük ekipman gereksinimleri nedeniyle ek dolaylı tasarruflar arasında lojistik, taşıma, sıkıştırma, insan gücü ve daha az trafik kısıtlaması bulunur (Kief vd., 2014).

5.5.2. Geleneksel Yöntemlerin-Neoloy Geocell Alternatif Yöntem ile Karşılaştırılması

Her yol inşaatı, tedarik, maliyet ve gereken kapsamlı inşaat çabası gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Geleneksel zorluklara ek olarak, çevre sorunları son yıllarda büyük ilgi görüyor. Bu nedenle, bu tür zorluklardan kaçınmak için yenilikçi çözümler kullanma gerekliliği her zamankinden daha fazla hissedilmektedir. Geleneksel yöntemlerin karşılaştığı en büyük zorluklar şu şekilde sıralanabilir:

- Yakınlarda çakıl bulunmaması,
- Yüksek nakliye maliyeti ve karbon emisyonu,
- Aşırı yumuşak alt zorlu geoteknik koşullar ve pahalı kaldırma ve doldurma işlemleri,
- Sınırlı geçiş hakkı,
- Sınırlı inşaat süresi çizgisi,
- Son derece yoğun bir trafik oluşmasıdır (Pokharel vd. 2016).

Dünyadan Geocell kullanımına örnek sürdürülebilir projeler; erişim yollarını, servis yollarını ve ilçe yollarını temsil eden 2012'den sonra inşa edilen dört

proje, Neoloy Geocell takviyesi ile tasarlanan ve inşa edilen yolların sürdürülebilirliğini incelemek ve geleneksel yöntem ile karşılaştırabilmek için temsili örnek olarak gösterilmiştir.

- MEG Enerji Şirketi -Geçici erişim yolu -P3 Konektör, (**Durum 1**)
- MEG Enerji-Ana Erişim Yolu (C- Yolu),(**Durum 2**)
- Fort Mc Murray'ın kuzeyinde ki petrol üreticisi şirket için dere geçişi (**Durum 3**)
- İlçe yolu 762, Uzun Süreli Keşif ve Smoky River Belediye Bölgesi (**Durum 4**) (Pokharel vd. 2016).

Tablo 2. Örnek durumlarda Neoloy Geocell alternatif yöntem (Pokharel vd., 2016)

GEOCELL ALTERNATİF YÖNTEM				
Temsilcisi Durumu	Miktar (Ton)	Toplam taşıma (km)	Kaldırma (m ³)	CO ₂ Emisyon(kg)
Durum 1	48,993	153,578	-	1,033,321
Durum 2	51,744	219,288	-	1,633,276
Durum 3	10,560	14,272	-	114,210
Durum 4	18,768	63,159	-	547,466

Tablo 3. Örnek durumlarda geleneksel yöntem (Pokharel vd., 2016)

GELENEKSEL YÖNTEM				
Temsilcisi Durumu	Miktar (Ton)	Toplam taşıma (km)	Kaldırma (m ³)	CO ₂ Emisyon(kg)
Durum 1	83,866	274,609	23,040	1,654,191
Durum 2	110,670	398,042	57,600	2,410,457
Durum 3	16,560	19,872	5,20	269,994
Durum 4	28,152	90,086	-	736,006

Geocell kullanılarak yenilikçi inşaat yönteminin de toplam miktarı azalır toprak ve agrega, nakliye, misk temizleme ve CO₂ emisyon azalır. Toplam tasarruf %30 ila %50 aralığındadır ve nihayetinde nakliye sırasında en az %30 tasarruf sağlamaktadır. Bu azaltılmış taşıma, CO₂ emisyonunun azaltılmasına önemli bir katkıda bulunur. Neoloy Geocell takviyeli yol yapılarının çok az bakım gerektirdiğini ve kayda değer bir yüzey bozulması göstermediğini bilinmektedir. Yolun tüm yaşam döngüsünün analiz edilmesi, daha az bakım çalışması gerektirmesi ve Neoloy Geocell kullanan yolların daha uzun hizmet ömrü açısından daha fazla

tasarruf sağlayacaktır. Yoğun trafiğe sahip kaplamasız erişim yollarının inşası, büyük miktarda agrega madenciliği ve kıt işlenmemiş agrega alanlarında uzun taşıma gerektirir.

