

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Bahadır OK

**GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İNŞAAT VE
YIKINTI ATIĞI DOLGULARIN STATİK VE TEKRARLI
YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2018

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İNŞAAT VE YIKINTI
ATIĞI DOLGULARIN STATİK VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Bahadır OK

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez .././2018 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Doç.Dr. Tuğrul TALASLIOĞLU
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Hanifi ÇANAKÇI
ÜYE

.....
Prof. Dr. Hasan ÇETİN
ÜYE

.....
Doç. Dr. Murat ÖRNEK
ÜYE

.....
Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir. Bu tez Çukurova Üniversitesi ile Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi arasında uygulanan protokole dayalı olarak kurulan, ortak İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalına bağlı aynı isimli Doktora Programında tamamlanmıştır.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

**GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İNŞAAT VE YIKINTI
ATIĞI DOLGULARIN STATİK VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Bahadır OK

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Doç. Dr. Tuğrul TALASLIOĞLU
İkinci Danışman : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Yıl: 2018, Sayfa: 377
Jüri : Doç. Dr. Tuğrul TALASLIOĞLU
: Prof. Dr. Hanifi ÇANAKÇI
: Prof. Dr. Hasan ÇETİN
: Doç. Dr. Murat ÖRNEK
: Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK

Bu çalışmada inşaat ve yıkıntı atıklarının statik veya tekrarlı yüklere maruz dolgularda doğal agregalar yerine kullanılabilmesi durumu yapılan laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. Ayrıca çalışmada inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilecek dolguların, kaliteli doğal agrega malzemeden inşa edilecek dolguların yük deplasman davranışını yakalayabilmesi için gosentetiklerle (geotekstil, geogrid, geocell) iyileştirilmesi de araştırılmıştır. Deneyler inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilmiş güçlendirmeli ve güçlendirmesiz dolgu tabakaları ve kıyaslamak amacı ile doğal agrega malzemeden inşa edilmiş dolgu tabakaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde granüler dolgu tabakası yumuşak zemin üzerine yerleştirilmiş ve ayrı ayrı hem statik hem de tekrarlı yüklemelere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları üzerinden istatistiksel analizler (MLR, MNLR ve M5T) yapılarak bazı denklemler elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin performansının kaliteli doğal agrega malzemeye göre düşük olduğu ama az bir geosentetik iyileştirme ile doğal agrega dolgulardan daha iyi performans gösterebileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Granüler Dolgu, Geosentetik Güçlendirme, Zemin İyileştirme, İnşaat ve Yıkıntı Atığı, Statik ve Tekrarlı Yükleme

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE EMBANKMENT REINFORCED WITH GEOSYNTHETICS

Bahadır OK

**CUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuğrul TALASLIOĞLU
Co-Supervisor : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Year: 2018, Page:377
Jury : Assoc. Prof. Dr. Tuğrul TALASLIOĞLU
: Prof. Dr. Hanifi ÇANAKÇI
: Prof. Dr. Hasan ÇETİN
: Assoc. Prof. Dr. Murat ÖRNEK
: Asst. Prof. Dr. Baki BAĞRIAÇIK

In this study, the use of construction and demolition wastes instead of natural aggregates in embankments subjected to static or repeated loads was investigated with the help of laboratory tests. Moreover, it was also studied the behaviour of the embankment created from the construction and demolition waste materials reinforced with geosynthetics (geotextile, geogrid, geocell) to reach the load displacement behavior of the embankment constructed from high quality natural aggregate materials. Tests were carried out on the filler layer built from the natural aggregate material to compare comparison with reinforced and unreinforced filler layer built from construction and demolition waste material. In the tests, the granular filler layer was placed on the soft soil, and then static and repeated loads were applied to it, separately. Statistical analyses (MLR, MNLR and M5T) were performed on the results of the laboratory tests and some equations were obtained. As a result of this study, it was determined that the performance of construction and demolition waste material is lower than that of high quality natural aggregate material. However, it was also found that construction and demolition waste material with a little geosynthetic reinforcement could perform better than natural aggregate material.

Keywords: Granular Fill, Geosynthetic Reinforced, Soil Improvement, Construction and Demolition Waste, Static and Repeated Load

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Dünya genelinde tüketilen doğal kaynakların ve üretilen atıkların yaklaşık %50'sinden inşaat sektörü sorumludur. İnşaat mühendisliği uygulamalarında en çok tüketilen doğal kaynaklardan biri agregalardır. Dünya genelinde inşaat sektörünün hızla büyümesi ile agregaların tüketimi de hızla arttırmaktadır. Sektördeki büyüme ile birlikte artan agrega ihtiyacı ise, genellikle açılan yeni taş ocakları ile karşılanmaktadır. Ayrıca agrega yenilenebilir bir doğal kaynak olmaması sebebi ile herhangi bir taş ocağının rezervi bittiğinde yeni taş ocakları açılmaktadır. Ancak genellikle doğa ile iç içe bulunan taş ocaklarının hızlı artışı çevreyi tahrip etmekte ve agrega kaynaklarını hızla tüketmektedir. Sürdürülebilir çözümler üretilmezse bu doğal kaynakların komple yok olması kaçınılmaz olacaktır.

İnşaat ve yıkıntı atıkları yapıların yıkılması, onarılması ve tekrar inşa edilmesi gibi inşaat faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan atıkların genel ismidir. Dünyanın hemen hemen her bölgesinde bu atıklar üretilmektedir. Avrupa genelinde yılda 310 ila 720 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı çıkmakta ve bu miktarlar her geçen yıl artmaktadır. İnşaat yıkıntı atıklarının depolanması veya bertaraf edilmesi için gereken enerji ve depolama sahaları, hem maliyetli hem de çevreye zararlıdır. Ayrıca depolama sahaları arazinin atıklarla işgal edilmesi ile israf edilmesine sebep olmaktadır. Ülkemizde ise 2012 yılında çıkan 6306 sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun” ile riskli bulunan yaklaşık 6-7 milyon yapının yıkılması planlanmaktadır. Bu yapıların yıkılması sonucu büyük miktarlarda inşaat ve yıkıntı atığı oluşacağı düşünülmektedir.

Artan doğal agrega ihtiyacı, taş ocaklarının çevreye verdiği zararlar, madencilikle ilgili ağırlaşan çevresel yönetmeliklerle doğal agregaya ulaşımın zorlaşması ve maliyetlerin artması doğal agregaya alternatif malzemelerin düşünülmesini teşvik etmiştir. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atıklarının bertaraf edilmesi için gerekli depolama alanları, bu depolama alanlarının çevreye vereceği zararlar,

harcanacak enerji için gerekli maddi kaynaklar ve kaynakların sürdürülebilirliği düşünüldüğünde bu atıkların mümkün olduğunca geri dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu atıklar, belli oranlarda yeni beton üretiminde, statik yüke maruz çeşitli dolgularda (spor, oyun tesisleri, kablo döşemesi, drenaj sistemlerinde, hafif yapıların altında dolgu olarak ve benzeri alanlarda), tesviye amaçlı dolgularda ve tekrarlı yüke maruz kalabilecek çeşitli dolgularda (düşük hacimli yol temel ve alt temelleri, otoparklar ve yürüyüş parkurları ve benzeri alanlarda) agrega yerine dolgu malzemesi olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

Bu çalışmanın amacı inşaat ve yıkıntı atıklarını geri dönüştürerek, statik yüklere maruz dolgularda veya tekrarlı yüklere maruz yol temel/alt temel dolgularında kullanılabilirliğini araştırmaktır. Birçok farklı malzemeyi heterojen bir şekilde içerebilen, temin edildiği nispeten az mühendislik hizmeti almış binaların beton kalitesindeki düşüklük ve değişkenlik göz önüne alındığında, dış etkilerin (statik veya tekrarlı yükler) inşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilecek dolgularda, kaliteli doğal malzemeden inşa edilmiş dolgulara göre biraz daha fazla deformasyon oluşabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple inşaat ve yıkıntı atığı malzemeleri kaliteli doğal agrega malzemelerin performansına getirebilmek için geosentetiklerle güçlendirmek ve bu atıkların geosentetiklerle birlikte göstereceği davranışı incelemekte bu çalışmanın bir amacıdır. Bu amaçlar doğrultusunda depreme dayanıksız olduğu belirlenen çok katlı bir binanın kontrollü yıkılmasından sonra çıkan inşaat ve yıkıntı atığı alınmış ve çeşitli işlemlerle geri dönüştürülmüştür. Geri dönüştürülen atık malzeme üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, birim hacim ağırlık, su emme, yassılık indeksi, Los Angeles, modifiye kompaksiyon ve CBR) yapılarak, malzemenin fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi için temin edilen ve uygun gradasyona ayarlanan doğal agrega karışımı malzeme üzerinde de benzer laboratuvar deneyleri yapılmıştır. İnşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilecek dolgunun performansı araştırılırken güvenli tarafta kalınarak dolgunun elverişsiz koşullara sahip zayıf zemin üzerindeki davranışı incelenmek

istenmiştir. Bu nedenle zayıf zemin üzerine geosentetiklerle güçlendirmeli ve güçlendirmesiz inşaat ve yıkıntı atığı dolgu inşa edilmiş sonrasında üzerinde statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Benzer deney şartlarında doğal agrega dolgu üzerinde de statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden çoklu doğrusal regresyon (MLR), çoklu doğrusal olmayan regresyon (MNLR) ve M5T (karar ağacı) gibi istatistiksel analizler yapılarak değişkenlilerin birbirleri ile ilişkileri belirlenmiştir. Statik yüklemeli deney sonuçlarından elde edilen taşıma gücü değerleri, iki farklı analitik yöntem kullanılarak elde edilen taşıma gücü değerleri ile kıyaslanmıştır.

Geleneksel laboratuvar deneyleri sonucunda, çalışma kapsamında geri dönüştürülerek elde edilen inşaat ve yıkıntı atığının, farklı ülkelerdeki çalışmalarda geri dönüştürülen inşaat ve yıkıntı atıklarına yakın fiziksel ve geoteknik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ancak çalışma kapsamında elde edilen kaliteli doğal agregaların fiziksel ve geoteknik özellikleri inşaat ve yıkıntı atığına göre biraz yüksek çıkmıştır.

Statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri sonucunda, inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun performansı doğal agrega dolgunun performansına göre biraz düşük çıkmıştır. Ancak her iki yükleme durumu içinde az bir geosentetik iyileştirme ile (ince bir geocell veya tek sıra geogrid vb.) inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun performansının doğal agrega dolgu performansını geçebildiği görülmüştür. Ayrıca güçlendirme amaçlı geotekstil donatı ile, düşük yük düzeylerinde doğal agrega dolgunun performansının yakalanabildiği fark edilmiştir.

İstatistiksel analizler sonucunda, statik yüklemeli deneylerden elde edilen taşıma gücü oranları ile, tekrarlı yüklemeli deneylerde de elde edilen toplam kalıcı deplasmanlar ile, farklı değişkenler arasında güçlü ilişkiler kurulabilmiştir. M5T (karar ağacı) istatistiksel analizi ile diğer istatistiksel analizlere göre, değişkenler arasında daha güçlü ilişkiler elde edilebildiği görülmüştür.

Statik yüklemeli durumda güçlendirmesiz deneyler için yapılan iki farklı analitik çözüm sonucunda, özellikle dolgu kalınlığının az olduğu durumlarda deney sonuçları ile analitik çözümlerin yakınsadığı görülmüştür.



TEŞEKKÜR

Çalışmamın bütününde yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana daima yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tuğrul TALASLIOĞLU ve ikinci danışman hocam Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın bütünündeki desteklerinden dolayı dostum Arş. Gör. Talha SARICI ve İ. Fatih ATASEVER'e, deneysel çalışmalardaki önemli katkılarından dolayı değerli arkadaşım Murat AKKOYUN'a, Furkan KILIÇEL'e, çalışmadaki istatistik kısmına yaptığı önemli destekten dolayı Arş. Gör. Yunus Ziya KAYA'ya, oldukça kıymetli fikirleri sebebi ile Öğr. Gör. Hakan ERKEK, Arş. Gör. Gökhan ALTAY, Arş. Gör. Dr. Evren TURHAN, Arş. Gör. Yavuz Çetin CUMA, Arş. Gör. Atakan TANTEKİN ve Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK'a, teşekkürü bir borç bilmekteyim.

Ayrıca bu süreçte desteğini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi A. Emre KELEŞ'e, Arş. Gör. İslam GÖKALP'e, Arş. Gör. Mustafa TOLUN'a, Arş. Gör. Sedat KARAAHMETLİ'ye çok değerli yardımlarını gördüğüm Adana B.T.Ü. personellerinden Cevdet YILDIRIM, Hasan DAŞ ve Cenk ÇELER'e, O.K.Ü. personellerinden Yakup Bakır'a, Ç.Ü. personellerinden Süleyman EVLEKSİZ ve Muzaffer KURT'a, Osmaniye İl Özel İdaresi'nden İnş. Yük. Müh. Mesut OVALI ve Feridun FIRAT'a teşekkürlerimi bildiririm. Desteklerinden dolayı "Geoplas" firmasına ayrıca teşekkür ederim.

Tez süresince hep arkamda olduklarını hissettiren, deneysel çalışmalar ve basım aşaması da dahil olmak üzere bu süreçte desteklerini hiç esirgemeyen babam Halit Bülent OK, annem Sezen OK ve ağabeyim Gökem OK'a sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi iletmek isterim.

Yoğun çalışmalarım sırasında sabır gösteren ayrıca çalışmamın her aşamasında maddi manevi desteklerini esirgemeyen çok kıymetli eşim can yoldaşım Ferdane OK'a ve moral kaynağım biricik oğlum Uras Efe OK'a sonsuz teşekkür ve sevgilerimi iletirim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XIV
ŞEKİLLER DİZİNİ	XVI
SİMGELER VE KISALTMALAR	XXX
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. Çözüm Önerileri	10
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	14
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	17
2.1. Statik Yüklere Maruz Zeminler ve Temel Göçme Mekanizmaları	17
2.1.1. Genel Kayma Yenilmesi.....	18
2.1.2. Yerel (Bölgesel) Kayma Yenilmesi.....	19
2.1.3. Zımbalama Kayma Yenilmesi	20
2.2. Statik Yüklere Maruz Zeminlerde Taşıma Gücü Kavramı.....	21
2.2.1. Tabakalı Olmayan Zeminler	21
2.2.2. Tabakalı Zeminler.....	24
2.3. Tekrarlı Yüklere Maruz Zeminler ve Temel Göçme Mekanizmaları.....	30
2.3.1. Karayolu Yapısı.....	32
2.3.2. Karayolu Dolgularının Temel Yenilme Mekanizmaları.....	34
2.4. Donatılı Zemin Uygulaması	41
2.4.1. Geosentetikler.....	41
2.4.2. Geosentetik Donatılı Zeminlerin Temel Güçlendirme Mekanizmaları.....	45

2.4.3. Geosentetik Donatılı Zeminlerin Temel Göçme Mekanizmaları	49
2.5. Literatür Özeti	56
2.5.1. Geosentetik Donatılı Zeminler İle İlgili Deneysel Çalışmalar	56
2.5.1.1. Statik Yüklemeli Çalışmalar.....	57
2.5.1.2. Tekrarlı Yüklemeli Çalışmalar.....	65
2.5.1.3. Statik ve Tekrarlı Yüklemelerin Bir Arada Yapıldığı Çalışmalar.....	75
2.5.2. İnşaat ve Yıkıntı Atıkları İle İlgili Yapılan Çalışmalar	81
2.5.2.1. Geleneksel Laboratuvar Deneylerinin Yapıldığı Çalışmalar.....	81
2.5.2.2. Arazi Çalışmaları.....	90
2.5.2.3. Geosentetik Donatılı Çalışmalar.....	96
2.6. Literatür Değerlendirmesi	99
3. MATERYAL VE METOD	109
3.1. Materyal	109
3.1.1. Tabi Zemin	109
3.1.2. İnşaat ve Yıkıntı Atığı	113
3.1.3. Doğal Agrega Karışımı.....	124
3.1.4. Geosentetik Elemanlar.....	128
3.1.5. Deney Düzenegi ve Kullanılan Ekipmanlar	130
3.1.5.1. Yükleme Çerçevesi ve Motoru.....	132
3.1.5.2. Deney Tankı	132
3.1.5.3. Model Temel Plakası.....	133
3.1.5.4. Yük Hücresi (Load Cell)	134
3.1.5.5. Deplasman Ölçer (LVDT).....	135
3.1.5.6. Basınç Ölçer (Basınç Transduseri).....	136
3.1.5.7. Veri Kayıt Etme Ünitesi (Data Logger) ve Bilgisayar	137
3.1.5.8. Sıkıştırma Ekipmanları (Hilti ve Tokmak).....	138
3.2. Metod	139

3.2.1. Deney Süreci	139
3.2.2. Statik Yükleme Deneyleri	145
3.2.3. Tekrarlı Yükleme Deneyleri	146
3.2.4. Deney Programı	148
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	153
4.1. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzemenin Özelliklerinin Kıyaslanması	153
4.1.1. Literatürdeki Benzer Malzemelerle Kıyaslama	153
4.1.2. Doğal Agregaya Karışımıyla Kıyaslama.....	158
4.2. Statik Yükleme Model Deneyleri.....	160
4.2.1. Tabii Zemin Durumu (Seri I).....	163
4.2.2. Dolgu Kalınlığı Etkisi (Seri II).....	165
4.2.2.1. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzemeden (CDW) Dolgu.....	165
4.2.2.2. Doğal Agregaya Karışımı Malzemeden (PMT) Dolgu	168
4.2.2.3. CDW ve PMT Dolgu Karşılaştırması.....	171
4.2.3. Geocell Güçlendirme Etkisi (Seri III).....	176
4.2.3.1. Dolgu İçerisindeki Yerinin Etkisi (Geocell).....	177
4.2.3.2. Yüksekliğin Etkisi	183
4.2.3.3. Hücre Açıklığının Etkisi.....	186
4.2.4. Geogrid Güçlendirme Etkisi (Seri IV).....	189
4.2.4.1. Dolgu İçerisindeki Yerinin Etkisi (Geogrid).....	190
4.2.4.2. Donatılar Arası Mesafenin Etkisi	196
4.2.4.3. Donatı Sayısının Etkisi	201
4.2.5. Geotekstil Etkisi (Seri V)	203
4.2.5.1. Ayırma Amaçlı Geotekstilin Etkisi (Geotekstil 200 g/m ²).....	204
4.2.5.2. Güçlendirme Amaçlı Geotekstilin Etkisi (Geotekstil 600 g/m ²).....	206
4.2.5.3. Geotekstil Etki Değerlendirmesi	209

4.2.6. Statik Yüklerde Geosentetik Güçlendirmelerin	
Değerlendirilmesi	213
4.3. Tekrarlı Yüklemeli Model Deneyler	218
4.3.1. Tabi Zemin Durumu (Seri VI).....	221
4.3.2. Dolgu Tipinin Etkisi (Seri VII)	224
4.3.3. Geocell Güçlendirme Etkisi (Seri VIII).....	234
4.3.3.1. Doğal Agregada Dolgu ile Karşılaştırılması (Geocell)	240
4.3.3.2. Geocell Yüksekliğinin Tekrarlı Yüklemelerdeki Etkisi ...	247
4.3.4. Geogrid Güçlendirme Etkisi (Seri IX).....	251
4.3.4.1. Doğal Agregada Dolgu ile Karşılaştırılması (Geogrid)	257
4.3.4.2. Geogrid Güçlendirme Sayısının Tekrarlı	
Yüklemelerdeki Etkisi	264
4.3.5. Geotekstil Etkisi (Seri X)	268
4.3.5.1. Tekrarlı Yüklerde Ayırma Amaçlı Geotekstil Etkisi.....	269
4.3.5.2. Tekrarlı Yüklerde Güçlendirme Amaçlı Geotekstil	
Etkisi ve Doğal Agregada Dolgu ile Karşılaştırılması	272
4.3.5.1. Tekrarlı Yüklerde Geotekstil Etkisi Değerlendirmesi	277
4.3.6. Tekrarlı Yüklerde Geosentetik Güçlendirmelerin	
Karşılaştırması.....	280
4.4. Statik ve Tekrarlı Yüklemeli Model Deneylerin Karşılaştırılması.....	297
4.5. İstatistiksel Analiz	309
4.5.1. Regresyon Analizleri	309
4.5.1.1. Çoklu Doğrusal (Lineer) Regresyon Analizi (MLR)	311
4.5.1.2. Çoklu Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Regresyon	
Analizi (MNLR)	313
4.5.1.3. Statik Yüklemeli Durumda MNR ve MLNR Analizleri ..	314
4.5.1.4. Tekrarlı Yüklemeli Durumda MNR ve MLNR	
Analizleri	319
4.5.2. M5T Metot.....	321

4.5.3. İstatistiksel Analizlerin Karşılaştırılması.....	336
4.6. Analitik Çözümler ve Literatür Karşılaştırması	337
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	345
5.1. Geleneksel Laboratuvar Deneyleri	347
5.2. Statik Plaka Yükleme Deneyleri	349
5.3. Tekrarlı Plaka Yükleme Deneyleri.....	353
5.4. Statik ve Tekrarlı Plaka Yükleme Deneylerinin Birlikte Değerlendirilmesi	357
5.5. İstatistik Analizler	357
5.6. Analitik Çözümler	358
5.7. Kısıtlamalar	359
5.8. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler	359
KAYNAKLAR.....	361
ÖZGEÇMİŞ.....	377



ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 1.1. Avrupada Üretilen Yaklaşık İnşaat ve Yıkıntı Atığı Miktarı ve Tekrar Kullanım Oranları (Vieira ve ve Pereira, 2015b).....	4
Çizelge 2.1. Bazı Çalışmalarda Kullanılan İnşaat Atığı Malzemelerin İçindeki RCA, RAP ve CB Oranları.....	100
Çizelge 2.2. Literatürden Bazı İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme İçeriği.....	101
Çizelge 2.3. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Gradasyon Özellikleri.....	102
Çizelge 2.4. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Fiziksel Özellikleri.....	103
Çizelge 2.5. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Geleneksel Laboratuvar Deneyleri	104
Çizelge 2.6. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Kesme Kutusu Deneyi	105
Çizelge 2.7. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Tekrarlı Üç Eksenli Deneyi	105
Çizelge 3.1. Tabi Zemin Geoteknik Özellikleri	113
Çizelge 3.2. Beton Basınç Mukavemetleri (Ok ve Demir, 2018).....	115
Çizelge 3.3. Konkasör Sonrası Elde Edilen İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Sınıflandırılması	118
Çizelge 3.4. İnşaat ve Yıkıntı Atığı İçerisindeki Malzemelerin Oranı (Ok ve Demir, 2018)	120
Çizelge 3.5. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Genel Özellikleri (Ok ve Demir, 2018)	123
Çizelge 3.6. Doğal Agrega Karışımı Genel Özellikleri.....	127
Çizelge 3.7. Geocell Donatı Genel Özellikleri	129
Çizelge 3.8. Geogrid Donatı Genel Özellikleri	129
Çizelge 3.9. Geotekstillerin Genel Özellikleri.....	130
Çizelge 3.10. Statik Yüklemeli Deney Programı	151
Çizelge 3.11. Tekrarlı Yüklemeli Deney Programı	152
Çizelge 4.1. İnşaat ve Yıkıntı Atığının Malzeme İçeriği Açısından Literatür ile Kıyaslanması	154
Çizelge 4.2. Gradasyon Özelliklerinin Literatür ile Karşılaştırılması	155

Çizelge 4.3. Fiziksel Özelliklerinin Literatür ile Karşılaştırılması.....	157
Çizelge 4.4. Genel Özelliklerin Karşılaştırılması	160
Çizelge 4.5. Tabi Zemin İçin Taşıma Gücü Değerleri.....	164
Çizelge 4.6. Dolgulu Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri	172
Çizelge 4.7. Geocell Güçlendirmeli Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri.....	181
Çizelge 4.8. Farklı Geocell Yüksekliği İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri	185
Çizelge 4.9. Farklı Hücre Açıklığı İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri	188
Çizelge 4.10. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri.....	194
Çizelge 4.11. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri.....	199
Çizelge 4.12. Geotekstilsiz Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri	206
Çizelge 4.13. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri.....	208
Çizelge 4.14. Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması.....	307
Çizelge 4.15. İstatistiksel Analizlerin Karşılaştırılması	337
Çizelge 4.16. Tabii Zemin İçin Analitik Çözüm	338
Çizelge 4.17. CDW Dolgulu Zemin İçin Analitik Çözüm	339

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1. Taş Ocağı Görüntüleri Finike/Antalya (www.milliyet.com.tr), Yıldız Dağları/Tekirdağ (www.cnnturk.com), Keşan/Edirne (www.hurriyet.com.tr), Gülyalı/Ordu (www.ordu.bel.tr).....	2
Şekil 1.2. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Depolama Sahası Ajdovščina/Slovenya (http://en.re-birth.eu)	4
Şekil 1.3. Basından Kentsel Dönüşüm Kapsamında Yıkım Görüntüleri (www.milliyet.com.tr).....	5
Şekil 1.4. Adana'dan Kentsel Dönüşüm Kapsamında Bir Yıkım Görüntüsü.....	6
Şekil 1.5. İstanbul Atık Depolama Sahaları Görüntüsü İstaç (https://atikyonetimi.ibb.istanbul)	7
Şekil 1.6. Odayeri/İstanbul (İstaç) ve Defne/Antakya'dan İnşaat ve Yıkıntı Atıkları Depolama Sahaları Görüntüleri	8
Şekil 1.7. Kaçak Hafriyat Dökümü Vakaları Arnavutköy/İstanbul, Belgrad Ormanı/İstanbul, Mamak/Ankara, İmrahor/Ankara (www.hurriyet.com.tr).....	9
Şekil 2.1. Yapı Temeli.....	18
Şekil 2.2. Genel Kayma Yenilmesi Göçme Yüzeyi ve Yük-Oturma Eğrisi (Örnek, 2009)	19
Şekil 2.3. Yerel Kayma Yenilmesi Göçme Yüzeyi ve Yük-Oturma Eğrisi (Örnek, 2009)	20
Şekil 2.4. Zımbalama Kayma Yenilmesi Göçme Yüzeyi ve Yük-Oturma Eğrisi (Örnek, 2009).....	20
Şekil 2.5. Terzagi Kabulüne Göre Göçme Anındaki Kırılma Yüzeyleri (Örnek, 2009)	22
Şekil 2.6. Rijit Temel Tabanında Oluşan Oturma ve Basınç Dağılımı (Örnek, 2009).....	23
Şekil 2.7. Tabakalı Zemin Durumu	26

Şekil 2.8. Zayıf Zemin Üzerinde Güçlü Zemin Durumunda Yenilme Yüzeyi.....	26
Şekil 2.9. K_s 'nin δ/ϕ_1 ve q_2/q_1 'e Bağlı Değişimi (Hanna ve Meyerhof, 1980)	28
Şekil 2.10. Granüler Dolgunun Yüğü Yayması.....	29
Şekil 2.11. Tekrarlı Yükleme Durumları (Demir ve ark., 2016)	31
Şekil 2.12. Karayolu Üst Yapısı	33
Şekil 2.13. Hareketli Trafik Yüğü Altında Üst Yapı Elemanında Oluşan Gerilmeler (Lekarp ve Dawson 1998).....	35
Şekil 2.14. Granüler Yol Temellerinin Gerilme Deformasyon Davranışı (Souci, 2007)	36
Şekil 2.15. Tekerlek İzi (Mazlum, 2014).....	37
Şekil 2.16. Tekrarlı Yüğe Karşılık Kalıcı Deformasyon Davranışı (Souci 2007).....	38
Şekil 2.17. Gerilme Düzeyi ile Kalıcı Deformasyona Davranışı.....	39
Şekil 2.18. Tekerlek İzi Oluşumu Mekanizması a) Mode 0, b) Mode 1, c) Mode 2 (Kazmee ve Tutumluer 2015)	41
Şekil 2.19. Örgülü ve Örgüsüz Geotekstil (Gupta, 2009).....	44
Şekil 2.20. Tek Eksenli, Çift Eksenli ve Üç Eksenli Geogrid (http://www.geogridfabric.com/).....	44
Şekil 2.21. Geocell (Yang ve ark., 2010; http://www.geogridfabric.com/).....	45
Şekil 2.22. Sınırlandırma Etkisi (Chen, 2007; Demir, 2011)	46
Şekil 2.23. Membran Etkisi (Chen, 2007; Demir, 2011).....	46
Şekil 2.24. Gerilmenin Yayılması	47
Şekil 2.25. Geogrid ile Agregalar Arası Kenetlenme Mekanizması (Souci, 2007).....	48
Şekil 2.26. Geocell Donatısının Düşey ve Yatay Sınırlandırma Mekanizması (Pokharel, 2010)	49
Şekil 2.27. Geosentetik Donatılı Zeminlerde Göçme Mekanizmaları (Binquet ve Lee, 1975b).....	51

Şekil 2.28. Geosentetik Donatılı Zeminlerde Göçme Mekanizmaları (Wayne ve ark., 1998).....	53
Şekil 2.29. Donatılı Zemin Temel Sistemi Göçme Mekanizması (Demir, 2011).....	55
Şekil 2.30. Deney Seması (Tafreshi ve Dawson, 2012)	76
Şekil 2.31. Geocellin Cep Açıklığı (Tafreshi ve Dawson, 2012)	77
Şekil 2.32. Tekrarlı Yükleme Karşılık Oturma Davranışı (Tafreshi ve Dawson, 2012).....	79
Şekil 3.1. Tabi Zemin Temini (Demir ve ark, 2016).....	110
Şekil 3.2. Tabi Zemin Gradasyon Eğrisi	111
Şekil 3.3. Casagrande Plastisite Kartı Zemin İndirekt Sınıflaması (Casagrande, 1948 ve Howard, 1977'den Geliştirilmiş)	111
Şekil 3.4. Tabi Zemin Standart Kompaksiyon Eğrisi.....	112
Şekil 3.5. Tabi Zemin Su İçeriği, CBR ve Drenajsız Kayma Mukavemeti Değişimi	113
Şekil 3.6. Düziçi İl Özel İdaresi Binası (Ok ve Demir, 2018).....	114
Şekil 3.7. Binanın Yıkılması (Ok ve Demir, 2018)	116
Şekil 3.8. Konkasör İşlemi (Ok ve Demir, 2018).....	116
Şekil 3.9. İnşaat ve Yıkıntı Atığı a)0-3 mm Malzeme b) 0-5 mm Malzeme c) 0-20 mm Malzeme d) 5-12 mm Malzeme e) 12-25 mm Malzeme (Ok ve Demir, 2018).....	117
Şekil 3.10. Konkasör Sonrası Elde Edilen İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Gradasyonu (Ok ve Demir, 2018)	118
Şekil 3.11. Hesap Edilen Karışım Gradasyonu ve Sınır Gradasyonlar (Ok ve Demir, 2018)	119
Şekil 3.12. Mikser ile Karıştırma ve Sonrasında Elde Edilen Karışım Gradasyonu.....	120

Şekil 3.13. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Bileşenleri a) Agregası b) Beton c) Tuğla d) Cam e) Batan X Malzemesi f) Yüzen X Malzemesi (Ok ve Demir, 2018)	121
Şekil 3.14. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Los Angeles a) Öncesi b) Sonrası (1.7 mm Elek Üzeri) (Ok ve Demir, 2018).....	122
Şekil 3.15. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Kompaksiyon Eğrisi ve Gradasyon Değişimi	123
Şekil 3.16. İnşaat ve Yıkıntı Atığı CBR Deneyi Grafikleri (Ok ve Demir, 2018).....	123
Şekil 3.17. Doğal Agregası Karışımı Gradasyonu	125
Şekil 3.18. Doğal Agregası Los Angeles a) Öncesi b) Sonrası (1.7 mm Elek Üzeri).....	126
Şekil 3.19. Doğal Agregası Karışımı Kompaksiyon Eğrisi ve Gradasyon Değişimi	126
Şekil 3.20. Doğal Agregası Karışımı CBR Deneyi Grafiği	127
Şekil 3.21. Geocell Donatı (Hücre Alanı Azaltılmış).....	128
Şekil 3.22. Geogrid Donatı	129
Şekil 3.23. Geotekstil Donatı.....	130
Şekil 3.24. Deney Düzenekçi Görüntüsü	131
Şekil 3.25. Deney Düzenekçi Şeması.....	132
Şekil 3.26. Deney Tankı	133
Şekil 3.27. Model Temel Plakası.....	134
Şekil 3.28. Yük Hücresi.....	134
Şekil 3.29. Yük Hücreleri Kalibrasyon Grafikleri.....	135
Şekil 3.30. Deplasman Ölçer	136
Şekil 3.31. Deplasman Ölçerlerin Kalibrasyon Grafikleri.....	136
Şekil 3.32. Basınç Ölçer	137
Şekil 3.33. Veri Kayıt Etme Ünitesi ve Bilgisayar	138
Şekil 3.34. Sıkıştırma Ekipmanları (Hilti ve Tokmak).....	139

Şekil 3.35. Mikserde Su ile Karıştırma İşlemi.....	140
Şekil 3.36. Ağırlık ve Su İçeriği Kontrolü İşlemi.....	141
Şekil 3.37. Mukavemet Kontrolü İşlemi (Vane ve Penetrometre Deneyi).....	141
Şekil 3.38. Yüzey Düzgünlüğü Kontrolü	142
Şekil 3.39. Granüler Malzemelerin Sıkıştırılma İşlemi (CDW ve PMT).....	143
Şekil 3.40. Donatının Yerleştirilme İşlemi (Geocell ve Geogrid).....	144
Şekil 3.41. Model Temelin Yerleştirilmesi İşlemi	144
Şekil 3.42. Zayıf Zeminin Çıkartılması İşlemi	145
Şekil 3.43. Deneyler ve Donatı Konfigürasyonları	150
Şekil 4.1. Gradasyonların Karşılaştırılması.....	158
Şekil 4.2. Kompaksiyon Deneyine Göre Gradasyon Değişimi	159
Şekil 4.3. Kompaksiyon ve CBR Eğrileri Karşılaştırması	160
Şekil 4.4. Tabi Zemin Değerlendirmesi.....	164
Şekil 4.5. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (CDW) İçin Deney Şartları Kontrolü	166
Şekil 4.6. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (CDW) İçin Gerilme Deplasman Eğrisi	167
Şekil 4.7. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (CDW) İçin BCR Değişimi	167
Şekil 4.8. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (PMT) İçin Deney Şartları Kontrolü	169
Şekil 4.9. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (PMT) İçin Gerilme Deplasman Eğrisi	170
Şekil 4.10. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (PMT) İçin BCR Değişimi	170
Şekil 4.11. CDW ve PMT’li Dolguların Gerilme Deplasman Eğrisi Kıyaslaması	172
Şekil 4.12. CDW ve PMT’nin H/D’ye göre BCR Değişimi.....	174
Şekil 4.13. CDW ve PMT’nin s/D’ye göre BCR Değişimi.....	175
Şekil 4.14. Dolgu Kalınlığının Artması ile Açının Etkisinin Artması.....	175
Şekil 4.15. H/D=0.50 İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Deney Şartları Kontrolü.....	178

Şekil 4.16. $H/D=0.33$ İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Deney Şartları	
Kontrolü.....	179
Şekil 4.17. $H/D=0.50$ İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Gerilme	
Deplasman Eğrisi	180
Şekil 4.18. $H/D=0.33$ İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Gerilme	
Deplasman Eğrisi	181
Şekil 4.19. Geocell Güçlendirmeli Durumda u/D 'ye göre BCR Değişimi.....	182
Şekil 4.20. Geocell Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre BCR Değişimi.....	183
Şekil 4.21. $h_c/D=0.33$ İçin Deney Şartları Kontrolü.....	184
Şekil 4.22. Farklı Geocell Yüksekliği İçin Gerilme Deplasman Eğrisi.....	185
Şekil 4.23. Farklı Kalınlıktaki Geocell Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre	
BCR Değişimi	186
Şekil 4.24. $d/D=1.25$ İçin Deney Şartları Kontrolü.....	187
Şekil 4.25. Farklı Hücre Açıklığı için Gerilme Deplasman Eğrisi	188
Şekil 4.26. Farklı Hücre Açıklığına Sahip Geocell Güçlendirmeli Durumda	
s/D 'ye göre BCR Değişimi.....	189
Şekil 4.27. Farklı Gömülme Derinlikleride (Geogrid) Deney Şartları	
Kontrolü.....	191
Şekil 4.28. Farklı Gömülme Derinlikleride (Geogrid) Gerilme Deplasman	
Eğrisi	192
Şekil 4.29. $u/D=0.10, 0.17$ ve 0.33 Deney Sonucu Yüzey Görüntüsü ve	
$u/D=0.10$ Donatı Deformasyonu	193
Şekil 4.30. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda u/D 'ye göre BCR	
Değişimi	195
Şekil 4.31. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre BCR	
Değişimi	196
Şekil 4.32. Çift Sıra Güçlendirme Durumunda Deney Şartları Kontrolü.....	197
Şekil 4.33. Çift Sıra Güçlendirme Durumunda Gerilme Deplasman Eğrisi.....	199

Şekil 4.34. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda h/D 'ye göre BCR	
Değişimi	200
Şekil 4.35. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre BCR	
Değişimi	201
Şekil 4.36. Çift Sıra Güçlendirme Durumunda Gerilme Deplasman Eğrisi	202
Şekil 4.37. Tek ve Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre	
BCR Değişimi	203
Şekil 4.38. Geotekstilsiz Durumunda Deney Şartları Kontrolü	205
Şekil 4.39. Geotekstilsiz ve Ayırma Amaçlı Geotekstilli Durumda Gerilme	
Deplasman Eğrisi	206
Şekil 4.40. Güçlendirme Amaçlı Geotekstilli Durumunda Deney Şartları	
Kontrolü.....	207
Şekil 4.41. Geotekstilsiz ve Güçlendirme Amaçlı Geotekstilli Durumda	
Gerilme Deplasman Eğrisi	208
Şekil 4.42. $H/D=0.33$ İçin Geotekstil Değişiminin Gerilme Deplasman Eğrisi	210
Şekil 4.43. $H/D=0.50$ İçin Geotekstil Değişiminin Gerilme Deplasman Eğrisi	211
Şekil 4.44. H/D , s/D ve Geotekstil Türüne Göre BCR Değişimi	212
Şekil 4.45. Farklı Geotekstiller İçin Dolgu Tabakası Kalınlığı ile BCR	
Değişimi	213
Şekil 4.46. Gerilme Deplasman Eğrileri İle Geosentetik Güçlendirmelerin	
Değerlendirilmesi	215
Şekil 4.47. $s/D=5$ İçin Geosentetik Güçlendirmelerin BCR Değerlendirilmesi	216
Şekil 4.48. $s/D=10$ İçin Geosentetik Güçlendirmelerin BCR	
Değerlendirilmesi	217
Şekil 4.49. $s/D=15$ İçin Geosentetik Güçlendirmelerin BCR	
Değerlendirilmesi	218
Şekil 4.50. Tekrarlı Yükleme Deneylerinde Basınç Deplasman Eğrisi	220
Şekil 4.51. Tekrarlı Yükleme Deneylerinde Yükleme Sayısı Deplasman	
Eğrisi	220

Şekil 4.52. Tabi Zemin Üzerine Tekrarlı Yükleme Deney Şartları Kontrolü.....	222
Şekil 4.53. Tabi Zemin Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi	223
Şekil 4.54. Tabi Zemin Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi	223
Şekil 4.55. Tabi Zemin Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi	224
Şekil 4.56. Granüler Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Deneylerin Deney Şartları Kontrolü.....	225
Şekil 4.57. CDW Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi	226
Şekil 4.58. PMT Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi	227
Şekil 4.59. CDW Dolgulu Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi.....	228
Şekil 4.60. PMT Dolgulu Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi.....	229
Şekil 4.61. CDW ve PMT Dolgulu Durumda Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi	230
Şekil 4.62. CDW ve PMT Dolgulu Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması (140 kPa).....	231
Şekil 4.63. CDW ve PMT Dolgulu Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması (280 kPa).....	232
Şekil 4.64. CDW ve PMT Dolgu Durumunda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslanması.....	233
Şekil 4.65. CDW ve PMT Dolgulu Durumda Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslanması.....	233
Şekil 4.66. Geocell Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Deneylerin Deney Şartları Kontrolü.....	235
Şekil 4.67. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	236
Şekil 4.68. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	237

Şekil 4.69. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi	238
Şekil 4.70. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi	239
Şekil 4.71. Geocell Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı Esnek	
Deplasman Oranı Değişimi	240
Şekil 4.72. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Gerilme	
Deplasman Değişimi Kıyaslanması.....	241
Şekil 4.73. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Durumda Gerilme	
Deplasman Değişimi Kıyaslanması.....	242
Şekil 4.74. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi Kıyaslaması.....	244
Şekil 4.75. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Yükleme Sayısı	
Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması.....	245
Şekil 4.76. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi Kıyaslaması.....	246
Şekil 4.77. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Durumda Yükleme Sayısı	
Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması.....	247
Şekil 4.78. Geocell Yüksekliğinin Gerilme Deplasman Davranışına Etkisi	249
Şekil 4.79. Geocell Yüksekliğinin Yükleme Sayısı Deplasman Eğrisine	
Etkisi.....	250
Şekil 4.80. Geocell Yüksekliğinin Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı	
Eğrisine Etkisi	251
Şekil 4.81. Geogrid Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme	
Deneylerin Deney Şartları Kontrolü.....	252
Şekil 4.82. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı	
Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	253
Şekil 4.82. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı	
Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	254

Şekil 4.83. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi	255
Şekil 4.84. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi	256
Şekil 4.85. Geogrid Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı Esnek	
Deplasman Oranı Değişimi	257
Şekil 4.86. Tek Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Gerilme Deplasman	
Değişimi Kıyaslanması.....	258
Şekil 4.86. Çift Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Gerilme Deplasman	
Değişimi Kıyaslanması.....	259
Şekil 4.87. Tek Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi Kıyaslaması.....	261
Şekil 4.88. Tek Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Yükleme Sayısı Esnek	
Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması.....	262
Şekil 4.89. Çift Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi Kıyaslaması.....	263
Şekil 4.90. Çift Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Yükleme Sayısı Esnek	
Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması.....	264
Şekil 4.91. Geogrid Sayısının Gerilme Deplasman Davranışına Etkisi	266
Şekil 4.92. Geogrid Sayısının Yükleme Sayısı Deplasman Eğrisine Etkisi	267
Şekil 4.93. Geogrid Sayısının Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı	
Eğrisine Etkisi	268
Şekil 4.94. Geotekstilsiz Durumunda Tekrarlı Yükleme Deneyi	
Şartları Kontrolü.....	269
Şekil 4.95. Ayırma Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Tekrarlı Yükleme	
Gerilme Deplasman Değişimi	270
Şekil 4.96. Ayırma Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimi	271

Şekil 4.97. Ayırma Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yükleme Sayısı	
Esnek Deplasman Oranı Değişimi.....	272
Şekil 4.98. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil (600 g/m ²) Yerleştirilen Tekrarlı	
Yüklemeli Deneyin Deney Şartları Kontrolü	273
Şekil 4.99. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Tekrarlı	
Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	274
Şekil 4.100. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yükleme	
Sayısı Deplasman Değişimi.....	276
Şekil 4.101. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yükleme	
Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi.....	277
Şekil 4.102. Tekrarlı Yüklemeli Deneylerde Geotekstilin Gerilme	
Deplasman Değişimine Etkisi	278
Şekil 4.103. Tekrarlı Yüklemeli Deneylerde Geotekstilin Yükleme Sayısı	
Deplasman Değişimine Etkisi	279
Şekil 4.104. Tekrarlı Yüklemeli Deneylerde Geotekstilin Yükleme Sayısı	
Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi	279
Şekil 4.105. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine	
Etkisi (140 kPa).....	281
Şekil 4.106. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine	
Etkisi (280 kPa).....	282
Şekil 4.107. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine	
Etkisi (420 kPa).....	283
Şekil 4.108. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine	
Etkisi (560 kPa).....	284
Şekil 4.109. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine	
Etkisi (140 kPa).....	286
Şekil 4.110. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine	
Etkisi (280 kPa).....	287

Şekil 4.111. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine Etkisi (420 kPa).....	288
Şekil 4.112. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine Etkisi (560 kPa).....	289
Şekil 4.113. Geocell ve Geogrid Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslaması	291
Şekil 4.114. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (140 kPa).....	292
Şekil 4.115. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (280 kPa).....	293
Şekil 4.116. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (420 kPa).....	294
Şekil 4.117. Geosentetiklerin Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (560 kPa).....	295
Şekil 4.118. Geosentetiklerin Esnek Deplasman Oranı Yük Kademesi Değişimine Etkisi	296
Şekil 4.119. Zayıf Zemin ve Dolgulu Zeminde Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	298
Şekil 4.120. Geocell Güçlendirmeli Durumda Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	299
Şekil 4.121. Geogrid Güçlendirmeli Durumda Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	300
Şekil 4.122. Geotekstil Güçlendirmeli Durumda Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi.....	301
Şekil 4.123. Zayıf Zemin Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması.....	302
Şekil 4.124. CDW Dolgulu (Geotekstilsiz) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması.....	303

Şekil 4.125. CDW Dolgulu (Geotekstil 200 g/m ²) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması.....	303
Şekil 4.126. PMT Dolgulu (Geotekstil 200 g/m ²) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması.....	304
Şekil 4.127. CDW Dolgulu (Geotekstil 600 g/m ²) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması.....	304
Şekil 4.128. Geocell h _c /D=0.17'li Durumu Statik ile Tekrarlı Yüklemeye Deplasman Davranışı Karşılaştırması	305
Şekil 4.129. Geocell h _c /D=0.33'lü Durumu Statik ile Tekrarlı Yüklemeye Deplasman Davranışı Karşılaştırması	305
Şekil 4.130. Tek Sıra Geogrid'li Durumu Statik ile Tekrarlı Yüklemeye Deplasman Davranışı Karşılaştırması	306
Şekil 4.131. Çift Sıra Geogrid'li Durumu Statik ile Tekrarlı Yüklemeye Deplasman Davranışı Karşılaştırması	306
Şekil 4.132. BCR Değerlerinin Karşılaştırılması (CDW ve PMT Dolgulu Durum)	315
Şekil 4.133. BCR Değerlerinin Karşılaştırılması (Geosentetik Güçlendirmeli Durum)	318
Şekil 4.134. s _p Değerlerinin Karşılaştırılması (Geosentetik Güçlendirmeli Durum)	320
Şekil 4.135. CDW Dolgulu Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yüklemeye).....	322
Şekil 4.136. PMT Dolgulu Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yüklemeye).....	323
Şekil 4.137. Geocell Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yüklemeye).....	325
Şekil 4.138. Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yüklemeye).....	327
Şekil 4.139. Geotekstil Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yüklemeye).....	329

Şekil 4.140. Geocell Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Tekrarlı Yükleme)	331
Şekil 4.141. Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Tekrarlı Yükleme)	333
Şekil 4.142. Ölçülen ve M5T Metodu ile Hesaplanan Değerlerin Karşılaştırılması.....	336
Şekil 4.143. Tabii Zemin İçin Teorik Çözüm ile Deney Sonuçları Karşılaştırması.....	338
Şekil 4.144. CDW Dolgulu Zemin İçin Teorik Çözüm ile Deney Sonuçları Karşılaştırması.....	340
Şekil 4.145. Hesaplanan Yük Dağıtım Açıları (β) ile Deney Sonuçlarının Kıyaslanması	341
Şekil 4.145. Analitik Çözümler ile Deney Sonuçlarının Kıyaslanması.....	343
Şekil 4.146. Zayıf Zemin Plaka Yükleme Deneylerinin Literatür ile Kıyaslaması	344

SİMGELER VE KISALTMALAR

γ	: birim hacim ağırlık
γ_{kmaks}	: maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_s	: dane birim hacim ağırlığı
γ_t, γ_1	: üst tabaka birim hacim ağırlık
γ_b, γ_2	: alt tabaka birim hacim ağırlık
φ	: içsel sürtünme açısı
φ_t, φ_1	: üst tabaka içsel sürtünme açısı
φ_b, φ_2	: alt tabaka içsel sürtünme açısı
δ	: toplam zemin itki basıncının yatayla yaptığı açı
β	: yükü yayma açısı
β	: bağımsız değişkene ait parametre
μ	: zemin donatı ara yüzey sürtünme katsayısı
ω	: su içeriği
ω_{opt}	: optimum su içeriği
ω_n	: zeminin doğal frekansı
n	: poisson oranı
ε	: hata terimi
ε_p	: kalıcı deformasyon
s	: normal basıncı
s_3	: çevresel basınç (hücre basıncı)
s_d	: deviatorik gerilme
D_q	: yük artımı
D_s	: oturma artımı
%	: deplasman oranı (M5T analizinde)
A	: temel alanı
b	: donatı genişliği

a, b	: regresyon katsayıları
a, b, c, d	: bir basınç kademesindeki ilk yüklemekten sonraki dokuz yükleme sonucu oluşan deplasman farkları
B	: temel genişliği
BCR	: taşıma kapasitesi oranı
c	: kohezyon
c_u	: drenajsız kayma mukavemeti
C_c	: eğrilik katsayısı
C_u	: üniform sıkışma katsayısı
c_u, c_1	: üst tabakanın kohezyon değeri
c_u, c_2	: alt tabakanın kohezyon değeri
C_u	: üniformluk katsayısı
CB	: geri dönüşümlü tuğla
CBR	: Kaliforniya taşıma gücü oranı
CDW	: inşaat ve yıkıntı atığı malzeme
CIVT	: clegg çarpma değeri testi
d	: hücre alanına eşdeğer alandaki dairenin çapı
D	: temel çapı
D_{10}	: efektif dane çapı
D_{30}	: granülometre eğrisinde %30'a karşılık gelen dane çapı
D_{60}	: granülometre eğrisinde %60'a karşılık gelen dane çapı
D_f	: temel derinliği
D_r	: sıkılık derecesi
E	: elastisite modülü
f_c	: zemin-donatı ara yüzey kohezyonunun zemin kohezyonuna oranı
FWDT	: ağırlık düşürme deneyi
GS	: güvenlik sayısı
G_s	: özgül yoğunluk
H	: dolgu tabakası kalınlığı

H_{CDW}	: CDW dolgu tabakası kalınlığı (istatistik çalışmalarda)
H_c	: CDW dolgu tabakası kalınlığı (M5T analizinde)
H_{PMT}	: PMT dolgu tabakası kalınlığı (istatistik çalışmalarda)
H_p	: PMT dolgu tabakası kalınlığı (M5T analizinde)
h	: geogrid donatılar arası mesafe
h_c	: geocell yüksekliği
K_1, K_2	: temel şekil katsayıları
K_p	: pasif toprak basıncı katsayısı
K_s	: zımbalama kesme katsayısı
L	: temel uzunluğu
LA	: Los Angeles aşınma yüzdesi
LL	: likit limit
LM	: deneklem (M5T analizi için)
$LVDT$	: deplasman ölçer
MAE	: ortalama mutlak hata
M_c, M_q, M_g	: donatıya bağlı taşıma kapasitesi katsayıları
MLR	: çoklu doğrusal regrasyon analizi
$MNLR$	: çoklu doğrusal olmayan regrasyon analizi
$M5T$	: karar ağacı modeli
N	: donatı sayısı
N_c	: tekrarlı yükleme sayısı
N_c, N_q, N_g	: taşıma gücü katsayıları
P_p	: üst tabakadaki zeminin toplam itki basıncı
PI	: plastisite indeksi
PL	: plastik limit
PMT	: doğal agrega karışımı malzeme
Q	: yük
q	: basınç yükü (gerilme)
q_0	: nihai taşıma kapasitesi (tabii zemin durumunda)

q_r	: nihai taşıma kapasitesi (güçlendirilmiş zemin durumunda)
q_u	: nihai taşıma kapasitesi
q_u	: serbest basınç mukavemeti
q_b, q_1	: üst zemin taşıma gücü
q_b, q_2	: alt zemin taşıma gücü
r	: korelasyon katsayısı
r_p	: Pearson korelasyon katsayısı
R	: yarıçap
R_a	: bitüm yüzdesi
R_b	: tuğla, kâgir, fayans yüzdesi
R_c	: beton ve beton ürünleri yüzdesi
R_g	: cam yüzdesi
R_M	: esneklik modülü
R_s	: zemin yüzdesi
R_u	: doğal agrega yüzdesi
RAP	: geri dönüşümlü asfalt kaplama
RCA	: geri dönüşümlü beton agrega
s	: deplasman (oturma)
s	: yüzey deplasmanı (tekrarlı yükleme durumunda)
s/D	: deplasman oranı
s_p	: kalıcı deplasman
s_r	: esnek deplasman
s_u	: nihai deplasman (oturma)
T	: donatı çekme kuvveti
T	: bir örnek kümesi
T_i	: örneklerin alt kümesi
T_t	: donatı çekme dayanımı
u	: geogrid ilk donatı derinliği
u	: geocell gömülme derinliği

x	: bağımsız değişken
X	: metal, plastik, kavu�uk, kereste vb. yüzdesi
y	: bağımlı değişken
Y�	: yassılık indeksi





1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Su ve agregalar dünyada birey başına en fazla tüketilen doğal kaynaklardır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan en önemli doğal kaynaklardan biri doğal kayalar ve doğal kayaların parçalanması ile oluşturulan doğal agregalardır. Bu yapı malzemesi inşaat sektöründe çok yaygın bir şekilde dolgu malzemesi olarak kullanılır. Betonun kullanıldığı her türlü yapıda, toprakarme, taş kolon, zemin güçlendirme veya tesviye amaçlı dolgularda, hava alanı, kara yolu ve demir yolu üst yapı ve alt yapı dolgularında çokça agregat tüketilmektedir. Dünya genelinde inşaat sektörünün hızla büyümesi ile bu doğal kaynakların tüketimini de büyük ölçüde arttırmıştır (Arulrajah ve ark., 2011).

Agrega tüketiminin artması sonucunda mevcut taş ocaklarının ihtiyacı tam olarak karşılayamaması, tüketimle doğru orantılı olarak mevcut taş ocaklarının kapasitelerinin düşmesi ve ulaşım maliyetleri inşaat sektörünü yeni taş ocağı sahaları araştırmaya itmiştir. Ancak kaliteli madenin genellikle doğa ile iç içe bulunmasından dolayı açılacak yeni taş ocakları çevre ve doğal yaşam açısından büyük sorunlar oluşturabilmektedir. Şekil 1.1’de ülkemizdeki bazı taş ocaklarının doğal yaşama etkileri gösterilmektedir. Ayrıca taş ocaklarındaki kaynaklar yenilenebilir olmadığından herhangi bir taş ocağının rezervi bittiğinde, agregat ihtiyacı açılacak başka yeni taş ocaklarından karşılanmaya çalışılmaktadır. Sürdürülebilir olmayan bu sistem hem doğaya zarar verilmekte hem de yenilenebilir olmayan doğal kaynakları hızla tüketmektedir. Sürdürülebilir çözümler üretilmezse ilerleyen zamanlarda bu doğal kaynakların komple yok olması kaçınılmaz olacaktır.

Özellikle en çok agregat tüketen sektörlerden olan inşaat sektörünün hızla büyümesi ile agregaya olan talep hızla artmakta ve dolayısı ile doğal kaynakların tüketimi hızlanmaktadır. Bu doğrultuda açılacak yeni maden ocaklarının çevreye verebileceği zararlardan ötürü, dünya genelinde madencilikle ilgili düzenlenen

çevresel yönetmelikler daha da ağırlaştırılmıştır. Bu gibi sebeplerden dolayı inşaat sektörünün ihtiyacı olan doğal kaynakların ekonomik ve kolay çıkartılması iyice zorlaşmıştır (Arulrajah ve ark., 2011). Araştırmacılar, hızla artan agrega talebini karşılamak için daha ekonomik, kolay ve çevre dostu alternatif çözüm arayışına girmişlerdir.



Şekil 1.1. Taş Ocağı Görüntüleri Finike/Antalya (www.milliyet.com.tr), Yıldız Dağları/Tekirdağ (www.cnnturk.com), Keşan/Edirne (www.hurriyet.com.tr), Gülyalı/Ordu (www.ordu.bel.tr)

Dünya genelinde tüketilen doğal kaynakların yaklaşık %50'sinden inşaat sektörü sorumlu olduğu gibi, üretilen atıkların yaklaşık %50'sinden de inşaat sektörü sorumludur. Sektörünün ürettiği atıkların başında inşaat ve yıkıntı atıkları (construction and demolition waste-CDW) gelmektedir. İnşaat ve yıkıntı atıkları yapıların yıkılması, onarılması ve tekrar inşa edilmesi gibi inşaat faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan atıkların genel ismidir. Bu atıklar genellikle birçok farklı

malzeme içerebilen heterojen bir karışım halindedirler. İnşaat ve yıkıntı atıklarının içerisinde bulunabilen birçok farklı malzeme gurubu aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir (Vieira ve Pereira, 2015b).

- Beton, tuğla, kiremit ve seramik
- Ahşap, cam ve plastik
- Bitümlü karışımlar, kömür ve petrol ürünleri
- Metaller
- Zemin ve taş parçaları
- Yalıtım malzemeleri ve asbest içeren yapı malzemeleri
- Alçı bazlı inşaat malzemeleri
- Diğer bazı inşaat atıkları

Avusturalya da her yıl yaklaşık olarak 8.7 milyon ton atık beton, 1.3 milyon ton atık tuğla, 3.3 milyon ton atık kaya, 1 milyon ton atık cam ve 1.2 milyon ton atık asfalt kaplama malzemesi üretilmektedir (Arulrajah ve ark., 2013a). Avrupa genelinde ise yılda 310 ila 720 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı üretilmektedir. Bu miktarlar her geçen yıl artmaktadır. Çizelge 1.1’de Avrupa’daki farklı ülkelerde çıkan inşaat ve yıkıntı atıkları ile bunların tekrar kullanılma oranları gösterilmektedir. Avrupa genelinde inşaat ve yıkıntı atıklarının tekrar kullanılma oranı ortalama olarak %46 civarındadır. Ancak Avrupa parlamentosunun talimatına göre bu oranın 2020’ye kadar en az %70 olması gerekmektedir (Vieira ve Pereira, 2015b). Ek olarak inşaat yıkıntı atıklarının depolanması veya bertaraf edilmesi için gereken enerji ve depolama sahaları, hem maliyetli hem de çevreye zararlıdır. Bu gibi sebepler araştırmacıları, bu atıkların geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılması için alternatif çözüm yolları aramaya itmiştir (Arulrajah ve ark., 2011). Şekil 1.2’de bir inşaat ve yıkıntı atığı depolama sahası örneği gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Avrupada Üretilen Yaklaşık İnşaat ve Yıkıntı Atığı Miktarı ve Tekrar Kullanım Oranları (Vieira ve Pereira, 2015b)

Ülke	Atık (Milyon Ton)	Tekrar Kullanım (%)	Ülke	Atık (Milyon Ton)	Tekrar Kullanım (%)
Avusturya	6.6	60	Letonya	2.32	46
Belçika	11.02	68	Litvanya	3.45	60
Bulgaristan	7.8	Bilgi yok	Lüksemburg	0.67	46
Kıbrıs	0.73	0	Malta	0.8	Bilgi yok
Çek Cum.	14.7	23	Hollanda	23.9	98
Danimarka	5.27	94	Polonya	38.19	28
Estonya	1.51	92	Portekiz	11.42	5
Filanda	5.21	45	Romanya	21.71	Bilgi yok
Fransa	85.65	14	Slovakya	5.38	Bilgi yok
Almanya	72.4	86	Slovenya	2	53
Yunanistan	11.04	5	İspanya	31.34	14
Macaristan	10.12	16	İsveç	10.23	Bilgi yok
İzlanda	2.54	80	Ukrayna	99.1	75
İtalya	46.31	Bilgi yok	Toplam	531.38	46



Şekil 1.2. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Depolama Sahası Ajdovščina/Slovenya (<http://en.re-birth.eu>)

Ülkemizde yaklaşık 19 milyon konut bulunmaktadır. Bu konutların %25'i yaklaşık 5 milyon konut, 2000'li yıllardan sonra yapılmış nispeten iyi mühendislik hizmeti almış binalardan oluşmaktadır. 2000'li yıllardan önce yapılan yaklaşık 14 milyon konutun afet riski yönünden incelenmesi gerekmektedir. Bu 14 milyon konutun yaklaşık 3 milyonu deprem tasarımının yetersiz olduğu 1975 yılı öncesinde yapılan binalardan oluşmaktadır. Malzeme dayanımı veya tasarımı yetersiz olan ve hiç mühendislik hizmeti almayan kaçak yapılarda dahil edildiğinde en az 6-7 milyon konutun yenilenmesi gerektiği tahmin edilmektedir. 2012 yılında çıkan 6306 sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun” ile riskli bulunan yaklaşık 6-7 milyon yapının yıkılması planlanmaktadır. Bu yapıların yıkılması sonucu büyük miktarlarda inşaat ve yıkıntı atığı oluşacağı düşünülmektedir. Günümüzde ülkemizin birçok bölgesinde kentsel dönüşüm projeleri hızla devam etmekte, depreme dayanıksız bulunan yapılar yıkmakta ve yerlerine yenileri yapılmaktadır (Şekil 1.3 ve Şekil 1.4).



Şekil 1.3. Basından Kentsel Dönüşüm Kapsamında Yıkım Görüntüleri
(www.milliyet.com.tr)



Şekil 1.4. Adana'dan Kentsel Dönüşüm Kapsamında Bir Yıkım Görüntüsü

Ülkemizde 18 Mart 2004 tarihinde 25406 sayılı Resmi Gazete' de "Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği" yayınlanmış ve belediyelere inşaat ve yıkıntı atıklarının toplanması, geçici biriktirilmesi, taşınması, geri kazanılması ve bertarafı ile ilgili yönetim planı hazırlaması, depolama sahası belirlemesi kurması veya kurdurması, işletmesi veya işletmesi görevi verilmiştir. Şuan için ülkemizde inşaat ve yıkıntı atıkları belediyeler tarafından belirlenen depolama sahalarına, genellikle belli bir ücret karşılığında depolanabilmektedir. Bu depolama sahaları hem arazinin atıklarla işgal edilmesi ile israf edilmesine yol açmakta hem de çevresindeki doğal hayatı olumsuz etkilemektedir. Kentsel dönüşümün hızlanması ile açığa çıkan aşırı miktarda inşaat ve yıkıntı atıkları, mevcut depolama sahalarının kapasitelerini hızla doldurmakta ve yeni depolama sahaları açılması gündeme gelmektedir. Şekil 1.5'te depolama sahalarının üstten görüntüsü verilerek çevresindeki doğal hayattan kopardığı arazi gösterilmiştir. Şekil 1.6'da ise depolama sahalarının nispeten yakın görüntüsü verilmiştir. Ek olarak bazı firmalar hem belediyeye ödenen ücretten hem de atığın depolama alanına taşınması için gerekli ulaşım masraflarından kaçmak için boş arazilere izinsiz döküm yapabilmektedir. Bu da zaten bu atıkların depolanması veya bertaraf edilmesi için gerekli onca arazinin çevreye verdiği zarara ek olarak daha fazla ve herhangi bir kontrol yapılmadığından daha tehlikeli

bir çevre kirliliğine yol açabilmektedir. Şekil 1.7’de benzer örnekler gösterilmiştir. Bu durumla ilgili gerekli yaptırımlar ve cezalar olmasına rağmen problem henüz tam anlamıyla çözülememiştir. Çünkü bu izinsiz dökümler genellikle تنها yerlerde yoğunlaştığından fark edilmesi zor ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu sorunun çözümü de ülkemiz için çok önemlidir. Bu atıkların geri dönüştürülerek tekrar kullanılması, hem depolama alanlarının azaltılması ve izinsiz dökümlerin önüne geçmesi yönü ile çevreye katkı sağlayabilecek, hem de ulaşım ve depolama maliyetlerinden tasarruf edilebilecektir. Ayrıca bu atığın geri kazanılması ile tekrar kullanılacağı sektördeki doğal kaynaklara olan ihtiyacı azaltabileceğinden çevreye ve ekonomiye katkısı olacağı öngörülmektedir. Bu atıkların geri dönüştürülerek tekrar kullanılması için alternatif yollar araştırmanın tüm dünya gibi ülkemiz içinde faydayı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 1.5. İstanbul Atık Depolama Sahaları Görüntüsü İstaç
(<https://atikyonetimi.ibb.istanbul>)



Şekil 1.6. Odayeri/İstanbul (İstaç) ve Defne/Antakya'dan İnşaat ve Yıkıntı Atıkları Depolama Sahaları Görüntüleri



Şekil 1.7. Kaçak Hafriyat Dökümü Vakaları Arnavutköy/İstanbul, Belgrad Ormanı/İstanbul, Mamak/Ankara, İmrahor/Ankara
(www.hurriyet.com.tr)

Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği'nde, inşaat ve yıkıntı atıklarının öncelikle kaynağında azaltılması, ayrı toplanması, tekrar kullanılması ve geri kazanılması esastır denilerek bu atıkların geri kazanılmasının önemini vurgulamıştır. Aynı yönetmelikte geri kazanılan bu atıkların, ilgili standartları sağlamak şartı ve gerekli işlemlerden sonra orijinal malzemeler ile birlikte veya ayrı olarak, yeni beton üretiminde, yol, otopark, kaldırım, yürüyüş yolları, drenaj çalışmaları, kanalizasyon borusu ve kablo döşemelerinde dolgu malzemesi olmak üzere, alt ve üst yapı inşaatlarında, spor ve oyun tesisleri inşaatları ile diğer dolgu ve rekreasyon çalışmalarında kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ancak ülkemizde inşaat ve yıkıntı atıkları genellikle ya depolama alanlarına gönderilmekte ya da meydana geldiği yerde mühendislik özellikleri bilinmeden kontrolsüz geri dolguda kullanılmaktadır.

Böyle hiçbir mühendislik özelliği bilinmeden gelişi güzel oluşturulan kontrolsüz dolgular, üstüne tesis edilecek herhangi bir yapı için oldukça tehlikeli ve önerilmeyen bir durumdur. İnşaat ve yıkıntı atığı malzemeler herhangi bir dolguda geri dönüştürülerek tekrar kullanılacaksa, mühendislik özellikleri belirlenmeli ve dolgu kontrollü bir şekilde inşa edilmelidir. Ayrıca bu atıkların fiziksel ve mühendislik özellikleri elde edilen yapıdaki kullanılan malzemenin kalitesine göre değişiklik gösterebileceğinden, fiziksel ve mühendislik özelliklerinin bölgeden bölgeye farklılıklar gösterebileceği unutulmamalıdır.

1.2. Çözüm Önerileri

İnşaat sektörü ile paralel olarak sürekli artan doğal agrega ihtiyacı, bu ihtiyacı karşılamak için açılan taş ocaklarının çevreye verdiği zararlar, madencilikle ilgili ağırlaşan çevresel yönetmeliklerle doğal agregaya ulaşımın zorlaşması ve maliyetlerin artması doğal agregaya alternatif malzemelerin düşünülmesini teşvik etmiştir. Ayrıca gene inşaat sektörünün artışına paralel olarak artan inşaat ve yıkıntı atıklarının bertaraf edilmesi için gerekli depolama alanları, bu depolama alanlarının çevreye vereceği zararlar ve harcanacak enerji için gerekli maddi kaynaklar düşünüldüğünde bu atıkların mümkün olduğunca geri dönüştürülmesi yoluna gidilmesi yönünde haklı bir eğilim mevcuttur. Ek olarak bu artık malzemelerin geri dönüştürülerek tekrar kullanılması, atık malzemenin daha çok değerlendirilmesine ve çevre sürdürülebilirliğinin artmasına olumlu etkiler yapacaktır. (Arulrajah ve ark., 2011,2013a; Rahman ve ark., 2015; Jiménez ve ark., 2012a; Vieira ve Pereira, 2015b).

Önceki çalışmalarda araştırmacılar, inşaat ve yıkıntı atıklarının çeşitli projelerde tekrar kullanılması için alternatifler önermenin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca araştırmacılar, konu üzerinde yapılacak çalışmaların bir çok ülkeyi atıklarını tekrar kullanılması konusunda teşvik edebileceğini belirtmişlerdir (Arulrajah ve ark., 2011). Bu atıklar, belli oranlarda yeni beton üretiminde, statik yüke maruz çeşitli dolgularda (spor, oyun tesisleri, kablo

döşemesi, drenaj sistemlerinde, hafif yapıların altında dolgu olarak ve benzeri alanlarda), tesviye amaçlı dolgularda ve tekrarlı yüke maruz kalabilecek çeşitli dolgularda (düşük hacimli yol temel ve alt temelleri, otoparklar ve yürüyüş parkurları ve benzeri alanlarda) agrega yerine dolgu malzemesi olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

Düşük yük taşıma kapasitesine sahip yumuşak killi siltli zeminler geoteknik mühendisliği açısından problemli zeminler olarak düşünülmektedir. Bu tür zeminlerin taşıma kapasitelerinin ve oturma davranışlarının iyileştirilmesi için birçok yöntem mevcuttur. Temel mühendisleri kendi problemine göre en iyi sonucu verecek, ekonomikliği ve estetikliği barındıracak optimum iyileştirme yöntemi seçip uygularlar. Genellikle, ekonomik olması, çabuk inşa edilebilir olması ve kalifiye elmana ihtiyaç duyulmadan kolaylıkla yapılabilir olmasından dolayı, yüzeysel temellerin altına belirli bir kalınlıkta granüler malzeme serilip sıkıştırılması (dolgu inşaatı) yaygın bir iyileştirme yöntemidir. Ayrıca bu tür dolgular ıslah amacının dışında yüzeysel temellerin altında düz bir arazi oluşturmak için tesviye amacıyla da yaygınca kullanılmaktadır. Granüler dolgu inşaatı ile rijit, sağlam ve topografik olarak düz yüzeye sahip bir zemin tabakası oluşturulabilir. İstenilen iyileştirme düzeyi veya topografik düzeltme için inşa edilmesi gereken dolgu kalınlığının fazla olması gerektiği durumlarda, bu yöntemin ekonomikliği ve uygulanabilirliği azalabilmektedir (Mısıır, 2008). Ayrıca bu durumda harcanan doğal kaynaklar aşırı düzeylere çıkabilmektedir. Bu gibi ve benzeri granüler dolgularda dolgu malzemesi olarak inşaat ve yıkıntı atıklarının kullanılması, bu pratik ve hızlı yöntemin maliyetini düşürebilecek, doğal kaynakların sarfiyatını azaltabilecek ve atıkların bertaraf edilmesine katkı sağlayarak çevrenin korunmasına destek olabilecektir.

Ülkemizde bazen inşaat ve yıkıntı atıkları, atığın çıktığı yerde hiçbir mühendislik özelliği belirlenmeden kontrolsüz bir şekilde geri dolguda kullanılabilir. Böyle mühendislik özelliği bilinmeden geliş güzel oluşturulan kontrolsüz dolgular, üstüne tesis edilecek herhangi bir yapı için

oldukça tehlikeli ve önerilmeyen bir durumdur. Bu atıklardan granüler dolgular inşa edilmek isteniyorsa, fiziksel, mekanik ve mühendislik özelliklerinin (parametrelerinin) belirlenmesi, ayrıca statik yükler altındaki davranışının incelenmesi gerekmektedir. Bu özellikler atığın elde edildiği yapının kalitesine göre ve genellikle bölgeden bölgeye değişim göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar daha çok geleneksel laboratuvar deneyleri ile malzemenin mekanik ve/veya çevresel özelliklerinin belirlenmesine yöneliktir. Ayrıca ülkemizde konu ile doğrudan ilgili kayda değer bir çalışma bulunmamaktadır. Bu atık malzemelerin mühendislik özelliklerinin ve statik yükler altındaki davranışının belirlenmesi, hem dolgularda kullanımının artmasına hem de bu atıklardan inşa edilen kontrolsüz dolguların önüne geçilmesine yardımcı olacağı tahmin edilmektedir.

İnşaat ve yıkıntı atıklarının tekrar kullanılması ile ilgili literatürdeki birçok çalışmada, bu atıklarının tekrarlı yüklere maruz yol temel ve alt temel dolgularında doğal agregalar yerine kullanmak için bir alternatif olabileceği kabul edilmiştir (Arulrajah ve ark., 2011,2013a; Rahman ve ark., 2015; Jiménez ve ark., 2012a; Vieira ve Pereira, 2015b). Dünya genelinde özellikle düşük hacimli yolların üretilmesi için gerekli malzeme ve enerji ihtiyacı çevre için büyük bir yük olmaktadır (Han ve ark., 2011). İnşaat ve yıkıntı atıklarının düşük hacimli yolların temel/alt temel tabakalarında kullanılması ile aşağıdaki kazançların elde edilmesi beklenmektedir:

- Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde her yıl çıkan çok büyük miktarlardaki inşaat ve yıkıntı atıklarının bertaraf edilmesi için büyük boyutlarda depolama alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyanın sürekli artan nüfusu ile doğru orantılı olarak artan arazi, konut ve zirai alan gibi ihtiyaçları sebebi ile atıklar için doğal depolama alanları bulmak daha da zorlaşmıştır. Bu malzemenin geri kazanılarak yol temel/alt temellerinde kullanılması ile bu atığın bertaraf edilmesi için gerekli depolama alanı ihtiyacı azalacaktır.
- Doğal agrega tüketiminin azalmasını sağlayacaktır.

- Atığın bertaraf edilme maliyetlerini düşüreceği ve doğal agregaya olan ihtiyacı azaltacağı için ekonomik kazanç sağlayacaktır.
- Çevre kirliliğini azaltacak ve çevre sürdürülebilirliğine katkı sağlayacaktır.
- Enerji tasarrufu sağlayacaktır (Arulrajah ve ark., 2011).

Benson ve Edil (2009) Amerika Birleşik Devletlerinde yaptıkları araştırmada yol inşaatlarında geri dönüşümlü beton agreganın kullanımının büyük faydaları olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında yol inşaatlarında geri dönüşümlü beton agreganın kullanımı ile enerji tüketiminin 162 trilyon Btu, su tüketiminin 32 milyar galon, sera gazı salınımının 11 milyon ton azaltılabileceğini ve 4-8 milyar dolar ekonomik kazanç sağlanabileceğini ifade etmişlerdir. Benzer sonuçlar Aydılek ve Zhang (2016) tarafından yapılan çalışmada da mevcuttur. Ülkemiz son 13 yılda inşa ettiği 12000 km'lik otoyol ve bölünmüş karayolu için yaklaşık 8.8 milyar ABD doları harcamıştır. Önümüzdeki 8 yıl içinde yapılacak 9000 km bölünmüş kara yolu için de yaklaşık 7.7 milyar ABD doları harcanması planlanmaktadır. Bu nedenle devam eden yol inşaatı projelerinde kentsel dönüşümden elde edilen inşaat ve yıkıntı atıklarının kullanılması için açık bir potansiyelin mevcut olduğu düşünülmektedir.

Türkiye'deki eski yapılarda (>30 yıl) kullanılan beton değişkenliği göz önüne alındığında (Cakir, 2014), farklı bölgelerden temin edilen betonarme yıkıntıların (dolgularda kullanılmadan önce) fiziksel, çevresel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Birçok farklı malzemeyi heterojen bir şekilde içeren inşaat ve yıkıntı atıkları, statik yüklemeye maruz kalacak dolgularda veya tekrarlı yüklere maruz yol dolgularda kullanıldığında bazı deformasyonlar oluşabileceği düşünülmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda bu tür deformasyonları azaltmak içinde bu atıkların geosentetiklerle güçlendirilmesinin de bir alternatif olabileceği belirtilmiştir (Santos ve Vilar, 2008; Arulrajah ve ark., 2014b; Kazmee ve Tutumluer, 2015; Vieria ve ark., 2015b).

Böyle bir etki durumunda bu atıkların geosentetiklerle birlikte göstereceği davranışın incelenmesi ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi mühendislerin işini kolaylaştıracaktır. Atık malzemenin geri dönüştürülerek geosentetiklerle birlikte dolgularda kullanılması, bertaraf edilmesine de büyük katkı sağlayacaktır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı inşaat ve yıkıntı atıklarını geri dönüştürerek, statik yüklere maruz dolgularda veya tekrarlı yüklere maruz yol temel/alt temel dolgularında kullanılabilirliğini araştırmaktır. Birçok farklı malzemeyi heterojen bir şekilde içerebilen, temin edildiği nispeten az mühendislik hizmeti almış binaların beton kalitesindeki düşüklük ve değişkenlik göz önüne alındığında, dış etkilerin (statik veya tekrarlı yükler) inşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilecek dolgularda kaliteli doğal malzemeden inşa edilmiş dolgulara göre biraz daha fazla deformasyon oluşabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple inşaat ve yıkıntı atığı malzemeleri kaliteli doğal agrega malzemelerin performansına getirebilmek için geosentetiklerle güçlendirmek ve bu atıkların geosentetiklerle birlikte göstereceği davranışı incelemekte bu çalışmanın bir amacıdır. Bu amaçlar doğrultusunda aşağıda belirtilen çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Ülkemizdeki kentsel dönüşüm projesi kapsamında depreme dayanıksız olduğu belirlenen ve yıkılmasına karar verilen çok katlı betonarme bir yapıdan inşaat ve yıkıntı atığı temin edilmiştir. Bu atık önce zararlı metallerden arındırılmış, uygun gradasyona getirilmiş, içerdiği farklı malzemelerin oranı saptanmıştır.
- Temin edilen atık malzeme üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, birim hacim ağırlık, su emme, yassılık indeksi, Los Angeles, modifiye kompaksiyon ve CBR) yapılarak, malzemenin fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Sonuçlar, inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerden dolgu inşa edilebilmesi için fiziksel ve geoteknik

özelliklerinin (geleneksel laboratuvar deneyleri) araştırıldığı farklı ülkelerdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu şekilde ülkemiz koşullarında elde edilen inşaat ve yıkıntı atıklarının farklı ülkelerdekine benzerlikleri kıyaslanmıştır (Ok ve Demir, 2018). Ayrıca elde edilen sonuçları doğal agregalarla kıyaslamak için, farklı çaplarda doğal agregalar temin edilmiştir. Özellikle yol dolguları olmak üzere dolgularda sıkça kullanılan bir gradasyon elde etmek için temin edilen agregalardan belli oranlarda uygun bir karışım yapılarak, granüler dolgu malzemesi (plentmiks temel-PMT) oluşturulmuştur. Bu granüler dolgu malzemesi (doğal agrega karışımı) üzerinde de geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, birim hacim ağırlık, su emme, yassılık indeksi, Los Angeles, modifiye kompaksiyon ve CBR) yapılarak, malzemenin fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Sonra doğal agregalar ile inşaat ve yıkıntı atıklarının fiziksel ve geoteknik özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

· Yumuşak veya gevşek zemin koşullarının hakim olduğu arazilerde zemin taşıma kapasitesinin düşük olmasından dolayı üzerine inşa edilecek yapıda aşırı oturmalar (tekerlek izleri) veya göçme oluşabilmektedir. Bu durum genelde ya pahalı zemin ıslahı yöntemleri ile, ya da zemine yapılması düşünülen dolgu kalınlığının artırılması ile çözülmektedir. Bu tür zeminler üzerine yapı tasarlamak (bina, kaplamalı ve/veya kaplamasız yollar, barajlar vs.) ve inşa etmek her zaman zor olmuştur (Demir, 2011). Bu durum göz önüne alınarak, inşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilecek dolgunun performansı araştırılırken güvenli tarafta kalınarak dolgunun elverişsiz koşullara sahip zayıf zemin üzerindeki davranışı incelenmek istenmiştir. Bu sebeple laboratuvarda model deneyler yapılmıştır. Model deneylerde laboratuvarda zayıf zemin koşulları (CBR=%1) oluşturulmuş, üzerine temin edilen inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden dolgu inşa edilmiş ve bu tabakalı sistem üzerinde statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Sonuçları kıyaslamak için aynı zemin koşulları üzerine

özellikleri belirlenen doğal agrega karışımından dolgu inşa edilmiş ve bu tabakalı sistem üzerinde de statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmıştır.

· İnşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilen dolgunun statik ve tekrarlı plaka yükleme deneylerindeki performansının doğal agrega karışımı malzemeyi yakalayabilmesi için geosentetiklerle güçlendirilmesi düşünülmüştür. Bu sebeple zayıf zemin üzerine geosentetiklerle (geocell, geogrid, geotekstil) güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden dolgu inşa edilerek, statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bu deneylerde geosentetiklerin dolgu (temel tabakası) içerisindeki yerinin etkisi, geocell donatının yüksekliğinin etkisi, geogrid güçlendirme sayısının etkisi ve geotekstilin yoğunluğunun etkisi gibi parametreler çalışılmış, bu koşullarda geosentetiklerle güçlendirme için en ideal olabilecek çözümler önerilmiştir.

· Statik yüklemeli deneyler sonucunda elde edilen taşıma kapasitesi oranı (BCR) değerlerinin ve tekrarlı yüklemeli deneyler sonucunda elde edilen toplam kalıcı deplasman (s_p) değerlerinin farklı değişkenlerle ilişkileri, çoklu doğrusal regresyon (MLR), çoklu doğrusal olmayan regresyon (MNLR) ve M5T (karar ağacı) gibi istatistiksel analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Bu analizlerin sonuçları birbirlerine göre kıyaslanarak en güvenilir ilişki önerilmiştir.

· Statik yüklemeli deney sonuçlarından elde edilen taşıma gücü değerleri, iki farklı analitik yöntem kullanılarak elde edilen taşıma gücü değerleri ile kıyaslanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

İnşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin dolgularda veya yol temel/ alt temel tabakalarında granüler dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılabilmesi için, öncelikle bu dolgularda kullanılan doğal granüler malzemelerin fiziksel ve geoteknik özellikleri bilinmeli ve sonrasında bu dolguların temel yenilme mekanizmaları incelenmelidir. Ayrıca bu dolgu sistemlerinde güçlendirme yapılacaksa, yapılacak bu güçlendirmelerin mekanizmaları da araştırılmalıdır.

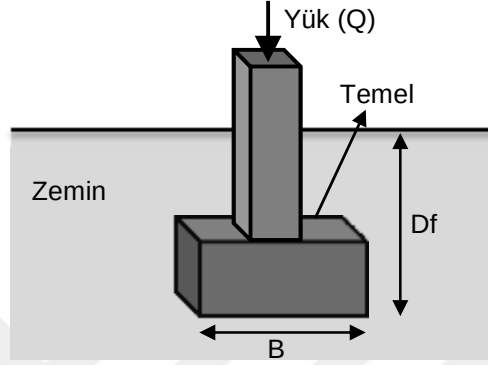
Bu kısımda öncelikle literatürde bahsedilen, zeminlerin statik yükler altındaki göçme mekanizmaları ve trafik yükü gibi tekrarlı yüklemeler altındaki yenilme mekanizmalarına değinilmiştir. Sonra özellikle dolgu ve dayanma yapılarında 1970'li yıllardan itibaren güçlendirme amacı ile yaygın bir şekilde kullanılan geosentetiklerin güçlendirme mekanizmaları anlatılmıştır. Daha sonra literatürdeki statik veya tekrarlı yüklere maruz geosentetiklerle güçlendirmeli veya güçlendirmesiz zeminler üzerine yapılan önemli çalışmalara sıralanmıştır. En son literatürdeki inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini inceleyen çalışmalar özetlenmiştir.

2.1. Statik Yüklere Maruz Zeminler ve Temel Göçme Mekanizmaları

Zeminler, birçok yapı çeşidi için temelleri vasıtası ile statik yüklemeye maruz kalmaktadır. Temeller yapı yüklerini güvenli bir şekilde zemine aktarma görevi gören yapı elemanlarıdır. Yapı temelleri temel mühendisleri tarafından sıkça temelin gömülme derinliğine göre, yüzeysel temeller ($D_f/B \leq 1$) ve derin temeller ($D_f/B > 1$) olarak iki grupta düşünülmektedir (Şekil 2.1). Ayrıca temel mühendisleri bu gruplarda genelde, yüzeysel temelleri, tekil, şerit ve radye temel olmak üzere, derin temelleri de kazıklı, ayak ve keson temeller olmak üzere alt gruplara ayırmaktadırlar (Örnek, 2009; Demir, 2011).

Statik bir yükleme sonucunda temelin göçmesi veya taşıma kapasitesi yenilmesi, genellikle temeli destekleyen zeminde kayma yenilmesi oluşması ile

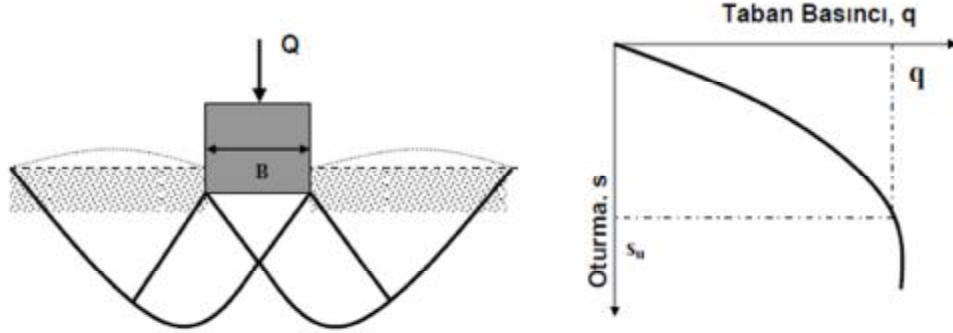
meydana gelmektedir. Kayma yenilmesi ise genel kayma yenilmesi, yerel (bölgesel) kayma yenilmesi ve zımbalama kayma yenilmesi olmak üzere üç farklı şekilde oluşabilmektedir.



Şekil 2.1. Yapı Temeli

2.1.1. Genel Kayma Yenilmesi

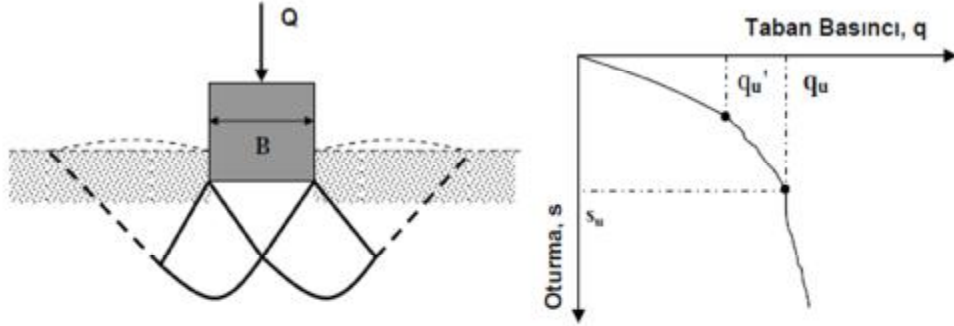
Bu yenilme tipinde uygulanan yük göçme yüküne gelene kadar temele gelen yük ($q=Q/A$) arttıkça oturmalar artarken, uygulanan yük göçme yüküne geldikten sonra, yük sabit kalmakta ve oturmalar devam ederek büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu tür göçme genellikle sıkı kum veya sert killerde oluşmaktadır. Genel kayma yenilmesi ile zeminde oluşan göçme yüzeyi ve sıkça elde edilebilecek bir yük-oturma eğrisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Grafikte gösterilen s_u ifadesi göçme oluştuğundaki oturma değerini temsil etmektedir (Yıldız, 2002).



Şekil 2.2. Genel Kayma Yenilmesi Göçme Yüzeyi ve Yük-Oturma Eğrisi (Örnek, 2009)

2.1.2. Yerel (Bölgesel) Kayma Yenilmesi

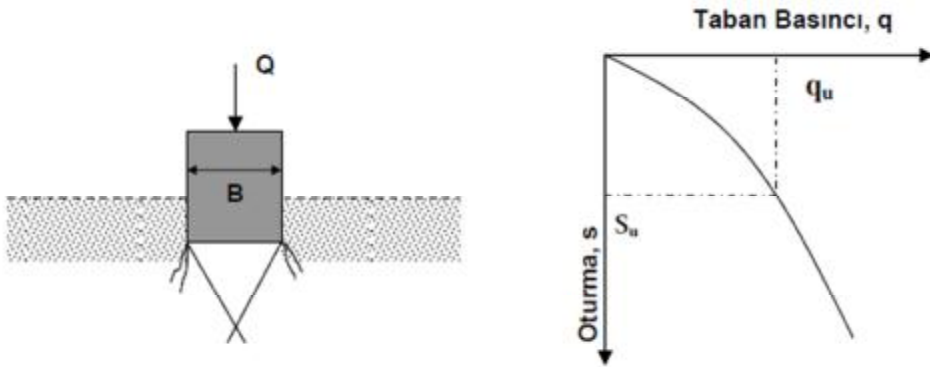
Bu yenilme tipinde yük-oturma eğrisi, 3 kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda yük ilk göçme yüküne ulaşınca kadar ($q=q_u'$), yükün atması ile oturmalar artmaktadır. Bu süreçte, düşey yönde sıkışan zeminin yüzeyinde az bir miktarda yanal deformasyon oluşmaktadır. Sonraki kısımda, yük ilk göçme yükünü geçerek daha da arttırılması durumunda yük-oturma eğrisi daha dik ve düzensiz bir şekilde artmaktadır. Bu süreçte, zeminde dışa ve yukarı doğru hareketler oluşmaktadır. Üçüncü kısımda, yük daha da arttırılması ile göçme yüzeyi zemin yüzeyine ulaşmaktadır ($q=q_u$). Genellikle, orta sıkı kum veya orta sertlikteki kil zeminlerde rastlanan bu tür bir yenilme şeklinde, yük-oturma eğrisi üzerinde q_u değerini belirlemek oldukça güçtür. Yerel (bölgesel) kayma yenilmesinde oluşan göçme yüzeyi ve sıkça elde edilebilecek bir yük-oturma eğrisi Şekil 2.3'de verilmiştir (Yıldız, 2002).



Şekil 2.3. Yerel Kayma Yenilmesi Göçme Yüzeyi ve Yük-Oturma Eğrisi (Örnek, 2009)

2.1.3. Zımbalama Kayma Yenilmesi

Bu yenilme tipinde, yük arttıkça oturmalar da sürekli artmakta olup, yük-oturma eğrisi üzerinde göçme yükü (q_u) tam olarak belirlenememektedir. Ayrıca bu yenilme tipinde zemin yüzeyinde kabarmalar oluşmamaktadır. Bu şekilde bir yenilme tipine çoğunlukla, gevşek kumlarda veya yumuşak kil zeminlerde rastlanmaktadır. Zımbalama kayma yenilmesinde oluşan göçme yüzeyi ve sıkça elde edilebilecek bir yük-oturma eğrisi Şekil 2.4’de verilmiştir (Yıldız, 2002).



Şekil 2.4. Zımbalama Kayma Yenilmesi Göçme Yüzeyi ve Yük-Oturma Eğrisi (Örnek, 2009)

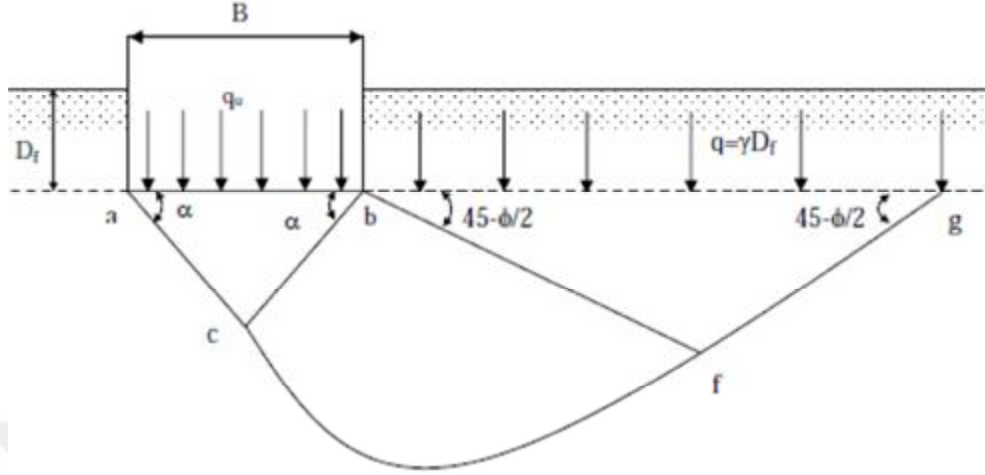
Araştırmacılar zımbalama kayma yenilmesinin görüldüğü durumlar için, nihai taşıma kapasitesinin (q_u) belirlenmesi amacıyla bazı yöntemler önermişlerdir. Bunlardan biri Das ve ark. (1994) tarafından önerilen, yük-oturma eğrisinde $\Delta s/\Delta q$ oranının en büyük olduğu ve sonrada bu değerde sabit kaldığı noktanın nihai taşıma kapasitesi olduğu teorisidir. Diğer bir yöntemde ise, Yetimoğlu ve ark. (1994) nihai taşıma kapasitesini yük-oturma eğrisinin başlangıç ve bitiş teğetlerinin kesişim noktası olarak belirlemişlerdir (Yıldız, 2002).

2.2. Statik Yüklere Maruz Zeminlerde Taşıma Gücü Kavramı

2.2.1. Tabakalı Olmayan Zeminler

Taşıma gücü kavramı konusunda çalışmaları bulunan Terzaghi üniform yüklü şerit bir temel için taşıma gücü teorisi önerirken bazı kabuller ve varsayımlar yapmıştır. Terzaghi'nin öne sürdüğü taşıma gücü teorisindeki yenilme anında temel zemininde meydana gelecek kırılma yüzeyleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Das ve ark., 1994). Bu teoriye göre, temel altındaki göçme bölgesi aşağıda belirtilen üç ana bölgeden oluşmaktadır.