Bu yol inşaatlarındaki geleneksel uygulamalar yapısal yeterlilik arar, ancak hiçbir zaman özellikle sürdürülebilirlik konusuna değinmez. Yapısal bütünlüğü korurken agrega malzemesinin hacmini azaltabilen yenilikçi teknoloji, bu yol yapımının sürdürülebilirlik sorununu ele almak için gereklidir. Geocell ise gerekli agrega miktarını önemli ölçüde azaltarak güçlendirilmiş kompozitin modülünü ve mukavemetini ve yol yapısının dayanıklılığını iyileştirir. Bu erişim yollarının işletilmesi aynı zamanda işletme maliyetinden, bakımdan ve arıza süresinden de tasarruf sağlamaktadır. Neoloy Geocell ayrıca, geleneksel inşaatın genel performansını hala aşan yol yapımı için geri dönüştürülmüş ve yerel olarak temin edilebilen daha ucuz malzemelerin kullanılmasını mümkün kılar. Sürdürülebilirlik açısından, işlenmemiş malzeme madenciliği ve şantiyeye nakliye için karbon ayak izi analiz edildiğinde fayda daha görünür olacaktır (Pokharel vd., 2016).

6. GEOCELL MALZEMESİNDEN GELECEKTEKİ BEKLENTİLER

Geocell; geleneksel zemin güçlendirme tekniklerine kıyasla geoteknik mühendisliğinde nispeten yeni bir malzemedir. Aşağıdakiler Geocell hapsi alanında gelecekteki araştırma kapsamını belirlemektedir.

- Geçmişte yürütülen çalışmaların çoğu, küçük ölçekli laboratuvar model testleridir. Mevcut teoriler ve modelleme teknikleri de laboratuvar modeli çalışmalarından türetilmiştir. Küçük ölçekli model testlerinin sonuçları ölçek etkilerine tabi tutulmuştur. Bu nedenle, küçük ölçekli model testlerinin bulgularını belirlemek için giderek daha fazla saha testi veya santrifüj modeli yapılacaktır. Tam ölçekli testlerin model çalışmalarının bulgularını ne ölçüde kopyaladığını kontrol etmek ilginç olacaktır.
- Geçmiş çalışmaların çoğu, yer hücrelerinin statik yük uygulamaları ile sınırlıdır. Döngüsel yüklemeye maruz kalan yer hücrelerinin performansı hakkındaki bilgiler sınırlıdır. Bu konuda deney ve 3 boyutlu sayısal çalışmaların yürütülmesine şiddetle ihtiyaç vardır. Bu, hücrelerin uygulamalarının makine temellerine, depreme dayanıklı tasarımlara ve demiryolu temellerine vb. genişletilmesine yardımcı olacaktır.

- Geocell başarılı uygulamaları ile ilgili çok fazla vaka çalışması belgelenmemiştir. Geocell'in kullanımını yaygınlaştırmak için giderek daha fazla vaka geçmişinin sistematik dokümantasyonu gereklidir.
- Sağlam tasarım metodolojilerinin ve analitik formülasyonların geliştirilmesine güçlü bir ihtiyaç vardır. Bu analitik formülasyonlar, özellikle Geocell ile güçlendirilmiş temel yataklarının taşıma kapasitesini ve oturmasını tahmin etmek için gereklidir. Şu anda, Geocell ile güçlendirilmiş zeminin oturma hesaplaması için gelişmiş bir metodoloji mevcut değildir.
- Geocell yüzeyindeki gerilmelerin ve gerilmelerin değişimini anlamak için giderek daha gerçekçi 3B sayısal simülasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı yük türleri altında Geocell davranışının yakından anlaşılması, yer hücrelerinin tasarımının optimize edilmesine yardımcı olacaktır (Hegde, 2017).

7. SONUÇ

Geocell malzemesi, Birleşik Devletler Ordusu Mühendisliği tarafından 1970 yılında icat edilmiş ve zamanla inşaat sektöründe kullanımı gerçekleşmiştir. Geocell malzemesi bal peteği formu ile şevlerde erozyona karşı koruma görevinde kullanılmaktadır. Geometrik şeklinin sayesinde hapsetme özelliğine sahiptir ve bu amaçla zeminlerinde güçlendirilmesinde doğal agregalar ile iç dolguları gerçekleştirilerek uygulanmaktadır. Diğer geosentetik malzemeler gibi Geocell de istinat duvarlarında kuvveti yayma amacı ile kullanarak mühendislik çözümler üretir. Hidrolik yapılarda ise aşınma ve oyulma problemlerinin önüne geçilmesi için çok uygun bir forma sahip olmasından dolayı uygulamalarda tercih edilerek yapının hizmet ömründe artış sağlamaktadır. Daha aktif bir şekilde karayolları ve demir yollarında tercih edilen geosentetik malzeme türü olan Geocell; hücre dolgu sistemi olarak da nitelendirilmektedir.

Karayollarında asfaltlı ve asfaltsız yollarda Geocell takviyesi ile taşıma kapasitesi iyileştirilen yolların kalitesini artırarak ülke ekonomisine de katkı sağlamaktadır. Yol kaplamalarında, asfaltın güçlendirilmesi gibi uygulamalarda da tercih edilmiş olan Geocell'in bu amaçla kullanımı ve başarılı sonuçlarına dair dünya üzerinde birçok örnekler bulunmaktadır. Günümüzün en büyük problemi olan CO₂ emisyon problemi ve hava kirliliği konusunda ise

çevre dostu olan Geocell sürdürülebilir yol projelerinde aktif olarak görev almaktadır. Geleneksel yöntemlere göre daha ekonomik, daha pratik ve daha doğa dostu olduğu kanıtlanmış ve bu sebeple uygulama alanları artmaktadır. Özellikle sürdürülebilir yol projelerinde Geocell ürünlerinden olan Neoloy Geocell kullanılmaktadır. Bu sayede taşıma ve nakil işlemleri ile havaya salınan CO₂ oranında azalma yaşanmaktadır ve zemin oturması problemine yüksek oranda çözüm sunmaktadır. Günümüzde Geocell malzemesinin üzerinde yapılan çalışmalar devam etmektedir. Bu sebeple gelecekte daha çok uygulama alanlarında performans sağlaması beklenmekte ve daha fazla saha çalışmaları ile yer hücrelerinin projelendirilmesinde optimize edilmesine yardımcı olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Briswas A., Krishna A. (2017). Geocell-Reinforced Foundation Systems: A Critical Review. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, 3(17).

Emersleben A., Meyer N. (2008). Bearing Capacity Improvement Of Asphalt Paved Road Constructions Due To The Use Of Geocells – Falling Weight Deflectometer And Vertical Stress Measurements, *Asian Regional Conference on Geosynthetics*.

Hegde A. (2017). Geocell reinforced foundation bedspast findings present trends and future prospects prospects: A state-of-the-art review, *Construction and Building Materials*, 154, 658-674, Indian Institute of Technology Patna.

Huang M., Cheng L., Pokharel S.K., Tura A., Mukhopadhyaya P. (2021). Model tests of freeze-thaw behavior of geocell-reinforced soils, *Geotextiles and Geomembranes*, 49, 669-687, University of Victoria.

Inti S., Tandon V. (2021) Design of geocell reinforced roads through fragility modeling”, *Geotextiles and Geomembranes*, 41, 55–63.

Işık A., Gürbüz A., Anıl Ö. (2020). Zemin-hücre sel dolgu elemanlarının sürtünme davranışlarının laboratuvarında yapılan çekme deneyleri ile belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 27-38.

Kief O., Schary Y. Pokharel S.K. (2014). High-Modulus Geocells for Sustainable Highway Infrastructure, *Indian Geotechnical Journal:Special Issue on Transportation Geotechnics*.

Khorsandiardabili N., Ghazavi M.(2021). Static stability analysis of geocell-reinforced slopes”, *Geotextiles and Geomembranes*, 49, 852-863, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology.

Latha G.M. (2021). Geocells for Transportation Geotechnical Applications, *Indian Geotech J*, 51(3), 612–623.

Li X., Zhu Y., Su T., Wang X., Zhang X. (2021). Study on performance improvement of new geocell reinforced asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, Wuhan University of Technology, 273, 121-693.

Mehrdadi T.G., Behrad R., Tafreshi S.N.M. (2019). “Scale effect on the behavior of geocell – reinforced soil”, *Geotextiles and Geomembranes*, 47, 154-163, Kharazmi University.

Norouzi, M., Pokharel S. K., Breault M., Breault D. (2017). Innovative Solution for Sustainable Road Construction, *Leadership in Sustainable Infrastructure*, June 3.

Pokharel S.K., Martin I., Norouzi M., Breault M. (2015). Validation of Geocell Design for Unpaved Roads, *Geosynthetics Conference*.

Pokharel S.K., Norouzi M., Martin I., Breault M. (2016). Sustainable Road Construction for Heavy Traffic Using High Strength Polymeric Geocells, *Resilient Infrastructure*, June 1-4.

Pokharel S.K., Han J., Leshchinsky D., Parsons R.L. (2018). “Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading”, *International Journal of Pavement and Technology*, 11, 114-127.

Thakur J. K., Han J., Parsons R. L. (2016). Factors Influencing Deformations of Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement Bases under Cyclic Loading, *ASCE, University of Kansas*, 29(3).

<https://www.movea.com.tr/hizmetler/hucresel-dolgu-sistemi> (Erişim Tarihi:10.05.2021).

<https://www.tarsu.com/tr/haberdetay/neden-geocell%E2%80%99ler-yol-yapimi-icin-geogridler%E2%80%99den-daha-iyi.html> (Erişim Tarihi:20.05.2021).