- abc bölgesi: Elastik bölgedir. Temelin hemen altın yer alan üçgen şekilli kısımdır. abc üçgeni eşkenar üçgen olup $\alpha=\varphi$ 'dir.
- bcf bölgesi: Prandtl radyal kayma bölgesidir. Kırılma yüzeyinin cf kenarı logaritmik spiraldir.
- bfg bölgesi: Rankine pasif bölgesidir. Kayma yüzeyleri yatayla $(45-\varphi/2)$ kadarlık bir açı yapmaktadır.



Şekil 2.5. Terzaghi Kabulüne Göre Göçme Anındaki Kırılma Yüzeyleri (Örnek, 2009)

Terzaghi'nin teorisinde, temel zemini; homojen, izotrop ve yarı sonsuz olduğunu varsayarak şerit temelin nihai taşıma kapasitesi için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir:

$$q_u = cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma \quad (2.1)$$

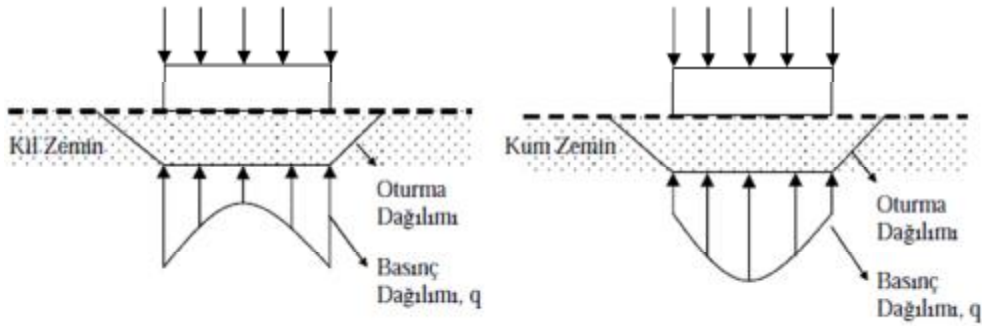
Denklemden, c , ϕ ve γ zeminle ilgili parametreler olup c : kohezyon, ϕ : içsel sürtünme açısı ve γ , zeminin birim hacim ağırlığıdır. Ayrıca N_c , N_q , N_γ , ϕ 'ye bağlı taşıma gücü katsayılarıdır. B ve D_f ise temel ile ilgili parametreler olup, sırasıyla temel genişliği ve temel derinliğidir. Terzaghi formülünün genel biçimi ise aşağıda verilmektedir:

$$q_u = K_1 c N_c + \gamma D_f N_q + K_2 \gamma B N_\gamma \quad (2.2)$$

Bu denklemden, K_1 ve K_2 temelin şekline bağlı olarak değişen şekil katsayılarıdır.

Zeminin temel vasıtası ile üzerine gelen yükü güvenli bir şekilde taşıyabilmesi için temel sisteminin taşıma gücü ve oturma gibi iki temel şartı sağlaması gerekmektedir. Taşıma gücü şartına göre, yüklemeler sonucunda zeminde kayma kırılması oluşmamalı ve verilen taşıma kapasitesi güvenli tarafta kalmalıdır. Bu sebeple taşıma kapasitesi belli güvenlik sayısına (GS) bölünmelidir. Oturma şartının sağlanması için ise, üstyapı yükü nedeniyle temel tabanında meydana gelebilecek oturmalar (elastik oturma, konsolidasyon oturması, ikincil konsolidasyon oturması) yapıya zarar vermemeli veya toplam oturmalar müsaade edilebilir sınırlar içerisinde kalmalıdır. Taşıma gücü ve oturma şartları sağlanarak hesaplanan taban basıncı değeri, zemin emniyet gerilmesi olarak tanımlanmaktadır (Örnek, 2009).

Rijit bir temele sahip yapıda, üst yapı yüklerinden dolayı temel tabanında zemin türüne bağlı olarak farklı oturma ve basınç dağılımı oluşabilir. Bu farklılık kil ve kum zemin için Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu zeminlerde oturmalar üniform olmasına rağmen taban basınç dağılımları kil zeminde temel kenarında kum zeminde ise temel ortasında maksimum olacak şekilde farklılık göstermektedir (Örnek, 2009).



Şekil 2.6. Rijit Temel Tabanında Oluşan Oturma ve Basınç Dağılımı (Örnek, 2009)

2.2.2. Tabakalı Zeminler

Temeller, farklı tabakalardan oluşan zemin üzerine oturuyorsa ya da derinlik boyunca zemin parametreleri (c , ϕ ve γ) değişkenlik gösteriyorsa bu tip zeminlerde nihai taşıma güçleri hesapları bazı farklılıklar gösterebilmektedir. Bu durumda nihai taşıma gücü hesabı için, temelin oturduğu tabakaların tipi ve bu tabakaların geoteknik özelliklerine göre aşağıda belirtilen üç genel durum söz konusudur (Das, 2009).

1) Tabakalı zeminlerin kil olması durumunda ($f = 0$)

- Üstteki tabaka alttaki tabakadan zayıf olması durumu ($c_1 < c_2$)
- Üstteki tabaka alttaki tabakadan sağlam olması durumu ($c_1 > c_2$)

2) Tabakalı zeminlerin f - c olması durumunda

- Üstteki tabaka alttaki tabakadan zayıf olması durumu
- Üstteki tabaka alttaki tabakadan sağlam olması durumu

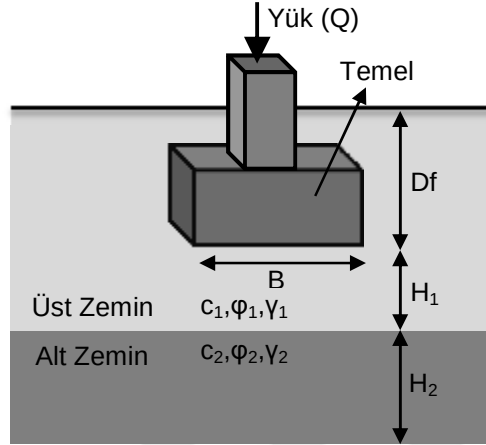
3) Tabakalı zeminlerden birinin güçlü kum diğerinin suya doymuş zayıf kil zemin olması durumunda

- Zayıf kil zemin (suya doymuş) tabakası üzerinde güçlü kum zemin tabakası olması durumu
- Güçlü kum zemin tabakası üzerinde zayıf kil zemin (suya doymuş) tabakası olması durumu

İki ya da daha çok tabakalı kohezyonlu zemin durumu çok karşılaşılan bir durum olmamakla birlikte daha çok kil tabakası üzerinde yer alan kum tabakası veya kum tabakası üzerinde yer alan kil tabakası şeklindeki tabakalı zeminlerle karşılaşılmaktadır. Tabakalı zeminlerde göçme yüzeyinin alttaki tabakayı etkileyip etkilemediği göçmenin nasıl olacağını belirleyen en önemli faktörlerdendir. Bu da

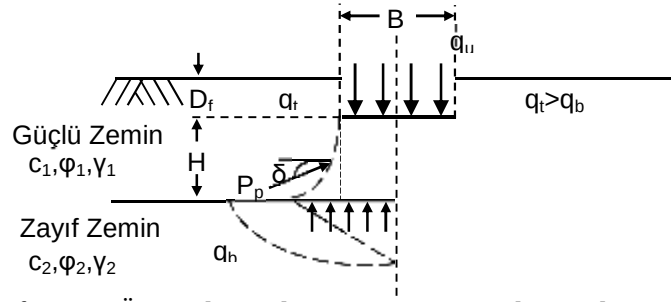
sıklıkla tabakaların birbirlerine göre sağlam veya zayıf olması ya da üsteki tabakanın kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır. Bu konuda literatürde değinilen birkaç yaklaşım aşağıda sıralanmıştır.

- Temel tabandan seviyesi ile bu seviyeden bir B aşağı derinlikteki bölgede mevcut zeminlerden en düşük zemin parametrelerine (c , ϕ ve γ) sahip olan zeminin parametreleri kullanılarak bir taşıma gücü hesabı yapılır (Şekil 2.7). Taşıma gücü yenilmelerinin büyük çoğunlukla bölgede oluşacağı düşünülmektedir. Kaymanın bir kısmı daha sağlam tabakalarda da oluşacağı için zayıf zeminin parametreleri ile hesap edilen taşıma gücünün güvenli tarafta kalacağı ifade edilmektedir.
- Temel taban seviyesi ile bu seviyeden bir B aşağı derinlikteki bölgede her bir tabakanın kalınlığına göre (Şekil 2.7) ağırlıklı ortalama alınarak zemin parametreleri (c , ϕ ve γ) hesaplanır. Hesaplanan bu zemin parametrelerine göre taşıma gücü değeri bulunur.
- Temel altında tahminen oluşabilecek göçme yüzeyleri belirlenir ve bu göçme yüzeylerindeki gerilmeler şev stabilitesi analizlerindeki benzer şekillerde hesap edilir. Taşıma gücünün en düşük hesap edildiği yenilme yüzeyi kritik göçme yüzeyi olarak belirlenir (Demir, 2011).



Şekil 2.7. Tabakalı Zemin Durumu

Bu çalışmada daha çok zayıf zeminler üzerine inşa edilecek dolgular üzerine araştırmalar yapılmıştır. Meyerhof (1973) zayıf (kil) zemin üzerinde ince güçlü (sıkı kum) zeminin olduğu tabakalı durumu için bir taşıma kapasitesi hesabı önermiştir. Böyle bir durumda genel olarak kayma yenilmesi yüzeyinin Şekil 2.8'deki gibi oluşabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 2.8. Zayıf Zemin Üzerinde Güçlü Zemin Durumunda Yenilme Yüzeyi

Üstteki kum zeminin yenilme yüzeyi boyunca etkileyen toplam zemin itki basıncı P_p ve bu basıncın yatayla yaptığı ortalama açı δ iken nihai taşıma kapasitesi yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabileceği belirtilmiştir.

$$q_u = c_2 N_{c2} + 2P_p \sin \delta / B + \gamma_1 D_f \quad (2.3)$$

Denklemdaki N_c kil zemin için taşıma kapasitesi faktörü olup bu zemin için içsel sürtünme açısının sıfır olması durumunda 5.14 alınabilir. Ayrıca burada itki kuvvetinin de aşağıdaki gibi hesaplanabileceği ifade edilmiştir.

$$P_p = 0.5\gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) K_p \cos \delta \quad (2.4)$$

Denklemdaki K_p pasif yanal toprak basıncı katsayısıdır. Ayrıca buradaki δ açısı temel yakınları ile kil yüzeyi arasında sıfırdan φ 'ya kadar değişmektedir. Bu açı yaklaşık olarak $2\varphi/3$ alınabileceği belirtilmiştir. Uygulamada düşey yönde zımbalama kesmesi direnci için bir katsayı (K_s) kullanılması önerilmektedir. Bu katsayı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$K_s \tan \varphi = K_p \tan \delta \quad (2.5)$$

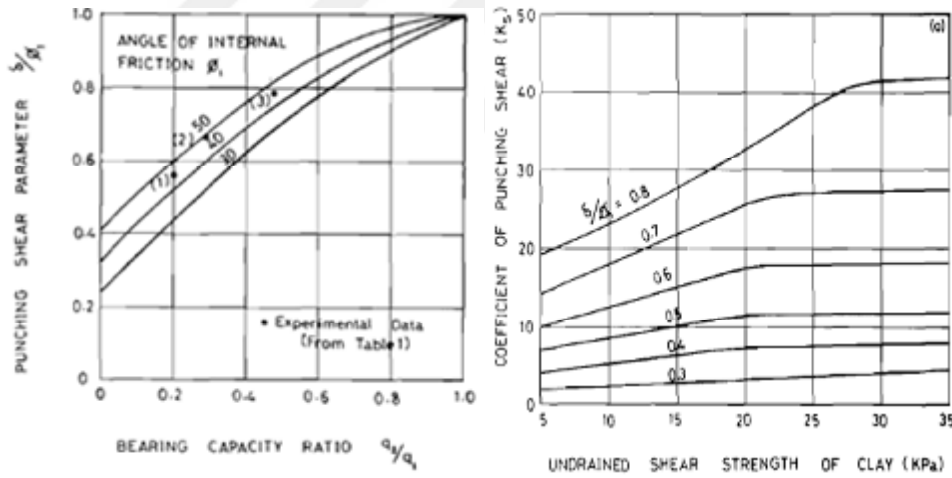
En son nihai taşıma kapasitesi denklemi düzenlenirse şerit temeller için aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$q_u = c_2 N_{c2} + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) K_s \tan \varphi / B + \gamma_1 D_f \quad (2.6)$$

Denklemin düşeyde silindirik yüzeye etkiyen pasif direnci belirlenmesi ile dairesel temeller için de kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Bu durumda dairesel temeller için aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$q_u = 1.2c_2 N_{c2} + 2\gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) sK_s \tan \varphi / B + \gamma_1 D_f \quad (2.7)$$

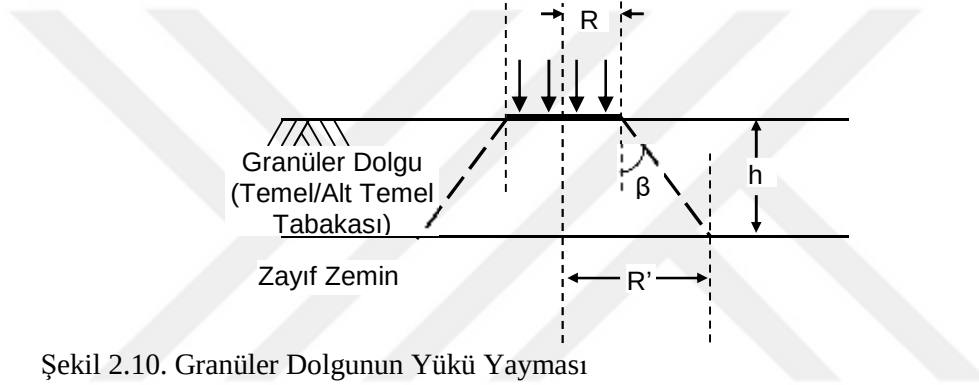
Denklemdaki s teriminin silindirik yüzeye etkileyen pasif zemin basıncı tarafından belirlenen şekil katsayısı olduğu ve küçük H/B değerleri için bir alınabileceği ifade edilmiştir. Tahmini düşey zımbalama yenilmesi yüzeyine gelen toplam zemin itki basıncı (P_p) bu basıncın yatayla yaptığı ortalama açıya δ bağlıdır (Şekil 2.8). Eğer tam gerçek zımbalama yenilme yüzeyi belirlenebilirse δ içsel sürtünme açısına eşit olmaktadır. Ancak tahmini yenilme yüzeyi üzerinde analiz yapıldığında (gerçek zımbalama yenilme yüzeyi ile tam yakalanamadığından) δ açısı içsel sürtünme açısından daha az değere sahip olabildiği görülmüştür. Denklemdaki K_s zımbalama kesme katsayısı, zımbalama kesme parametresi (δ/ϕ_1) değerine bağlı olarak zemin tabakalarının nihai taşıma güçlerinin bir fonksiyonudur (q_2/q_1). K_s zımbalama kesme katsayısı Şekil 2.9'da gösterilen eğrilere göre elde edilebilir (Hanna ve Meyerhof, 1980).



Şekil 2.9. K_s 'nin δ/ϕ_1 ve q_2/q_1 'e Bağlı Değişimi (Hanna ve Meyerhof, 1980)

Zayıf zemin üzerine granüler dolgu yerleştirildiğinde nihai taşıma kapasitesinin tahmin edilmesinde yaygın bir biçimde kullanılan bir yöntemde yükü yayma modelidir. Bu yöntemde granüler dolgunun yükü yaymaya çalıştığı ve temelin yenilmesinin yayılan yüke göre zayıf zeminin taşıma kapasitesini geçmesi

ile oluşacağı varsayılmıştır. Birçok araştırmacı bu tip zeminler için benzer yaklaşım kullanmışlardır (Love ve ark., 1987; Jewell 1996; Giraud ve Han 2004a; Giraud ve Han 2004b; Lyons ve Fannin 2006; Han ve ark., 2011; Demir ve ark., 2013). Bu yaklaşımda dolgunun altındaki zayıf zeminde, dolgu kalınlığı (h), yük dağıtma açısı (β), dolgunun yüzeyine uygulanan basınç (p) ve temelin yarıçapı (R) gibi parametrelere bağlı olarak üniform bir gerilme oluştuğu düşünülmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Granüler Dolgunun Yüğü Yayması

Altta zayıf zemin üstte granüler dolgu durumunda dolguya teker yükü uygulanıyorsa tekerin dairesel kabul edilen temas alanı ile veya dolguya direk dairesel bir temelle yük uygulanıyorsa yükün uygulandığı dairesel alanın yarıçapı R , uygulanan yük P ve uygulanan basınç p ise bu parametreler arasında aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$P = p\pi R^2 \quad (2.8)$$

Altta zayıf zemin kil olduğu düşünülürse, zeminin nihai taşıma kapasitesi (q') birkaç farklı katsayılarla verilebileceği gibi en basit halde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$q' = N_c c_u \quad (2.9)$$

Bu denklemdeki c_u direnajsız kayma mukavemeti N_c ise içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayısıdır. Nihai taşıma kapasitesinden zeminin taşıyabileceği yüke (P') aşağıdaki denklemle geçilebilir.

$$P' = N_c c_u \pi R'^2 \quad (2.10)$$

Zeminin taşıyabileceği yük (P') uygulanan yüke (P) eşitlenirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$p = N_c c_u \left(\frac{R'}{R} \right)^2 \quad (2.11)$$

Burada R' değeri geometriden yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

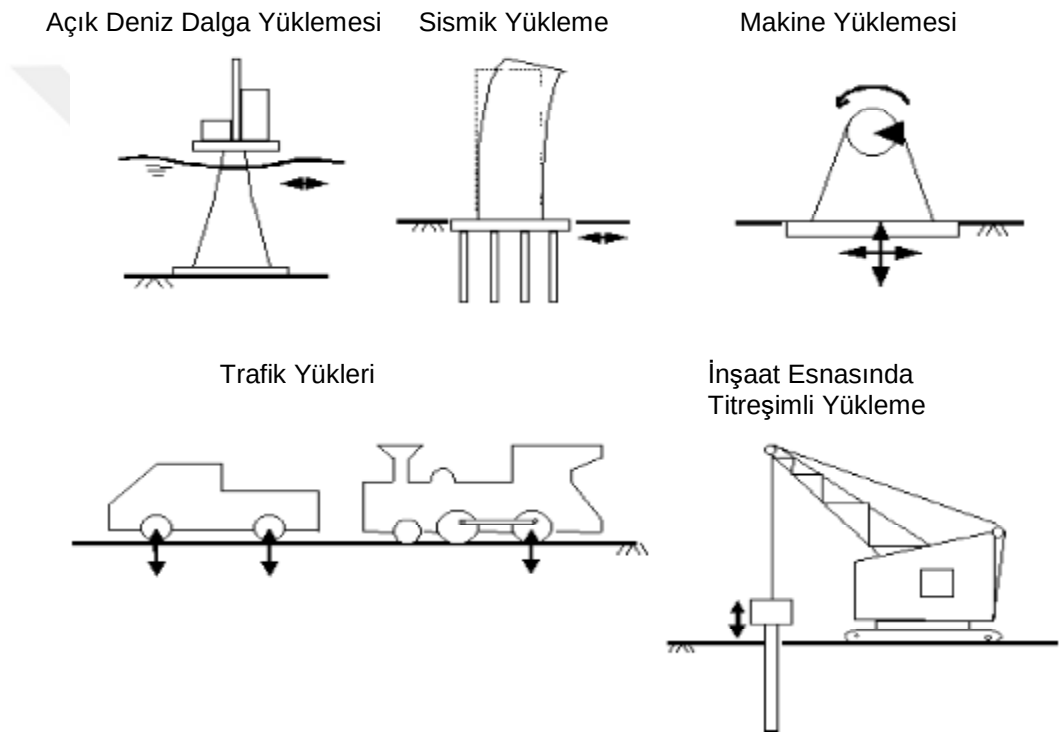
$$R' = R + h \tan \beta \quad (2.12)$$

Daha önceki yapılan çalışmalarda, denklemdeki yük dağıtma açısının (β) granüler dolgu kalınlığı ile değiştiği kalınlığın artması ile arttığı ve genelde değerinin 20° ile 40° arasında değiştiği bildirilmiştir (Lyons ve Fannin 2006; Demir ve ark., 2013).

2.3. Tekrarlı Yüklere Maruz Zeminler ve Temel Göçme Mekanizmaları

Statik yüklemeler sonucu zeminlerde oturmalar görülebileceği gibi statik yüklemelere ek olarak tekrarlı yüklemeler sonucunda da oturmalar meydana gelebilmektedir. Farklı uygulamalarda ilave oturmalar sebep olabilecek tekrarlı yüklemeler karşımıza çıkabilmektedir. Zeminler sanayi yapılarında makine titreşimleri, trafik yükleri, kazık imalatı sırasında, yüksek yapılarda rüzgar

kuvvetleri ile, offshore yapılarında dalga kuvvetleri ile ve deprem kuvvetleri gibi kuvvetler vasıtası ile birçok kez tekrarlı kesme kuvvetlerine maruz kalmaktadır (Şekil 2.11). Bu dinamik yükler statik yüklere göre küçük olmakla beraber zaman içinde çok sayıda tekrarla uygulanmaktadır. Dinamik yükler altında temel tasarımı geoteknik mühendisleri için hala tam olarak anlaşılamamış ve zor bir iştir (Tafreshi ve Dawson, 2012).



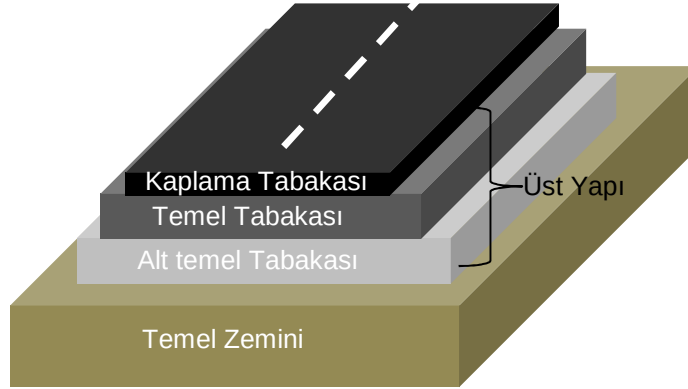
Şekil 2.11. Tekrarlı Yükleme Durumları (Demir ve ark., 2016)

Zemine gelen tekrarlı yükler zeminde hacim azalması oluşturmaya çalışır. Zeminin boşluklarında su varsa ve bu su zeminde hacim azalmasını meydana getirmek için yeterince hızlı sönümlenmez ise artık boşluk suyu basıncı oluşabilir. Özellikle ince daneli zeminlerde boşluk suyu basıncı kısa sürede sönümlenemeyeceği için bu tür zeminler tekrarlı yüklere maruz kaldığında artık

boşluk suyu basıncı oluşur. Bu durumda drenajsız koşullar geçerli olup artık boşluk suyu basıncı sayesinde efektif gerilmeler düşer. Tekrarlı yükten dolayı statik gerilmelerin bölgesel olarak yeniden dağılımı ile birlikte efektif gerilmelerdeki azalma, kayma deformasyonlarının ve drenajsız yükleme esnasında yapıdaki oturmaların artmasına neden olur (Demir ve ark., 2016).

2.3.1. Karayolu Yapısı

Tekrarlı yüklere sıkça maruz kalan ulaştırma yapıları, üzerinde taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konforda hareket edebilmeleri için inşa edilmektedir. Karayolları oldukça yaygın olarak inşa edilen ve genelde yapım sırası ya da görevi bakımından alt ve üst yapı olarak iki bölümde incelenebilen ulaştırma yapısıdır. Alt yapı, genellikle tesviye yüzeyi ile doğal zemin arasındaki bölge olarak düşünülür. Yolun dolgu gerektirecek bölümlerinde inşa edilecek dolgu ve yarma bölümlerinde ise tesviye amaçlı yapılan dolgu da alt yapı olarak kabul edilir. Alt yapı üzerine tabakalı bir şekilde granüler malzemelerin serilmesi ve sıkıştırılması ile inşa edilen, asıl amacı trafik yüklerinin zemine dağıtmak olan dolgulara üst yapı denilmektedir (Şekil 2.12). Üst yapı sıkça alt temel, temel ve kaplama tabakası olarak üç kısımda düşünülür (Taşçı, 2010). Bu şekildeki bir ulaştırma yapısında fazlaca dolgu inşa edilmekte ve agrega tüketilmektedir. Bu dolguların inşaatında doğal agrega yerine inşaat ve yıkıntı atıklarının kullanılabilmesi durumu araştırılırken, dolguların tekrarlı yükler altındaki yenilme mekanizmaları da incelenmelidir.



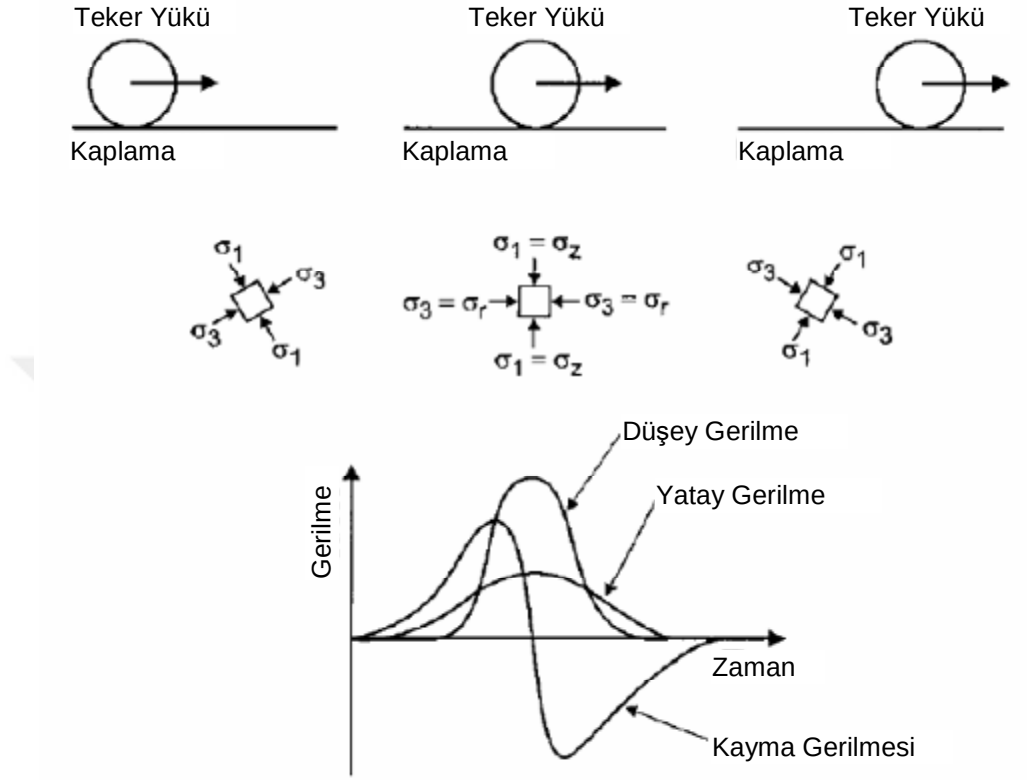
Şekil 2.12. Karayolu Üst Yapısı

Yollar trafik hacmine göre gerektiğinde kaplamalı veya kaplamasız olarak inşa edilebilirler. Özellikle trafik hacminin düşük olduğu yollar kaplamasız veya sathi (yüzeysel) kaplamalı olarak inşa edilebilmektedir. Ek olarak sathi kaplamalı yollar kademeli inşaatı izin verdiği ve ilk yatırım maliyetinin de düşük olduğu için servis ömrünün kısa tutulduğu yüksek trafik hacmine sahip bölgelerde de çokça mevcuttur. Hem ekonomik hem de basit bir şekilde inşa edilebilen bu kaplama ülkemizdeki yol ağlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Sathi kaplamada da, asfalt betonu kaplamalarda kullanılan agrega ve bitüm kullanılır. Ancak asfalt betonu kaplamada bitüm ve agrega uygun sıcaklıkta karıştırılıp gene uygun sıcaklıkta serilip sıkıştırılarak inşa edilirken, sathi kaplama granüler temel tabakası üzerine ince bir sıvı asfalt (yapışma tabakası) döküldükten sonra istenen boyutta agreganın serilip sıkıştırılması ile elde edilir. Sathi kaplamalı yollarda kaplamanın taşıma gücü olmadığı kabul edildiğinden, yolun tekrarlı trafik yüklerine karşı dayanımı kaplamasız yollardaki gibi granüler dolgular (temel/alttemel) ve taban zemini tarafından sağlandığı var sayılmaktadır (Uz 2012). Bu çalışmada, bu tip kaplamanın taşıma gücünün etkisinin olmadığı sathi kaplamalı ve kaplamasız yollar düşünülerek herhangi bir kaplama tabakası kullanılmadan araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde elde edilen sonuçların, temel tabakasının üzerine

herhangi bir kaplama inşa edildiğinde elde edilebilecek sonuçlara göre güvenli tarafta kalacağı düşünülmektedir.

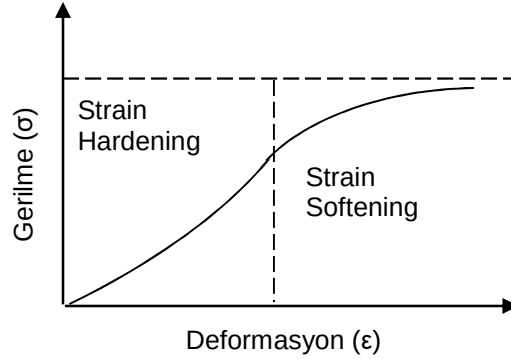
2.3.2. Karayolu Dolgularının Temel Yenilme Mekanizmaları

Yol üzerinde hareket eden bir aracın ağırlığı tekerlekleri vasıtası ile üst yapıya aktarılır ve bu da üstyapıda farklı büyüklüklerde gerilmelerin (düşey, yatay ve kesme) oluşmasına neden olur. Yol üzerinde hareket eden bir aracın yol üst yapısındaki bir eleman üzerinde meydana getirdiği düşey, yatay ve kesme gerilmeleri asal gerilmeler (kayma gerilmesinin sıfır olduğu düzlemdeki normal gerilmeler) cinsinden ifade edilebilir. Hareketli trafik yükünde taşıtın hareketi ile yol üst yapısındaki bir elemanda oluşacak gerilmeler ve bu gerilmelerin asal gerilmeler cinsinden ifadesi Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Şekil 2.13'den de anlaşılacağı gibi üst yapıdaki bir eleman için tekerlek sadece elemanın tam üzerindeyken kesme gerilmeleri oluşmaz iken diğer durumlarda düşey ve yatay gerilmelere ek olarak kesme gerilmeleri de oluşmaktadır (Brown, 1996; Uz, 2012).



Şekil 2.13. Hareketli Trafik Yüğü Altında Üst Yapı Elemanında Oluşan Gerilmeler (Lekarp ve Dawson 1998)

Tekrarlı yüklemeler sonucunda yol temellerinde esnek (elastik) ve kalıcı (plastik) deformasyonlar oluşur. Bu deformasyonlar tekrarlı yük sonucunda oluşacak gerilmenin düzeyine bağlıdır (Şekil 2.14). Önce gerilme arttıkça deformasyonlar artar bir gerilme seviyesine ulaşıldıktan sonra ise artık gerilme arttırılsa da zemin yumuşak zeminlerin yaptığı deformasyonlar gibi tepki verir (Souci, 2007).



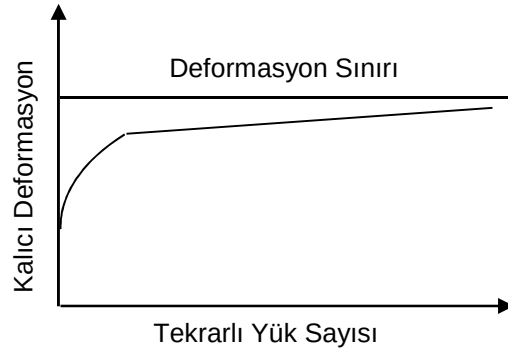
Şekil 2.14. Granüler Yol Temellerinin Gerilme Deformasyon Davranışı (Souci, 2007)

Tekrarlı yüklemeler sonucunda yol dolgularında oluşacak esnek deformasyonlar ile meydana gelen hasar geçicidir ve gerilme ortadan kaldırıldığında deformasyonlar geri döner. Ancak bu durumda oluşacak kalıcı deformasyonlar, gerilmeler ortadan kaldırılrsa bile geri dönmez ve kalıcı hasar oluşturur. Kaplamalı veya kaplamasız yollardaki birincil yenilme mekanizması üstyapının bir veya daha fazla tabakasında oluşan kalıcı düşey deformasyonlardır (Şekil 2.15). Bu deformasyonlar sıkça teker izi olarak adlandırılır ve deformasyona teker yükünün altındaki malzemenin yanıl hareketleri veya konsolidasyonu sebep olmaktadır (Kazmee ve Tutumluer 2015).



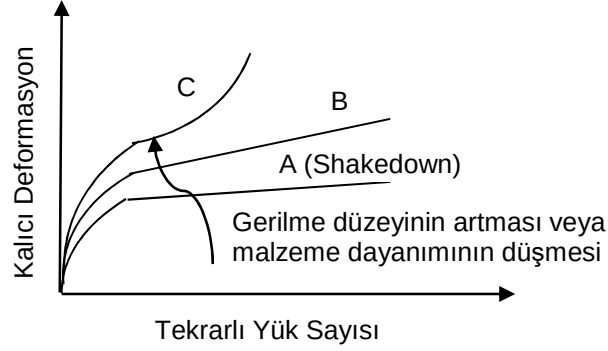
Şekil 2.15. Tekerlek İzi (Mazlum, 2014)

Literatürdeki çalışmalarda, düşük gerilme seviyelerinde tekrarlı yükleme sayısını arttırdıkça kalıcı deformasyonların önce arttığı sonra bu deformasyonların belli bir değere asimptot yaptığı ifade edilmiştir. Ayrıca kalıcı deformasyonlar asimptot yaptığı değere ulaştıktan sonra tekrarlı yükleme sayısı arttıkça oluşan deformasyonların elastik olduğu bildirilmiştir (Şekil 2.16). Bu şekilde oturmanın dengeye ulaşmasına genellikle ‘shakedown’ (Sharp ve Booker, 1984), bu dengeye ulaşana kadar plastik deformasyonların kademeli olarak artmasına da ‘plastic shakedown’ şeklinde isimlendirilmiştir (Werkmeister ve ark., 2001, 2005). Ancak shakedown’a ulaşmış durumda iken gerilme seviyesi arttırılırsa tekrar plastik deformasyonların oluştuğu belirtilmiştir (Sharp ve Booker, 1984).



Şekil 2.16. Tekrarlı Yüke Karşılık Kalıcı Deformasyon Davranışı (Souci 2007)

Granüler temel malzemesine uygulanan tekrarlı yüklerde gerilme seviyesi düşük olursa malzeme shakedown tepkisi verebilirken, daha yüksek gerilmelerde tekrarlı yükler uygulandığında malzeme farklı kalıcı deformasyon tepkisi verebilmektedir. Bu uygulanan gerilmenin seviyesine göre elde edilen kalıcı deformasyon tepkisi genellikle üç grupta incelenmektedir (Şekil 2.17). Şekil 2.16'da A B ve C olarak üç gerilme düzeyi gösterilmiştir. A düşük gerilme düzeyini gösterirken A düzeyinde shakedown tepkisi görülmektedir. Belli bir yük tekrarından sonra plastik deformasyonlar gözlenmez. B gerilme seviyesinde ise yük tekrarı arttıkça plastik deformasyonlar tam olarak sıfır olmaz azda olsa artmaya devam eder. Eğer tekrar sayısı çok arttırılırsa göçme oluşabilir. C gerilme düzeyinde ise artan tekrarlı yüklerle kalıcı deformasyonlar hızla artar ve göçme oluşur. Bu anlatılan davranışlar sabit gerilme düzeyi için malzemenin dayanımındaki azalma ile de gözlenebilmektedir. Yol inşaatında kullanılan granüler malzemenin A gerilme düzeyindeki davranışı göstermesi istenirken, C düzeyindeki davranış uygun görülmez. (Arnold, 2004; Uz, 2012).



Şekil 2.17. Gerilme Düzeyi ile Kalıcı Deformasyona Davranışı

Bazı araştırmacılar yol dolgularındaki en önemli yenilme davranışı olan tekerlek izinin (düşey yönlü kalıcı deformasyonlar) oluşumunu etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Saeed (2008) çalışmasında bu faktörleri aşağıdaki gibi belirtmiştir.

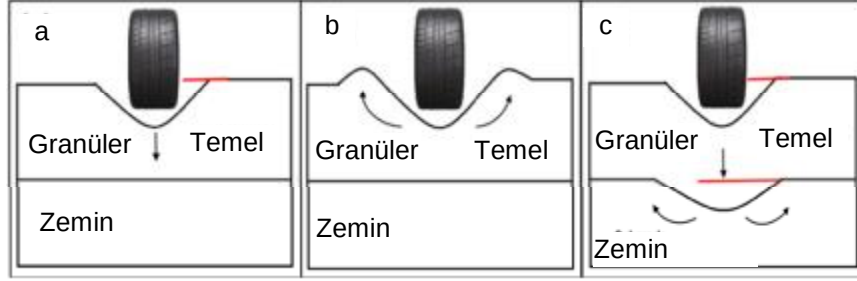
- Kayma mukavemeti düşük temel ve/veya zemin tabakası
- Temel tabakasının gradasyonunun yetersiz olması
- Temel tabakasında ince dane oranının gereğinden fazla olması
- Temel tabakasının su içeriğinin gereğinden fazla olması
- Temel tabakasının malzemenin yoğunluğunun düşük olması
- Temel tabakasındaki malzemenin köşeliliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün yetersiz olması
- Donma erime ve tekrarlı yük döngülerinin oluşturduğu bozukluklar

Giroud ve Han (2004) yapmış oldukları çalışmada, aşağıda belirtilen mekanizmaların biri ya da birkaçının birleşerek tekerlek izinin oluşumunu tetikleyebileceğini ifade etmişlerdir.

- Temel tabakası malzemesinin ve/veya alt temel zemininin tekrarlı trafik yükleri altında sıkışması

- Temel tabakasının ya da temel altındaki zeminin trafik yükleri tarafından oluşturulan normal ve kayma gerilmelerinden dolayı taşıma gücü yetersizliği
- Temel tabakasının aşamalı bozulması ile sonuçlanan tekrarlı trafik yüklerinden sonra temel tabakasının ya da temel altındaki zeminin taşıma gücünün yetersizliği
- Her bir tekrarlı yük tarafından oluşturulmuş artan plastik yer değiştirmelerinin toplamından dolayı temel tabakasının ve temel altındaki zemin malzemesinin yanal deplasmanı

Dawson ve Kolisoja (2006) yaptıkları çalışmada granüler kaplamalarda oluşan teker izi yenilme mekanizmasını üç gruba ayırarak incelemişlerdir. Birinci yenilme tipi (Mode 0); granüler malzemenin uygun sıkıştırılmamasından dolayı tekrarlı yükler ile oluşan düşey yönlü kalıcı deformasyonlardır. Burada oturma granüler dolguda meydana gelmektedir. İkinci yenilme tipi (Mode 1); temel tabakasında kullanılan malzemenin dayanımının uygulanan tekrarlı yükleri kaldıramayacak durumda olması ile temel tabakasında kayma yenilmesi olmasıdır. Temel tabakasının kayma direncinin aşılması ile malzeme yana doğru hareket ederek yolda önemli kabarmalar oluşmasına sebep olur ki bu da tekerlek izini oluşturur. Üçüncü yenilme tipi (Mode 2); temelin kaliteli malzeme ile uygun bir şekilde sıkıştırılmasına rağmen aşırı trafik yüklerinin ile zeminde oluşan aşırı gerilmelerin sonucunda düşük mukavemete sahip zeminin yenilmesi ile oluşur. Bu yenilme tipinde zemindeki oluşan oturmalar, yol üst yapısını etkileyerek tekerlek izini oluşturmaktadır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Tekerlek İzi Oluşumu Mekanizması a) Mode 0, b) Mode 1, c) Mode 2 (Kazmee ve Tutumluer 2015)

2.4. Donatılı Zemin Uygulaması

Zeminlerin çekme dayanımı çok düşük olduğundan, çekme dayanımının ve mühendislik özelliklerinin artırılması için zemine metal şeritler veya geogrid, geotekstil ve geocell gibi geosentetiklerin yerleştirilmesi durumuna donatılı zemin denilmektedir. Vidal (1968) ilk defa donatılı zemin kavramını bilimsel olarak tarif ederken, zemine yerleştirilen çekmeye dayanıklı malzemelerin betonarme elemanlardaki donatılar gibi davrandığını ileri sürmüştür. Donatılı zemin sistemi 1970'li yıllardan itibaren dünya geneline yayılmış ve özellikle istinat yapıları, çeşitli kontrollü dolgularda artan bir sıklıkta kullanılarak çok iyi sonuçlar alınmıştır. Donatılı zemin uygulaması önceleri metal şeritler ve çubuklar ile yapılırken, 1980'li yıllardan itibaren bu terk edilerek daha çok geosentetik ürünler tercih edilmiştir (Yıldız, 2002).

Bu çalışma için iki farklı geotekstil, geocell ve geogrid olmak üzere dört geosentetik malzeme temin edilmiştir. Geotekstillere biri ayırma amaçlı diğeri ise güçlendirme amaçlı olarak, geocell ve geogrid ise sadece güçlendirme amacıyla kullanılmıştır.

2.4.1. Geosentetikler

Geosentetikler, insan yapımı proje, yapı veya sistemin bir parçası olarak, zemin, kaya ve diğer geoteknik ile ilgili malzemelerde kullanılan polimer

malzemeden üretilmiş düzlemsel elemanlardır şeklinde tanımlanmaktadır (ASTM D 4439). Geosentetikler, sentetik polimer hammadde kullanılarak fabrikalardan kontrollü bir biçimde istenilen fiziksel ve mekanik özelliklerde üretilen çevresel etkilere dayanıklı ve ekonomik ürünlerdir. Kara yolları, hava alanları, demir yolları, istinat duvarları, dolgular, barajlar, depolama alanları ve benzeri birçok inşaat mühendisliği uygulamasında geosentetikler kullanılmaktadır. Geoteknik mühendislerinin en yaygın olarak kullandığı geosentetikler, geotekstil, geogrid, geomembran, geocell, geonet, geofoam ve geokompozittir (Acharya, 2011).

Geosentetiklerin temel amacı zeminlerin fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerini iyileştirmektir. Geosentetik ürünler, üretimde, kalite kontrolde ve tasarımda kullanmak için, birçok malzeme özelliğine sahiptirler. Genellikle üretim ve kalite kontrolde kullanılan özelliklere indeks özellikleri denirken, tasarımda kullanılan özelliklere performans özellikleri denilmektedir. Çeşitli geosentetik ürünler farklı işlevleri yerine getirebilmektedir. Bu ürünler inşaat mühendisliği uygulamalarında sıkça ayırma, güçlendirme, filtrasyon, drenaj, koruma ve bariyer amaçlı kullanılırlar. Bu özellikler aşağıdaki maddelerde kısaca açıklanmıştır (Gupta, 2009).

- Ayırma; esnek bir geosentetik iki farklı malzemenin veya zeminin ara yüzüne koyulması ile iki malzemenin işlevini korumasına yardımcı olması durumudur. Burada geosentetik birbirinden farklı malzemelerin birbirine karışmasına engel olarak ayırıcı görevi görür. Özellikle yumuşak zeminli yerlerde yol temeli ile zemin arasına koyularak temel malzemesinin zemine batmasına engel olduğu için yol uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda yaygın olarak geotekstil ve geomembran tercih edilmektedir.
- Filtrasyon; bazı geosentetiklerin sıvıyı geçirebilme ancak sıvı ile birlikte hareket eden ince malzemenin hareketini engelleme özelliği vardır.

Filtrasyon kara yolu, baraj, isale hatları gibi birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılmaktadır. Yol dolgularında özellikle ince malzemenin yolun temel tabakasına doğru hareketini önlemek için kullanılırlar. Bu şekilde temel tabakasının bütünlüğünün bozulması önlenabilmektedir. Filtrasyon amacı ile en yaygın kullanılan geosentetikler geotekstillerdir.

- Drenaj; bazı geosentetik kendi bünyesine gelen suyu iletebilmektedir. İsale hatlarında, yol dolgularında, istinat duvarlarında ve barajlarda geotekstillere ve geokompozitlere sıkça bu işlem için kullanılır.
- Güçlendirme; bazı geosentetikler zeminin içine yerleştirilmesiyle, çekme mukavemeti, rijitliği ve yanıl hapsedmesi ve benzeri etkileri ile zeminin mukavemetini artırarak güçlendirebilirler. Geogrid, geocell ve geotekstillere güçlendirme amacı ile sıkça kullanılmaktadır.
- Koruma; bazı geosentetikler inşaat ve yerleştirme esnasında kullanılan geosentetiğin keskin kayalar, ağaç kökleri, güneşin zararlı etkileri gibi çevresel faktörlerden dolayı zarar görmesini engellemek amacı ile kullanılabilir. Bazen şişen zeminlerde inşa edilecek dolguyu korumak içinde kullanılırlar. Genellikle geomembranlar geotekstillere ile birlikte kullanılarak koruma işlemi yapılır.
- Yalıtım; bazı geosentetikler iki farklı tabakanın birbirinden izole edilmesi için kullanılabilir. Geomebranlar genellikle çevreden veya zeminden temele su gelmesini engellemek için kullanılırlar.

Geotekstillere polipropilen (85%), polyester (12%), polietilen (2%) ve poliamid (1%) gibi malzemelerin karışımından elde edilen polimer liflerin örgülü veya örgüsüz şekilde birleştirilmesi ile imal edilen geosentetiklerdir. Örgülü geotekstil polimer liflerin çeşitli örgü yöntemleri (düz, sepet, saten vb.) ile

birleştirilmesi ile üretilirken örgüsüz geotekstiller lifler zımbalama veya eriterek birleştirme gibi yöntemlerle imal edilmektedirler (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Örgülü ve Örgüsüz Geotekstil (Gupta, 2009)

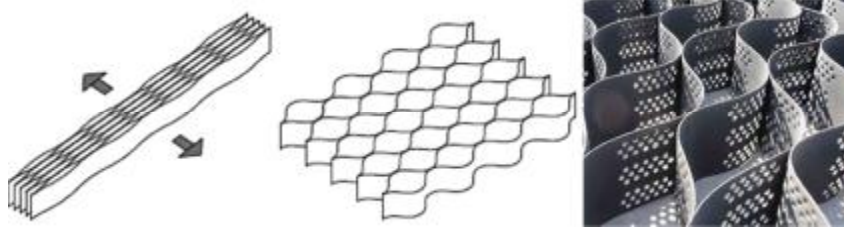
Geogridler, genellikle polietilen, poliester veya polipropilen cinsi polimerlerden üretilen, rijitlikleri ve çekme dayanımları yüksek geosentetiklerdir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında güçlendirme amaçlı olarak kullanılırlar. Çekme dayanımı, elastisite modülü ve sıyrılma direnci yüksektir. Sünme (creep) özelliği ise düşüktür. Geogridler, boşluklu şekilde, tek eksenli, çift eksenli ve üç eksenli olmak üzere üç farklı tipte üretilmektedir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Tek Eksenli, Çift Eksenli ve Üç Eksenli Geogrid (<http://www.geogridfabric.com/>)

Geoceller özgün üç boyutlu birbirine bağlı bal peteği benzeri yapısı ile özel bir çeşit geosentetiktir. Diğer geosentetikler gibi geocellerde polimerik malzemelerden üretilirler. Katlanabilir özelliği ile diğer düzlemsel geosentetikler

gibi kolay taşınabilmektedir (Şekil 2.21). Zemini yanal sınırlandırma etkisi yüksek olup güçlendirme amacı ile kullanılabilirler.



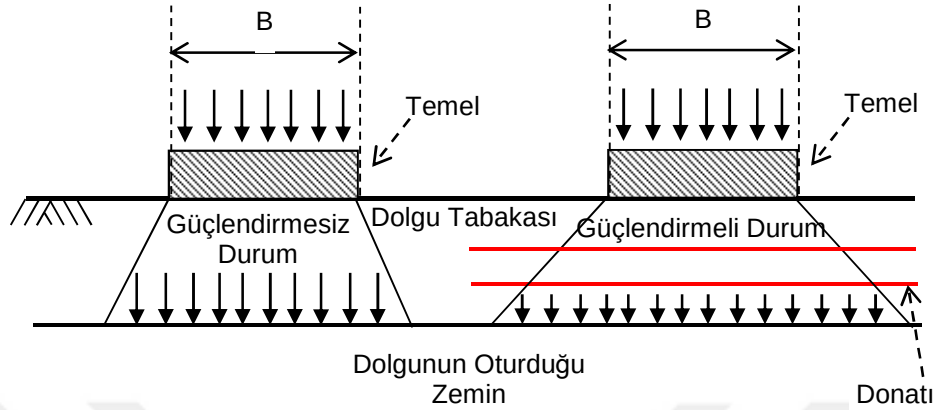
Şekil 2.21. Geocell (Yang ve ark., 2010; <http://www.geogridfabric.com/>)

2.4.2. Geosentetik Donatılı Zeminlerin Temel Güçlendirme Mekanizmaları

Geosentetik donatılarla güçlendirilen dolgularda geosentetik donatının sağladığı güçlendirme mekanizmaları; donatının, bulunduğu tabakadaki zeminin yanal hareketlerini sınırlandırarak zeminin yanal hareketini kısıtlaması (Bender ve Barenberg, 1978; Huang ve Tatsuoka, 1990), yük altında dolgu ile birlikte deforme olan geosentetiğin oluşturduğu gerilmiş membran etkisi (Binquet ve Lee, 1975a; Giroud ve Noiray, 1981) ve bu iki mekanizmanın devreye girmesi ile oluşan gerilmenin yayılması etkisidir.

Yanal sınırlandırma mekanizması ile dolgudaki zeminin yana doğru hareketi kısıtlanır ve zeminin yanal olarak hareketi (yayılması) azalır (Şekil 2.22). Gerilmiş membran etkisinde ise yük altında dolgunun deforme olması ile birlikte deforme olan geosentetiğin üzerindeki çekme gerilmesi artar, artan bu çekme gerilmesi dolgudaki zemine aktarılır ve zemin daha çok çekme gerilmesi taşıyabilir duruma gelir (Şekil 2.23). Bu iki mekanizma sonucunda aşağıda belirtilen durumlar oluşur.

- Dolgunun rijitliğini artır.
- Dolgunun rijitliğinin artması ile dolgunun altındaki zemine aktarılan normal gerilmeler düşer (gerilme yayılır) (Şekil 2.24).

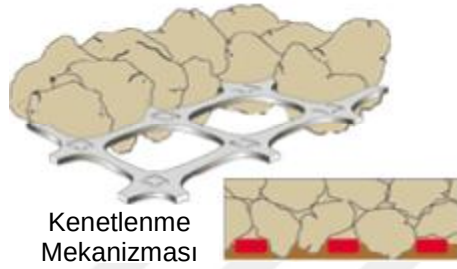


Şekil 2.24. Gerilmenin Yayılması

Geotekstiller normalde sıkça ayırma amaçlı kullanılsa da bazı özel durumlarda güçlendirme etkileri vardır. Özellikle yumuşak zeminler ($1 < \text{CBR} < 3$ veya kayma mukavemeti 30 kPa ile 90 kPa arası olan) üzerine inşa edilecek kaplamalarda güçlendirme etkileri olabilmektedir (AASHTO M288). Subaida ve ark., (2009) yaptıkları çalışmada CBR'ı 1 ile 2 arası değişen zemin üzerine inşa edilen kaplamasız yolda, temel tabakası kalınlığı düşük olduğu durumda temele geotekstil yerleştirmenin, yolun taşıma gücünü arttırdığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada çekme dayanımı nispeten yüksek olan nispeten ağır (600 g/m^2) bir çeşit geotekstil güçlendirme amacı ile kullanılırken, çekme dayanımı düşük ve hafif (200 g/m^2) bir çeşit geotekstil ise ayırma amaçlı kullanılmıştır.

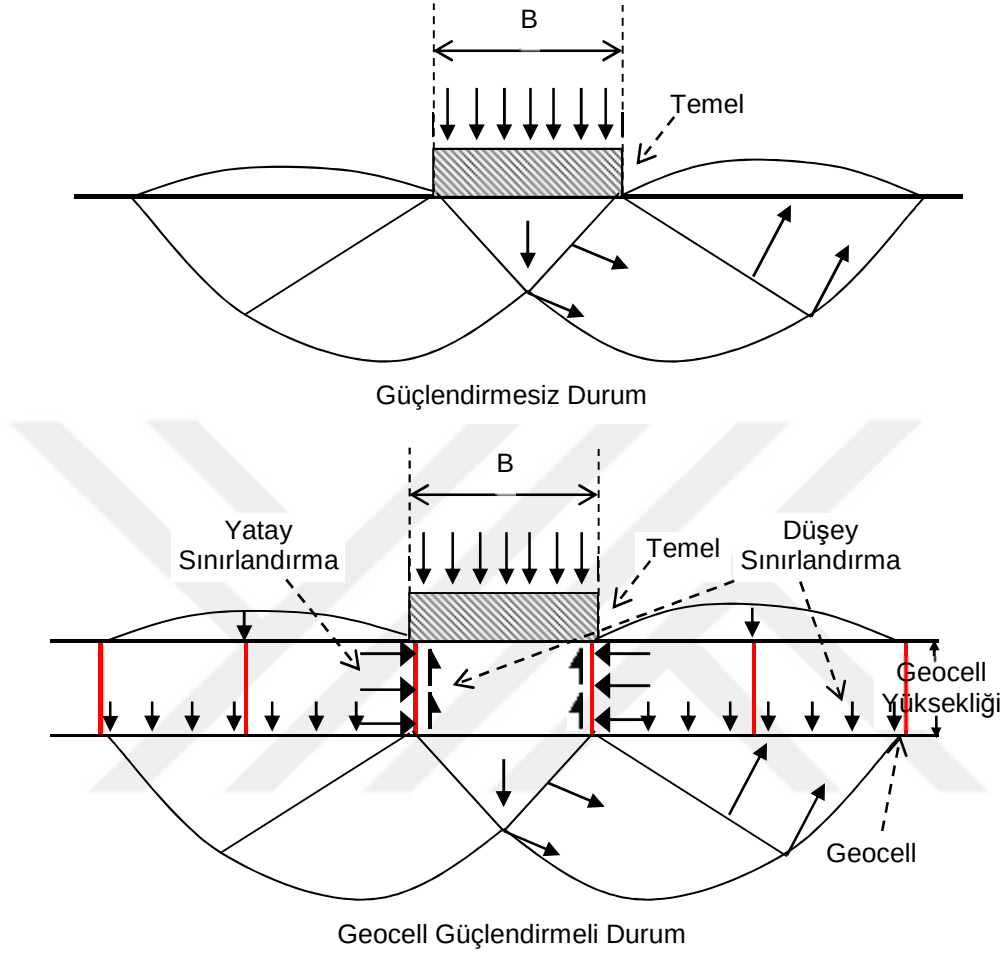
Geogridlerde yanıl hapsetme etkisi ve gerilmiş membran etkisi gibi etkiler, donatı ile birlikte donatının boşluklarına sıkışan agregaların oluşturduğu kenetlenme etkisi ile artmaktadır. Bu etki Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Geogrid yerleştirildikten sonra üzerine yerleştirilen agregalar geogridin boşluklarına sıkışarak hareketi kısıtlanır. Böylelikle yana doğru hareket sınırlandırılmış olur. Dolgu içinde bulunan geogrid yük ile biraz deforme olduğunda geogridin açıklıkları sünerek artar ve agregalar geogridin bu açıklıklarına düşerek sıkışır. Bu da donatı ile agregalar arasındaki kenetlenmeyi artırır. Bunun sonucunda geogrid

üzerindeki çekme gerilmesi agregalara aktarılır ve sistem daha yüksek çekme gerilmesine karşı koyabilir. Ayrıca dolgunun rijitleşmesi ile alt zemin üzerine gelen gerilmeler azalır. Bu da alt zeminde oluşan kayma gerilmelerini düşürür (Souci, 2007)



Şekil 2.25. Geogrid ile Agregalar Arası Kenetlenme Mekanizması (Souci, 2007)

Geocellerde yanal ve düşey sınırlandırma (hapsetme) etkisi, gerilmiş membran etkisi ve bu etkilerin dolguyu rijitleştirmesi ile gerilmenin yayma etkisi gibi mekanizmalar ile güçlendirme sağlamaktadır (Han ve ark., 2008; Zhang ve ark., 2010; Yang, 2010; Pokharel, 2010). Geocell donatı için mekanizmalardan en önemlisi yanal ve düşey sınırlandırma etkisidir. Üç boyutlu yapısı sebebi ile içine sıkışan zeminin yanal sınırlandırmasını sağlayan geoceller bunun dışında güçlendirme amaçlı kullanılan düzlemsel geosentetiklerden farklı olarak düşey sınırlandırma da sağlayabilmektedirler. Bu düşey sınırlandırma etkisi dolgu malzemesi ile geocell duvarı arasındaki sürtünme ve geocell ile güçlendirilmiş bölgenin, dolgu malzemesinin yukarı doğru kabarmasını önlemesi ile oluşmaktadır (Şekil 2.26) (Pokharel, 2010).

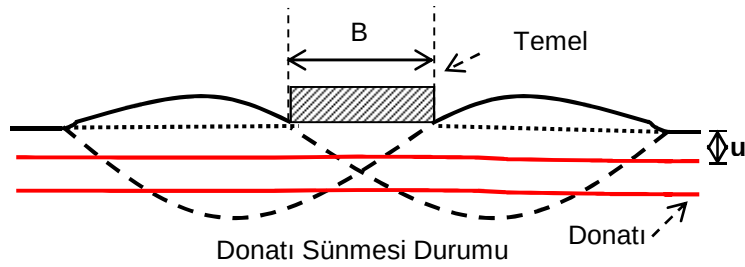
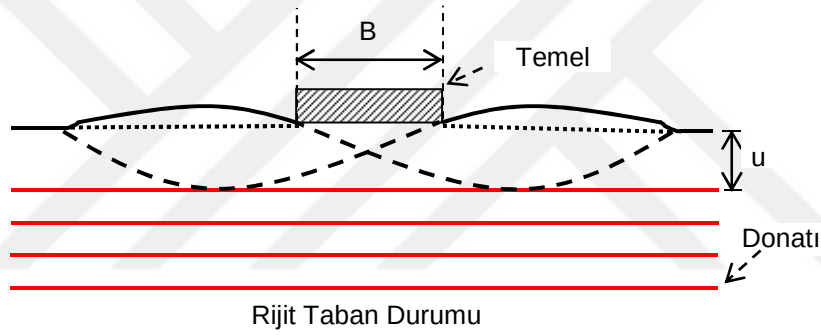


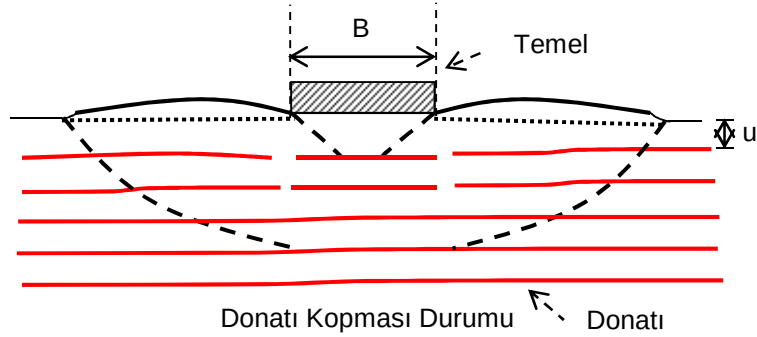
Şekil 2.26. Geocell Donatının Düşey ve Yatay Sınırlandırma Mekanizması (Pokharel, 2010)

2.4.3. Geosentetik Donatılı Zeminlerin Temel Göçme Mekanizmaları

Binquet ve Lee (1975b) yaptıkları küçük ölçekli model deneyler sonucunda üç farklı göçme mekanizmasının gelişebileceğini belirtmişlerdir. Bu göçme mekanizmalarında donatının yerleştirme düzeni ve rijitliğinin temel rolü oynadığını ifade etmişlerdir. Bu mekanizmalar aşağıda sıralanmıştır (Örnek, 2009).

- Rijit taban etkisi olarak da tanımlanan, göçmenin geogrid donatılı kısmın üzerinde meydana gelmesi durumudur. İlk donatı derinliğinin $u > 2B/3$ olması durumunda gözlenebilmektedir.
- Donatı sünmesi durumu, ilk donatı derinliğinin $u < 2B/3$, donatı sayısının $N < 3$ olması veya donatı boyunun oldukça kısa olması durumlarında beklenmektedir.
- Donatı kopması durumu, ilk donatı derinliğinin $u < 2B/3$, donatı sayısının $N > 4$ ve donatı boyunun fazla olması durumlarında ortaya çıkabilmektedir (Şekil 2.27).





Şekil 2.27. Geosentetik Donatılı Zeminlerde Göçme Mekanizmaları (Binquet ve Lee, 1975b)

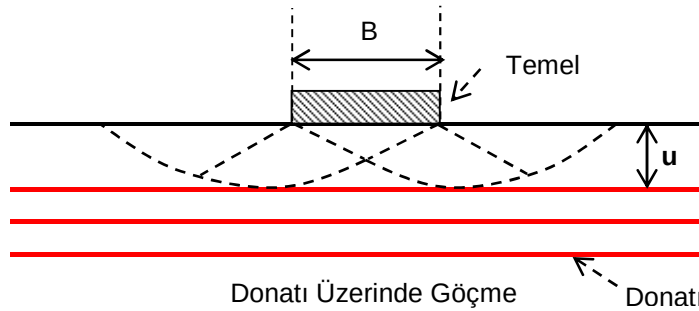
Wayne ve ark., (1998) ise donatı ile güçlendirilmiş dolgular için donatı yerleşim düzeni ve zeminin türüne göre değişen dört farklı göçme mekanizması tanımlamışlardır. Bu mekanizmalar aşağıda sıralanmıştır.

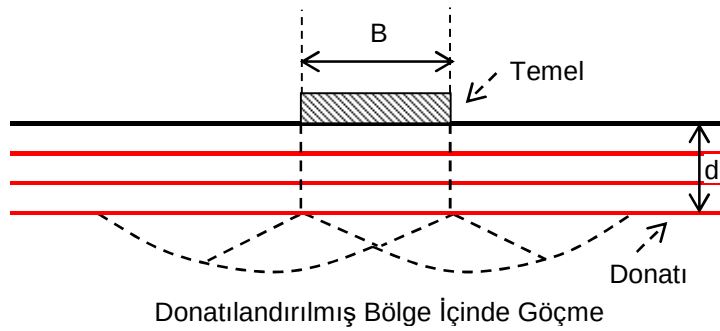
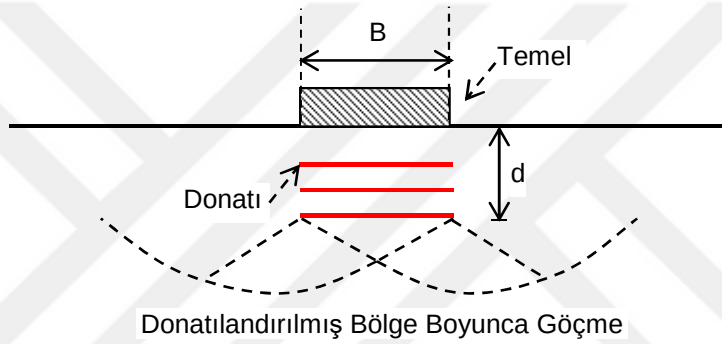
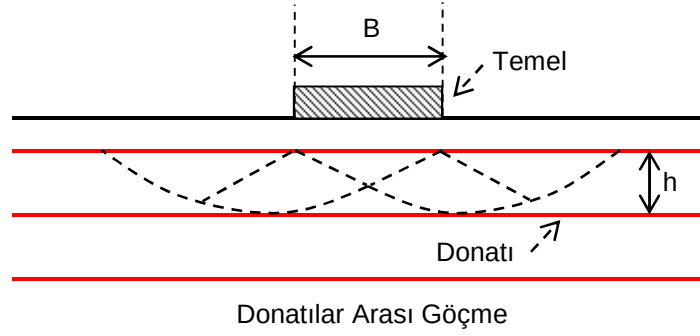
- Göçmenin donatılar üzerinde oluşması durumu, ilk donatı derinliğinin (u) belli bir değerden büyük olması durumunda donatılı bölgenin rijit bir sınır gibi davrandığı durumdur. Bu göçmenin oluşmaması için donatı temele yakın olarak koyulmalıdır.
- Göçmenin donatılar arasında oluşması durumu, donatılar arası mesafenin (h) belli bir değerden büyük olması durumunda oluşmaktadır. Bu göçmenin oluşmaması için donatılar arası mesafe uygun olmalıdır.
- Göçmenin donatılandırılmış bölge boyunca oluşması durumu, donatının yeteri kadar uzun olmadığı ve donatılandırılmamış bölgenin çok rijit olduğu durumda oluşan zımbalama göçmesi durumudur. Bu tür bir göçme durumunda donatılandırılmış bölge rijit bir derin temel gibi davranırken bu donatılandırılmış bölgenin kalınlığı da temelin gömülme derinliği olarak düşünülür. Bu durumda donatılandırılmış temel zemininde taşıma gücü, klasik taşıma gücü formülleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

· Göçmenin donatılandırılmış bölge içinde oluşması durumu, bu şekilde donatılandırılmış bölge boyunca zımbalama göçmesi oluşması durumu genelde uygun donatı yerleştirme düzenine sahip güçlendirilmiş temel zemini içerisinde meydana gelmektedir (Şekil 2.28). Bu tür göçme için, altta zayıf zemin üstte sert zemin durumunda Meyerhof (1973) tarafından önerilen taşıma gücü artışı formülüne, donatı katkısı eklenerek yeni bir formül türetilmiştir.

$$q_{u(R)} = q_b + 2c_t(B + L) \frac{d}{BL} + [\gamma_t H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{d}\right) K_s (B + L)(\tan \varphi_t / (BL))] + 2(B + L) \frac{T}{BL} - \gamma_t d \quad (2.13)$$

Buradaki parametrelerden; q_b donatılandırılmış bölge altındaki nihai taşıma kapasitesi, c_t üst tabakanın kohezyon değeri, γ_t üst tabakanın birim hacim ağırlığı, d üst tabaka kalınlığı, B temel genişliği, L temel uzunluğu, D_f temel gömülme derinliği, φ_t üst tabakanın içsel sürtünme açısı, T donatı çekme kuvvetidir. K_s ise üst tabakanın zımbalama kayma katsayısı olarak tanımlanmakla birlikte, tabakalı zemine oturan yüzeysel temele ait nihai taşıma kapasitesine bağlı olarak sürtünme açısının bir fonksiyonudur (Örnek, 2009).





Şekil 2.28. Geosentetik Donatılı Zeminlerde Göçme Mekanizmaları (Wayne ve ark., 1998)

Michalowski (2004) geosentetik donatı ile güçlendirilen zeminlerde kopma göçmesi ve sünme göçmesi olarak iki farklı göçme mekanizması tanımlanmıştır. Çalışmasında süperpozisyon yöntemi ile bu şekilde güçlendirilen zeminlere oturan

şerit temellerin taşıma kapasitelerini hesaplamak adına oluşacak iki farklı göçme durumu için denklem önermiştir.

· Sünme göçmesi için;

$$p = cN_c + qN_q + 0.5\gamma BN_\gamma + k_t M'_r \quad (2.14)$$

$$k_t = T_t / h \quad (2.15)$$

$$M'_r = (1 + \sin \varphi) e^{(\frac{\pi}{2} + \varphi) \tan \varphi} \quad (2.16)$$

denklemdeki; T_t donatının çekme dayanımı, h donatılar arası mesafeyi ifade etmektedir.

Kopma göçmesi için; tek donatı ile güçlendirme durumunda aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$p = \frac{1}{1 - \mu \frac{u}{B} M_p} \left[c(N_c + f_c M_c) + q(N_q + \mu M_q) + \gamma B \left(0.5N_\gamma + \mu \frac{d}{B} M_\gamma \right) \right] \quad (2.17)$$

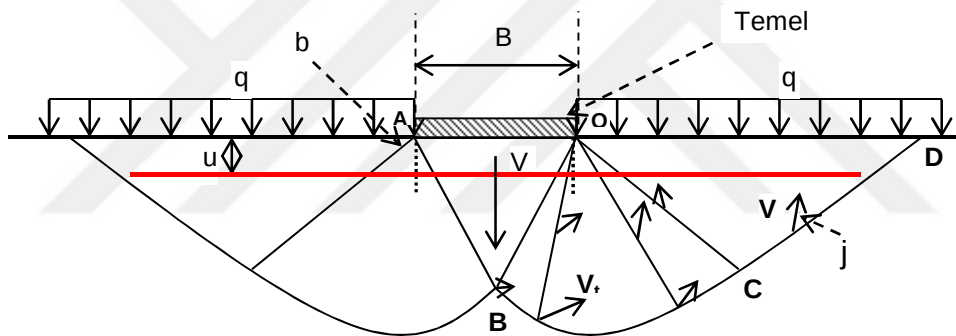
Denklemdeki, N_c , N_q ve N_γ zemin taşıma gücü katsayıları, M_p , M_q , M_c ve M_γ donatı taşıma gücü katsayıları, μ zemin-donatı ara yüzey sürtünme katsayısı, u ilk donatı derinliği, B temel genişliği, c kohezyon, q sürşarj yükü, γ zemin birim hacim ağırlığı, ve f_c ise, zemin-donatı ara yüzey kohezyonunun zemin kohezyonuna oranıdır (Örnek, 2009).

Birden çok donatı ile güçlendirme durumunda ise aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$p = \frac{1}{1 - \mu \frac{u}{B} M_p \sum_{i=1}^n \frac{di}{B}} \left[c(N_c + n f_c M_c) + q(N_q + n \mu M_q) + \gamma B \left(0.5 N_\gamma + \mu M_\gamma \sum_{i=1}^n \frac{di}{B} \right) \right] \quad (2.18)$$

Denklemdaki; n donatı sayısı, d_i i. tabakanın derinliği ($=u-(i+1)$), h donatılar arası mesafedir.

Ayrıca Michalowski (2004) yaptığı çalışmada, donatıların taşıma gücüne maksimum desteği Şekil 2.29’da gösterilen B ve C noktaları üzerine yerleştirilmesi durumunda elde edileceğini ifade etmiştir.



Şekil 2.29. Donatılı Zemin Temel Sistemi Göçme Mekanizması (Demir, 2011)

Geocell donatılı ile güçlendirilmiş zeminlerde muhtemelen yenilmenin oluşabileceği durumlar, Mitchell ve ark., (1979) kare kesitli içi kum ile dolu kağıttan geocell kullanarak yaptığı çalışmada aşağıdaki sıralanmıştır (Pokharel, 2010).

- Hücrenin aşağıdaki yumuşak zemine batması
- Aşırı yükleme sonucunda hücreni patlaması

- Doğrudan hücre duvarlarına yükleme ve yetersiz yanıl dirençten dolayı hücre duvarlarının burkulması
- Yumuşak zeminde oluşan kayma yenilmesi sonucu taşıma kapasitesi yenilmesi
- Zemin ile geocell tabakasının levha gibi davranması sonucu eğilme yenilmesi
- Uzun süre çevresel etkilere maruz kalma sonucunda dayanıklılığının azalması

Yuu ve ark., (2008) yaptıkları kapsamlı literatür araştırması sonucunda zeminlerin geocell ile güçlendirilmesi durumunda, oluşacak iyileştirme faktörlerinin ve mekanizmalarının tam olarak bilinmediğini belirtmiş ve bu sebeple inşaat mühendisliği uygulamalarında geocell kullanımı diğer geosentetiklere göre daha az olduğunu ifade etmişlerdir. Zeminlerin geocell ile güçlendirme proje ve uygulamalarının diğer geosentetiklerle güçlendirme proje ve uygulamalarına göre daha az olması, yük iletim mekanizmasının çok bilinmemesi ve performansı ile ilgili yeterli veri olmamasından kaynaklanmaktadır. Özellikle tekrarlı ve statik yükler altında performansını etkileyen faktörler henüz tam olarak bilinmemektedir (Pokharel, 2010).

2.5. Literatür Özeti

2.5.1. Geosentetik Donatılı Zeminler İle İlgili Deneyisel Çalışmalar

Zeminlerin geosentetiklerle güçlendirilmesi durumunu ele alan literatürde mevcut deneyisel çalışmalar, statik yüklemeli, tekrarlı yüklemeli ve hem statik hem de tekrarlı yüklemeli çalışmalar olarak gruplandırılmıştır.

2.5.1.1. Statik Yükleme Çalışmaları

Binquet ve Lee'nin (1975a) yaptıkları laboratuvar model deneyleri ile donatılı (alüminyum şeritler) kum zeminlere oturan şerit temellerin davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı zemin durumunu araştırmışlardır. Birinci durumda zemini derin homojen bir kum tabakasından, ikinci durumda zemini yumuşak kil üzerine kum tabakasından ve üçüncü durumda ise zemini sınırlı boyutlarda çok yumuşak zemin (organik zemin veya kireçtaşı oyuğu gibi) üzerine kum tabakasından oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda donatı ile iyileştirilen tüm deney kesitlerinde taşıma kapasitesi artışı ve oturma miktarında azalma elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Donatı sayısı altıya kadar arttırıldığında, zeminin taşıma gücü ve oturma karakterinin iyileştiğini bu sayıdan sonraki artışın pek önemli olmadığını belirtmişlerdir.

Akinmusuru ve Akinbolade (1981) çalışmalarında yaptıkları model deneyler ile donatıyla güçlendirilmiş kum zeminlerin taşıma kapasitesini incelemişlerdir. Deneylerde, kenarı 10 cm (B) olan kare kesitli temel ve bitkisel liflerden elde edilen donatı kullanmışlardır. Çalışmalarında güçlendirme elemanı sayısı (N), güçlendirme elemanları arasındaki yatay (x) ve düşey (z) mesafe ve ilk güçlendirme elemanı derinliği (u) parametrelerinin taşıma gücüne etkilerini irdelemişlerdir. Yaptıkları bir dizi model deney sonucunda, donatı sayısı 3 olduğunda, ilk donatı derinliğinin (u) ve donatı şeritleri arası bütün mesafelerin (x, z) yaklaşık 0.5B olması durumunda en efektif sonuçları elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Omar ve ark. (1993) yaptıkları model deneyler ile kum zeminlere yerleştirilen geogrid donatısının taşıma gücü bakımından güçlendirme etkisini şerit (7.62 cm × 30.48 cm) ve kare (7.62 cm × 7.62 cm) temeller kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada iki farklı temel şekli (şerit ve kare) için geogrid donatısının optimum yerleştirme derinliğini ve boyutlarını araştırmışlardır. Deneylerde tek çeşit kum zemin (üniform derecelendirilmiş ince kum) kullanmış ve bu zemini de tek sıkılık oranında ($D_r=70\%$) deney kasasına yerleştirmişlerdir.

Çalışmaları sonucunda ilk donatı derinliğinin 1B'den küçük olması gerektiğini belirtmişlerdir. İlk donatı derinliğinin 1B'den büyük olması durumunda BCR değerinin azalarak 1 değerine yaklaştığını ifade etmişlerdir.

Adams ve Collin (1997) yaptıkları çalışmada geosentetik (geogrid ve geocell) ile güçlendirilen zeminlere yerleşen yüzeysel temellerin taşıma gücü ve oturma davranışını model deneylerle irdelenmişlerdir. İlk donatı derinliği, zemin yoğunluğu, temel boyutu, güçlendirmelerin sayısı ve arasındaki mesafe gibi parametreleri geogrid ve geocell donatılar için araştırmışlardır. Deneyleri genişliği 5.4m, uzunluğu 6.9m ve derinliği 6m olan betonarme duvarlarla çevrili bir arazide kenar uzunlukları 0.30m, 0.46m, 0.61m ve 0.91m olan kare temeller ile gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde önce çukur kazılmış, ardından 30cm kalınlıklar halinde kum serilip belli yoğunluğa göre sıkıştırılmıştır. Hazırlanan deney zemini üzerine yerleştirilen model temellere yükleme elle kontrol edilebilen hidrolik kriko ile yük artımları şeklinde yapmışlardır. Çalışma sonucunda, güçlendirmeli deneylerde güçlendirmenin etkisini görmek için temel boyutunun %0.5, %1.0 ve %3.0 kadarı deplasmanlar için taşıma gücü oranlarını (BCR) hesap etmişlerdir. Sonuçta geosentetik donatı ilavesinin kum zeminlerin taşıma kapasitesini yaklaşık 2.5 kat artırdığını ve ilk donatı derinliğinin 0.25B olması halinde en yüksek taşıma kapasitesi değeri elde edildiğini belirtmişlerdir.

Gabr ve Hart (2000) yaptıkları model deneyler ile geogrid donatılarla güçlendirilmiş kum zeminlerde elastisite modülü değerini hesaplamaya çalışmışlardır. Deneyleri genişliği ve uzunluğu 1.52 m, yüksekliği 1.37 m olan deney kasasında ve bir kenarının boyutu 30 cm olan kare temeller ile yapmışlardır. Güçlendirmesiz ve iki farklı tip geogrid donatı ile güçlendirmeli 9 deney gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde 9.2mm ve 4.6mm'lik deplasmanlar için elastisite modülü (E_1) hesaplamışlardır. Donatının güçlendirme etkisini hesap edilen elastisite modülü değerine göre kıyaslamışlardır. Bu çalışmada elde edilen elastisite modülü değerleri Adams ve Collin (1997)'e göre %20 daha düşük değerde ($u/B = 0.5$ 'de) bulunmuştur.

Yıldız (2002) yaptığı model deneylerle güçlendirmesiz ve geogrid ile güçlendirmeli kum zeminlere oturan dairesel temellerin taşıma kapasitelerini araştırmıştır. Model deneylerde; geogrid ile güçlendirilen kum zeminde güçlendirme ile ilgili parametrelerin taşıma kapasitesine etkisine bakmıştır. Bu bağlamda ilk donatı derinliği (u), donatılar arası derinlik (h), donatı tabaka sayısı (N), donatı boyu gibi parametrelerin etkisini irdelemiştir. Taşıma gücü değeri bakımından bu parametrelerin optimum değerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda ilk donatı derinliği ve donatılar arası mesafenin en efektif 0.30 B de olduğu belirtilmiştir. Geogrid donatı kullanılarak kum zeminlerin taşıma kapasitesinin ve oturma davranışının önemli ölçüde iyileştirilebildiği ifade edilmiştir.

Dash ve ark. (2003) yumuşak kil zemin üzerine geosentetik donatılarla (geocell ve geocell ile birlikte geogird) güçlendirilmiş kum tabakası yerleştirerek küçük ölçekli laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Deneylerde rijit dairesel bir temel (150 mm çapında) vasıtası ile monotonik olarak yükleme yapmış ve yüke karşılık temelin oturmasını ölçmüşlerdir. Çalışmalarında geocellin yüksekliği, geocell tabakasının genişliği gibi parametrelerin taşıma gücüne etkisini incelemişlerdir. Geocelli tek yönlü geogirdleri uygun şekilde birleştirerek oluşturmuşlardır. Geocell güçlendirme ile yapılan deneylerde geocell donatıyı sabit olarak yüzeyden yükleme plakası çapının 0.1 katı derinliğine ($u/D=0.1$) yerleştirmişlerdir. Deneylerde kullandıkları geocell donatının açıklığına eşdeğer dairenin çapı yükleme plakası çapının 0.8 katıdır ($d/D=0.8$). Deneylerin sonucunda yumuşak kil zemin üzerine kum tabakası yerleştirmenin taşıma gücünü artırdığını belirtmişlerdir. Kum tabakasının geocell ile güçlendirilmesi durumunda, geocell tabakası genişliği temel çapının 1.2 katı ($b/D=1.2$) iken taşıma kapasitesinde iyi artışı olduğunu vurgulamışlardır. Geocell genişliği temel çapının 5 katından ($b/D=5$) daha fazla olduğu durumlarda taşıma kapasitesinde önemli bir artışın olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca geocell yüksekliğinin temel çapının yaklaşık iki katı ($h/D=2.1$) kadar olduğunda iyi bir taşıma kapasitesi artışına ulaşıldığını ifade etmişlerdir.

Sireesh ve ark. (2009) boşluk bırakılarak oluşturulan yumuşak kil zemin üzerine geosentetik donatılarla (geocell ve geocell ile birlikte geogird) güçlendirilmiş kum tabakası yerleştirerek küçük ölçekli laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Deneylerde rijit dairesel bir temel (150 mm çapında) vasıtası ile monotonik olarak yükleme yapmış ve yüke karşılık temelin oturmasını ölçmüşlerdir. Ayrıca basınç sensörleri ile basınç ölçümleri de almışlardır. Yumuşak kil zemin yüzeyinden temel çapının 0.75 katı derinlikte ve temel çapının 0.6 katı çapında dairesel bir delik açarak deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Geocell güçlendirme ile yapılan deneylerde geocell donatıyı sabit olarak yüzeyden yükleme plakası çapının 0.05 katı derinliğine ($u/D=0.05$) yerleştirmişlerdir. Deneylerde kullandıkları geocell donatının açıklığına eşdeğer dairenin çapı yükleme plakası çapının 0.8 katıdır ($d_c/D=0.8$). Deneylerde yumuşak kil zemin üzerine inşa ettikleri kum tabakasının kalınlığı, sıklığı, bu tabaka içerisine yerleştirilen geocell tabakasının genişliği ve yüksekliği parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda geocell tabakasının boşluğun üzerinde boşluğun çapına eşit bir mesafeye yerleştirildiğinde yük kapasitesini arttırdığı ifade etmişlerdir. Ayrıca bu koşullarda geocell tabakası genişliğinin temel çapının 4.9 katından ($b/D=4.9$) daha fazla olduğunda taşıma kapasitesinde önemli bir artış olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında geocell tabakası yüksekliğinin artmasının atalet momentini ve dolayısı ile tabakanın rijitliğini arttırdığını bununla yük taşıma kapasitesini arttırdığının belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2010) yumuşak zemin üzerine inşa edilen kaplamasız yollar için, temel dolgusunun geocell ile güçlendirilmesi durumunda güçlendirmenin taşıma gücüne etkisini belirlemek amacıyla basit bir taşıma gücü hesaplama yöntemi önermiş ve bu yöntemi doğrulamak için model deney yapmışlardır. Geocell donatının taşıma gücüne etkisini belirlemek için önerdikleri hesaplama yönteminde geocell donatının düşey gerilme dağılımına etkisini ve membran etkisini hesap etmişlerdir. Hesap yöntemini kıyaslamak için laboratuvar da geocell ile güçlendirmeli ve güçlendirmesiz iki deney yapmışlardır. Deneylerde yumuşak

kil zemin üzerine killi kum zeminden yastık tabakası, üzerine de temel dolgusu yerleştirmişlerdir. Güçlendirmeli deneylerde yumuşak zeminin 20 mm üzerine 30 mm kalınlığındaki geocell donatıyı yerleştirmişlerdir. Yüğü monotonik artan bir şekilde ve 236 mm çapındaki dairesel bir plaka ile verilmiştir. Deney sonuçlarını, önerdikleri metodu ve Koerner yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, büyük deformasyonlarda model deney sonuçlarının, Koerner yöntemine göre önerilen metoda daha yakın olduğu ifade etmişlerdir. Ayrıca geocell ile güçlendirmenin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

Pokharel ve ark. (2010) çalışmalarında, statik yük altında geocell güçlendirmeli dolguların rijitliğini ve taşıma kapasitesini etkileyen faktörleri laboratuvar deneyleri ile araştırmışlardır. Deneylerin büyük bir çoğunluğunu geocell malzemesinin tek hücresi üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde yüklemeyi hava ile maksimum 900 kPa basınç üretebilen yükleme sisteminde, 15 cm çaplı plaka ile statik yük şeklinde yapmışlardır. Alanları 605mm x 605mm (Box A) ve 800mm x 800mm (Box B) olan iki farklı deney kasası kullanmışlardır. Çalışmada aşağıda belirtilen parametreleri araştırmışlardır.

- Geocell'in biçimi (geocell dairesel ve elips olarak yerleştirilmiş),
- Geocell'in tipi (dört farklı rijitlikte geocell kullanılmış),
- Geocell'in sınırlandırma etkisi (sadece geocellin içine zemin koyularak yükleme yapılmış),
- Geocell'in yüksekliği (iki farklı yükseklikte geocell kullanılmış),
- Dolgu malzemesinin tipi (kohezyonlu taş ocağı atığı malzeme ve kohezyonsuz nehir kumu kullanılmış).

Çalışma sonunda aşağıda sıralanan sonuçları elde ettiklerini belirtmişlerdir.

- Dairesel şekilde yerleştirilen geocell'in taşıma kapasitesi ve rijitliği elips şeklinde yerleştirilen geocell'e göre daha iyi çıktığı belirtilmiştir.
- Geocellin rijitliği arttıkça güçlendirilmiş temelin taşıma gücünün de arttığı ifade edilmiştir.
- Statik yükler altında geocell ile güçlendirmede, kohezyonsuz kum zemin-dolgulu sistemde elde edilen iyileşme, kohezyonlu taş ocağı atığı dolgusu ile oluşturulan sistemden elde edilen iyileştirmeye göre daha anlamlı olduğu belirtilmiştir.
- Çoklu geocell güçlendirmeli temel zemin (3x3=9 adet hücreye sahip) tekli güçlendirmeli temel zemine (tek hücreli) göre daha düşük rijitlik ve daha yüksek taşıma gücü verdiği ifade edilmiştir.

Sitharam ve Hegde (2013) alüminyum endüstrisi atığı olan yumuşak zemin özellikleri gösteren ($c_u=10$ kPa) kırmızı çamuru (red mud) bir depolama alanında 3 metre yüksekliğe kadar depolamak için geocell donatı ile destekleme durumunu laboratuvar ve arazi deneyi ile araştırmışlardır. Laboratuvar yaptıkları model deneyler ile geocell ve/veya geogrid ile taşıma kapasitesi artışını araştırmışlardır. Laboratuvar deneylerinde kırmızı çamuru yerleştirip üzerine geosentetiklerle güçlendirilmiş dolgu yerleştirmişlerdir. Daha sonra şerit temel ile plane strain koşullarında artan yük uygulayarak taşıma gücü ve oturma davranışını incelemişlerdir. Üç adet deney (güçlendirmesiz, geocell ile güçlendirmeli ve geocell ile birlikte geogrid güçlendirmeli) gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde eşdeğer çapı 0.21 m olan ve çekme dayanımı 20 kN/m olan geocell ve açıklığı 35 x 35 mm olan çekme dayanımı 20 kN/m olan biaxial geogrid kullanmışlardır. Ayrıca yük ve kapasite artışını tahmin etmek için basit bir analitik model önermişlerdir. Analitik modelde geocell donatının yanal sınırlama etkisini, gerilme dağılım etkisini ve membran etkisini göz önünde bulundurmuşlardır. Ek olarak arazide yumuşak oturmuş kırmızı çamur üzerine donatılı temel yapmış ve üzerine 3 m

dolgu yaparak gözlem yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda geocell ve geogrid kombinasyonu ile taşıma kapasitesinin 4-5 kat arttığını ifade etmişlerdir. Arazide inşa edilen dolguda ise iki kere muson yağmuru geçirmesine rağmen dolguda herhangi bir çatlağın oluşmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca kurulan analitik model sonuçları ile deney sonuçlarının birbirini tuttuğunu ancak analitik modele uygun şekil faktörleri ekleyerek daha ileri deneysel çalışmalar yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Thakur ve ark. (2013) geri dönüşümlü asfalt (recycled asphalt pavement-RAP) malzemeden inşa edilen yol temellerinde oluşabilecek tekerlek izi ve deformasyonları azaltmak amacı ile temelin geocell donatı ile güçlendirilmesi durumunun yaptıkları orta ölçekli laboratuvar deneyleri ile araştırmışlardır. Yaptıkları orta ölçekli statik plaka yükleme deneylerinde temele artan yükler uygulayarak basınç deformasyon davranışı ve uzun süreli sabit bir yük uygulayarak zamana bağlı sünme davranışını incelemişlerdir. Ayrıca geocell ile güçlendirilmiş RAP malzeme temel üzerine doğal agregadan örtü tabakası da yerleştirerek örtü tabakasının davranışa etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında güçlendirilmemiş, tek hücre ile güçlendirilmiş ve çok hücre ile güçlendirilmiş RAP temel üzerinde yükleme deneyleri yapmışlardır. Ayrıca tek bir geocell hücresinin içerisine RAP malzemesi doldurarak ve mold kabını komple RAP doldurarak yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneyleri $605 \times 605 \times 150$ mm ve $800 \times 800 \times 150$ mm boyutlarındaki deney kasalarında yapmış ve yükü 150 mm çapında dairesel bir temelle iletmışlerdir. Deneylerde güçlendirme elemanı olarak yeni polimer alaşımdan (NPA) üretilmiş 100 mm yüksekliğinde et kalınlığı 1.1 mm olan ve çekme dayanımı 19.1 MPa olan geocell kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda temel rijitliğinin tek hücreli geocell ile güçlendirme durumunda 1.2 kat, çok hücreli geocell ile güçlendirme durumunda 1.6 kat arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca uzun süre sabit yüklemeli deneylerde (276 KPa ve 552 KPa) geocell güçlendirmenin sünme hızının ve başlangıç deformasyonunun azaldığını belirtmişlerdir.

Örnek (2009) çalışmasında doğal kil zemin üzerine geogrid donatı ile güçlendirilen ve güçlendirmesiz stabilize dolgu yerleştirmiş ve arazi ortamında 30cm, 45cm, 60cm ve 90cm çaplarında dairesel temeller ile statik yükleme yaparak yüzeysel temellerin taşıma gücü ve oturma davranışlarını araştırmıştır. Deneylerde donatı ile ilgili olarak; ilk donatı derinliği, donatılar arası mesafe ve donatı tabaka sayısı, dolgu ile ilgili olarak; stabilize dolgu tabakası kalınlığı ve temel ile ilgili olarak temelin boyutu gibi parametrelerin taşıma gücü ve oturma karakteristiklerine etkilerini incelemiştir. Arazide yüklemeyi doğal zeminde oluşturulan yükleme kazıkları, yükleme kirişleri ve hidrolik piston yardımı ile kontrollü olarak yapmış, zemin içinde oluşan basınç ve zemin yüzeyindeki deplasmanları elektronik ölçüm cihazları yardımı ile kayıt etmiştir. Deneylerde güçlendirme elemanı olarak tek yönlü (biaxal) geogrid kullanmıştır. Deneylerin haricinde sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir paket program (PLAXIS) ile analiz yaparak deney sonuçlarını kıyaslamıştır.

Çalışma sonucunda, taşıma gücü, oturma, uygulanabilirlik ve ekonomi gibi kriterlere dayanarak, stabilize dolgu kalınlığı $H=0.67D$ ve ilk donatı derinliği $u=0.17D$ önermiştir. Ayrıca çoklu donatı kullanılacaksa 4 adet donatı ve donatılar arası mesafenin $h=0.17D$ olmasını tavsiye etmiştir. Ayrıca yaptığı analizlerde deney sonuçlarına benzer davranışlar elde etmekle birlikte donatılı analizlerin deneylerden biraz daha düşük olduğunu belirtmiştir.

Demir (2011) çalışmasında doğal kil zemin üzerine geogrid donatı ile güçlendirilen ve güçlendirmesiz stabilize dolgu yerleştirmiş ve arazi ortamında 6cm, 9cm ve 12cm çaplarında dairesel temeller ile statik yükleme yaparak yüzeysel temellerin taşıma gücü ve oturma davranışlarını araştırmıştır. Ek olarak laboratuvar da küçük ölçekli deneyler ve iki farklı paket program (PLAXIS ve ABAQUS) ile sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Ayrıca Louisiana State Üniversitesinde bazı büyük ölçekli deneylerde yaparak konuyu irdelemiştir. Arazi deneylerden elde ettiği sonuçları, laboratuvardaki deney sonuçları ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırmıştır. Arazide deneylerinde yüklemeyi

doğal zeminde oluşturulan yükleme kazıkları, yükleme kirişleri ve hidrolik piston yardımı ile kontrollü olarak yapmış, zemin içinde oluşan basınç ve zemin yüzeyindeki deplasmanları elektronik ölçüm cihazları yardımı ile kayıt etmiştir. Laboratuvarındaki küçük ölçekli deneyleri 38 cm çapında ve 42 cm yüksekliğindeki deney tankında yapmış, yüklemeyi 6cm ve 9cm çaplı temeller vasıtasıyla mekanik krikolo ile yaparken verdiği yükü ve oluşan deplasmanları elektronik ölçüm cihazları yardımı ile kayıt etmiştir. Büyük ölçekli deneyleri ise 1.5 m uzunluğundaki 0.91 m genişlik ve yükseklikteki deney kasası içerisinde bir kenarı 0.152 m olan kare temel vasıtası ile diğer deneylere benzer şekilde gerçekleştirmiştir.

Çalışma sonucunda, arazi deneylerinde Örnek (2009) benzer tasarım kriterleri önermiştir. Taşıma gücü, oturma, uygulanabilirlik ve ekonomi gibi faktörler doğrultusunda, stabilize dolgu kalınlığı $H=0.67D$ ve ilk donatı derinliği $u=0.17D$ olarak tavsiye etmiştir. Ayrıca çoklu donatı kullanılacaksa 4 adet donatı ve donatılar arası mesafenin $h=0.17D$ olmasını önermiştir. Laboratuvar deneylerinde ise ilk donatı derinliği (u) için 0.25D, 0.50D ve 1.00D olmak üzere üç deney yapmış ve 0.25D'nin en efektif olduğunu belirtmiştir. Bu deneylerde çift donatılı tasarıma geçilecekse ulaşım yapılarındaki gibi bir tane ara yüzeye bir tane de dolgunun ortasına geogrid yerleştirilmesini önermiştir. Ayrıca sayısal analizlerde PLAXIS paket programında Mohr Coulomb zemin modeli ile, ABAQUS paket programında ise Lineer Drucker-Prager zemin modeli ile zemin davranışını iyi bir şekilde modellenebildiğini ifade etmiştir. Fakat diğer taraftan geogrid donatı, PLAXIS programında düzlem bir eleman olarak modellendiği ve ABAQUS programında ise membran elemanı olarak modellendiği için zemin-donatı etkileşimi net bir şekilde modele yansıtılamadığı belirtilmiştir.

2.5.1.2. Tekrarlı Yükleme Çalışmaları

Tutumluer ve ark. (2006) Illinois üniversitesi laboratuvarında inşa ettikleri geogridle güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş yol dolgusu üzerine 9 adet geniş

ölçekli deney yapmışlardır. Çalışmalarında yol dolgusunu, 254 mm kalınlığında geogridle güçlendirilmiş temel tabakası üzerine, 76 mm kalınlığında asfalt tabakası yerleştirerek oluşturmuşlardır. Bu yol dolgusuna hareketli tekerlek yükü uygulayarak geogrid donatının tekerlek izi oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Ayrıca yaptıkları deneyleri sonlu elemanlar yöntemiyle modelleyerek karşılaştırmışlardır. Sonuçta; güçlendirilmemiş kesitte yol dolgusu altındaki zemine gelen basınçların, güçlendirilmiş kesite göre daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak güçlendirilmemiş kesitin temel tabakasında, güçlendirilmiş kesitin temel tabakasına göre daha büyük yanal deformasyonlar oluştuğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yaptıkları modelleme ve büyük ölçekli deney sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Al-Qadi ve ark. (2006) geogridle güçlendirilmiş esnek yol kaplamalarında güçlendirmenin performansa etkisini incelemek için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kendi arasında üç bölümden oluşan bir kaplama kullanmışlardır. Bu üç bölümde kalınlığı 0.20 m, 0.30 m ve 0.46 m olan granüler dolgu tabakasının üzerine 0.08 ve 0.13 m kalınlığında sıcak karışım asfalt kaplama yapmışlardır. Bu sistemde asfalt kaplamasından 0.15 m, 0.20 m ve 0.30 m aşağı geogrid donatı yerleştirmişlerdir. Daha sonra hazırlanan deney sisteminde asfalt kaplama üzerine tekrarlı yüklemeler yapmışlar ve kesitlerin performanslarını değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, güçlendirilmiş kesitlerde daha az ilave düşey gerilme ve daha az deformasyonlar gözlediklerini belirtmişlerdir.

Subaida ve ark. (2009) çalışmalarında CBR'ı %1.2 olan yumuşak kil zemin üzerine geotekstil ile güçlendirilen ve güçlendirmesiz iki farklı kalınlıkta granüler temel tabakası yerleştirerek (167 mm ve 267 mm) monotonik ve tekrarlı yüklemeli laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Deneylerde geotekstili zemin ile temel ara yüzeyine ve temel tabakası içerisinde farklı derinliklere yerleştirerek, yerinin etkisini de incelemişlerdir. Deneyleri 1500 mm uzunluğunda, 1000 mm genişliğinde ve yüksekliğinde deney kasasında yapmışlardır. Çalışmalarında hindistan cevizi lifinden örgülü ve örgüsüz olmak üzere iki farklı çeşit doğal

geotekstil kullanmışlardır. Yüğü 200 mm çapında dairesel bir temelle aktarmışlardır. Monotonik yüklemeyi elle 10 kN'luk yük kademeleri şeklinde yapmışlardır. Her kademedede oturma 0.025 mm/dak olana kadar bekletilmiş ve sonrasında bir sonraki kademeye geçmişlerdir. Tekrarlı yükleme ise kalınlığı 167 mm olan temelde monotonik deneylerden elde edilen taşıma kapasitesinin yaklaşık %60'ına denk gelen 280 kPa'lık yüğü 100 kere uygulayarak yapmışlardır. Kalınlığı 267 mm olan temellerde ise tekrarlı yüklemeyi 400 kPa'lık yüğü (eşdeğer tekerlek basıncı 600kPa) 1000 kere uygulayarak gerçekleştirmişlerdir. Tüm tekrarlı yüklemeli deneylerde istenilen basınca kadar yükleme yapmış sonra o kademedede 1 saniye beklemiş ve sonra yüğü boşaltmışlardır. Deneylerde plaka üzerinde ve temel tabakası yüzeyinden deformasyon okumaları almışlardır. Çalışma sonucunda ince temelli kaplamasız yollarda temel tabakasına örgülü doğal geotekstil yerleştirilmesinin taşıma kapasitesinin attığını ancak temel tabakası kalınlığı arttığında artışın çok az olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca tekrarlı yüklerde örgülü doğal geotekstilin kalıcı deformasyonu önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Temel tabakası kalınlığı 167 mm olan deneylerde ara yüzeye koyulan örgülü ve örgüsüz geotekstillerin kalıcı deformasyonu sırasıyla %30 ve %14 azalttığını ifade etmişlerdir. Geotekstilin optimum gömülme derinliğini yüzeyden temel çapının üçte biri derinlikte gömüldüğünde elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ek olarak ince temele sahip yollarda trafik yüklerinden dolayı geotekstilin zarar görmesinin önlenmesi için geotekstili temel ile zemin ara yüzeyine yerleştirmeyi önermişlerdir.

Palmeira ve Antunes (2010) CBR'ı %8 olan zemin üzerine geosentetik güçlendirmeli kaplamasız yolların performansın incelemek için monotonik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneyleri yüksekliği 1.2 m, genişlik ve uzunluğu 1.6 m olan deney kasası içerisinde yapmış, yüklemeyi 300 mm çapındaki dairesel bir temelle iletmışlerdir. Tekrarlı yüklemeyi 1 Hz frekansında, 80 kN eşdeğer dingil yüküne denk 566 kPa basınç uygulayacak şekilde üç aşamada gerçekleştirmişlerdir. Her aşama yükleme plakası 25 mm deplasman yapana kadar yükleme boşaltma devam ettirilmiş 25 mm deplasmana ulaşıncaya deney durdurmuş,

oluşan 25 mm'lik boşluk temel malzemesi ile doldurmuş ve diğer aşamaya geçmişlerdir. Monotonik yüklemeli deneyler ise tekrarlı yüklemeli deneylerle kıyaslama yapmak açısından gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde biaxial (iki yönlü) geogrid ve geotekstil olmak üzere iki farklı geosentetik kullanmışlardır. Bu geosentetikleri zemin ile temel arasına yerleştirerek üç adet tekrarlı iki adet monotonik deney yapmış, bu deneylerde dolgu yüzeyindeki deplasmanları ve zemindeki basınçları ölçmüşlerdir. Çalışmalarında performans değerlendirmesini TBR (Traffic Benefit Ratio- Trafik Fayda Oranı) ile yapmışlardır. TBR'ı 25 mm deplasmana ulaşıncaya kadar güçlendirmeli kesitlerdeki tekrarlı yük sayısının, aynı deplasmana ulaşmak için güçlendirmesiz kesitlerdeki tekrarlı yük sayısına bölünmesi ile oluşturulduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca literatürdeki çalışmalarda TBR değerinin 2 ile 16 arasında değiştiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda; güçlendirilmiş deneylerde, güçlendirme elemanı ve yükleme aşamasına bağlı olarak TBR değerleri 2.3 ile 9.2 arasında değişiklik gösterdiğini ve her yükleme aşamasında geogrid güçlendirmeli kesitin TBR değerinin en büyük çıktığını belirtmişlerdir. Deneylerde geogrid güçlendirmenin geotekstil güçlendirmeye göre önemli derecede iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Geogrid ile güçlendirmeli deneyde ilk yükleme aşamasında agrega danelerinde bazılarının parçalanması sonucunda sonraki yükleme aşamalarında TBR değerinin düştüğünü buna rağmen son yükleme aşamasında 7.4'lük bir TBR değeri elde ettiklerini belirtmişlerdir. Monoton yüklemeli deneylerde ise güçlendirmenin etkisinin göz ardı edilebilecek boyutta olduğunu ve bu deneylerde agrega danesi kırılmasının çok görülmediğini ifade etmişlerdir.

Pokharel (2010) çalışmasında orta ölçekli ve büyük ölçekli laboratuvar plaka yükleme deneyleri ve tam ölçekli tekerlek yükleme deneyleri ile geocell donatıyla güçlendirilmiş yol temellerinin davranışını incelemiştir. Orta ölçekli plaka yükleme deneylerini dört farklı geocell ile güçlendirilmiş temellerde statik ve tekrarlı yükleme şeklinde yapmıştır. Statik yüklemeli deneylerde yükü monoton artan bir şekilde, tekrarlı yüklemeli deneylerde ise yükü dakikada bir kere (1

dakika/döngü) ve uygulanan zeminin göçme mukavemetine göre (552 kPa veya 345 kPa) 150 döngü şeklinde uygulamıştır. Orta ölçekli plaka yükleme deneylerinde statik yüklemede geocellin hapsetme etkisini araştırmış ve geocellin şekil etkisi (daireseel veya eliptik), rijitliği, yüksekliği, gömülme derinliği ve dolgu malzemesinin tipi gibi parametrelerin davranışa etkisini incelemiştir. Tekrarlı yüklemede ise tekrarlı yük sayısına göre kalıcı deformasyon miktarı ve esnek deformasyon yüzdesini araştırmıştır. Esnek deformasyon yüzdesini esnek deformasyonun toplam deformasyona oranı olarak belirlemiştir. Ayrıca zayıf zemin (CBR yaklaşık %2) üzerine seçilen bir çeşit geocell ile güçlendirilmiş temel tabakasının davranışını büyük ölçekli tekrarlı plaka yükleme deneyleri ve tam ölçekli hareketli tekerlek yükleme deneyleri ile araştırmıştır. Bu çalışmalarda parçalanmış kireç taşı agrega, kansas nehri kumu, taş ocağı atığı ve geri dönüşümlü asfalt kaplama olmak üzere dört farklı çeşit temel malzemesi kullanmıştır. Büyük ölçekli deneylerde tekrarlı yüklemeyi 0.77 Hz ve 552 kPa olarak yapmıştır.

Orta ölçekli yapılan deneylerin sonucunda daireseel bir şekilde yerleştirilen geocellin eliptik şekilde yerleştirilene göre daha yüksek taşıma kapasitesi olduğunu belirtmiştir. NPA geocell güçlendirmenin statik yükler altında taşıma gücünü yaklaşık 2.5 katı arttırdığını, tekrarlı yükler altında ise kalıcı deformasyonları önemli ölçüde düşürdüğünü ifade etmiştir. Büyük ölçekli plaka yüklemeli ve tam ölçekli tekerlek yüklemeli deney sonuçlarından ise NPA geocell güçlendirmenin zayıf zemin üzerine inşa edilen kaplamasız yolun servis ömrünü ve mukavemetin arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca temel tabakasına yerleştirilen geocell donatının zarar görmemesi için üzerinde yaklaşık 5 cm örtü tabakası olması gerektiğini ifade etmiştir.

Mekkawya ve ark. (2010) çalışmalarında CBR'ı düşük (%10'dan az) zemin üzerine geogrid ile güçlendirilmiş banketlerde güçlendirmenin tekrarlı yükler sonucunda oluşan teker izi deformasyonuna etkisini arazi ve laboratuvar deneyleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı biaxial geogrid ve iki farklı geotekstil kullanmış ve bu geosentetikleri zayıf zemin ile temel ara yüzeyine

yerleştirmişlerdir. Arazideki deneylerde banketi inşa ettikten sonra bir sene trafik yükleri altında yolu incelemiş ve banketin performansını belirlemek için inşaattan hemen sonra, üç ay sonra ve on ay sonra 300 mm çapında yükleme plakası ile plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda elde edilen verilerle yük deplasman eğrisi çizip, eğrinin 0 mm ve 10 mm deplasmanları arasından geçen sekant modülünü kullanarak elastisite modülü hesaplamışlardır. Sekant modülü kullanarak ilk yüklemede (K) ve yükü boşaltıp sonra tekrar yüklemede (KR) olmak üzere iki farklı elastisite modülü hesap edip bu değerler üzerinden değerlendirme yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda inşaattan hemen sonra ilk yüklemeden elde edilen (K) elastisite modülünün, güçlendirmeli kesitte güçlendirmesiz kesite göre yaklaşık %60 daha fazla çıktığını belirtmişlerdir. Üç ay sonra ise tüm geogrid ile güçlendirmeli kesitlerde elastisite modülünün yaklaşık %70 arttığını bunun da artan tekerlek izi deformasyonları sonrasında geogrid donatının yanal hapsetme mekanizmasının artmasından kaynaklanmış olabileceğini belirtmişlerdir. Bu etkinin deforme olmuş zeminin geogrid donatıya uyguladığı gerilme kuvveti sonucu kesitin stabilitesini arttırmış olabileceğini de ifade etmişlerdir. Bir ay sonra kontrol kesitindeki elastisite modülündeki artışın, artan tekerlek izi sonrasında temelin tekrar sıkışıp, yerleşmesinden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Laboratuvarında 0.6 m x 0.6 m x 0.6 m boyutlarında kasa içerisinde 150 mm çaplı plaka ile tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Toplamda 15000 tekrarlı yüklemeyi 1 Hz frekansında ve 275 kPa, 550 kPa ve 827 kPa olmak üzere üç farklı yük kademesinde (her kademede 5000 kere yükleme yapılarak) gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda banketler için bir tasarım abağı önermişlerdir. Ayrıca çalışmalarında geogrid donatının yüzey deformasyonunu %75'e kadar azalttığını ifade etmişlerdir.

Abu-Farsakh ve Chen (2011) çalışmalarında yumuşak zemin üzerine (yaklaşık CBR değeri %0.5) geogrid donatı ile güçlendirilmiş temel tabakası ve üzerine de esnek kaplama yerleştirip, tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneyleri 2 m eninde 2 m boyunda ve 1.7 m yüksekliğindeki kasada,

yükü 305 mm çapında plaka ile ileterek gerçekleştirmişlerdir. Yüklemede 80 kN'luk çift tekerli eşdeğer dingil yükünü modellemek için yükleme plakasına 40 kN yük yani 550 kPa basıncı 0.77 Hz frekansında uygulamışlardır. Bir yüklemeyi 1.3 saniyede tamamlamışlardır. Deneylerde iki farklı rijitliğe sahip biaxial ve iki farklı rijitliğe sahip triaxial olmak üzere dört farklı geogrid donatı kullanmışlardır. Geogrid donatıyı iki farklı kalınlıktaki inşa ettikleri temel tabakasının içine, temel ile zemin ara yüzeyine, temel tabakası ortası ve temel tabakası kalınlığının üçte biri derinliğe yerleştirmişlerdir. Deneylerde sırasında esnek kaplama yüzeyine yerleştirilen deplasman ölçerler ve zayıf zemine yerleştirilen basınç ölçerler ile veri elde etmişlerdir. Deneylerin sonuçlarını kıyaslamak için TBR (güçlendirmeli kesitlerde 19.1 mm deplasman için gerekli yükleme sayısının, aynı deplasman için güçlendirmesiz durumda gerekli yükleme sayısına oranı) hesap etmişlerdir.

Çalışmalarının sonucunda, zayıf zemin koşullarında yol temeli geogrid donatılarla güçlendirilirse, yolun teker izi deplasmanlarının azalabileceğini ve bunun yolun servis ömrünü uzatabileceğini belirtmişlerdir. Geogrid güçlendirmesiyle TBR değerinde 15.3'e kadar bir artış görülebildiğini ifade etmişlerdir. Güçlendirmenin, yükün daha geniş bir alana yayması sonucu zayıf zemine gelen gerilmelerin azalmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir. Bundan dolayı da zayıf zeminde biriken kalıcı deformasyonların azaldığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda geogrid donatının temel tabakası kalınlığının üçte biri derinliğe yerleştirilmesi durumunda en iyi performansı elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Acharya (2011) yumuşak zemin (CBR %5) veya sert zemin üzerine, geocell donatı ile güçlendirilmiş geri dönüşümlü asfalt (Recycled Asphalt Pavement-RAP) malzemedan temel tabakası oluşturarak laboratuvar deneyleri yapmıştır. Çalışmasında geocell güçlendirmeli ve güçlendirmesiz farklı temel kalınlıklarına sahip sekiz adet tekrarlı plaka yükleme deneyi gerçekleştirmiştir. Deneylerde 0.77 Hz frekansında ve 40 kN yükleme 0.5 kN boşaltma olmak üzere tekrarlı yük uygulamıştır. Deneyleri 25 mm deplasmanı kadar devam ettirmiştir.

Güçlendirmeli yaptıkları deneylerde temel ve zemin ara yüzeyine ayırma amaçlı geotekstil koymuştur. Deneylerde zayıf zemine basınç ölçerler yerleştirilerek gerilme dağılım açısını ve yüzey deplasman ölçerler vasıtası ile esnek ve toplam deformasyonları belirlemiştir. Ek olarak her yükleme için esnek deformasyon miktarını toplam deformasyona bölerek esnek deformasyon yüzdesini hesap etmiştir. Sonuçta, RAP temele sahip kesitler için güçlendirmesiz duruma göre geocell güçlendirmeli durumda gerilme dağılım açısı ve esnek deformasyon yüzdesinin arttığını ifade etmiştir.

Yang ve ark. (2012) arazi deneyleri ile zayıf zemin (CBR %5) üzerine yeni polimer alaşım (NPA) geocell donatı ile güçlendirilmiş kaplamasız yolların teker yükü altındaki performansını incelemişlerdir. Çalışmada güçlendirmeli ve güçlendirmesiz deney kesitleri inşa etmişlerdir. Güçlendirmeli kesitleri oluşturmak için, zayıf zemin üzerine geotekstil sermiş (ayırma amaçlı), sonra geocell güçlendirmeli kum temel inşa etmiş ve en son üzerine agrega örtü tabakası yerleştirmişlerdir. Özellikle kaplamasız yollarda örtü tabakasının çok önemli olduğunu, tekerleğin geocell ile doğrudan temas etmesi halinde geocelle önemli zararlar verebileceğini belirtmişlerdir. Güçlendirmeli deneylerle kıyaslamak için agrega temel tabakalı kesitler inşa etmişlerdir. Deney kesitlerinden, 11.3 km/s hızında ve 10 geçiş/dak frekansında 80 kN yüke sahip (552 kPa basınç oluşturan) hareketli tekerleği 5000 kere geçirmişlerdir. 100, 200, 300, 400, 1000, 2000, 3000, 4000 ve 5000 geçişte oluşan deplasmanları okumuşlardır. Ayrıca geocell donatıların üzerine yerleştirdikleri strain gaugeler ile yatay gerilmeleri ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, kum temele sahip kaplamasız yollarda geocell ile güçlendirmenin kalıcı deformasyonları önemli ölçüde düşürdüğü ifade etmişlerdir.

Mehrijardi ve ark. (2012) çalışmalarında ulaşım yapılarının gömülü borularla kesiştiği noktalarda tekrarlı yüklerin borulara ve geri dolguya etkilerini yaptıkları büyük ölçekli deneylerle incelemişlerdir. Çalışmalarında boru üzerine yapılan dolgu zemin belli oranlarda parçalanmış ve dilimlenmiş lastik ile

kariştirilerek karişım bir zemin oluşturulmuş ve bu zemin farklı iki seviyede yerleştirilerek lastik parçalarının etkisi araştırılmıştır. Ayrıca lastik parçaları ile kariştirilerek oluşturulan geri dolgu, geotekstilin kesilip yapıştırılması ile oluşturulan geocell ile güçlendirilmiş ve bu şekilde yapılan deneylerle geocell güçlendirmenin etkisi de araştırılmıştır. Deneylerde, 200 kPa, 400 kPa, 600 kPa ve 800 kPa olmak üzere dört kademeden oluşan, her kademede yaklaşık 10 kere yükleme boşaltma ve tekrar yükleme döngüsü şekilde yükleme yapmışlardır. Bu şekilde hafiften ağıra trafik yükü modellemeye çalışmışlardır. Çalışmalarında bu yükleme şeklinin trafik yüklerini tam olarak yansıtmadığı ancak özellikle geocell ile güçlendirilmiş temeller için sabit bir yükün tekrarlı şekilde uygulandığı durumda temelin teker izi deformasyonuna daha dirençli olduğunu, bu sebeple bu şekilde yüklemenin daha çok tekerlek izi oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Dolayısı ile bu yükleme ile elde edilebilecek herhangi bir pozitif sonucun güvenli tarafta kalacağını ve trafik yüklerinde de etkili olacağını belirtmişlerdir (Thom, 2008). Yükün verileceği yükleme plakasının çapı için plakanın altında kullanılan dolgu zeminin D_{50} çapının 15 katından daha büyük olması gerektiğini belirtmişler ve 150 mm çapında yükleme plakasının uygun olduğuna karar vermişlerdir (Hsieh ve Mao, 2005). Deneylerde yüzeyin deplasmanı gömülü borunun çap deformasyonu ve zeminde oluşan gerilmeler ölçmüşlerdir. Çalışmaları sonucunda yüzey deplasmanı ve borunun çap deformasyonu açısından en iyi sonucu geocell güçlendirmeli, gömülü borunun üzerinde %5 oranında dilimlenmiş lastik ile kariştirilmiş zemin durumunda elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Hegde ve Sitharam (2016) çalışmalarında geocell ile güçlendirilmiş yumuşak kil zeminlere ($c_u=5$ kPa) oturan makine temelleri için elastik katsayıları hesap etmişlerdir. Yumuşak kil zeminler üzerine geocell ve geocell ile birlikte geogrid güçlendirmeli durum için artan tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneyleri 900 mm genişliğinde 900 mm uzunluğunda ve 600 mm yüksekliğindeki deney kasasında gerçekteştirmişlerdir. Yüğü bir kenarı 150 mm olan kare kesitli plaka ile zemine iletmişlerdir. Yumuşak zemin üzerine ayırma

amaçlı geotekstil yerleştirmiş üzerine yüksekliği 150 mm olan geocell ve geocell ile birlikte geogridin koyulduğu iki güçlendirmeli deney yapmışlardır. Deneyler sonucunda zeminin elastik üniform sıkışma katsayısını hesaplamış (C_u) ve buradan zeminlerin diğer elastik sabitlerini hesap etmişlerdir. Ayrıca deney sonuçlarından zeminin deformasyon modülü (E_v), taşıma kapasitesi, yatak katsayısı (K_s) ve hazırlanan bir senaryoya göre zeminin doğal frekansını da (ω_n) hesaplamışlardır. Çalışmaları sonucunda geocell ve geogrid güçlendirmeli sistemin üniform sıkışma katsayısı (C_u) en yüksek çıkmıştır. Bu güçlendirme kombinasyonunda güçlendirmesiz kesite göre deformasyon modülü üç kat, taşıma kapasitesinin on kat arttığını ve deplasmanların ise %90 azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca yaptıkları simülasyonda zeminin doğal frekansının yaklaşık dört kat arttığını ifade etmişlerdir.

Demir ve ark. (2016) yumuşak zeminler üzerine inşa edilen yol dolgularında, geogrid güçlendirmenin etkilerini incelemek için büyük ölçekli tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Ayrıca esneklik modülü ve büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri de yaparak araştırmayı genişletmişlerdir. Büyük ölçekli deneyleri bir kenarı 2.00 m olan küp şeklindeki bir kasada, bu deneylerdeki yüklemeyi de 0.3 m çapında dairesel bir plaka ile yapmışlardır. Çalışmalarında iki yönlü ve üç yönlü olmak üzere iki çeşit geogrid ve ara yüzeye ayırma amaçlı yerleştirilen bir çeşit geotekstil kullanmışlardır. Tekrarlı plaka yüklemede bir yüklemeyi 0.4 saniyede 0.5kN'dan 40kN'ye kadar yükleyerek, sonra 0.4 saniyede 40kN' den 0.5kN' a kadar boşaltarak, daha sonra 0.5 saniye bekleyerek toplamda 1.3 saniyede tamamlamışlardır. Bu şekilde yaklaşık 100000 tekrarlı yüklemeli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde yüzey deformasyonlarını ve zemin içerisinde oluşan gerilmeleri elektronik ölçüm cihazları ile ölçüp kayıt etmişlerdir. Çalışma sonucunda geogrid güçlendirmenin tüm yerleştirme düzenleri için kalıcı deformasyonları düşürdüğünü ve zayıf zemine gelen gerilmeleri azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca en efektif sonucun üç yönlü geogridin temel çapının üçte biri derinliğe yerleştirilmesi ile elde edildiğini ifade etmişlerdir.

2.5.1.3. Statik ve Tekrarlı Yüklemlerin Bir Arada Yapıldığı Çalışmalar

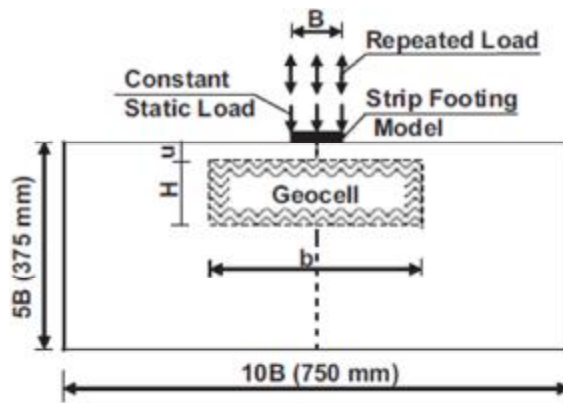
Chang ve ark. (2007) çalışmalarında geocell ile güçlendirilmiş kötü derecelendirilmiş kumlar üzerinde statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneylerde iki farklı yükseklikte geocell (7.5 cm ve 15 cm) ve üç farklı çapta yükleme plakası (10 cm, 20 cm ve 30 cm) kullanmışlardır. Deneyler sonucunda geocell güçlendirmenin, taşıma kapasitesini 1.4'e kadar arttırdığını ifade etmişlerdir. Ayrıca genel olarak dinamik yüklemeli deneylerde geocell kalınlığı arttıkça zeminin dinamik modülünün arttığını belirtmişlerdir.

Tafreshi ve ark. (2008) çalışmalarında makine temelleri dizaynı için önemli bir parametre olan elastik üniform sıkışma katsayısının (C_u) kumun sıkılığına bağlı değişimini yaptıkları laboratuvar deneyleri ile araştırmışlardır. Ayrıca Flac 3D paket programı ile yaptıkları nümerik analizlerle deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında % 45, 63 ve 78 rölatif sıkılığa sahip kum zeminler üzerinde, 200 mm x 200 mm x 200 mm kutu (küçük) içerisinde statik yüklemeli, 650 mm x 650 mm x 600 mm kutu (büyük) içinde statik ve artan tekrarlı yüklemeli deneyler yapmışlardır. Tekrarlı yüklemeyi, statik yüklemeli deneylerde ulaşılan yüke beş kademede ulaşacak şekilde yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda kumun sıkılığının artması ile elastik üniform katsayısının (C_u) arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca deney sonuçlarının Flac 3D paket programı ile yaptıkları nümerik analizler ile uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Sawwaf ve Nazir (2010) çalışmalarında; geogrid donatıyla güçlendirilmiş tekrarlı yüke maruz (petrol tankı gibi yapıların temeli ile) kum zeminlerde, tekrarlı yüklerin zemine etkilerini incelemek için monotonik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneyleri 2 mm genişliğinde 0.6 m uzunluğunda ve derinliğinde kasada, 80 mm genişliğinde 120 mm uzunluğunda dikdörtgen temel vasıtası ile yükleme yapmışlardır. Çalışmalarında ilk donatı deriliğinin temele oranı 0.3 (u/B), donatılar arası mesafenin temele oranı 0.6 (x/B) olarak sabit almış, kumun sıkılığı, donatı sayısı, donatı genişliği (b/B), başlangıç monotonik yük değeri (q_0/q_u) ve yükleme sayısı gibi parametreleri incelemişlerdir. Çalışmada

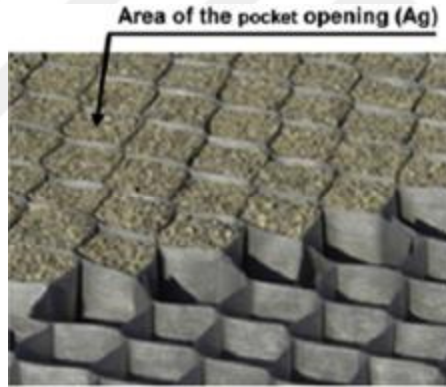
zemine önce monotonik yüklemeli deneyler yapılarak taşıma gücünü belirlemiş (q_u), sonra belli oranlarında ($q_o/q_u = \%20, \%40, \%70, \%85$) tekrarlı yüklemeli deneyler yapmışlardır. Tekrarlı yüklemeli deneylerde istenilen yüke kadar monotonik yükleme yapmış sonra yük sıfıra kadar boşaltmış ve tekrar aynı yüke yüklemiş bu sırada da oluşan deplasmanları kayıt etmişlerdir. Bu şekilde 10 ve 100 tekrarlı yüklemeli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kum zeminlerde üç sıra geogrid güçlendirme kullanmanın ve güçlendirme uzunluğunun temele oranının 5 katı olmasını önermişlerdir. Ayrıca tekrarlı yüklemeli deneylerde başlangıç monotonik yüklemenin artması ile kalıcı deformasyonların arttığını ifade etmişlerdir. Ek olarak tekrarlı yüklemeli deneylerde oturmanın büyük kısmının ilk beş döngü içerisinde gerçekleştiğini, sonra oturma hızının azaldığını, 70 döngüden sonra da neredeyse sabit duruma geldiğini belirtmişlerdir.

Tafreshi ve Dawson (2012) laboratuvarında yaptıkları model deneylerde geocell ile güçlendirilmiş kum zemine şerit temel vasıtası ile statik ve tekrarlı yük kombinasyonları uygulamışlardır. Çalışmalarında, uygulanan tekrarlı yüklerin genliği, geocell donatının yüksekliği, genişliği ve gömülme derinliği gibi parametreleri incelemişlerdir. Model deneyleri 750 mm uzunluk, 150 mm genişlik ve 375 mm yüksekliği olan deney kasası içerisinde, 148 mm uzunluk, 75 mm genişliğe sahip şerit temel vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30. Deney Seması (Tafreshi ve Dawson, 2012)

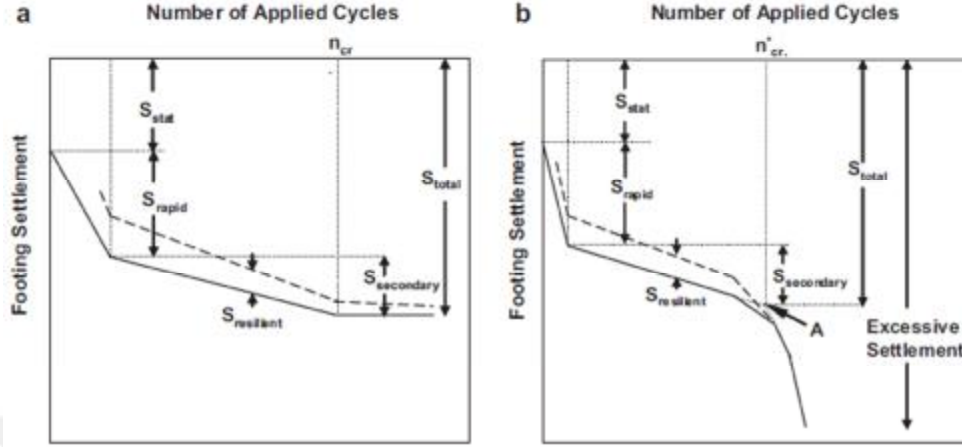
Güçlendirme olarak kullanılan geocelli, geotekstillerin uygun boyutlarda kesilmesi ve parçaların birbirine yapıştırılması ile elde edilmiştir. Geocell donatının açıklığının alanına (A_g) eşdeğer dairenin çapını (d), temel boyutuna oranı 0.67 ($d/B=0.67$) olacak şekilde ayarlamışlardır (Şekil 3.31). Bu oranın 0.7-0.8 arasında olduğunda güçlendirmenin en iyi performansa sahip olduğu belirtilmiştir (Dash ve ark., 2003). Yükleme şeklini belirlemek için, önce monotonik yükleme (1.0 kPa/s) ile güçlendirmesiz kum zeminin nihai taşıma kapasitesini bulmuş, sonra nihai taşıma kapasitesini uygulamada kullanılan asgari güvenlik katsayısına (2) bölerek q_{stat} değerini elde etmişlerdir. Daha sonra deprem, makine temeli titreşimi gibi yükleri göz önüne alarak tekrarlı yükleri $q_{dyn}/q_{stat} = 0.2$ ve 0.3 olarak belirlemişlerdir. Ek olarak aşırı durumları göz önünde bulundurarak $q_{dyn}/q_{stat} = 0.5$ tekrarlı yükü içinde çalışma yapmışlardır.



Şekil 2.31. Geocellin Cep Açıklığı (Tafreshi ve Dawson, 2012)

Deneylerde önce monotonik statik yük (q_{stat}) uygulanmış, sonra deplasmanın bitmesi beklenmiş, sonrasında statik yükün üzerine 1 Hz frekansında q_{dyn}/q_{stat} göre belirlenen tekrarlı yük (kalıcı deformasyonların bittiği noktaya kadar) uygulanmıştır. Deneyler sonucunda iki farklı davranış görmüşlerdir. Birinci tip davranışta, başlangıç statik yüklemesi sonrasında bir deplasman oluşmuş (S_{stat}), sonra tekrarlı yükleme esnasında hızlı bir kalıcı deplasman oluşmuş (S_{rapid}), daha

sonra tekrarlanan yüklerde deplasmanın hızı azalmış ($S_{secondary}$) ve en son uygulanan tekrarlı yüklerde nerdeyse hiç kalıcı deplasman oluşmamıştır (shakedown). Bu tip davranışın en son aşamada kalıcı deplasmanların neredeyse sabitlenmesi, yüklemeler ile zemin danelerinin hareketlenmesi sonucu dolgunun yerel olarak rijitliğinin artmasıyla oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu kalıcı deplasmanların sabitlendiği deplasman değerini maksimum oturma veya shakedown oturması, bu deplasmana ulaşmak için gerekli tekrarlı yük sayısının n_{cr} diye tanımlandığını belirtmişlerdir. Bu davranışı genelde yoğunluğu fazla geosenetik yüklemeli deneylerde ($H/B=1.33$, $b/B=3.2$) ve genliği küçük güçlendirmesiz deneylerde ($q_{dyn}/q_{stat} = 0.2$) görmüşlerdir. İkinci tip davranışta ise, başlangıç statik yüklemesi sonrasında bir deplasman oluşmuş (S_{stat}), sonra tekrarlı yükleme esnasında hızlı bir kalıcı deplasman oluşmuş (S_{rapid}), daha sonra birinci durumun aksine tekrarlanan yüklerde deplasman hızı artmış ($S_{secondary}$) ve en son artan tekrarlı yüklerde aşırı deplasmanlar oluşmuştur. En son aşamada artan tekrarlı yüklerde sistem dengesiz bir şekilde aşırı deformasyon göstermesi sebebiyle bu deneylerde shakedown tepkisi oluşmadığını ve dolayısı ile bir n_{cr} tekrarlı yük sayısının olmadığını ifade etmişlerdir. Ancak aşırı deplasmanlar oluşmadan önce $S_{secondary}$ bittiği noktadaki tekrarlı yük sayısını n_{cr}^* olarak isimlendirmişlerdir. Bu deneylerde aşırı deplasmanlar oluştuğu sırada dolgu yüzeyinde önemli kabarmalar olduğunu belirtmiş, bu davranışı da temel altındaki bölgede yerel olarak aşırı tekrarlı yükler altında gelişen kopma bölgesi olarak tanımlamışlardır (Şekil 3.32).



Şekil 2.32. Tekrarlı Yükleme Karşılık Oturma Davranışı (Tafreshi ve Dawson, 2012)

Çalışmalarında dinamik yükleme ile statik yükleme arasında çok önemli üç davranış farkı olduğunu belirtmiş bu davranış farklarını da aşağıdaki gibi özetlemişlerdir.

- Doğrusal olamayan davranış; birçok araştırmacı granüler zeminlerin rijitliğinin uygulanan gerilme seviyesi ile doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmiştir (Brown ve Pappin, 1981; Plaistow ve Dawson, 1995; Lekarp ve ark., 2000). Ancak kumlu zeminlerde tekrarlı yüklemede statik yükleme ile benzer yükleme artışında ($\Delta q_{stat} = \Delta q_{dyn}$) aynı tepkiyi vermeyebileceklerini belirtmişlerdir.
- Yükleme zamanına bağımlılık; statik yüklemelerde yükleme hızı genellikle 1-1.5 kPa/s olurken tekrarlı yüklemelerde bu oran 48,72 veya 120 kPa/s (haversine gerilme dalgasının ortalama yarısı olarak) olabilmektedir. Kuru kumdan viskoz bir davranış beklenmese de bazı viskozite etkileri ve atalet etkileri ile hızlı yükleme yapıldığında zeminin aynı miktarda yavaş yükleme göre daha rijit davranmasını beklediklerini ifade etmişlerdir.

Ayrıca polimer bazlı geosentetikler ile güçlendirilen zeminlerde, polimerin viskozite etkileri ile bu etkinin daha belirgin olabileceğini belirtmişlerdir.

· Toplam deformasyon; birçok tekrarlı yüke bağlı olarak artan plastik deformasyonların, basit monoton statik yüklemeye göre daha büyük deformasyonlara sebep olacağını belirtmişlerdir.

Çalışmaların sonucunda geocell donatının gömülme derinliğinin temel boyutuna oranı yaklaşık 0.1 olduğunda en iyi performansın elde edildiğini ($u/B=0.1$) ifade etmişlerdir. Güçlendirme genişliğinin temel genişliğinin 3.2 katına kadar ($b/B=3.2$) oturmayı azalttığını, daha yüksek oranlarda çok değiştirmedığını belirtmişlerdir. Düşük tekrarlı yük genliklerine göre yüksek genliklerde geocell yüksekliğinin artmasının oturmaları daha çok düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca güçlendirilmemiş ve hafif geocell güçlendirmeli durumlar haricinde 10000-20000 tekrarlı yükler arasında plastik deformasyonların hemen hemen bittiğini (plastic shakedown) görmüşlerdir. Çalışmalarında her deney için elde edilen toplam deformasyonun büyük bir kısmının ilk on yükleme sırasında oluştuğunu belirtmişlerdir. Toplam oturma miktarı ve plastik shakedown için gerekli yükleme sayısı başlangıç statik yüklemeye, tekrarlı yüklemenin büyüklüğüne ve güçlendirme miktarına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Ek olarak kum zeminlerin geocell ile güçlendirilmesi durumunda, yatay hapsedme ile hücrelerin içindeki kumun direncinin artması sonucu plastik deformasyonlara karşı direncin arttığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında güçlendirmeli durumda, hızlı tekrarlı yükleme ile plastik deformasyonların daha çok azaldığının ifade etmişlerdir. Bunun sebebinin de hızlı yüklemede yüksek esnek dayanıma sahip polimer bazlı geocell donatının gerilmeyi daha çok üzerine çekmesi sonucunda zemine daha az etki gelmesine sebep olmasından kaynaklandığını öne sürerek açıklamışlardır.

2.5.2. İnşaat ve Yıkıntı Atıkları İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Literatürdeki inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülerek kullanılması ile ilgili mevcut çalışmalar atık üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deneyleri, arazi çalışmaları ve geosentetik donatılı çalışmalar olarak gruplandırılmıştır

2.5.2.1. Geleneksel Laboratuvar Deneylerinin Yapıldığı Çalışmalar

O'Mahony ve Milligan (1991) parçalanmış beton ve yıkıntı atıklarını geri dönüştürerek alt temel dolgusunda kullanılabilirliğini laboratuvarda yaptıkları CBR deneyleri ile araştırmışlardır. Çalışmalarında atık malzemenin performansını doğal kireç taşı agrega üzerinde yaptıkları CBR deneyi sonuçları ile kıyaslayarak ortaya koymuşlardır. Çalışmaları sonucunda geri dönüştürülen parçalanmış beton ve yıkıntı atıklarının CBR değerinin doğal kireç taşı agregaya çok yakın olduğunu ancak atıkların biraz daha düşük sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Bennert ve ark. (2000) bazı atıkların ve bu atıkların doğal malzemeler ile karışımlarının yol dolgularında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu kapsamda geri dönüşümlü beton agrega (RCA) ve geri dönüşümlü asfalt kaplama (RAP), doğal malzeme ve iki atık malzemenin ayrı ayrı, belli oranlarda doğal malzeme ile karıştırıldığı karışım malzemeler üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, kompaksiyon ve üç eksenli deney) ve esneklik modülü deneyi yapmışlardır. Ayrıca bu malzemeler üzerinde esneklik modülü deney aletinde 103.42 kPa çevresel basınçta 310.26 kPa deviatorik gerilmede 100000 tekrarlı yüklemeli kalıcı deformasyon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda %75 doğal malzeme ile %25 RCA karışımının veya %75 doğal malzeme ile %25 RAP karışımının kalıcı deformasyon özelliklerinin doğal malzemeyi yakaladığını ve bu atıkların kaplama dolgularında kullanılmasının ekonomik açıdan çok olumlu olacağını belirtmişlerdir.

Nataatmadja ve Tan (2001) geri dönüşümlü beton agregaların (RCA) esnek davranışın etkileyen parametreleri araştırmak için basınç mukavemeti 15

kPa ile 75 kPa arası değişen dört farklı geri dönüşümlü beton agregası üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, Los Angeles, yassılık indeksi deneyi, agregası kırma deneyi) ve esneklik modülü deneyi yapmışlardır. Deneyler sonucunda geri dönüştürülen betonun mukavemeti, yassılık indeksi ve içerdiği yumuşak malzeme miktarının malzemenin esnek davranışını etkilediğini belirtmişlerdir. Ek olarak geri dönüşümlü beton agregası standartlara uygun bir şekilde üretilebiliyorsa, yol temel/alt temel dolgularında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Molenaar ve van Niekerk (2002) inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin bileşimleri, dane boyutu ve kompaksiyon derecelerinin malzemenin mekanik davranışına etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda en çok kompaksiyon derecesi olmak üzere bu üç parametrenin de mekanik davranışını etkilediğini, ancak kompaksiyon derecesi inşaat sırasında kolaylıkla kontrol edilebileceğinden danelerin boyutu ve bileşiminin mekanik davranışa etkisinin daha ön plana çıkacağını öngörmüşlerdir. Ayrıca çalışma sonucunda inşaat ve yıkıntı atıkları ile yol temel/alt temel dolgularının inşa edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Sivakumar ve ark. (2004) geri dönüşümlü parçalanmış beton, geri dönüşümlü parçalanmış tuğla ve parçalanmış doğal bazalt (karşılaştırma amaçlı) üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deney aletinde tekrarlı yüklemeli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 305 mm x 305 mm boyutlarında kesme kutusu kullanmışlardır. Numuneleri 60 kPa, 120 kPa, 240 kPa ve 300 kPa ön yükleme altında 1.5 mm/dk. hızında kesmeye maruz bırakmışlardır. Maksimum kesme gerilmesine ulaşıldığında deneyi durdurmuş, oluşan kesme deplasmanı geri almış ve tekrar kesmeye maruz bırakarak tekrarlı yüklemeleri gerçekleştirmişlerdir. Bu şekilde her deney için 8 tekrarlı yükleme yapmışlar 1., 2., 4. ve 8. tekrarlardan sonraki deney sonuçlarını vermişlerdir. Çalışma sonucunda doğal agreganın içsel sürtünme açısı ilk yüklemede 47° 'den sekizinci yüklemede 45° 'ye düştüğü, geri dönüşümlü beton parçalarının ve geri dönüşümlü tuğla parçalarının ise yaklaşık olarak 43° 'den 38° 'ye düştüğünü ifade etmişlerdir.

Sürtünme direncindeki azalmanın geri dönüşümlü malzemelerde daha çok olmak üzere agregaların ezilmesinden kaynaklanabileceğini öne sürmüşlerdir. Ek olarak geri dönüşümlü beton parçaları ve geri dönüşümlü tuğla parçalarının önemli bir kayma mukavemetine sahip olduğu ve çeşitli geoteknik uygulamalarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

Poon ve Chan (2006) yolların alt temel dolgularında doğal agrega yerine geri dönüşümlü beton agrega (RCA) ve geri dönüşümlü tuğla (clay brick-CB) kullanılmasının uygunluğu üzerine geleneksel laboratuvar deneyleri (kompaksiyon, CBR) yapmışlardır. Çalışmada %100 geri dönüşümlü beton agreganın yanında, geri dönüşümlü beton agregaya ile ağırlıkça %25 ve %50 oranlarında geri dönüşümlü tuğla eklenmesi ile karışım malzemeler oluşturmuşlardır. Bu malzemelerin performansını da doğal malzeme üzerinde yaptıkları deneylerden elde ettikleri sonuçlarla kıyaslamışlardır. Çalışmaları sonucunda %100 geri dönüşümlü beton agreganın doğal agregaya kıyasla daha yüksek optimum su içeriği ve daha düşük kuru birim hacim ağırlığa sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bahsi geçen iki atık malzemeden oluşturulan karışımda, geri dönüşümlü beton agrega oranı azalıp, geri dönüşümlü tuğla oranı arttıkça optimum su içeriğinin daha da arttığını maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin daha da düştüğünü ifade etmişlerdir. Bunun sebebinin ise geri dönüşümlü tuğla parçalarının geri dönüşümlü beton agregalara göre daha düşük dane yoğunluğuna ve daha yüksek su emme kapasitesine sahip olmasından kaynaklanabileceğini öne sürmüşlerdir. Çalışmada %100 geri dönüşümlü beton agreganın CBR değerinin doğal agregaya göre biraz düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak bahsi geçen iki atık malzemeden oluşturulan karışımda, geri dönüşümlü beton agrega oranı azalıp, geri dönüşümlü tuğla oranı arttıkça CBR değerinin daha da düştüğünü ifade etmişlerdir.

Arulrajah ve ark. (2011) geri dönüşümlü tuğlalar üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri yapmış ve malzemenin yol alt temel dolgularında kullanılabilme durumunu değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında laboratuvar da geri

dönüşümlü tuğla malzemesi üzerinde elek analizi, modifiye kompaksiyon deneyi, dane yoğunluğu deneyi, su emme deneyi, CBR, Los Angeles deneyi, malzemenin pH ve organik içeriği, statik ve tekrarlı üç eksenli deneyler yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda, geri dönüşümlü tuğla malzemesinin yol inşaatlarında alt temel olarak kullanmak için Los Angeles aşınma oranının fazla CBR değerinin ise düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca yüksek su içeriğinde geri dönüşümlü tuğla malzemesinin kayma mukavemetinin kabul edilebilir sınırların ötesinde düşük olduğunu belirtmişlerdir. Tekrarlı üç eksenli deney sonuçlarına göre yaklaşık %65 su içeriğindeki geri dönüşümlü tuğla malzemesinin yollarda alt temel olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca geri dönüşümlü tuğla malzemesinin yolların alt temel dolgularında, doğal agrega ile karıştırılarak kullanılmasını önermişlerdir.

Leite ve ark. (2011) CDW malzemesinin bileşimi ve kompaksiyon derecesinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini yaptıkları CBR ve tekrarlı üç eksenli deneyleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında tekrarlı üç eksenli deney aletinde 180000 tekrarlı yükleme sonucu malzemenin kalıcı deformasyonların belirlenmesine yönelik deneylerde yapmışlardır. Malzemenin kalıcı deformasyonları belirlemek için tekrarlı üç eksenli deney aletinde yaptıkları deneylerde deviatörük gerilmeyi (σ_d) 300 kPa çevresel basıncı (σ_3) ise 50 kPa ($\sigma_d/\sigma_3=6$) olarak almışlardır. Ayrıca farklı gerilme oranlarında da deneyler yaparak ($\sigma_d/\sigma_3=2-4-6-6.7$) malzemenin yenilme durumunu incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kompaksiyon süresince CDW malzemenin dane boyutunun azaldığı ve bu azalmanın kompaksiyon enerjisinin artması ile daha da arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca CDW malzemesinin CBR ve esneklik modülü değerinin yol inşaatlarında kullanılan doğal agregalara çok yakın olduğunu ifade etmişlerdir. Ek olarak kompaksiyon enerjisi ve gerilme seviyelerinin atığın kalıcı deformasyon değerlerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir.

Gabr ve Cameron (2012) çalışmalarında geri dönüşümlü beton agreganın (RCA) yol temel/alt temel dolgularında kullanılabilirliğini yaptıkları geleneksel

laboratuvar deneyleri ile araştırmışlardır. İki farklı kaynaktan aldıkları iki farklı çeşit geri dönüşümlü beton agrega ve bunları kıyaslamak için doğal agrega üzerinde laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Malzemelerin genel mühendislik özelliklerini, esneklik modülünü ve tekrarlı üç eksenli deney aletinde yaptıkları tekrarlı yüklemeler ile kalıcı deformasyonlarını belirlemişlerdir. Çalışmalarında ayrıca malzemelerin 7 günlük kür sonunda betonun hidratasyonu ile büzüşme miktarını ve su geçirgenliğini değişimini de incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda geri dönüşümlü beton agrega malzemenin esneklik modülünün Avusturalya standartlarına göre kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve doğal malzemedan biraz daha yüksek çıktığını ifade etmişlerdir. Ayrıca kalıcı deformasyonun ise su içeriğine bağlı olarak değiştiğini ancak geri dönüşümlü beton agreganın Avusturalya standartlarına göre kabul edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Barbudo ve ark. (2012) Akdeniz bölgesinde üretilen karıştırılmış geri dönüşümlü beton agreganın (beton ve moloz karışımı) mekanik özelliklerinin yol dolgularında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında 4 doğal, 27 geri dönüşümlü agrega olmak üzere toplamda 31 agrega malzeme üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri (Los Angeles, Modifiye Kompaksiyon ve CBR) yapmışlardır. Sonuçları yaptıkları istatistik çalışması ile değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında inşaat ve yıkıntı atığı malzeme içindeki parçalanmış tuğla ve alçı oranının, çözünür sülfat içeriğini doğrudan etkilediğini belirtmişlerdir. Parçalanmış tuğlanın sülfat içeriğinin doğal agrega ve diğer geri dönüşümlü agregalara göre daha yüksek olduğunu öne sürmüşlerdir. Doğal agregaların geri dönüşümlü agregalara kıyasla daha yüksek kuru birim hacim ağırlık, daha düşük optimum su içeriği, daha düşük Los Angeles aşınma katsayısı ve daha düşük su emme kapasitesi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca geri dönüşümlü beton agregaların diğer geri dönüşümlü agregalara oranla daha düşük yassılık indeksi ve kırık yüzeye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Geri dönüşümlü agregaların bir bölümünün düşük yoğunluklu yollarda kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Cerni ve ark. (2012) çalışmalarında yol temel/alt temel dolgularında inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin kullanılabilirliğini yaptıkları geleneksel laboratuvar ve tekrarlı üç eksenli deneylerle araştırmışlardır. Atık malzemenin kalıcı deformasyon davranışını referans alınan iki doğal granüler malzemesi ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca bu atıkların uzun dönem toplam kalıcı deformasyonlarının belirlenmesi için de bir analitik model önermişlerdir. Çalışmalarında biri geri dönüşüm tesisinden elde edilen inşaat ve yıkıntı atığı, kırılmış kireç taşı agrega ve kırılmış kireç taşı agregadaki ince malzeme yerine siltli kil kullanılarak elde edilen agrega olmak üzere üç agrega üzerinde hem optimum hem de doymuş su içeriğinde tekrarlı üç eksenli deneyler yapmışlardır. Deneyleri direnajlı koşullarda ve istenilen yanıl basınca ulaştıktan sonra istenilen düşey basıncın 2 Hz frekansında sinüs dalgası şeklinde 10000 kere yüklenmesi ile gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin İtalyan şartnamesine göre Los Angeles hariç genel fiziksel özelliklerinin yol dolgularında granüler malzeme olarak kullanmak için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu atık malzemesinin uzun süre kalıcı deformasyon davranışını belirleyen uygulanan basınç ve tekrarlı yük sayısının fonksiyonu olan eşitlik önermişlerdir. Deneylerde inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin kohezyonlu doğal malzemeye göre su içeriği değişiminden daha az etkilendiğini belirtmişlerdir. Ek olarak atık malzemenin kohezyonu az olan doğal malzemeye göre daha yüksek gerilmelerde yenilme gösterdiğini ifade etmişlerdir. Genel olarak inşaat ve yıkıntı atıklarının uygun fiyatı ve sürdürülebilirlik açısından geleneksel agregaya alternatif olabileceğini öne sürmüşlerdir.

Arulrajah ve ark. (2013a) farklı bileşimlere sahip beş inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin geoteknik ve çevresel etki özelliklerinin yol alt temel dolgularında kullanmak için uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Araştırdıkları inşaat ve yıkıntı atıklarını, geri dönüşümlü beton agregası (RCA), geri dönüşümlü kırık tuğla (CB), kaya atığı (waste rock-WR), geri dönüşümlü asfalt kaplaması (RAP) ve geri dönüşümlü ince cam atığı (fine recycled glass-FRG) olarak gruplandırmışlardır. Çalışmalarında atık malzemelerin geoteknik özelliklerini belirlemek için

geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, dane yoğunluğu, su emme, kompaksiyon, Los Angeles aşınma deneyi, yassılık indeksi, hidrolik iletkenlik, CBR deneyi) yapmışlardır. Ayrıca yaptıkları çalışmada atık malzemelerin esneklik modüllerini ve tekrarlı üç eksenli deney aletinde kalıcı deformasyonlarını da belirlemişlerdir. Atıkların çevresel etkilerini PH değeri, organik içeriği ve sızıntı suyu konsantrasyonu analizleri yapmışlardır. Kalıcı deformasyon deneyini 50 kPa yanal basınçta 150 ile 450 kPa arası deviatörük gerilmede ve 40000 tekrarlı yükleme şeklinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda aşağıdaki sıralanan sonuçları vurgulamışlardır.

- İnceledikleri tüm atık malzemelerin doğaya uyumlu olarak PH değeri 7'nin üzerinde çıktığı ve sızıntı suyu konsantrasyonundaki ağır metal miktarlarının yol alt temel dolgularında kullanmak için uygun olduğu belirtmişlerdir belirtilmiştir.
- İnşaat ve yıkıntı atığı malzemenin yoğunluğu arttıkça yüksek kaliteli agregalara benzer davranış gösterdiği ifade etmişlerdir.
- Los Angeles deneyler RCA, WR ve FRG malzemelerin durabilitesinin CB ve RAP malzemedan daha yüksek olduğu ifade edilmiştir.
- RCA, CB ve WR malzemelerinin esneklik modülü ve CBR değerleri yol alt temel dolgularında kullanmak uygun iken, esneklik modülü ve CBR değeri düşük olan FRG ve RAP malzemeleri yol alt temel dolgularında kullanılacaksa granüler malzemeler ile belli oranlarda karıştırılmalarını önermişlerdir.
- Konsolidasyonlu dirençli üç eksenli deneylerden atık malzemelerin içsel sürtünme açılarının 49-51° olduğu kohezyonlarının ise 41-46 kPa olduğu ancak farklı olarak FRG malzemenin kohezyonu 0 RAP malzemenin kohezyonu 53kPa, iki malzemenin de içsel sürtünme açısı 37° çıktığını belirtmişlerdir.

- Tekrarlı üç eksenli deneylerinde RCA, CB ve WR malzemeler için optimum su içeriğinin %70'inde yol alt temellerinde kullanmak için tatmin edici sonuçlar elde edildiği ancak su içeriği arttıkça kalıcı deformasyonların arttığı esneklik modülünün ise düştüğünü belirtmişlerdir.
- RCA ve WR malzemelerinin doğal granüler alt temel malzemesine göre daha düşük kalıcı deformasyon ve daha yüksek esneklik modülü elde edildiği belirtilmiştir.
- Genel olarak RCA ve WR malzemenin geoteknik özelliklerinin yol alt temel dolgularında kullanılan granüler malzemeler ile aynı veya daha iyi olduğunu, CB malzemesinin de düşük su içeriğinde için yol alt temel dolgularında kullanılan granüler malzemeye benzer özellikler gösterdiğini belirtilmiştir.

Arulrajah ve ark. (2014c) farklı bileşimlere sahip altı inşaat ve yıkıntı atığı malzeme üzerinde yaptıkları geleneksel laboratuvar ve büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri ile yol dolgularında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırdıkları inşaat ve yıkıntı atıklarını, geri dönüşümlü beton agregası (RCA), geri dönüşümlü kırık tuğla (CB), kaya atığı (waste rock-WR), geri dönüşümlü asfalt kaplaması (RAP), geri dönüşümlü ince cam atığı (fine recycled glass-FRG) ve geri dönüşümlü orta cam atığı (medium recycled glass-MRG) olarak gruplandırmışlardır. Çalışmalarında maksimum dane çapı 20 mm olan RCA, CB, WR ve RAP malzemeleri için 305 mm x 305 mm x 205 mm boyutlarındaki büyük ölçekli kesme kutusu deney aletini kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda RCA, CB ve WR malzemelerinin, sıkı kaba daneli granüler malzemeler gibi maksimum dilatasyon oranında pik kesme mukavemeti değeri gösterdiği sonrasında artan yatay deformasyonlarda kesme mukavemetinin düştüğünü belirtmişlerdir. Ancak RAP, FRG ve MRG malzemelerinde bu davranışı göremediklerini ifade etmişlerdir. Genel olarak RCA, CB ve WR malzemelerinin fiziksel özellikleri ve

kayma mukavemeti değerinin, yol temel/alt temel dolgularında kullanılan granüler malzemelere benzer olduğunu öne sürmüşlerdir.

Disfani ve ark. (2014) %3 çimento ile iyileştirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemeler üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, modifiye kompaksiyon, CBR, serbest basınç deneyi), tekrarlı üç eksenli deney aletinde kalıcı deformasyon deneyi ve kırış eğilme deneyi yapmışlardır. İnşaat ve yıkıntı atıklarını, geri dönüşümlü beton agregası (RCA) ve geri dönüşümlü kırık tuğla (CB) malzemelerin karıştırılması ile elde etmişlerdir. Serbest basınç deneylerini numunelerin 7 gün ve 28 gün kür edilmesinden sonra yapmışlardır. Kalıcı deformasyon deneylerini 50 kPa çevresel gerilmede, 350 kPa, 450 kPa ve 550 kPa deviatorik gerilmede 10000 tekrarlı yükleme ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda %3 çimento ile iyileştirilmiş %50 ye kadar parçalanmış tuğla atığı bulunduran atık malzemenin mukavemet ve fiziksel özelliklerinin Avusturalya standartlarına uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Ayan ve ark. (2014) geri dönüşümlü asfalt kaplama (RAP) ve geri dönüşümlü beton agrega (RCA) malzemelerinin ve bu malzemelerin karışımının yol alt temel dolgularında kullanılabilmesi durumunu, yaptıkları geleneksel laboratuvar deneyleri (modifiye kompaksiyon ve CBR) ile araştırmışlardır. Çalışmalarında %100 RCA malzemesi ve %50 RCA ile %50 RAP karışım malzemesi ve kıyas için doğal granüler alt temel malzemesi üzerinde deneyler yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda %100 RCA malzemenin alt temel malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Vieira ve Pereira (2015b) çalışmalarında inşaat ve yıkıntı atıklarının geoteknik uygulamalarda yeniden değerlendirilmesi ile ilgili geniş kapsamlı bir literatür incelemesi yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda inşaat ve yıkıntı atıklarının geosentetik donatılı dolgularda veya yol alt temellerinde dolgularında dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için sahip olması gereken özellikler ve izlenmesi gereken standartlara vurgu yapmışlardır.

2.5.2.2. Arazi Çalışmaları

Park (2003) beton kaplamalı yoldan ve konutlardan elde ettiği iki farklı geri dönüşümlü agreganın fiziksel ve kompaksiyon özelliklerini araştırmıştır. Geri dönüşümlü agregaların davranışını kıyaslamak için iki farklı çeşit doğal granüler malzeme üzerinde de deneyler yapmıştır. Ayrıca arazide temel ve alt temel dolgusu elde ettiği geri dönüşümlü beton agregadan ve doğal kırma taş agregadan inşa edilmiş beton kaplamalı bir yolda ağırlık düşürme deneyi (Falling Weight Deflectometer Test -FWDT) gerçekleştirmiştir. Arazi çalışması sonucunda kırma taş agregası kullanılarak inşa edilen kesitlerin sonuçları ile geri dönüşümlü beton agregası kullanılarak inşa edilen kesitlerin benzer sonuçlar verdiğini ifade etmiştir. Sonuçta geri dönüşümlü beton agreganın yol temel ve alt temel dolgularında kırma taş agregaya alternatif olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

Blankenagel (2005) yumuşak zemin üzerine geri dönüşümlü beton agregası malzemelerden inşa edilen dolgunun mukavemetini ve rijitliğini belirlemek için bazı arazi deneyleri yapmıştır. Çalışmasında gradasyonları farklılık gösterdiği iki farklı çeşit geri dönüşümlü beton agregası kullanmıştır. Bu atık malzemeler üzerinde laboratuvarında CBR, serbest basınç, donma çözülme, Los Angeles aşınma, alkali duyarlılık gibi deneyler gerçekleştirerek malzemenin özelliklerini belirlemiştir. Sonrasında arazide bir araba park alanında yumuşak zemin üzerine geotekstil yerleştirmiş, üzerine de yaklaşık 200-300 mm geri dönüşümlü beton agregası malzemelerden dolgu inşa etmiştir. Dolgu üzerinde yaklaşık bir sene içerisinde belli zaman aralıklarında clegg çarpma değeri testi (Clegg Impact Value Test-CIVT), ağırlık düşürme deneyi (Falling Weight Deflectometer Test -FWDT) ve dinamik koni penetrasyon (DCP) gibi deneyler yapmıştır. Çalışması sonucunda geri dönüşümlü beton agregalardan inşa edilen dolgunun rijitlik ve CBR değerinin su içeriğine bağlı olarak çok değişebildiğini, ilkbaharda doymuş durumda yazın göre rijitlik ve CBR değerlerinde %60'a varan kayıplar olabildiğini belirtmiştir. Ayrıca genel olarak geri dönüşümlü beton agregası malzemenin birçok bakımdan yol temel malzemesi ile kıyaslanabilir olduğunu ifade etmiştir.

Jiménez ve ark. (2012a) inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin trafik yoğunluğu az olan kırsal alanlardaki kaplamasız yollarda kullanılabilmesi durumun, bu atık malzemeleri kullanarak arazide inşa ettikleri kaplamasız yol dolgusu ile araştırmışlardır. Çalışmalarında karşılaştırma yapabilmek için doğal kireç taşı agrega malzemeden de kaplamasız yol inşa etmişlerdir. Farklı kesitlerde atık ve doğal malzemelerden inşa ettikleri kaplamasız yol dolgusu kesitlerin yapısal performansının ölçmek için arazide kompaksiyon kontrolü, plaka yükleme deneyi, ağırlık düşürme deneyi (Falling Weight Deflectometer Test -FWDT) ve yüzey pürüzlülük deneyleri yapmışlardır. Ayrıca kullanılan inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin çevresel etkilerini araştırmak için sızıntı suyu konsantrasyonu analizleri de yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda sızıntı suyu konsantrasyonu analizlerinde tuz içeriği dışında sınırların üzerinde zararlı bir maddeye rastlamadıklarını ifade etmişlerdir. Üç yıl boyunca belli zamanlarda yapılan kompaksiyon kontrol deneyinde inşaat ve yıkıntı atığından inşa edilen yol dolgusunda sadece üçüncü yıl yaklaşık %4 lük bir artış olurken doğal agregadan inşa edilen kesitte anlamlı bir artış görmediklerini belirtmişlerdir. Ayrıca statik plaka yükleme deneyi sonuçlarında iki dolgunun taşıma kapasitelerinin birbirine yakın olduğunu ve iki yıllık trafik akışından sonra hala taşıma kapasitelerinin birbirine çok benzediğini ifade etmişlerdir. Genel olarak kullanılan inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin kaplamasız kırsal yol dolgularında doğal agregaya alternatif olabileceğini öne sürmüşlerdir.

Jiménez ve ark. (2012b) düşük kaliteli (seçilmemiş) inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin düşük trafik hacmine sahip kaplamasız yol dolgularındaki performansını ve bu malzemenin çevresel etkilerini zayıf zemin üzerine inşa ettikleri deneme yolunda incelemişlerdir. Yol dolgusunun performansını belli zaman aralıklarında arazide yaptıkları ağırlık düşürme deneyi (Falling Weight Deflectometer Test -FWDT) ve statik plaka yükleme deneyleri ile ölçmüşlerdir. Yaptıkları deneysel yolu, zayıf zemin üzerine temel tabakası ve yüzeysel kaplama tabakası olmak üzere iki yapısal katmandan oluşturmuşlardır. Çalışmada iki farklı

kesit inşa etmişlerdir. Birinci kesiti zayıf zemin üzerine doğal agrega malzemeden inşa edilmiş temel tabakası ve üzerine düşük kaliteli inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilmiş yüzey tabakasından oluşturmuşlardır. Diğer kesiti ise referans olsun diye sadece yumuşak kireç taşı agregadan inşa etmişlerdir. Çalışma sonucunda her iki kesitte de statik plaka yükleme deneyinden elde edilen elastisite modülü değerlerinin standartların üstünde olduğunu ancak zaman içerisinde inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilen kesitin elastisite modülünün %27 arttığını, diğer kesitin elastisite modülünün ise %23 azaldığını ifade etmişlerdir. FWDT ile ölçülen yüzey deformasyonunun yumuşak kireç taşı agregadan inşa edilen kesitte, inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilen kesite göre hafif daha az olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda düşük kaliteli (seçilmemiş) geri dönüşümlü beton atığı malzemenin küçük iyileştirmelerle kaplamasız yollarda doğal agrega yerine kullanmak için bir alternatif olabileceğini belirtmişlerdir.

Herrador ve ark. (2012) inşaat ve yıkıntı atıklarının kaplamalı yollarda temel tabakası dolgusunda kullanılabilirliğini, doğal arazide inşa ettikleri yol üzerinde yaptıkları bazı deneylerle araştırmışlardır. İnşaat ve yıkıntı atığı malzemeyi yıkama, plastik ve metal malzemelerden ayrıştırma gibi işlemlerin sonucunda içeriği %75 beton atığı, %20'si asfalt atığı ve %5 seramik atığından oluşacak şekilde hazırlamışlardır. Çalışmalarında oluşturdukları yol kesiti genel olarak taşıma gücü yol için yeterli olan bir zemin üzerine alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşturmuşlardır. Temel tabakası inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden ve atık malzemeyi kıyaslamak için doğal taşocağı agrega malzemeden oluşan iki farklı yol kesiti inşa etmişlerdir. İnşa ettikleri yol dolguları üzerinde plaka yükleme deney parametrelerinin elde edilebildiği görüntüleme sistemi ADAR ile tarama ve ağırlık düşürme deneyi (Falling Weight Deflectometer Test - FWDT) yapmışlardır. Ayrıca inşa ettikleri yolda, trafik yükleri (günlük yaklaşık 100-199 araç) sonrası 6 ayda bir oluşan deformasyonları geophone ve high-performance dynamic monitoring tests ile ölçmüşlerdir. Çalışmaları sonucunda inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin, doğal agregaya göre su emmesinin yüksek

yoğunluğunun ise düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin çok su gerektirmesinden dolayı arazide kompaksiyonunun zor olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin yük deformasyon davranışını yeterli gördüklerini ifade etmişlerdir.

Perez ve ark. (2013) inşaat ve yıkıntı atıklarının kaplamalı yollarda temel tabakası dolgusunda çimento ile iyileştirilerek kullanılabilirliğini, doğal arazide inşa ettikleri yol üzerinde yaptıkları bazı deneylerle araştırmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları inşaat ve yıkıntı atığı malzemeyi mekanik ve manuel olarak plastik ve metal gibi yabancı maddelerden temizlemiş, yıkanmış ve gradasyon olarak 25 mm ile 5 mm arası malzemeyi ayırmışlardır. Daha sonra inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin gradasyonunu tamamlamak için 5 mm altı doğal malzeme ile karıştırmışlardır. Çalışmalarında oluşturdukları yol kesiti genel olarak taşıma gücü yol için yeterli olan bir zemin üzerine alt temel, çimento ile iyileştirilmiş temel ve kaplama tabakalarından oluşturmuşlardır. Temel tabakası %3.5 oranında çimento karıştırılarak iyileştirilen inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden ve atık malzemeyi kıyaslamak için %3.5 oranında çimento karıştırılarak iyileştirilen doğal taşocağı agrega malzemeden oluşan iki farklı yol kesiti inşa etmişlerdir. İnşa ettikleri yol dolguları üzerinde plaka yükleme deney parametrelerinin elde edilebildiği görüntüleme sistemi ADAR ile tarama ve ağırlık düşürme deneyi (Falling Weight Deflectometer Test -FWD) yapmışlardır. Ayrıca inşa ettikleri yolda, trafik yükleri (günlük yaklaşık 100-199 araç) sonrası 6 ayda bir oluşan deformasyonları geophone ve high-performance dynamic monitoring tests ile ölçmüşlerdir. Çalışmalarında inşaat ve yıkıntı malzemenin ince kısmının doğal agregalardan oluşturarak kompaksiyon için gerekli su miktarını azaltmaya çalışmışlardır. Çalışmalarının sonucunda inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin doğal agregaya göre su emmesinin biraz daha fazla maksimum kuru birim hacim ağırlığı biraz daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin doğal agregadan daha hafif olduğunu bununla ulaşım masraflarını azaltacağını öne sürmüşlerdir. Çimento ile iyileştirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı

malzemenin yol temel dolgularında doğal agregaya göre iyi bir alternatif olabileceğini belirtmişlerdir.

Sangiorgi ve ark (2013) farklı tür inşaat ve yıkıntı atığı karışımı malzemelerin dolgularda kullanılabilmesi durumunu arazide inşa ettikleri deneme dolgusunda yaptıkları bazı deneyler ile incelemişlerdir. Dolguyu 40 cm'lik iki tabaka olmak üzere 80 cm'lik yükseklikte, 5 m genişlikte, 60 m boyunda inşa etmişlerdir. Bu dolguyu her deney bölümünde farklı atık malzemeler kullanılmak üzere dört bölüme ayırmışlardır. Birinci bölümü %65 inşaat ve yıkıntı atığı, %20 demir cürufu ve %15 seramik atığı karışımından, ikinci bölümü %50 demir yolu traversi ve %50 kum taşı karışımından, üçüncü bölümü sadece geri dönüşümlü beton agregadan, dördüncü bölümü %50 geri dönüşümlü asfalt ve %50 geri dönüşümlü beton agregadan oluşturmuşlardır. Dolgunun rijitliğini kompaksiyonu sırasında ve kompaksiyon sonrasında yaptıkları farklı çeşitlerdeki light-weight deflectometer deneyleri ile kontrol etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda 5 ay süresince yapılan deneylerde en rijit dolgunun dördüncü kesitte elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kompaksiyon oranı arttıkça elastisite modülünün belirgin şekilde arttığı ifade etmişlerdir. İnşaat ve yıkıntı atığı malzemenin rijitliğinin zamanla önemli ölçüde arttığı ve bu artışın malzemenin çimentolanma etkisi göstermesinden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir.

Neves ve ark. (2013) bazı inşaat ve yıkıntı atıkların dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi durumunu arazide inşa ettikleri deneme dolgusu ile araştırmışlardır. Dolguyu inşaat ve yıkıntı atığı, geri dönüşümlü asfalt kaplama, %70 doğal agrega %30 geri dönüşümlü asfalt kaplama karışımı ve kıyaslamak için doğal agrega olmak üzere dört farklı kesitte inşa etmişlerdir. Oluşturdukları kesitlerin performansını belirlemek için ağırlık düşürme deneyi (Falling Weight Deflectometer Test -FWDT) yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda atık malzemelerin doğal malzeme göre farklı davranış gösterdiğini ama test edilen tüm atık malzemelerin kabul edilebilir olduğunu öne sürmüşlerdir.

Arulrajah ve ark. (2014a) geri dönüşümlü beton agregası (RCA) ve geri dönüşümlü asfalt kaplama (RAP) malzemelerinin karışımlarının yol temel alt temel dolgularında kullanılabilirliğini geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, modifiye kompaksiyon, piknometre, su emme, Los Angeles aşınma deneyi, CBR, yassılık indeksi) ve arazi deneyi ile araştırmışlardır. Ayrıca farklı su içeriklerindeki (optimum su içeriğinin %60'ı, 75'i ve %90'ı) karışım malzemeler üzerinde tekrarlı üç eksenli deney yapmışlardır. Arazide alt temel tabakası olarak %100 RAP malzeme kullanılan deneyler yapmışlardır. Arazi deneylerinde performans değerlendirmesini nükleer yoğunluk ölçer (nuclear density gauge-NDG) ve clegg çekici (clegg hammer-CH) ile clegg çarpma değeri (clegg impact value-CIV) hesaplanması ve oradan denklemlerle CBR değerine geçilmesi ile yapmışlardır. Sonuç olarak; RCA ve RAP malzemesi karışımı için RAP içeriği %15'in altında olduğu karışımlarda su içeriği optimum su içeriğinin %59-78 aralığında ise yol alt temellerinde kullanmak için uygun kalıcı deformasyon ve esneklik modülüne sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ancak bu karışımın CBR sonuçlarının istenilen değerlerden biraz düşük çıktığını ifade etmişlerdir.

Kazmee ve Tutumluer (2015) temel/ alttemel dolgusu geri dönüşümlü beton agregası (RCA), geri dönüşümlü asfalt kaplama (RAP) ve %40 RAP ile %60 RCA karışımı olmak üzere üç çeşit geri dönüşümlü atık malzeme ile oluşturulan kaplamalı yollarda teker izi oluşumunu tam ölçekli arazi deneyleri ile incelemişlerdir. Atık malzemelerin performansını kıyaslamak için tüvenen agregası ve demir yolu balastı olmak üzere iki farklı doğal agregası üzerinde de tam ölçekli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında belirlenene malzemelerden hazırlanan yol dolgusu üzerine doğal agregalardan inşa edilen çalışma platformu ve esnek olmak üzere iki farklı kaplama oluşturmuşlardır. İnşa edilen deneme yolu üzerinden 8 km/s hızla ve 758 kPa'lık (44.5 kN) bir basınç oluşturan tekerlek yüklemesi yapmışlardır. Yükleme sonrasında oluşan tekerlek izini lazer ölçüm cihazları ile belirlemiş ve 7.6 cm tekerlek izi oluşuncaya kadar ya da 4000 geçişe kadar tekerlek yüklemesi yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda %100 RAP

malzeme kullanılan bölümlerde yüksek kalıcı deformasyonların oluştuğunu belirtmişlerdir. %40 RAP ile %60 RCA karışımı atık malzemenin iyi performans verdiğini ve inşaat platformlarında agrega zemin olarak kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca %100 RCA malzemenin inşaat platformları ve esnek kaplamalı yollar için iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

2.5.2.3. Geosentetik Donatılı Çalışmalar

Santos ve Vilar (2008) geri dönüşümlü inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin kimyasal ve geoteknik özelliklerini belirlemek için geleneksel laboratuvar deneyleri, büyük ölçekli kesme kutusu deneyi ve pH deneyleri yapmışlardır. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin içinden geogrid donatı çekme deneyi de yapmışlardır. Büyük ölçekli kesme kutusu deneylerini 500 mm x 500 mm x 500 mm boyutlarındaki kasada, 50 150 ve 300 kPa normal basınç altında gerçekleştirdiklerini ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda büyük ölçekli kesme kutusu deneylerinde inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin içsel sürtünme açısının 42° standart kumun 32° çıktığını belirtmişlerdir. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin bazik olarak pH değerini 9.1 olduğunu, ancak bu pH'ın geoteknik uygulamaları için atıkla birlikte polyester geogridlerin kullanılmasına engel olmadığını öne sürmüşlerdir. Ek olarak malzemenin içinden donatı çekme deneyler sonucunda geri dönüşümlü inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin standart kumdan daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Arulrajah ve ark. (2013b) geoteknik mühendisliği uygulamalarında doğal granüler malzemelere alternatif olarak geogridle güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin kullanılabilirliğini yaptıkları büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri ile incelemişlerdir. Deneyleri 305mm x 305mm x 205mm boyutlarındaki kesme kutusu içerisinde, 30 kPa, 60 kPa, ve 120 kPa ön yükleme ile 0.025 mm/dak hızında keserek gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada geri dönüşümlü beton agrega (RCA), geri dönüşümlü parçalanmış tuğla (CB) ve geri dönüşümlü asfalt kaplaması

(RAP) olmak üzere dört farklı çeşit inşaat yıkıntı atığı ve bu atık malzemeleri güçlendirmek için düşük mukavemetli iki yönlü (biaxial) geogrid ve yüksek mukavemetli üç yönlü (triaxial) geogrid donatı kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda güçlendirilmemiş ve geogridle güçlendirilmiş RCA malzemesinin peak ve residual gerilmelerinin güçlendirilmiş CB ve RAP malzemelerine göre daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. Güçlendirmesiz deneylerde elde edilen kayma mukavemeti özelliklerinin güçlendirmeli deneylere göre yüksek çıktığını, bunun inşaat ve yıkıntı atığı malzemeler ile donatı arasındaki kenetlenme mekanizmasının tam olarak çalışmamasından veya deney metodundan kaynaklanabileceğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca kayma mukavemeti özelliklerinin yüksek mukavemetli üç yönlü geogridle güçlendirmede, düşük mukavemetli iki yönlü ile güçlendirmeye göre daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Genel olarak güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan tipik granüler malzemelerin peak ve residual gerilme özelliklerini yakaladığını belirtmişlerdir.

Santos ve ark. (2013) geosentetikle güçlendirilmiş duvarda dolgu malzemesi olarak inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin kullanılabilmesi durumunu yaptıkları tam ölçekli arazi deneyleri araştırmışlardır. Çalışmalarında güçlendirme elemanı olarak polyester geogrid ve polipropilen geotekstil malzeme kullanmışlardır. Arazide çökebilir bir zemin üzerine donatılı duvar inşa etmişlerdir. İnşa edilen yapıyı ıslak ve kuru mevsimler boyunca izleyip, oluşan yatay deplasmanları kayıt etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda göçebilir zeminler üzerine dolgu malzemesi inşaat ve yıkıntı atığı olan geosentetik güçlendirmeli duvarların, benzer büyüklükte ve geleneksel granüler malzeme ile inşa edilmiş geosentetik güçlendirmeli duvarlarla benzer performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Rahman ve ark. (2014) geogridle güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin yol temel ve alt temel dolgularında kullanılan doğal granüler malzemeye alternatif olarak kullanılabilirliğini belirlemek için esneklik modülü ve

tekrarlı üç eksenli deney aletinde kalıcı deformasyon deneyi yapmışlardır. Ayrıca esneklik modülü deney sonuçlarından iki ve üç parametrelili modeller kullanarak regresyon analizi yapmışlardır. Kalıcı deformasyon deneylerini 50 kPa çevresel basınç ve 150 kPa, 250 kPa ve 350 kPa olmak üzere üç farklı deviatorik gerilmede, haversine (0,1 saniye yükleme 0,9 saniye dinlenme) yüklemesi şeklinde ve 30000 tekrarlı yük uygulayarak yapmışlardır. Çalışmada geri dönüşümlü beton agrega (RCA), geri dönüşümlü parçalanmış tuğla (CB) ve geri dönüşümlü asfalt kaplaması (RAP) olmak üzere dört farklı çeşit inşaat yıkıntı atığı ve bu atık malzemeleri güçlendirmek için iki yönlü (biaxial) geogrid ve üç yönlü (triaxial) geogrid donatı kullanmışlardır. Donatı ile güçlendirmeli deneylerde donatıyı numunenin tam ortasına yerleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin geogrid donatı ile güçlendirildiğinde, esneklik modülü değerinin arttırdığını ve kalıcı deformasyon değerinin de önemli ölçüde düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca üç yönlü geogrid donatının iki yönlü geogrid donatıya göre daha yüksek performans sağladığını ifade etmişlerdir.

Arulrajah ve ark. (2014b) geogrid ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin kayma mukavemetini büyük ölçekli ve geleneksel kesme kutusu deneyleri ile belirlemişlerdir. Deneyleri geleneksel ve büyük ölçekli olmak üzere iki farklı boyuttaki kesme kutusu içerisinde yapmışlardır. Büyük ölçekli deneyleri 305mm x 305mm x 205mm boyutlarındaki kesme kutusu içerisinde, 30 kPa, 60 kPa, ve 120 kPa ön yükleme ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada geri dönüşümlü beton agrega (RCA), geri dönüşümlü parçalanmış tuğla (CB) ve geri dönüşümlü asfalt kaplaması (RAP) olmak üzere dört farklı çeşit inşaat yıkıntı atığı ve bu atık malzemeleri güçlendirmek için düşük mukavemetli iki yönlü (biaxial) geogrid ve yüksek mukavemetli üç yönlü (triaxial) geogrid donatı kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda büyük ölçekli kesme kutusunda test edilen geogrid ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin kayma mukavemetinin güçlendirilmemiş olan deneylere ve geleneksel kesme kutusu deneylerine göre daha yüksek çıktığını ifade etmişlerdir. Yaptıkları büyük ölçekli ve geleneksel kesme kutusu deneylerinde

RCA malzemenin en yüksek kayma mukavemeti değerine sahip olduğu, onu CB ve PAP malzemenin izlediğini ifade etmişlerdir.

Vieira ve Pereira (2015a) inşaat ve yıkıntı atıklarının meydana getirebileceği bazı fiziksel ve kimyasal etkilerin, geosentetikler üzerinde oluşturabileceği bozulmaları incelemişlerdir. Çalışmalarında arazide inşaat ve yıkıntı atığı malzemeler kullanarak, içine tek yönlü HDPE geogrid ve örgüsüz PP geotekstil olmak üzere iki çeşit geosentetik yerleştirdikleri, 2 m x 3 m alanına ve 0.4 m yüksekliğine sahip dolgu inşa etmişlerdir. Donatıyı dolgunun tam ortasına yerleştirmişlerdir. Altı ay sonra dolgu içindeki geosentetiği çıkarmış ve geosentetiğe çekme deneyi yaparak gerilme davranışını incelemişlerdir. Ayrıca geosentetik üzerinde SEM (scanning electron microscope) analizi yaparak molekül yapısını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda dolgudan çıkartılan geosentetikler ile normal geosentetikler kıyaslandığında, HDPE geogridin çekme mukavemetinde ve elastisite modülünde çok az bir azalma meydana geldiğini, PP geotekstilde ise çekme mukavemetinin yaklaşık %16 düştüğünü ama elastisite modülünün çok değişmediğini belirtmişlerdir.

2.6. Literatür Değerlendirmesi

Literatürde incelendiğinde dolgularında kullanılan inşaat atıklarının genelde, sadece beton parçaları içeren geri dönüşümlü beton agregası (recycled concrete aggregate-RCA) veya beton parçaları ile birlikte birkaç inşaat atığı malzeme (tuğla, cam, mermer, ahşap, alçı vb.) ve doğal agregada içerebilen inşaat ve yıkıntı atıkları (construction and demolition waste-CDW) olarak geçtiği görülmüştür. Ayrıca bu atıklara belli oranlarda geri dönüşümlü asfalt kaplama da (recycled asphalt pavement-RAP) ilave edildiği çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmaların bazılarında, araştırdıkları atık malzemenin barındırdığı geri dönüşümlü beton agregası (RCA), geri dönüşümlü asfalt kaplama (RAP) ve geri dönüşümlü tuğla (CB) oranları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Bu çalışmalardaki üç atık malzeme genel bir atık yığınının özel olarak ayrıştırılarak elde edilmiş ve

çalışmayı yapanlar tarafından istenilen oranlarda karıştırılmış ya da yalnız kullanılmıştır.

Çizelge 2.1. Bazı Çalışmalarda Kullanılan İnşaat Atığı Malzemelerin İçindeki RCA, RAP ve CB Oranları

Önceki Çalışmalar	Kullanılan Malzemenin İçeriği		
	RCA (%)	RAP (%)	CB (%)
Ayan ve ark. 2014 (1)	100	-	-
Ayan ve ark. 2014 (2)	50	50	-
Poon ve Chan 2006 (1)	100	-	-
Poon ve Chan 2006 (2)	75	-	25
Poon ve Chan 2006 (3)	50	-	50
Arulrajah ve ark. 2013a (1)	100	-	-
Arulrajah ve ark. 2013a (2)	-	-	100
Park 2003	100	-	-
Arulrajah ve ark. 2014a (1)	100	-	-
Arulrajah ve ark. 2014a (2)	85	15	-
Arulrajah ve ark. 2014a (3)	70	30	-
Arulrajah ve ark. 2014a (4)	50	50	-
Kazmee ve Tutumluer 2015 (1)	100	-	-
Kazmee ve Tutumluer 2015 (2)	60	40	-
Disfani ve ark. 2014	100	-	-
Gabr ve Cameron 2012 (1)	100	-	-
Gabr ve Cameron 2012 (2)	100	-	-
Arulrajah ve ark. 2014c (1)	100	-	-
Arulrajah ve ark. 2014c (2)	-	-	100
Herrador ve ark. 2012	75	20	5
Blankengel 2005 (1)	100	-	-
Blankengel 2005 (2)	100	-	-

Bazı çalışmalarda ise geri dönüşümlü beton agreganın yanı sıra tuğla, cam, mermer, ahşap, alçı gibi malzemelerde barındıran inşaat ve yıkıntı atığı, kaynağından doğrudan alınarak kullanılmıştır. Bu atıklar kaynağından temin edildikten sonra sadece çeşitli zararlı malzemelerin (plastik ve metal malzemelerin uzaklaştırılması) ayrıştırılması ve konkasörlerde belli gradasyonda kırılması ile elde edilmiştir. Elde edilen bu atıklar çeşitli uygulamalarda kullanmadan önce barındırdıkları beton parçaları, tuğla parçaları, doğal agrega, bitüm, cam ve benzeri

paraçaların ağırlıkça oranları belirlenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Literatürden Bazı İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme İçeriği

Önceki Çalışmalar	Kullanılan Malzemenin İçeriği						
	$R_c(\%)$	$R_b(\%)$	$R_u(\%)$	$R_a(\%)$	$R_g(\%)$	$R_s(\%)$	$X(\%)$
Vieira ve Pereira 2015b	23.8	10.8	33.7	0.5	1.0	17.1	0.1
Cerni ve ark. 2012	25.6	29.5	42.0	2.0	0.6	-	0.3
Jimenez ve ark. 2012a	76.0	3.1	20.8	-	-	-	0,1
Neves ve ark. 2013	68.0	13.0	17.0	1.9	0.3	-	0.1
Perez ve ark. 2013	55.0	-	45.0	-	-	-	-
R _c : Beton, Beton Ürünleri Parçaları, R _b : Tuğla, Kagir Birim Parçaları, Fayans, Seramik, R _u :Doğal Agregat, R _a : Bitüm, R _g : Cam, R _s : Zemin, X: Diğer Malzemeler (Metal, Plastik, Kavuçuk, Kereste vb.)							

İnşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülerek tekrar kullanılması ile ilgili literatür incelendiğinde, çalışmaların çoğunu bu atıklar üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deneyleri ile malzemenin fiziksel, geoteknik ve/veya çevresel özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin yol temel/alt temel ve benzeri dolgularında kullanmak için uygun olup olmadığının yorumlanması üzerine olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda, atık malzeme üzerinde elek analizi, Los Angeles deneyi, yassılık indeksi deneyi, su emme deneyi, dane yoğunluğu deneyi, modifiye kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi, CBR, esneklik modülü deneyi, statik ve tekrarlı (kalıcı deformasyon) üç eksenli deneyi, büyük ölçekli kesme kutusu deneyi gibi deneylerden bazılarını yaparak atık malzemenin fiziksel ve geoteknik (mekanik) özelliklerini araştırdıkları görülmüştür. Ayrıca bazı çalışmalarda PH değeri, organik içeriği analizi ve sızıntı suyu konsantrasyonu analizleri ile malzemenin çevresel özelliklerini inceledikleri saptanmıştır. Bu çalışmalardaki atık malzemelerin gradasyon özellikleri Çizelge 2.3’te, fiziksel özellikleri Çizelge 2.4’te verilmiştir. Ek olarak statik yük uygulanan laboratuvar deneylerinden, konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney, CBR deneyi ve serbest basınç deneyi

sonuçları Çizelge 2.5'te, büyük ölçekli kesme kutusu sonuçları Çizelge 2.6'da, tekrarlı yük uygulanan laboratuvar deneylerinden kalıcı deformasyon ve esneklik modülü deney sonuçları Çizelge 2.7'de verilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda genel olarak inşaat ve yıkıntı atıkların özellikle yol dolguları olmak üzere çeşitli dolgularda doğal agregalar yerine bir alternatif olabileceği kabul edilmiştir.

Çizelge 2.3. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Gradasyon Özellikleri

Önceki Çalışmalar	Gradasyon Özellikleri					
	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c	Y _i
Ayan ve ark. 2014 (1)	0.11	1.05	7.00	66.67	1.50	-
Ayan ve ark. 2014 (2)	1.50	4.00	9.50	6.33	1.12	-
Vieira ve Pereira 2015b	0.06	0.35	1.40	23.33	1.46	-
Poon ve Chan 2006 (1)	0.45	2.60	8.50	18.85	1.77	-
Poon ve Chan 2006 (2)	0.90	3.20	9.00	10.00	1.26	-
Poon ve Chan 2006 (3)	0.80	3.00	8.50	10.63	1.32	-
Arulrajah ve ark 2013a (1)	0.24	1.30	7.50	31.25	0.94	11.00
Arulrajah ve ark 2013a (2)	0.18	1.70	8.00	44.44	2.01	14.00
Cerni ve ark. 2012	0.70	0.90	6.00	85.71	1.93	26.50
Park 2003	0.10	1.90	10.50	105.0	3.44	-
Arulrajah ve ark. 2014a (1)	0.24	1.40	7.30	30.42	1.12	11.00
Arulrajah ve ark. 2014a (2)	0.36	1.70	7.50	20.83	1.07	37.00
Arulrajah ve ark. 2014a (3)	0.16	2.40	9.00	56.25	4.00	37.90
Arulrajah ve ark. 2014a (4)	0.20	2.70	9.70	48.50	3.76	33.14
Jimenez ve ark. 2012a	0.22	2.30	9.50	43.18	2.53	8.00
Kazmee ve Tutumluer 2015 (1)	10.00	11.50	12.50	1.25	1.06	-
Kazmee ve Tutumluer 2015 (2)	0.80	5.20	10.70	13.38	3.16	-
Disfani ve ark. 2014	0.10	1.40	7.00	70.00	2.80	-
Neves ve ark. 2013	0.22	1.50	10.75	48.86	0.95	-
Gabr ve Cameron 2012 (1)	0.15	1.50	7.00	46.67	2.14	-
Gabr ve Cameron 2012 (2)	0.25	2.20	8.50	34.00	2.28	-
Perez ve ark. 2013	0.30	2.30	9.00	30.00	1.96	-
Arulrajah ve ark. 2014c (1)	-	-	-	33.30	1.70	-
Arulrajah ve ark. 2014c (2)	-	-	-	46.90	2.70	-
Herrador ve ark. 2012	0.33	2.05	9.90	30.00	1.29	12.00
Blankengel 2005 (1)	0.40	4.30	9.50	23.75	4.87	-
Blankengel 2005 (2)	0.20	0.80	5.00	25.00	0.64	-
D_{10} , D_{30} , D_{60} : %10, %30, %60'ının geçtiği çap, C_u : Uniformluk Katsayısı, C_c : Eğrilik Katsayısı, Y_i : Yassılık İndeksi						

Çizelge 2.4. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Fiziksel Özellikleri

Önceki Çalışmalar	Fiziksel Özellikleri				
	γ_{kmaks} (kN/m^3)	(ω_{opt}) (%)	(γ_s) (kN/m^3)	LA Aşınma (%)	Su Emme (%)
Ayan ve ark. 2014 (1)	18.40	13.71	-	-	-
Ayan ve ark. 2014 (2)	18.90	10.53	-	-	-
Vieira ve Pereira 2015b	-	-	-	-	-
Poon ve Chan 2006 (1)	20.20	11.80	-	-	-
Poon ve Chan 2006 (2)	19.70	12.70	-	-	-
Poon ve Chan 2006 (3)	18.20	16.00	-	-	-
Arulrajah ve ark 2013a (1)	19.13	11.00	27,10 ^k - 26,00 ⁱ	44.00	4,70 ^k - 9,80 ⁱ
Arulrajah ve ark 2013a (2)	19.73	11.25	26,20 ^k - 25,80 ⁱ	41.00	6,20 ^k - 6,90 ⁱ
Cerni ve ark. 2012	19.20	12.00	25.70	37.00	7.72
Park 2003	22.10	9.00	25.27	32.90	1.43
Arulrajah ve ark. 2014a (1)	19.60	12.00	27,60 ^k - 26,50 ⁱ	28.00	4,66 ^k - 9,75 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014a (2)	19.50	12.20	29,00 ^k - 25,00 ⁱ	39.00	8,40 ^k - 18,60 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014a (3)	19.40	12.00	21,50 ^k - 18,00 ⁱ	36.00	5,72 ^k - 7,40 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014a (4)	20.30	11.50	21,90 ^k - 16,70 ⁱ	33.00	6,00 ^k - 8,13 ⁱ
Jimenez ve ark. 2012a	18.80	11.60	21.38	34.00	8.80
Kazmee ve Tutumluer 2015 (1)	-	-	-	33.50	-
Kazmee ve Tutumluer 2015 (2)	-	-	-	31.00	-
Disfani ve ark. 2014	20.38	11.75	-	28.00	-
Neves ve ark. 2013			-	-	-
Gabr ve Cameron 2012 (1)	19.20	11.50	26.00	39.00	8.90
Gabr ve Cameron 2012 (2)	19.90	11.00	25.50	37.00	5.50
Perez ve ark. 2013	22.30	5.60	-	38.00	4.72
Arulrajah ve ark. 2014c (1)	19.60	12.00	27,10 ^k - 26,00 ⁱ	28.00	4,70 ^k - 9,80 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014c (2)	20.20	10.70	26,20 ^k - 25,80 ⁱ	36.00	6,20 ^k - 6,90 ⁱ
Herrador ve ark. 2012	20.50	9.50	-	34.00	-
Blankengel 2005 (1)	18.30	9.70	-	31.00	5.20
Blankengel 2005 (2)	20.20	10.60	-	17.00	6.50
γ_{kmaks} : Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, ω_{opt} : Optimum Su İçeriği, γ_s : Dane Birim Hacim Ağırlığı, LA Aşınma: Los Angeles Aşınma ^k : Kaba Dane, ⁱ : İnce Dane					

Çizelge 2.5. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Geleneksel Laboratuvar Deneyleri

Önceki Çalışmalar	Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Deney			CBR	Serbest Basınç Deneyi
	c (kPa)	ϕ (°)	σ_3 (kPa)	CBR (%)	q_u (MPa)
Ayan ve ark. 2014 (1)	-	-	-	47.0	-
Ayan ve ark. 2014 (2)	-	-	-	29.0	-
Poon ve Chan 2006 (1)	-	-	-	66.0	-
Poon ve Chan 2006 (2)	-	-	-	62.0	-
Poon ve Chan 2006 (3)	-	-	-	43.0	-
Arulrajah ve ark 2013a (1)	44.0	49.0	50-100- 200	118-160	-
Arulrajah ve ark 2013a (2)	41.0	48.0	50-100- 200	123-138	-
Cerni ve ark. 2012	-	-	-	90.0	-
Arulrajah ve ark. 2014a (1)	-	-	-	118.0	-
Arulrajah ve ark. 2014a (2)	-	-	-	66.0	-
Arulrajah ve ark. 2014a (3)	-	-	-	46.0	-
Arulrajah ve ark. 2014a (4)	-	-	-	39.0	-
Jimenez ve ark. 2012a	-	-	-	138.0	-
Disfani ve ark. 2014	-	-	-	505*	4^{7k} - $5,35^{28k*}$
Gabr ve Cameron 2012 (1)	-	-	-	-	0,69- 0,88 ^{28k}
Gabr ve Cameron 2012 (2)	-	-	-	-	0- 0,53 ^{28k}
Arulrajah ve ark. 2014c (1)	53^P - 47^R	0	50-100- 200	118-160	0,310- 0,378
Arulrajah ve ark. 2014c (2)	52^P - 49^R	0	50-100- 200	123-138	0,086- 0,130
Blankengel 2005 (1)	-	-	-	22.0	$1,26^{7k}$
Blankengel 2005 (2)	-	-	-	55.0	$1,82^{7k}$
c: Kohezyon, ϕ : İçsel sürtünme açısı σ_3 : Çevresel Basınç, q_u : Serbest Basınç Mukavemeti, *: Çimento ile Güçlendirilmiş, 7^k : 7 Günlük Kür Sonunda, 28^k : 28 Günlük Kür Sonunda, P : Peak Parametre, R : Rezidual Parametre					

Çizelge 2.6. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Kesme Kutusu Deneyi

Önceki Çalışmalar	Büyük Ölçekli Kesme Kutusu Deneyi		
	c (kPa)	ϕ (°)	σ (kPa)
Sivakumar ve ark. 2004 (1)	0	43	60-120-240-300
Sivakumar ve ark. 2004 (2)	0	43	60-120-240-300
Santos ve Vilar 2008	13	42	50-150-300
Arulrajah ve ark 2013b (1)	95 ^P -80 ^R	65 ^P -39 ^R	30-60-120
Arulrajah ve ark 2013b (2)	87 ^P -30 ^R	57 ^P -41 ^R	30-60-120
Arulrajah ve ark. 2014c (1)	154 ^P -36 ^R	45 ^P -40 ^R	50-100-200
Arulrajah ve ark. 2014c (2)	60 ^P -0 ^R	52 ^P -56 ^R	30-60-120-240
c: Kohezyon, ϕ : İçsel sürtünme açısı σ : Normal Basınç, P: Peak Parametre, R: Rezidual Parametre			

Çizelge 2.7. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzeme Tekrarlı Üç Eksenli Deneyi

Önceki Çalışmalar	Kalıcı Deformasyon			Esneklik Modülü			N	ω (%)
	ϵ_p	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	R_M	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)		
Arulrajah ve ark. 2013a (1)	7304	50	150-450	239-357	50	150-450	40000	(%90 ω_{opt})
Arulrajah ve ark. 2013a (2)	-	-	-	301-319	50	150-450	40000	(%90 ω_{opt})
Cerni ve ark. 2012	3000	70	140				10000	(ω_{opt})
Arulrajah ve ark 2014a (1)	5669	50	150-350	357-342	50	150-350	30000	(%90 ω_{opt})
Arulrajah ve ark 2014a (2)	-	50	150-350	232	50	150-350	30000	(%90 ω_{opt})
Disfani ve ark.. 2014	1500-1180*	50	350-550	498,3-324,5*	50	350-550	30000	(%70 ω_{opt})
Gabr ve Cameron 2012 (1)	5700-3000	196	25-460	390-700	196	25-460	50000	(%90-60 ω_{opt})
Gabr ve Cameron 2012 (2)	5800-2500	196	25-460	410-1020	196	25-460	50000	(%90-60 ω_{opt})
ϵ_p : Kalıcı Deformasyon, R_M : Esneklik Modülü, σ_3 : Deney Çevre Basıncı, σ_d : Deviatorik Basınç, ω : Numune Su İçeriği, N: Tekrarlı Yükleme Sayısı								

Detaylı literatür analizinde, inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin yol temel/alt temel dolgularında olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı birkaç tane arazi çalışması görülmüştür. Bu çalışmalarda genellikle çok az sayıda deneyin yapıldığı birkaç kesit üzerinde araştırma yapılmış ve genellikle dolgu inşa edildikten sonra performansı plaka yükleme deneyi, clegg çarpma değeri testi (CIVT) ve ağırlık düşürme deneyi (FWDT) gibi deneylerle incelenmiştir. Bu az sayıdaki çalışmalarda inşaat yıkıntı atıklarının yol dolgularında doğal agregalar yerine bir alternatif olabileceği öne sürülmüştür. Ancak bu çalışmalarda pahalı ve zaman alıcı arazi deneyleri sebebi ile konunun detaylı olarak irdelenmediği ve dolgunun davranışına etki edebilecek birçok parametrenin (zemin durumu, dolgu kalınlığının, yükleme şekli vb.) detaylı olarak araştırılmadığı görülmüştür. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atıkları meydana çıktığı yerde yeni yapılacak bir binanın altında geri doğuda kullanılabilmesi durumunu detaylı araştıran çalışmaya da rastlanmamıştır. Mevcut çalışmaların daha çok yol dolguları üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Ancak ülkemizde inşaat ve yıkıntı atıkları meydana çıktığı yerde tesviye ve benzeri amaçlarla başta olmak üzere çeşitli amaçlarla kullanımı daha yaygın olduğu düşünülmektedir. Tasarımcı ve uygulamacı mühendislerin bu malzemeyi çeşitli imalatlarda dolgu malzemesi olarak kullanabilmesi durumunun yaygınlaşabilmesi için dolgunun farklı durumlardaki davranışı detaylıca incelenmesi gerektiği ön görülmektedir.

Birçok farklı malzemeyi heterojen bir şekilde içeren inşaat ve yıkıntı atıkları statik yüklemeye maruz kalacak dolgulara veya tekrarlı yüklere maruz yol dolgulara kullanıldığında doğal malzemelere göre bazı deformasyonlar oluşabileceği düşünülmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda bu tür deformasyonları azaltmak içinde bu atıkların geosentetiklerle güçlendirilmesinin de bir alternatif olabileceği belirtilmiştir. Literatürde mevcut geosentetiklerle güçlendirilen inşaat yıkıntı atıkları ile ilgili çalışmalar daha çok büyük ölçekli kesme kutusu ve tekrarlı üç eksenli deney aletinde yapılan denemelerle sınırlı olduğu görülmüştür. Geosentetiklerle güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarından

inşa edilen dolguların statik ve tekrarlı yükler altındaki performansını ve geosentetiklerin tasarım parametrelerinin bu performansa etkisini inceleyen detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın aşağıdaki maddelerde belirtilen sebeplerden dolayı literatüre önemli katkı sağlayacağı ve inşaat yıkıntı atıkların geri dönüştürülerek tekrar kullanılmasını teşvik edeceği düşünülmektedir.

- İnşaat ve yıkıntı atığı dolgu üzerine yapılan model deneylerle birçok farklı parametre araştırılmıştır.
- Ayrı ayrı statik ve tekrarlı yüklemeler yapılarak değerlendirme yapılmıştır.
- Karşılaştırma amaçlı kaliteli doğal agregalar üzerinde de deneyler yapılmıştır.
- İnşaat ve yıkıntı atıklarının farklı geosentetiklerle (geocell, geogrid ve geotekstil) güçlendirilmesi durumundaki davranışını incelenmiştir.
- İnşaat ve yıkıntı atığı dolgunun en elverişsiz zayıf zeminler üzerindeki performansının araştırılmıştır.
- Deney sonuçları üzerinden inşaat ve yıkıntı atıklarının kullanımına ilişkin istatistiksel analizi yapılmıştır.



3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Tez çalışmasında yapılan model deneylerde, ince taneli siltli-killi zemin, biri inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) diğeri doğal agrega karışımı (PMT) olmak üzere iki farklı granüler malzeme, ayırma elemanı olarak geotekstil ve güçlendirme elemanı olarak üç farklı geosentetik donatı kullanılmıştır. Zayıf zemin koşullarını yansıtacak şekilde ayarlanan ince daneli zemin dolgu altındaki tabi zemini oluşturmak için, inşaat yıkıntı atığı ve doğal agrega karışımı dolgu inşası için, geosentetik donatılar inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilen dolgunun güçlendirilmesi kullanılmıştır. Bu kısımda bu malzemeler tanıtılmıştır.

3.1.1. Tabi Zemin

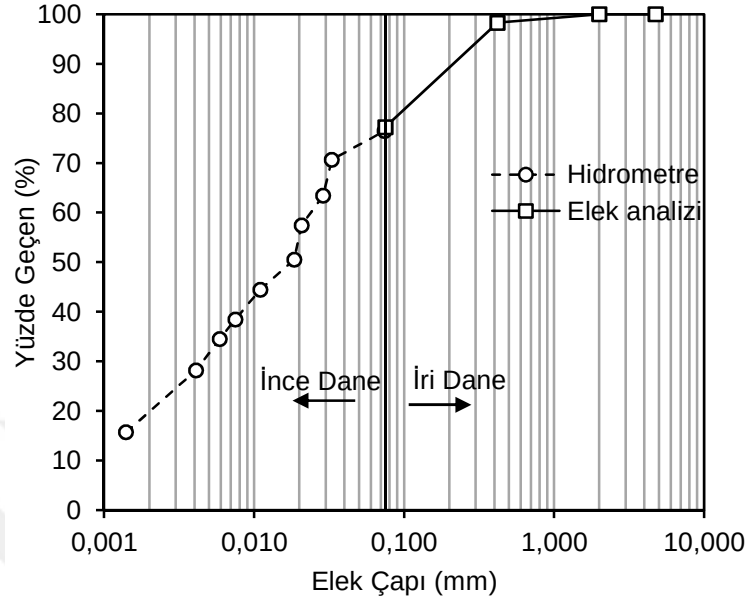
Tez çalışmasındaki model deneylerde inşa edilecek dolgunun oturacağı tabii zemin için daha önceki çalışmalarda da kullanılan Adana-Karataş yolunun, 10. kilometresi civarından yaklaşık 2.5 metre derinlikte mevcut olan ve su içeriğine bağlı olarak zayıf zemin özellikleri gösterebilen ince taneli zemin kullanılmıştır (Demir ve ark, 2016). Bu doğrultuda bölgede muayene çukuru açılarak yeterli miktarda zemin alınmıştır (Şekil 3.1).



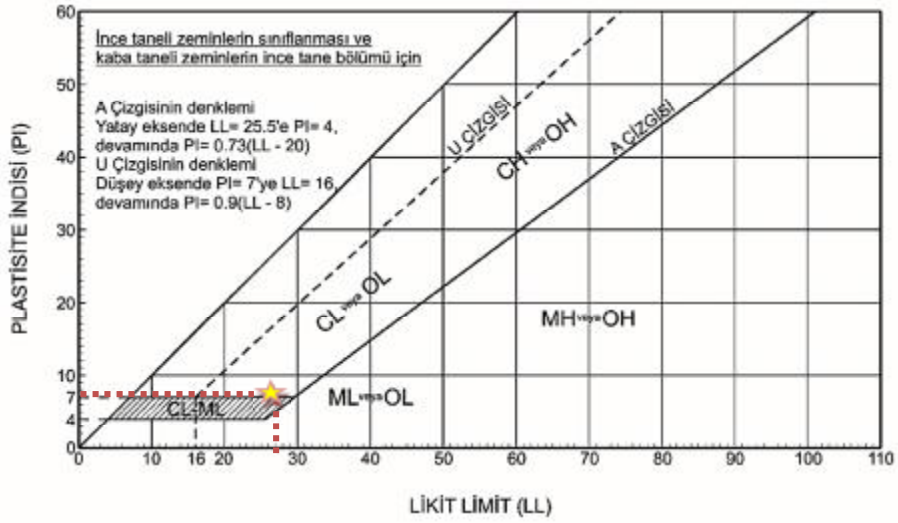
Şekil 3.1. Tabi Zemin Temini (Demir ve ark, 2016)

Araziden alınan zemin üzerinde zeminin fiziksel ve geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için bir takım geleneksel laboratuvar deneyi (elek analizi, hidrometre, piknometre, kıvam limitleri, standart kompaksiyon deneyi, CBR, vane ve üç eksenli deney) gerçekleştirilmiştir.

Zeminin tane çapı dağılımını belirlemek için yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri (ASTM D 422-63) sonucunda elde edilen birleştirilmiş gradasyon eğrisi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Dane birim hacim ağırlığı (özgül ağırlık) tayini için yapılan piknometre deneyi (ASTM D 854-02) sonucunda zeminin dane birim hacim ağırlığı 26.00 kN/m^3 (γ_s) olarak bulunmuştur. Kıvam limitlerini belirlemek için yapılan deneyler sonucunda zeminin likit limiti %28, plastik limiti %21 ve plastisite indeksi ise %7 çıkmıştır. Casagrande plastisite diyagramı kullanılarak zeminin cinsi ML (İnorganik silt ve çok ince kum, siltli veya killi ince kum veya çok az plastisiteli killi silt) olarak bulunmuştur (Şekil 3.3).



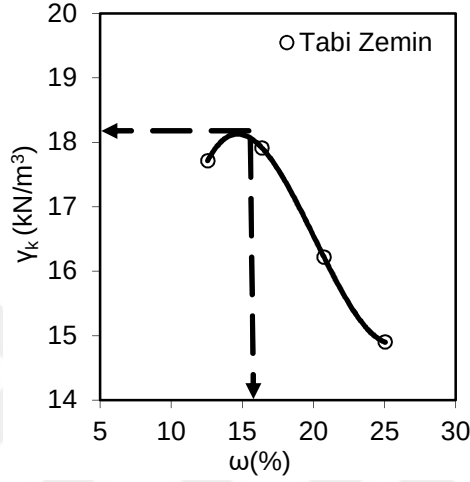
Şekil 3.2. Tabi Zemin Gradasyon Eğrisi



Şekil 3.3. Casagrande Plastisite Kartı Zemin İndirekt Sınıflaması (Casagrande, 1948 ve Howard, 1977'den Geliştirilmiş)

Zeminin optimum su içeriğini ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için yapılan standart kompaksiyon deneyi (ASTM D 698-00)

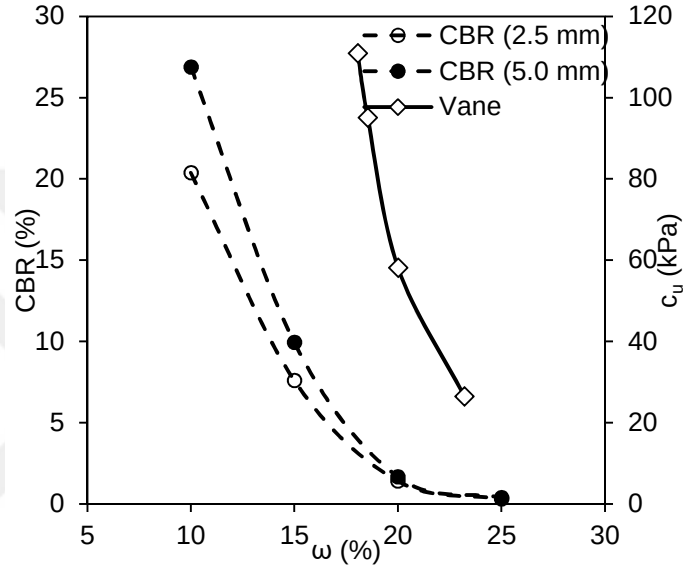
sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlık 18.0 kN/m^3 ($\gamma_{\text{k maks}}$), optimum su içeriği % 16.1 (ω) olarak bulunmuştur. Kompaksiyon eğrisi Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Tabi Zemin Standart Kompaksiyon Eğrisi

Çalışma kapsamında, dolgu altına yerleştirilecek zeminin, zayıf zemin koşullarına sahip olması istenmektedir. Bu durumda yol dolguları başta olmak üzere, dolgu altındaki zeminler için CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değeri bir ölçüt olarak kullanılabilir. Bu sebeple farklı su içeriklerine sahip ($\omega = \%10, \%15, \%20, \%25$) tabi zemin üzerinde CBR deneyleri (ASTM D1883) yapılmıştır. Ayrıca CBR değerinin düşük olduğu %19 ile %23 su içeriği arasındaki dört farklı numuneye vane deneyi yaparak direnajsız kayma mukavemeti (c_u) belirlenmiştir. Zeminin su içeriğine bağlı CBR ve drenajsız kayma mukavemeti değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Su içeriği CBR değişimi grafiğinde görüldüğü gibi optimum su içeriğinden sonra su içeriği artışı ile CBR değeri önemli ölçüde düşmektedir. Vane ve CBR deneyleri sonrasında, dolgu altına yerleştirilecek zeminde zayıf zemin koşullarını oluşturmak için tabii zeminin $\%22.5 \pm 1$ su içeriğine (CBR= $\%1$) getirilmesine karar verilmiştir. Ayrıca bu su içeriğine getirilen

zemin numunesi üzerinde 50 kPa, 100 kPa ve 150 kPa yanal basınçlarda konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deney yapılmış ve deney sonucunda kohezyon 25 kPa (c_u) olarak bulunmuştur. Tabi zemine ait bazı özellikler Çizelge 3.1.'de özet olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Tabi Zemin Su İçeriği, CBR ve Drenajsız Kayma Mukavemeti Değişimi

Çizelge 3.1. Tabi Zemin Geoteknik Özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Likit Limit (LL)	%	28
Plastik Limit (PL)	%	21
Plastisite İndeksi (PI)	%	7
Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)	kN/m ³	26
Maks. Kuru Birim Hacim. Ağırlık (γ_{kmaks})	kN/m ³	18
Optimum Su İçeriği (ω_{opt})	%	16.1
CBR (%22.5 su içeriğinde)	%	1
c_u (%22.5 su içeriğinde)	kPa	25

3.1.2. İnşaat ve Yıkıntı Atığı

Çalışma kapsamında inşaat ve yıkıntı atığı temin etmek için, Çukurova bölgesinde en az on yaşında olan, tüm çevresel koşullara maruz kalmış, deprem

performansı incelenen ve yıkılmasına karar verilen yapılar incelenmiştir. Bu kapsamda Osmaniye'nin Düziçi ilçesindeki yıkılması planlanan çok katlı il özel idaresi binası seçilmiştir. Mevcut bina bodrum, zemin ve yedi normal kattan oluşmaktadır (Şekil 3.6). Binanın deprem performansı incelenirken zemin ve her kattan üçer adet olmak üzere toplamda 24 adet alınan karot numunelerinden elde edilen basınç mukavemetleri Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir. Karot numunelerine göre binanın ortalama beton basınç mukavemeti 14.5 MPa'dır (Ok ve Demir, 2018).



Şekil 3.6. Düziçi İl Özel İdaresi Binası (Ok ve Demir, 2018)

Çizelge 3.2. Beton Basınç Mukavemetleri (Ok ve Demir, 2018)

<i>Kat</i>	<i>Eleman</i>	<i>Basınç Mukavemeti (MPa)</i>	<i>Kat</i>	<i>Eleman</i>	<i>Basınç Mukavemeti (MPa)</i>
Zemin	C-1 Kolon	15.4	4. Kat	B-6 Kolon	11.5
Zemin	B-1 Kolon	15.0	4. Kat	C-7 Kolon	10.7
Zemin	A-1 Kolon	11.0	4. Kat	F-1 Kolon	21.8
1. Kat	B-6 Kolon	16.6	5. Kat	E-4 Kolon	7.4
1. Kat	B-7 Kolon	12,8	5. Kat	B-7 Kolon	12.9
1. Kat	C-2 Kolon	16.0	5. Kat	BC-1 Kolon	14.0
2. Kat	AC-2 Kolon	15.8	6. Kat	B-6 Kolon	11.1
2. Kat	C-2 Kolon	13.0	6. Kat	E-2 Kolon	11.0
2. Kat	BC-3 Kolon	24.0	6. Kat	C-3 Kolon	12.5
3. Kat	B-6 Kolon	17.2	7. Kat	A-8 Kolon	10.2
3. Kat	BE-5 Kolon	20.9	7. Kat	F-8 Kolon	16.2
3. Kat	D-2 Kolon	15.3	7. Kat	E-4 Kolon	14.5
Ortalama Basınç Mukavemeti 14.5 MPa					

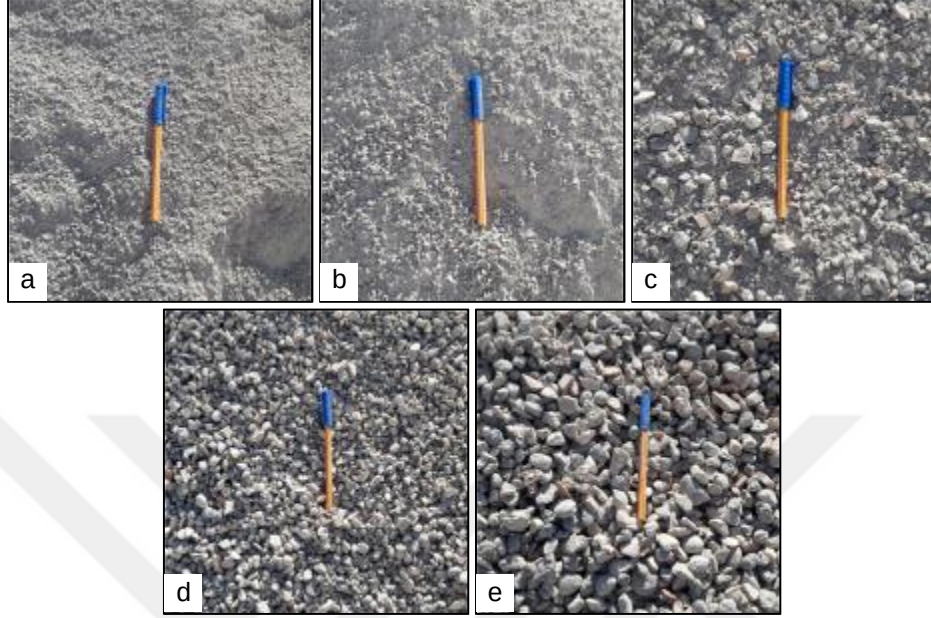
Yıkılması kararlaştırılan deprem performansı yetersiz il özel idaresi binası kontrollü olarak iş makineleri yardımı ile parça parça yıkılmıştır (Şekil 3.7). Binanın yıkılması ile ortaya çıkan molozlarda mevcut donatı ve metal parçalarının çok büyük bir kısmı binayı yıkan firma tarafından ayıklanarak alınmıştır. Sonrasında molozlar kamyonlarla taşınarak uygun bir sahada yere serilmiş ve gözle görülen yabancı maddeler (donatı, metal vb.) ayıklanmıştır. Molozların ayıklanması işleminde asit ayrıştırma yöntemi kullanılmamıştır. Ayıklanan molozlar kamyonlar vasıtası ile taş ocağına taşınmış ve taş ocağında mevcut konkasöre yerleştirilmiştir. Malzeme konkasöre girerken mıknaş sisteminden geçirilmiştir. Konkasör sonrası 0-3 mm, 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-25 mm ve 0-20 mm olmak üzere beş farklı çap aralığına sahip inşaat ve yıkıntı atığı malzeme elde edilmiştir (Şekil 3.8). Farklı gradasyondaki malzemenin her birinden yaklaşık beşer ton kadar malzeme elde edilmiş ve bu malzemeler uygun bir depolama alanına yerleştirilmiştir. Depolanan farklı çaplardaki inşaat ve yıkıntı atığı malzeme Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Binanın Yıkılması (Ok ve Demir, 2018)

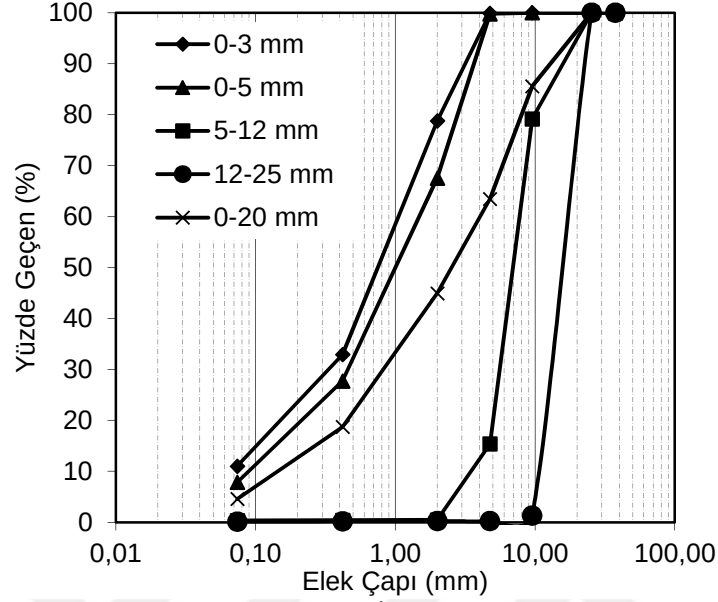


Şekil 3.8. Konkasör İşlemi (Ok ve Demir, 2018)



Şekil 3.9. İnşaat ve Yıkıntı Atığı a)0-3 mm Malzeme b) 0-5 mm Malzeme c) 0-20 mm Malzeme d) 5-12 mm Malzeme e) 12-25 mm Malzeme (Ok ve Demir, 2018)

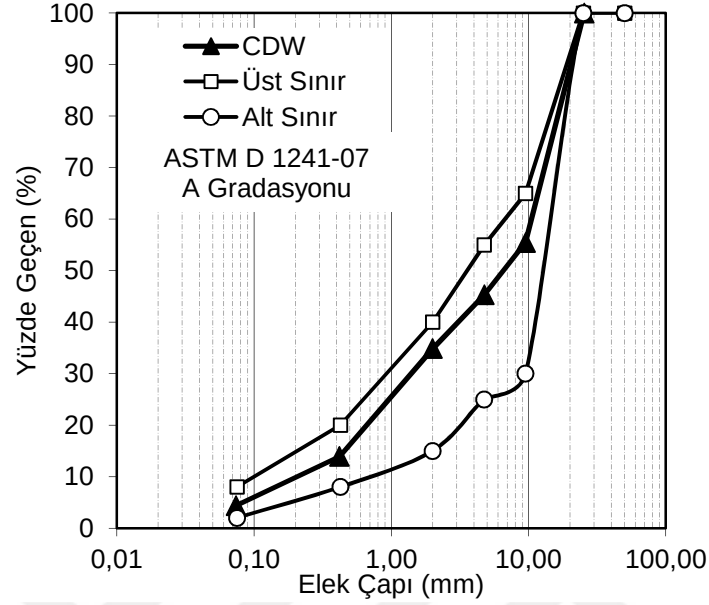
Molozların konkasörde parçalanması işlemi sonrasında elde edilen beş farklı çaptaki inşaat ve yıkıntı atığı malzeme için elek analizi yapılmıştır (Şekil 3.10). Bu atık malzemelerin UCSC'ye ve TS 1500'e göre zemin sınıflandırmaları Çizelge 3.3'de verilmiştir. Elek analizi sonuçlarına göre yol temel ve/veya alt temel dolgularında ya da standart dolgularda kullanmak için uygun gradasyona sahip olabilecek bir karışım hesabı yapılmıştır (ASTM D 1241-07). Elde edilen karışım malzemenin gradasyonu Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Konkasör Sonrası Elde Edilen İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Gradasyonu (Ok ve Demir, 2018)

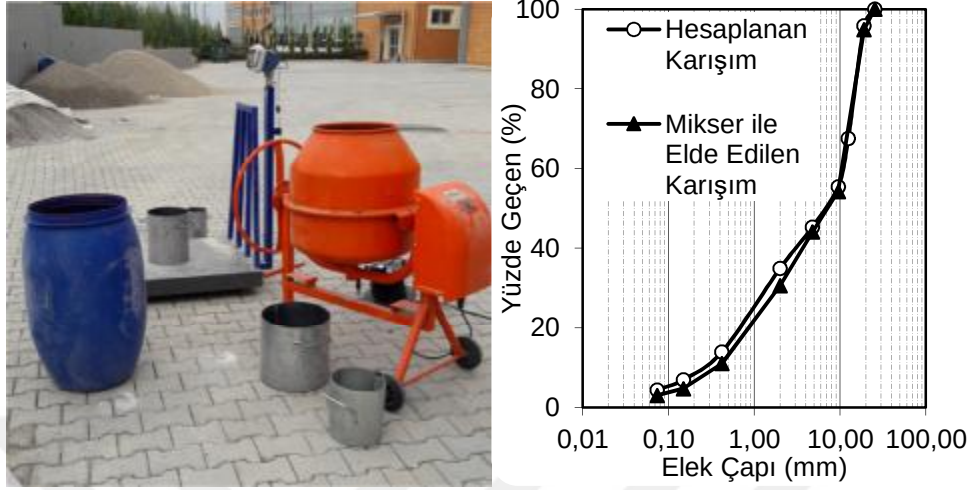
Çizelge 3.3. Konkasör Sonrası Elde Edilen İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Sınıflandırılması

	UCSC	TS 1500
0-3 mm	SW-SM	SW-SM (Düzgün Dane Dağılımlı Kum ve Az Silt ve Az Çakıl)
0-5 mm	SW-SM	SW-SM (Düzgün Dane Dağılımlı Kum ve Az Silt ve Az Çakıl)
5-12 mm	GP	GP (Üniform Çakıl)
12-25 mm	GP	GP (Üniform Çakıl)
0-20 mm	SW	GW (Düzgün Dane Dağılımlı Çakıl ve Az Kum)



Şekil 3.11. Hesap Edilen Karışım Gradasyonu ve Sınır Gradasyonlar (Ok ve Demir, 2018)

Karışım hesabına uygun gradasyonda numuneler elde etmek için farklı çap aralığındaki malzemeler karışım hesabında belirlenen oranlarda mikserde yerleştirilmiş ve mikserde karıştırılmıştır. Belirli oranlarda mikserle karıştırılarak hazırlanan inşaat ve yıkıntı atığı malzemeye tekrar elek analizi yapılmıştır. Mikserle karıştırma işlemi ve karıştırma sonrası elde edilen malzemenin gradasyonu, hesap edilen (hedeflenen) gradasyon ile birlikte Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Karışım yapılarak hazırlanan inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin sınıfı UCSC’ye göre GW, TS 1500’e göre GW “Düzgün Dane Dağılımlı Çakıl” olarak belirlenmiştir.

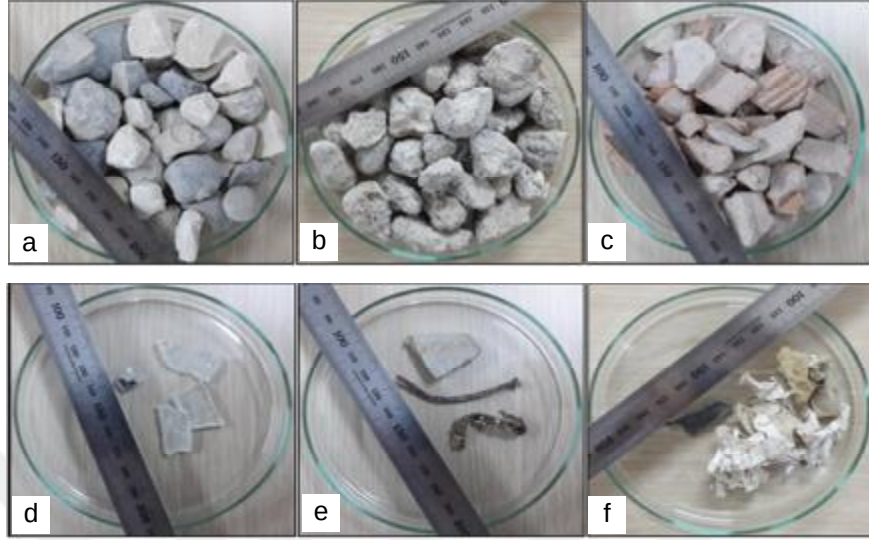


Şekil 3.12. Mikser ile Karıştırma ve Sonrasında Elde Edilen Karışım Gradasyonu

Belirlenene gradasyona göre hazırlanan inşaat ve yıkıntı atığı malzeme içerisinde beton, agrega, tuğla, cam ve bazı diğer malzemeler gibi farklı malzemeler barındırmaktadır. Bu malzemelerin inşaat ve yıkıntı atığı malzeme içerisindeki ağırlıkça yüzdeleri BS EN 933-11:2009 standardına göre belirlenmiştir. İnşaat ve yıkıntı atığı malzemenin barındırdığı farklı malzemelerin ağırlıkça oranları Çizelge 3.4.'te sunulmuştur. Ayrıca içerikte bulunan malzemeler Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. İnşaat ve Yıkıntı Atığı İçerisindeki Malzemelerin Oranı (Ok ve Demir, 2018)

Bileşen	Birim	Değer
Beton, Beton Ürünleri, Harç (R_c)	(%)	36.33
Agrega, Bağlayıcısız Agregas, Hidrolik Bağlı Agregas (R_u)	(%)	52.65
Tuğla, Kalsiyum Silikatlı Duvar Üniteleri (R_b)	(%)	10.53
Cam (R_g)	(%)	0.11
Diğer Malzemeler (Metaller, Yüzmeyen Ahşap Plastik Kavuçuk, Alçı) (X)	(%)	0.38
Yüzen Parçacıklar (FL)	(cm ³ /kg)	0.07

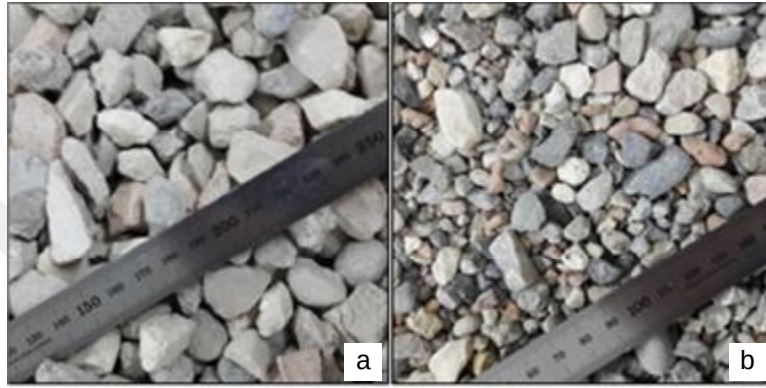


Şekil 3.13. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Bileşenleri a) Agregat b) Beton c) Tuğla d) Cam e) Batan X Malzemesi f) Yüzen X Malzemesi (Ok ve Demir, 2018)

Elektanalizleri sonucunda belli oranlarda mikserde karıştırılarak dolgu dolgu malzemesi olarak kullanmak için uygun gradasyona getirilen inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için bir takım laboratuvar deneyleri (piknometre, su emme, yassılık indeksi, Los Angeles, modifiye kompaksiyon ve CBR) yapılmıştır. Ayrıca modifiye kompaksiyon deneyi sonrasında numuneye tekrar elektanalizi yapılarak malzemenin gradasyon değişimi incelenmiştir.

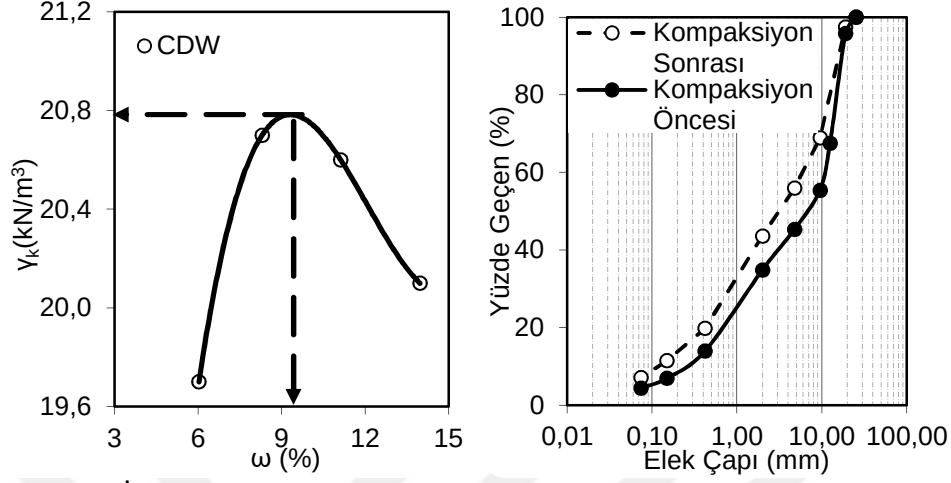
Piknometre ve su emme deneyi sonrasında (ASTM C 127 – 01, ASTM C 128 – 01) malzemenin dane birim hacim ağırlığı (γ_s) ortalama ince danelerde 26.30 kN/m^3 , kaba danelerde 26.10 kN/m^3 , su emmesi ise ince danelerde % 6.82 kaba daneler için % 4.06 çıkmıştır. Malzemenin içerisindeki özellikle çimento bazlı danelerin su emme yüzdesini yükselttiği düşünülmektedir. Malzemenin uygun fraksiyonlara ayrılması sonrasında yapılan yassılık indeksi deneyi sonucunda (TS 9582 EN 933-3) yassılık indeksi %11.68 çıkmıştır. Genel olarak inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin içindeki tuğla (R_b) ve cam (R_g) parçalarının, beton (R_c) ve agregat (R_u) parçalarına göre daha yassı danelerden oluştuğu görülmüştür (Ok ve Demir,

2018). Los Angeles deneyi sonucunda (ASTM C 131 – 03) ise, malzemenin aşınması %33.58 çıkmıştır. Deney sonucunda atık malzeme içindeki beton (R_c), tuğla (R_b) ve cam (R_g) parçalarının, agregata (R_u) danelerine göre daha çok parçalandığı görülmüştür. Los Angeles deneyi öncesi ve sonrası danelerin görüntüsü Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



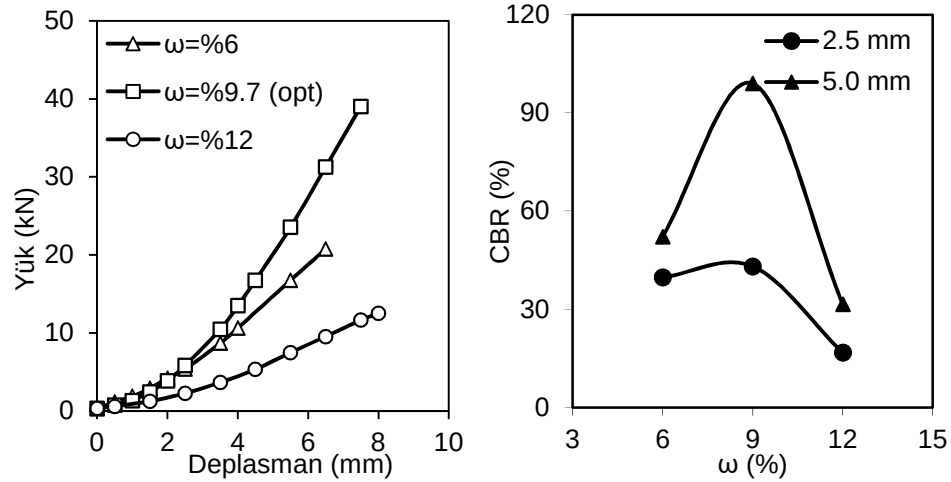
Şekil 3.14. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Los Angeles a) Öncesi b) Sonrası (1.7 mm Elek Üzeri) (Ok ve Demir, 2018)

Modifiye kompaksiyon deneyi sonucunda (ASTM D 1557) optimum su içeriği (ω_{opt}) % 9.7 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) 20.77 kN/m^3 olarak bulunmuştur. Malzemenin yüksek olan su emme yüzdesi, özellikle optimum su içeriği değerini arttırdığı düşünülmektedir. Kompaksiyon eğrisi ve kompaksiyonun danelerin gradasyonuna etkisini belirlemek için deney öncesi ve sonrası yapılan elek analizleri sonucu Şekil 3.15’te gösterilmiştir. Deney öncesi ve sonrası yapılan elek analizleri sonucunda belirgin bir gradasyon değişimine rastlanmamıştır.



Şekil 3.15. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Kompaksiyon Eğrisi ve Gradasyon Değişimi

Optimum (%9.7), % 6 ve % 12 su içeriklerinde olmak üzere farklı su içeriklerinde yapılan CBR deneyi sonucunda (ASTM D 1883 – 99) elde edilen yük deformasyon eğrileri ve CBR su içeriği grafiği Şekil 3.16’da verilmiştir. Malzemenin optimum su içeriğindeki CBR değeri % 99.98 olarak bulunmuştur. İnşaat ve yıkıntı atığı malzemenin genel özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.16. İnşaat ve Yıkıntı Atığı CBR Deneyi Grafikleri (Ok ve Demir, 2018)

Çizelge 3.5. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Genel Özellikleri (Ok ve Demir, 2018)

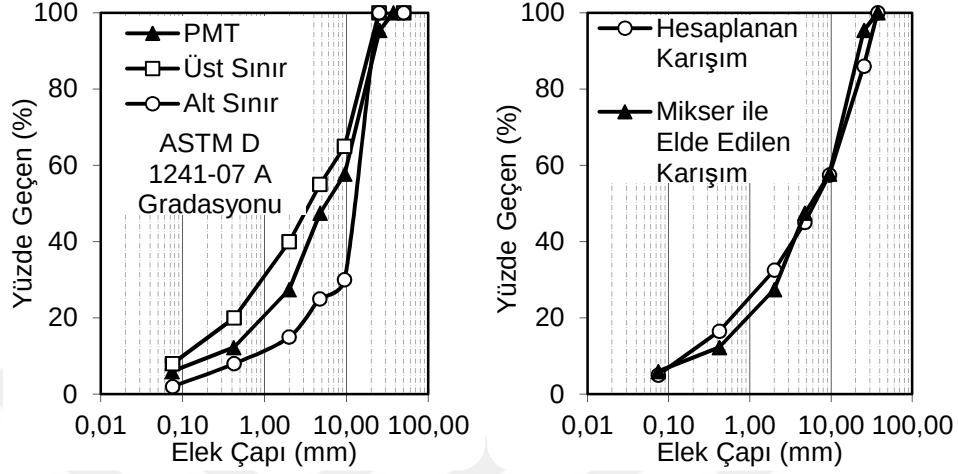
Özellik	Birim	Değer

Üniformluk Katsayısı (C_u)	%	41.87
Eğrilik Katsayısı (C_c)	%	1.06
Yassılık İndeksi	%	11.68
Los Angeles Aşınması (LA)	%	33.58
Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)	kN/m ³	26.30 ¹ -26.10 ^k
Su emme	%	6.82 ¹ -4.06 ^k
Maks. Kuru Birim Hacim. Ağırlık (γ_{kmaks})	kN/m ³	20.77
Optimum Su İçeriği (w_{opt})	%	9.7
CBR	%	99.98
¹ İnce Dane (4.75 mm elek altı), ^k Kaba Dane (4.75 mm elek üzeri)		

KTŞ 2013'e göre inşaat yıkıntı atığı malzemenin Los Angeles aşınma yüzdesi, yassılık indeksi ve CBR değeri temel alttemel dolgularında dolgu malzemesi olarak kullanmak için uygun iken, su emme yüzdesi biraz fazladır.

3.1.3. Doğal Agregalar Karışımı

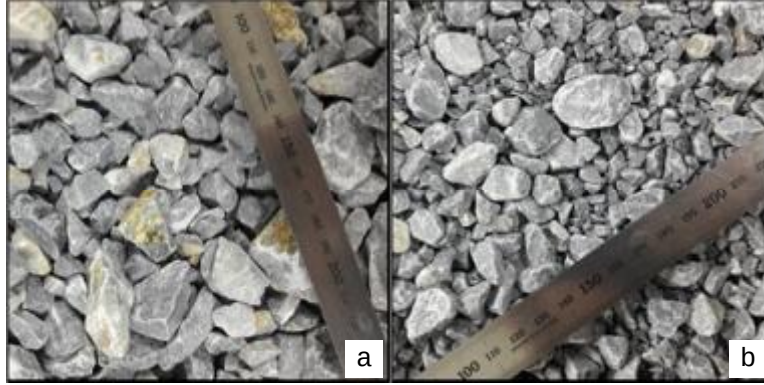
Çalışma kapsamında inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden elde edilen deney sonuçlarının kıyaslanması için dolgularda sıkça kullanılan doğal agregalar kullanılmıştır. Bu sebeple Mersin/Tarsus Sağlıklı Taş Ocağından farklı çaplarda doğal agregalar temin edilmiştir. Bu farklı çaplardaki agregalarda özellikle yol dolguları olmak üzere dolgularda yaygın olarak kullanılan bir gradasyon elde etmek için karışım hesabı yapılmıştır (ASTM D 1241-07). Karışım hesabına uygun gradasyonda numuneler elde etmek için farklı çaplara sahip doğal agregalar karışım hesabında belirlenen oranlarda mikserde yerleştirilmiş ve mikserde karıştırılarak, granüler doğal dolgu malzemesi (plentmiks temel-PMT) oluşturulmuştur. Mikserle karıştırma işlemi, inşaat ve yıkıntı atıklarını hazırlarken yapılan karıştırma işlemi ile aynı şekilde yürütülmüştür. Karıştırma işlemi sonrası elde edilen karışıma elek analizi (ASTM D 422-63) yapılmıştır. Hesap edilen (hedeflenen) gradasyon ile birlikte karıştırma sonrası elde edilen granüler doğal agrega karışımı (PMT) gradasyonu Şekil 3.17'de gösterilmiştir. PMT malzeme, UCSC'ye göre GW, TS 1500'e göre GW düzgün dane dağılımlı çakıl ve az kum olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.17. Doğal Agrega Karışımı Gradasyonu

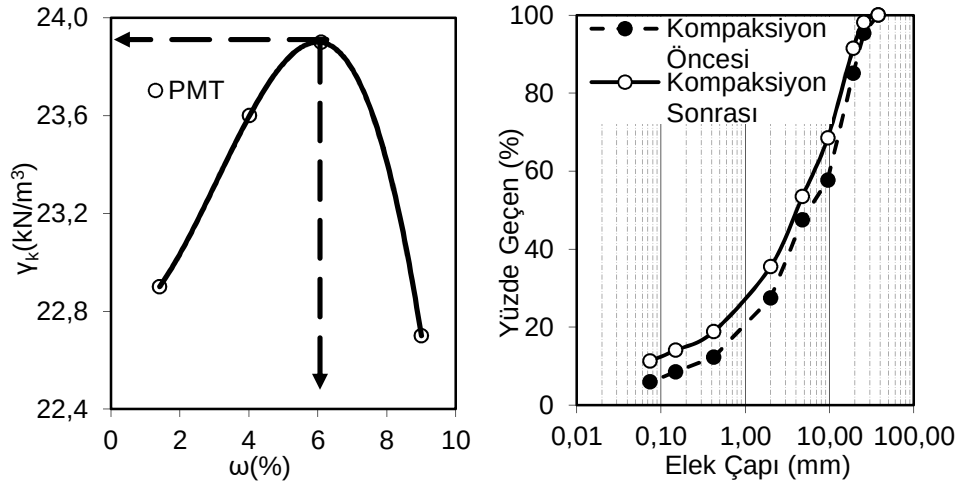
Elek analizleri sonucunda belli oranlarda mikserde karıştırılarak uygun gradasyona getirilen doğal agrega karışımı malzemenin (PMT), fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için bir takım laboratuvar deneyleri (piknometre, su emme, yassılık indeksi, Los Angeles, modifiye kompaksiyon ve CBR) yapılmıştır. Ayrıca modifiye kompaksiyon deneyi sonrasında numuneye tekrar elek analizi yapılarak malzemenin gradasyon değişimi incelenmiştir.

Piknometre ve su emme deneyi sonrasında (ASTM C 127 – 01, ASTM C 128 – 01) malzemenin dane birim hacim ağırlığı (γ_s) ortalama ince danelerde 26.90 kN/m³, kaba danelerde 27.10 kN/m³, su emmesi ise ince danelerde % 0.40 kaba daneler için % 0.36 çıkmıştır. Malzemenin uygun fraksiyonlara ayrılması sonrasında yapılan yassılık indeksi deneyi sonucunda (TS 9582 EN 933-3) yassılık indeksi %12.66 çıkmıştır. Los Angeles deneyi sonucunda (ASTM C 131 – 03) ise, malzemenin aşınması %23.40 çıkmıştır. Los Angeles deneyi öncesi ve sonrası danelerin görüntüsü Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



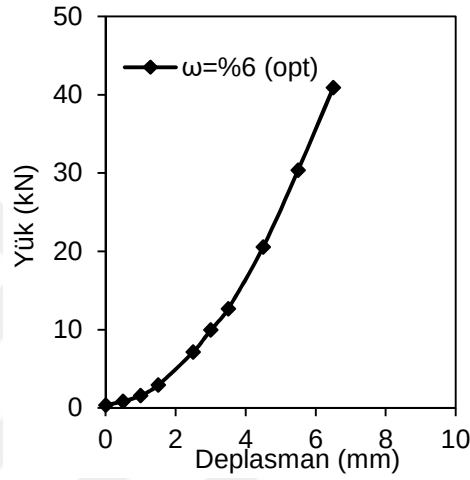
Şekil 3.18. Doğal Agrega Los Angeles a) Öncesi b) Sonrası (1.7 mm Elek Üzeri)

Modifiye kompaksiyon deneyi sonucunda (ASTM D 1557) optimum su içeriği (ω_{opt}) % 6.0 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) 23.90 kN/m³, olarak bulunmuştur. Kompaksiyon eğrisi ve kompaksiyonun danelerin gradasyonuna etkisini belirlemek için deney öncesi ve sonrası yapılan elek analizleri sonucu Şekil 3.19’da gösterilmiştir. Deney öncesi ve sonrası yapılan elek analizleri sonucunda belirgin bir gradasyon değişimine rastlanmamıştır.



Şekil 3.19. Doğal Agrega Karışımı Kompaksiyon Eğrisi ve Gradasyon Değişimi

Optimum (%6) su içeriğindeki yapılan CBR deneyi sonucunda (ASTM D 1883 – 99) elde edilen yük deformasyon eğrisi 3.20’de verilmiştir. Malzemenin optimum su içeriğindeki CBR değeri % 125.16 olarak bulunmuştur. Doğal agregadan karışımından elde edilen malzemenin (PMT) genel özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.20. Doğal Agregası Karışımı CBR Deneyi Grafiği

Çizelge 3.6. Doğal Agregası Karışımı Genel Özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Üniformluk Katsayısı (C_u)	%	35.88
Eğrilik Katsayısı (C_c)	%	1.89
Yassılık İndeksi	%	12.66
Los Angeles Aşınması (LA)	%	23.40
Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)	kN/m^3	26.90^I - 27.10^K
Su emme	%	0.40^I - 0.36^K
Maks. Kuru Birim Hacim. Ağırlık (γ_{kmax})	kN/m^3	23.90
Optimum Su İçeriği (ω_{opt})	%	6.0
CBR	%	125.16
^I İnce Dane (4.75 mm elek altı), ^K Kaba Dane (4.75 mm elek üzeri)		

KTŞ 2013’e göre doğal agregası karışımı malzemenin Los Angeles aşınma yüzdesi, yassılık indeksi, CBR değeri ve su emme yüzdesi temel alttemel dolgularında dolgu malzemesi olarak kullanmak için uygundur.

3.1.4. Geosentetik Elemanlar

Çalışma kapsamında yapılan model deneylerde zayıf zemin üzerine, inşaat ve yıkıntı atıkları ile inşa edilen dolgunun, doğal agrega karışımından inşa edilen dolgunun performansını yakalayabilmesi için, geotekstil (600 g/m^2), geogrid (üç yönlü) ve geocell (petek) olmak üzere üç farklı geosentetik güçlendirme kullanılmıştır. Ayrıca deneylerde zayıf zemin ile dolgu tabakasını ayırmak için geotekstil (200 g/m^2) kullanılmıştır.

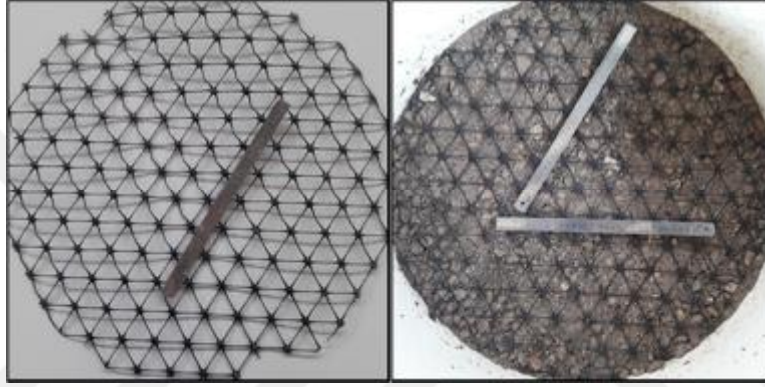
Yerli bir firmalardan güçlendirme amacı ile 50 mm yüksekliğine sahip geocell temin edilmiştir. Geocell, bazı deneylerde yüksekliği ve bazı deneyler de ise hücre alanı azaltılarak kullanılmıştır. Geocellin yüksekliği ortadan keserek azaltılırken, hücre alanı her bağlantı noktasında iki adet olmak üzere plastik kelepçeler yardımı ile azaltılmıştır. Yüksekliği 50 mm olan ve hücre alanı plastik kelepçelerle azaltılmış geocellin görüntüsü Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Geocellin özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir. Başka bir firmadan güçlendirme amacı ile eşkenar üçgen deliklere sahip, bir kenarı 40 mm olan üç yönlü (triaxial) geogrid temin edilmiştir. Geogridin görüntüsü Şekil 3.22’de özellikleri ise Çizelge 3.8’de verilmiştir. Yerli bir firmadan güçlendirme amacı ile geotekstil (600 g/m^2) ve zayıf zemin ile dolgu tabakasını ayırma amacı ile geotekstil (200 g/m^2) temin edilmiştir. Geotekstillerin görüntüsü Şekil 3.23’te özellikleri ise Çizelge 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.21. Geocell Donatı (Hücre Alanı Azaltılmış)

Çizelge 3.7. Geocell Donatı Genel Özellikleri

Özellik	Geocell (Hücre alanı normal)	Geocell (Hücre alanı azaltılmış)
Hammadde	HDPE	HDPE
Nominal Hücre Uzunluğu (mm/mm)	210/250	105x125
Hücre Alanı (cm ²)	275	68.75
Hücre Yüksekliği (mm)	50, 25	50, 25
Kalınlık (mm)	2	2
Polimer Yoğunluğu (g/cm ³)	0.935-0.965	0.935-0.965



Şekil 3.22. Geogrid Donatı

Çizelge 3.8. Geogrid Donatı Genel Özellikleri

Özellik	Geogrid
Hammadde	PP
Açıklık Şekli	Üçgen
Kenar Uzunlukları (mm/mm/mm)	40/40/40
Kalınlık (mm)	1.1
Çekme Dayanımı (% 0.5 deformasyonda) (kN/m)	225



Şekil 3.23. Geotekstil Donatı

Çizelge 3.9. Geotekstillerin Genel Özellikleri

Özellik	Geotekstil (Ayırma amaçlı)	Geocell (Güçlendirme Amaçlı)
Ham madde	PP	PP
Tip	Örgüsüz	Örgüsüz
Birim Ağırlık (g/cm ²)	200	600
Kalınlık (mm)	1	4.2
Gözenek Açıklığı (mm)	0.13	0.08
Çekme Dayanımı (İD/İDD) (kN/m)	11/13	31/33
Statik Delinme Dayanımı (N)	2000	6000
Dinamik Delinme Dayanımı (mm)	24	2
İD: İmalat Doğrultusu, İDD: İmalat Doğrultusuna Dik		

3.1.5. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında mevcut deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bütün deneyler, eksenel simetri koşullar hakim olacak şekilde yapılmıştır. Deney düzeneği, yükleme çerçevesi, yükleme çerçevesine sabit yükleme motoru (motor kontrollü hidrolik krikö), deney tankı (alt plakaya sabitlenmiş) ile birlikte yük hücresi (load cell), deplasman ölçer (LVDT), basınç ölçer (basınç transduseri) gibi ölçüm cihazları ve ölçüm cihazlarından gelen verilerin kayıt edilebilmesi için veri kaydetme ünitesi (data logger) ile bilgisayardan oluşmaktadır. Ayrıca deneylerde zeminin deney tankına

yerleştirilebilmesi için sıkıştırma ekipmanları kullanılmıştır. Deney düzeneğinin görüntüsü ve şematik çizimi sırası ile Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Deney Düzeneği Görüntüsü

deney tankı tabanından en üst seviyesine kadar 50 mm aralıklarla ölçeklendirilmiştir (Şekil3.26).



Şekil 3.26. Deney Tankı

3.1.5.3. Model Temel Plakası

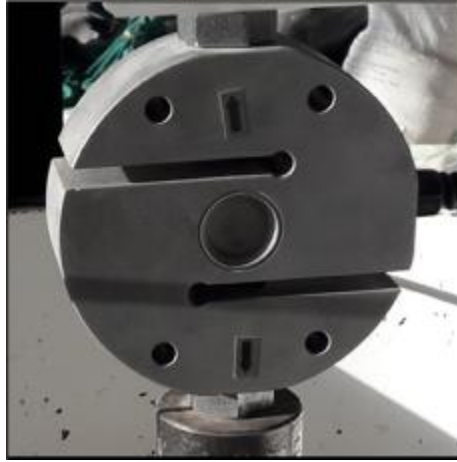
Tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm deneylerde dairesel temel tipi esas alınmıştır. Model temel olarak 150 mm çapında, 20.5 mm kalınlığındaki rijit çelik plaka kullanılmıştır (Şekil 3.27). Deney sırasında yükün temel plakasına üniform olarak etkimesi için yük, temele çelik bilye vasıtasıyla aktarılmıştır (Şekil 3.27).



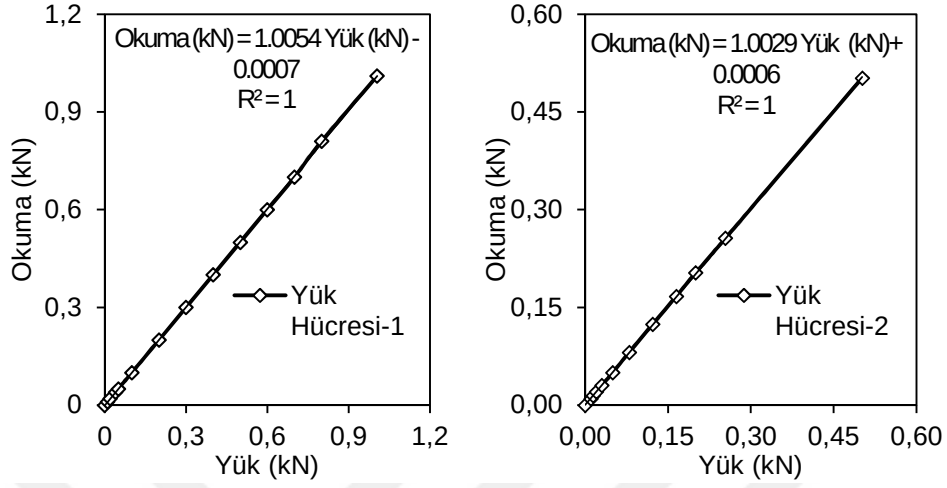
Şekil 3.27. Model Temel Plakası

3.1.5.4. Yük Hücresi (Load Cell)

Deneylerde, model temel plakasına uygulanan yük değerlerini ölçmek için kapasiteleri 50 kN (Yük Hücresi-1) ve 10 kN (Yük Hücresi-2) olan iki adet s tipi yük hücresi (ESİT) kullanılmıştır. Anlık yük değerleri yük hücresindeki yük transduceri yardımı ile data logger cihazında kayıt edilmiştir. Yük hücresinin bir görüntüsü ve yük hücrelerinin kalibrasyon eğrileri sırası ile Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.28. Yük Hücresi



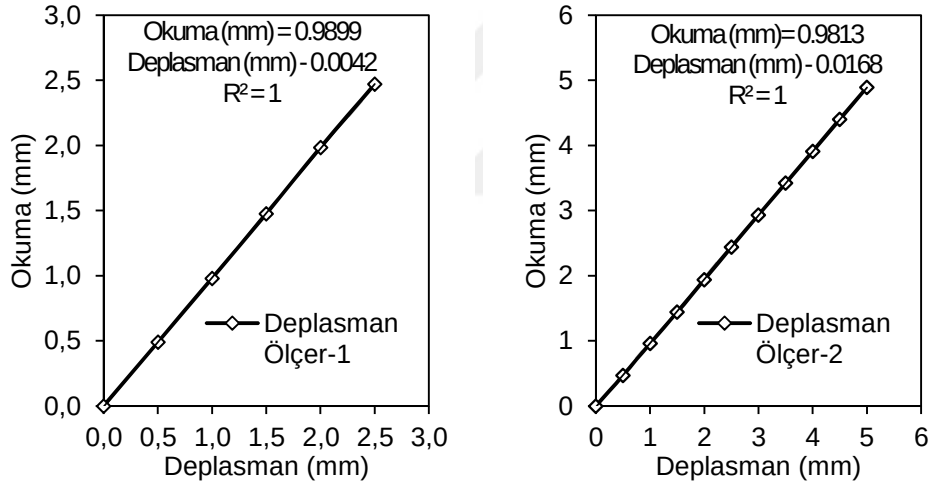
Şekil 3.29. Yük Hücreleri Kalibrasyon Grafikleri

3.1.5.5. Deplasman Ölçer (LVDT)

Deneylerde, model temel plakasına uygulanan yük sonrasında temel tabanında meydana gelecek deplasmanların ölçülebilmesi için kapasiteleri 2.5 mm (Deplasman Ölçer-1) ve 5.0 mm (Deplasman Ölçer-2) olan iki adet deplasman ölçer (AHLBORN) kullanılmıştır. Deplasman ölçerler deney tankına mıknatıslı ayaklarla sabitlenmiştir. Statik yüklemeli deneylerde, temel plakası tabanında oluşan deplasmanlar, model temel merkezine eşit mesafedeki iki farklı noktada ölçülmüş ve oturma değeri olarak bu iki okumanın ortalaması alınmıştır. Tekrarlı yüklemeli deneylerde ise belirlenmiş yük kademesindeki deplasmanlar ölçülmüştür. Deplasman ölçerin bir görüntüsü ve deplasman ölçerlerin kalibrasyon eğrileri sırası ile Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3.30. Deplasman Ölçer



Şekil 3.31. Deplasman Ölçerlerin Kalibrasyon Grafikleri

3.1.5.6. Basınç Ölçer (Basınç Transduseri)

Deneylerde tankın çeperine yerleştirilen basınç ölçer (Geokon 3500-2X-250kPa) ile deney tankının kenarlarında sınır etkisi oluşma durumu incelenmiştir. Bu sebeple 250 kPa kapasiteli (0.1 Pa hassasiyetli) basınç ölçer kullanılmıştır

(Şekil 3.32). Deneylerde yükleme sırasında herhangi bir basınç değişimine rastlanmamıştır.



Şekil 3.32. Basınç Ölçer

3.1.5.7. Veri Kayıt Etme Ünitesi (Data Logger) ve Bilgisayar

Deneylerde yük hücresi, deplasman ölçerler ve basınç ölçerden 29 kanal girişli veri kayıt etme ünitesine (AHLBORN ALMEMO 5690-1M) gelen datalar bir yazılım (ALMEMO AMR WinControl 6) ile bilgisayar ortamında sayısal değerlere dönüştürülmüş ve bilgisayara kayıt edilmiştir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Veri Kayıt Etme Ünitesi ve Bilgisayar

3.1.5.8. Sıkıştırma Ekipmanları (Hilti ve Tokmak)

Deneylerde zayıf zemin tabakası oluşturmak için ince daneli zemin özel olarak yaptırılan tokmak vasıtası (8 kg) ile sabit enerji altında (20 cm yükseklikten düşürülerek) 5'er cm'lik tabakalar halinde sıkıştırılarak kasaya yerleştirilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda her tabaka için düşü sayısı 10 olarak sabitlenmiştir. Ayrıca deneylerde, inşaat ve yıkıntı atığı ve doğal agrega karışımı malzemeler belli bir sıklık oranında kasa içerisine tabaka tabaka yerleştirilerek dolgu tabakası oluşturulmuştur. Bu amaçla, deney kasasının duvarları ölçeklendirilmiştir. Her bir granüler dolgu tabakası, elektrikle çalışan BOSCH GBH 4-32 DFR titreşim cihazı ile önceden belirlenen derinliğe ulaşınca kadar sıkıştırılmıştır (Şekil 5.34). Sıkıştırma sırasında üniform sıklık elde etmek amacıyla, titreşim cihazının uç kısmına 12cm çapında ve 2cm kalınlığında derlin malzemedan yapılmış bir plaka monte edilmiştir.



Şekil 3.34. Sıkıştırma Ekipmanları (Hilti ve Tokmak)

3.2. Metod

Deneyisel çalışmada deney tankı içerisine yerleştirilen zayıf zeminin üzerine, geosentetik güçlendirmeli ve güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atıklarından dolgu inşa edilerek statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca sonuçların karşılaştırılması için aynı zayıf zemin üzerine doğal agrega karışımından dolgu inşa edilerek benzer yüklemeli deneyler yapılmıştır.

3.2.1. Deney Süreci

Tekrarlı ve statik plaka yükleme deneylerinde, deneyin gerçekleştirilmesi için yapılan işlemler aşağıda sıralanmıştır.

- Araziden getirilen ince daneli zemin, dönüşüm işlemleri sonrasında hazırlanan inşaat ve yıkıntı atığı malzeme ve doğal agrega karışımı malzeme etüvde kurutulmuştur.
- Etüvden çıkarılan ince daneli zemin lastik tokmaklarla parçalanmış ve 10'ar kg'lık kısımlara ayrılmış, %19 ve %22.5 su içeriğine getirmek için etüv kurusu parçalanmış zemine ayrı ayrı belirlenen kadar su karıştırılmış,

bir gün kür odasında bekletilmiş ve her karışımdan su içeriği örnekleri alınmıştır.

· Etüvden çıkarılan inşaat ve yıkıntı atığı malzeme ve doğal agrega karışımı malzeme 15'er kg'lık kısımlara ayrılmış, optimum su içeriğine getirmek için ayrı ayrı etüv kurusu malzeme mikser yardımıyla su ile karıştırılmış (Şekil 3.35), bir gün kür odasında bekletilmiş ve her karışımdan su içeriği örnekleri alınmıştır.



Şekil 3.35. Mikserde Su ile Karıştırma İşlemi

· İnce daneli zeminin kasaya 5 cm'lik tabakalar halinde, su içeriği %19 ve %22.5 olan ince daneli zeminin doğal birim hacim ağırlıkları sırası ile 20.2 kN/m³ ve 19.0 kN/m³ olacak şekilde yerleştirilmiştir. Tabakalar yerleştirilirken her tabaka için ağırlık kontrolü, su içeriği kontrolü ve mukavemet kontrolü yapılmıştır. Bu sebeple, önce ince daneli zemin tartılarak her tabaka için gerekli zemin miktarı ayrılmış (ağırlık kontrolü), sonra her tabaka için ayrılan zeminin farklı noktalarından su içeriği örnekleri (su içeriği kontrolü) alınmıştır (Şekil 3.36). Daha sonra bir tabaka için ayrılan zemin el ile kasaya yerleştirilerek tokmakla sıkıştırılmış, sıkıştırılan zeminin tabaka kalınlığı kontrol edilmiş ve dört farklı noktada

vane deneyi ve dört farklı noktada penetrometre deneyi (mukavemet kontrolü) yapılmıştır (Şekil 3.37). En son tabaka yüzey düzeltilmiş ve yüzeyin düzgünlüğü su terazisi ile kontrol edilmiştir (Şekil 3.38). Bu işlemler tekrar edilerek ince daneli zemin kontrollü bir şekilde tabaka tabaka istenilen yüksekliğe kadar kasaya yerleştirilmiştir.



Şekil 3.36. Ağırılık ve Su İçeriği Kontrolü İşlemi



Şekil 3.37. Mukavemet Kontrolü İşlemi (Vane ve Penetrometre Deneyi)



Şekil 3.38. Yüzey Düzgünlüğü Kontrolü

- İnce daneli zeminin su içeriği %19 ve %22.5 iken üzerinde herhangi bir dolgu tabakası olmadan statik yüklemeli deneyler yapılmış, daha sonra dolgulu statik ve tekrarlı yüklemeli deneyler için doğal zemin su içeriğinin %22.5 olmasına karar verilmiştir. Kalan bütün deneylerde doğal zemin olarak su içeriği %22.5 olan ince daneli zemin kullanılmıştır.
- Zayıf zemin koşullarını sağlayacak şekilde hazırlanan (CBR %1) doğal zemin üzerine, optimum su içeriğine getirilen inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) veya doğal agrega karışımı (PMT) kasaya 5 cm'lik tabakalar halinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Tabakalar yerleştirilirken her tabaka için ağırlık ve su içeriği kontrolü ve yapılmıştır. Bu sebeple, önce granüler dolgu malzemesi tartılarak her tabaka için gerekli zemin miktarı ayrılmış (ağırlık kontrolü), sonra her tabaka için ayrılan zeminin farklı noktalarından su içeriği örnekleri (su içeriği kontrolü) alınmıştır. Daha sonra bir tabaka için ayrılan zemin el ile kasaya yerleştirilerek dinamik yöntem ile (elektrikle çalışan BOSH GBH 4-32 DFR hilti kullanılarak) sıkıştırılmış ve sıkıştırılan zeminin tabaka kalınlığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.39). Her bir tabaka dolgu yüzeyinin düzgün olup olmadığı su terazisi yardımıyla kontrol

edilmiştir. Bu şekilde dolgu malzemesi tabaka tabaka istenilen kalınlıkta yerleştirilmiştir.



Şekil 3.39. Granüler Malzemelerin Sıkıştırılma İşlemi (CDW ve PMT)

· Zayıf zemin üzerine inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden dolgu tabakası yerleştirilen bazı deneylerde dolgunun güçlendirmesi amacı ile geosentetikler kullanılmıştır. Bu deneylerde dolgu içerisine daha önceden belirlenmiş donatı konfigürasyonuna göre donatı yerleştirilmiştir. Dolgu donatının yerleştirileceği derinliğe kadar donatısız deneylerdeki gibi yerleştirilmiş ve sıkıştırılmış, sonra sıkıştırılan dolgu üzerine donatı yerleştirilmiş ve üzerine tekrar donatısız deneylerdeki gibi dolgu tabakası yerleştirilerek sıkıştırılmıştır (Şekil 3.40).



Şekil 3.40. Donatının Yerleştirilme İşlemi (Geocell ve Geogrid)

- Zayıf zemin ve dolgu tabakası yerleştirildikten sonra dairesel kasanın tam ortasına dairesel model temel yerleştirilmiş ve model temelin durumu su terazisi ile kontrol edilmiştir (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. Model Temelin Yerleştirilmesi İşlemi

- Model temelin üzerindeki oyuğa bilye yerleştirilmiş, sonra yükün eksantrik olmamasına dikkat edilerek model temele statik veya tekrarlı yük uygulanmıştır.

- Deney sonucunda, yükleme sırasında ölçüm aletleri yardımı ile bilgisayara gönderilen deplasman değerleri ile buna karşılık gelen yük ve basınç değerleri bilgisayar ortamında kayıt edilmiştir.
- Kayıt işleminden sonra kasada bulunan dolgu tabakası ve hilti yardımı ile (özel yaptırılan metal kanatlı bir aparat takılarak) zayıf zemin hassas bir şekilde çıkartılarak deney kasası bir sonraki deney için hazırlanmıştır. Kasadan çıkartılan zeminlerden su içeriği örnekleri alınmıştır.
- Çıkartılan dolgu zemin atılmış ve yeni deneyler için dolgu zemin tekrar hazırlanmıştır. Hilti yardımı ile parçalanarak çıkartılan ince daneli zemin ise (zayıf zemin) tekrar karıştırılmış (Şekil 3.42), yoğurulmuş ve üzeri düzgünce branda ile kapatılmış kür tankında bekletilmiştir.
- Yukarıdaki işlemler farklı deneylerde tekrar edilmiştir.



Şekil 3.42. Zayıf Zeminin Çıkartılması İşlemi

3.2.2. Statik Yükleme Deneyler

Deneyisel çalışmada gerçekleştirilen statik yüklemeli deneyler, elektrikli motor yardımı ile sabit 2.33 mm/dk. hızında yapılmıştır. Statik yükleme süreci içerisinde ölçüm aletleri vasıtası ile deplasmana karşılık yük ve basınç değerleri veri kayıt etme ünitesine aktarılmış, deney model temel plaka çapının ($D=150$ mm)

yaklaşık olarak %16'sı kadar deplasman yapınca durdurulmuş ve alınan veriler kayıt edilmiştir.

3.2.3. Tekrarlı Yükleme Deneyleri

Deneyisel çalışmada gerçekleştirilen tekrarlı plaka yükleme deneyleri, yükleme şekli hariç statik yüklemeli deneylerdeki deney şartlarına benzer deney şartları oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde yükleme statik yüklemekten farklı biçimde, trafik yükleri, petrol tankları ve benzeri tekrarlı yükler düşünülerek tekrarlı şekilde gerçekleştirilmiştir. Yükleme plakasına 80 kN'luk çift tekerli eşdeğer dingil yükünü modellemek için yaklaşık olarak 560 kPa'lık basınç (Thakur ve ark., 2012; Yang ve ark., 2012; Abu-Farsakh ve Chen 2011; Acharya 2011), hafif trafik yüklerini de modellemek için dört kademe halinde verilmiştir (Mehrijardi ve ark., 2012). Tekrarlı yükleme 140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa olmak üzere dört kademe ve her kademe yaklaşık 10 kere istenilen yüke kadar yükleme, sıfıra kadar boşaltma ve tekrar istenilen yüke kadar yükleme döngüsü şeklinde yapılmıştır. Deneylerden herhangi biri, herhangi bir yükleme aşamasında toplam 50 mm düşey deplasmana ulaştığı anda durdurulmuştur (Mehrijardi ve ark., 2012).

Tekrarlı plaka yükleme deneylerindeki yükleme sistemi ile ilgili bazı açıklamalar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Tez çalışmasının önceki çalışmalar bölümünde araştırmacıların, tekrarlı yüklemelerde uygulanan gerilme seviyesine göre elde edilen kalıcı deformasyon tepkisini üç gruba ayırdıklarına değinilmiştir (Arnold, 2004). Özellikle shakedown tepkisi görülen düşük gerilme düzeyine sahip zeminlerde, tekrarlı yüklemeler sonucu oluşacak kalıcı deformasyonların büyük kısmının ilk yüklemelerde oluşmakta, artan tekrarlı yüklemelerde kalıcı deformasyonlar genellikle azalmakta, daha sonra artan tekrarlı yüklemelerde sistem shakedown'a ulaşıncaya kadar sadece elastik deformasyonlar

görülmektedir (Sharp ve Booker, 1984). Ancak shakedown'a ulaşmış durumda iken gerilme seviyesi arttırılırsa tekrar plastik deformasyonların oluştuğu belirtilmiştir (Sharp ve Booker, 1984). Hafif ve ağır trafik yüklemeleri düşünülerek (Mehrijardi ve ark., 2012), tekrarlı yüklemelerde uygulanan gerilmenin inşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilen dolgunun davranışına etkisini incelemek amacı ile kademeli artan yükleme uygulanmıştır.

· Özellikle tekrarlı yükler sonrasında shakedown tepkisi görülen zeminlerde, kalıcı deformasyonların önemli bir kısmı ilk tekrarlı yüklemelerde oluşmaktadır. Bu sebeple hem zeminin ilk tekrarlı yüklemelere vereceği kalıcı deformasyon tepkisi önemli olmakta hem de zeminin daha sonraki tekrarlı yüklemeler sonucundaki davranışı hakkında bir fikir verebilmektedir. Literatürde mevcut tekrarlı yükleme uygulanan bir çok deneysel çalışmada, uygulanan ilk tekrarlı yüklemeler sonucunda kalıcı deformasyonların dikkate değer bir kısmının oluştuğu belirtilmiştir. Sawwaf ve Nazir (2010) ilk beş tekrarlı yüklemede, Tafreshi ve Dawson (2012) ilk on yüklemede oluşan toplam kalıcı deformasyonların büyük miktarının oluştuğunu ifade etmişlerdir. Mehrijardi ve ark., (2012) çalışmalarında her yük kademesinde 8 ile 10 arası yükleme yapmışlardır. Diğer bazı çalışmalarda da tekrarlı yükler sonucu oluşan toplam kalıcı deformasyonların kayda değer kısmının ilk yüklemeler sonucunda oluştuğu görülmüştür (Yang ve ark., 2012; Thakur ve ark. 2012; Abu-Farsakh ve Chen 2011). Bu sebeplerden dolayı yük kademelerinde 10'ar tekrarlı yükleme uygulanmıştır (Mehrijardi ve ark., 2012).

· Tafreshi ve Dawson (2012) yaptığı çalışmada deneylerdeki statik ve tekrarlı yüklemede yükleme zamanına bağıllık durumunu açıklamışlardır. Çalışmada statik yüklemelerde yükleme hızı genellikle 1-1.5 kPa/s olurken tekrarlı yüklemelerde bu oran 48.72 kPa/s veya 120 kPa/s (haversine gerilme dalgasının ortalama yarısı olarak) olabileceğini, ancak bazı

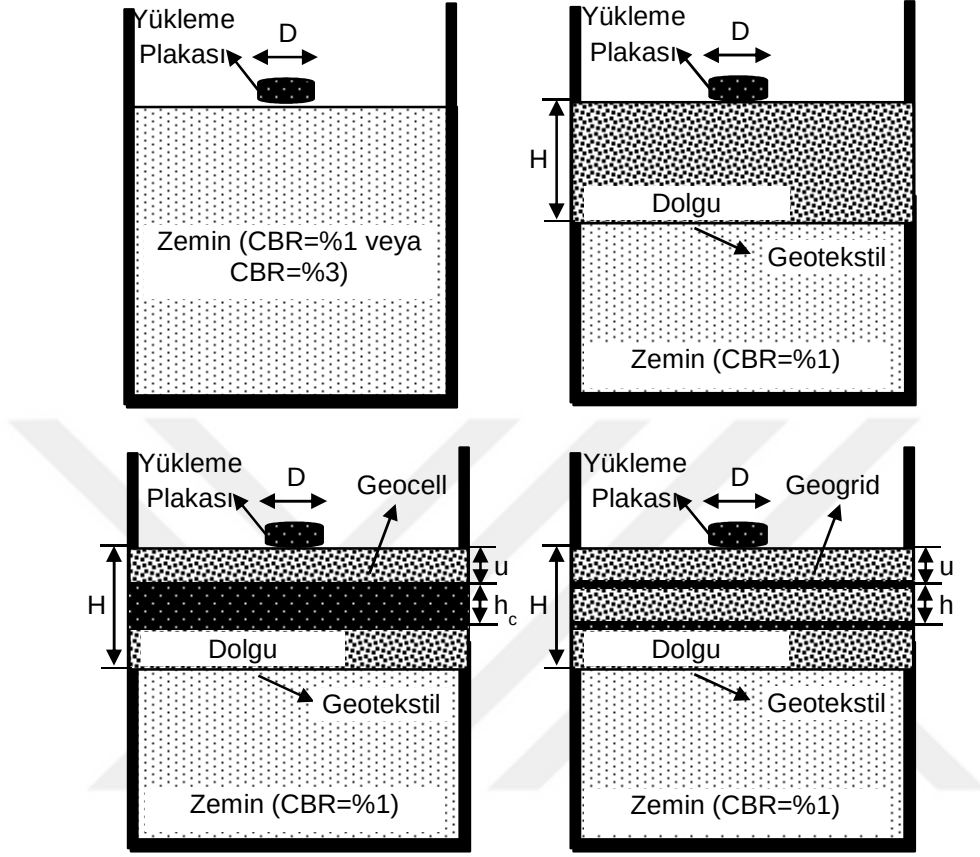
viskozite ve atalet etkilerinden dolayı zemine hızlı yükleme yapıldığında, zeminin aynı miktarda yavaş yüklemeye göre daha rijit davranmasını beklediklerini ifade etmişlerdir. Ayrıca polimer bazlı geosentetikler ile güçlendirilen zeminlerde, polimerin viskozite etkileri ile bu etkinin daha belirgin olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda güçlendirmeli durumda hızlı tekrarlı yükleme ile plastik deformasyonların daha çok azaldığının bunun sebebinin de hızlı yüklemede yüksek esnek dayanıma sahip polimer bazlı geocellin gerilmeyi daha çok üzerine çekerek zemine daha az etki gelmesine sebep olmasından kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Bu sebepten dolayı yavaş tekrarlı yükleme ile elde edilecek deney sonuçlarının, trafik yüklerine maruz kalacak dolgular için güvenli tarafta kalacağı (Tafreshi ve Dawson 2012), petrol tankları gibi tekrarlı yük alan yapıların altındaki dolguları da temsil edebileceği (Sawwaf ve Nazir 2010) düşünülmektedir.

Deneylerde uygulanan tekrarlı yükleme durumuna benzer şekilde, ulaşım yapıları için önerilen bir yükleme yöntemi de TS 5744'te mevcuttur. TS 5744'te tekrarlı yüklere maruz yol yapıları için önerilen tekrarlı plaka yükleme deneyinde, tekrarlı yüklemeyi her yük kademesinde altı kere yükleme boşaltma olacak şekilde üç farklı yük kademesinde yapılmasını tavsiye etmiştir. Ayrıca yük kademelerini ise tahmini olarak 1 mm, 5mm ve 10 mm deformasyon oluşturacak yükler olarak belirlenmesini önermiştir.

3.2.4. Deney Programı

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, 28 tane statik yüklemeli ve 9 tane tekrarlı yüklemeli olmak üzere toplamda 37 deney gerçekleştirilmiştir. Yapılan statik yüklemeli deneylerden 2 tanesi dolgu tabakası olamadan direk zemin (tabii) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Diğer 26 statik yüklemeli deneyde ise zemin (tabii) üzerine inşaat ve yıkıntı atıklarından veya doğal agregadan dolgu

yerleştirilmiştir. Bu 26 deneyden, 3 tanesinde hiç geosenetik kullanılmazken, 8 tanesinde sadece ayırma amaçlı geotekstil (200 g/cm^2), 2 tanesinde de sadece güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/cm^2) kullanılmıştır. Kalan 13 tane deneyde ise dolgu tabakası içinde farklı konfigürasyonlara sahip olarak, 7 tanesinde geocell, 6 tanesinde geogrid güçlendirme kullanılmış ve bu deneylerde ayrıca ayırma amaçlı olarak zayıf zemin ve dolgu tabakası arasına geotekstil (200 g/cm^2) yerleştirilmiştir. Statik yüklemeli deneylere göre, elde edilen optimum konfigürasyonlarda güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarda 9 tekrarlı plaka yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde araştırılan donatı konfigürasyonlarının parametreleri ve gösterimi Şekil 3.43'te verilmiştir. Ayrıca yapılan statik yüklemeli deneyler ve tekrarlı yüklemeli deneyler sırası ile Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11'de açıklanmıştır.



Şekil 3.43. Deneyler ve Donatı Konfigürasyonları

Çizelge 3.10. Statik Yüklemeli Deney Programı

Seri	Dolgu	Donatı Durumu		Sabit	Değişken	Açıklama
		Ayırma	Güç.			
I	-	-	-	-	Zemin CBR (%1 veya %3)	1
II	PMT	Geotekstil 200 (g/m ²)	-	-	H/D=0.33, 0.50, 0.67, 1.00	2
	CDW	Geotekstil 200 (g/m ²)	-	-	H/D=0.33, 0.50, 0.67, 1.00	3
III	CDW	Geotekstil 200 (g/m ²)	Geocell	d/D=0.62	H/D=0.33, 0.50- u/D=0.10, 0.17, 0.33	4
				H/D=0.50, d/D=0.62, u/D=0.10	h _c /D=0.17, 0.33	5
				H/D=0.50, h _c /D=0.17, u/D=0.10	d/D=0.62, 1.25	6
IV	CDW	Geotekstil 200 (g/m ²)	Geogrid	H/D=0.50, N=1	u/D=0.10, 0.17, 0.33	7
				H/D=0.50, u/D=0.17, N=2	h/D=0.10, 0.17, 0.23	8
				H/D=0.50, u/D=0.17, h/D=0.17	N=1, 2	9
V	CDW	-	Geotekstil 600 (g/m ²)	Ara Yüzeyde	H/D=0.33, 0.50	10
		-	-	-	H/D=0.33, 0.50, 0.67	11

1) Zayıf Zemin Değerlendirmesi, 2) PMT kalınlık etkisi, 3) CDW kalınlık etkisi
4) Geocellin temel tabakası içerisindeki yerinin etkisi, 5) Geocellin yüksekliğinin etkisi, 6) Geocellin Açıklığının etkisi, 7) Geogridin temel tabakası içerisindeki yerinin etkisi, 8) Geogrid donatılar arası mesafenin etkisi, 9) Geogrid donatı sayısının etkisi, 10) Geotekstil güçlendirmenin etkisi, 11) Geotekstil etkisinin değerlendirilmesi

Çizelge 3.11. Tekrarlı Yükleme Deney Programı

Seri	Dolgu	Donatı Durumu		Sabit	Değişken	Açıklama
		Ayırma	Güç.			
VI	-	-	-	Zemin CBR (%1)	-	1
VII	PMT	Geotekstil 200 (g/m ²)	-	H/D=0.50	-	2
	CDW	Geotekstil 200 (g/m ²)	-	H/D=0.50	-	
VIII	CDW	Geotekstil 200 (g/m ²)	Geocell	H/D=0.50, d/D=0.62, u/D=0.10	h _c /D=0.17 , 0.33	3
IX	CDW	Geotekstil 200 (g/m ²)	Geogrid	H/D=0.50, u/D=0.10, h/D=0.17	N=1, 2	4
X	CDW	-	Geotekstil 600 (g/m ²)	H/D=0.50, Ara Yüzeyde	-	5
		-	-	H/D=0.50	-	6
1) Zayıf Zemin Değerlendirmesi, 2) Dolgu tipinin etkisi, 3) Geocell etkisi, 4) Geogrid etkisi, 5) Geotekstil güçlendirmenin etkisi, 6) Geotekstil etkisinin değerlendirilmesi						

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu kısmında önce inşaat ve yıkıntı atığı malzeme (CDW) üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deneylerinin sonuçları, literatürde geleneksel laboratuvar deneyleri yapılmış benzer atık malzemelerin sonuçlarıyla ve doğal agrega malzeme üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deneylerinin sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Sonra zayıf zemin üzerine yerleştirilen, güçlendirmeli ve güçlendirmesiz inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu üzerinde yapılan statik ve tekrarlı plaka yükleme deney sonuçları, kıyaslamak için doğal agrega (PMT) dolgu üzerinde yapılan statik ve tekrarlı plaka yükleme deney sonuçları ile birlikte gösterilmiştir. Daha sonra deney sonuçları üzerinden yapılan çoklu doğrusal regresyon (MLR), çoklu doğrusal olmayan regresyon (MNLR) ve M5T (karar ağacı) gibi istatistiksel analizler ile elde edilen, değişkenlilerin birbirleri ile ilişkileri sunulmuştur. En son statik yüklemeli deney sonuçlarından elde edilen taşıma gücü değerlerinin, iki farklı analitik yöntem kullanılarak elde edilen taşıma gücü değerleri ile kıyaslaması verilmiştir.

4.1. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzemenin Özelliklerinin Kıyaslanması

Bu bölümde inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemenin geleneksel laboratuvar deneyleri ile elde edilen fiziksel ve geoteknik özellikleri önce literatürdeki benzer malzemelerle sonrada doğal agrega (PMT) malzemesi ile kıyaslanmıştır.

4.1.1. Literatürdeki Benzer Malzemelerle Kıyaslama

Çalışma kapsamında geri dönüştürülen inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemenin içindeki farklı maddelerin ağırlıkça yüzde oranlarının, özellikle inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin (donatı ve metal yabancı maddelerin ayıklanması sonucu) direk kullanıldığı (tuğla, cam, ahşap alçı vb. atıklara dokunmadan) benzer çalışmalarda elde edilen oranlara oldukça yakın olduğu görülmüştür. Çizelge

4.1’de tez çalışmasında kullanılan inşaat ve yıkıntı atığı malzeme bileşenlerinin literatürdeki benzer malzeme bileşenleri ile karşılaştırılması sunulmuştur. Literatürde inşaat ve yıkıntı atıklarından beton parçalarını seçip alınarak oluşturulan geri dönüşümlü beton agregalar (RCA) veya bu agregalara belli oranlarda geri dönüşümlü asfalt kaplama (RAP) ile geri dönüşümlü tuğla (CB) ilave edilerek oluşturulan agregaların kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Bu çalışmalarda ise kullanılan malzeme, genellikle harç ve harca yapışık agregalarında bulunduğu geri dönüşümlü beton agrega ağırlıklı olmaktadır. Bu bakımdan bu çalışmalarda kullanılan atık agregaların içerdiği malzeme oranları da mevcut tez çalışmasının çok uzağında değildir.

Çizelge 4.1. İnşaat ve Yıkıntı Atığının Malzeme İçeriği Açısından Literatür ile Kıyaslanması

Önceki Çalışmalar	Kullanılan Malzemenin İçeriği						
	$R_c(\%)$	$R_b(\%)$	$R_u(\%)$	$R_a(\%)$	$R_g(\%)$	$R_s(\%)$	$X(\%)$
Vieira ve Pereira 2015b	23.8	10.8	33.7	0.5	1.0	17.1	0.1
Cerni ve ark. 2012	25.6	29.5	42.0	2.0	0.6	-	0.3
Jimenez ve ark. 2012a	76.0	3.1	20.8	-	-	-	0,1
Neves ve ark. 2013	68.0	13.0	17.0	1.9	0.3	-	0.1
Perez ve ark. 2013	55.0	-	45.0	-	-	-	-
Tez Çalışması	36,33	10,53	52,65	-	0,11	-	0,38
R _c : Beton, Beton Ürünleri Parçaları, R _b : Tuğla, Kagir Birim Parçaları, Fayans, Seramik, R _u : Doğal Agregat, R _a : Bitüm, R _g : Cam, R _s : Zemin, X: Diğer Malzemeler (Metal, Plastik, Kavuçuk, Kereste vb.)							

Tez çalışması için farklı çaplardaki inşaat ve yıkıntı atıklarının karıştırılması ile elde edilen inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemenin gradasyon özellikleri literatürdeki çalışmalarda kullanılan atıkların gradasyon özelliklerine yakındır. Çizelge 4.2.’de inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemenin gradasyon özellikleri literatürdeki benzer malzeme gradasyonları ile karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Gradasyon Özelliklerinin Literatür ile Karşılaştırılması

Önceki Çalışmalar	Gradasyon Özellikleri					
	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c	Y_i
Ayan ve ark. 2014 (1)	0.11	1.05	7.00	66.67	1.50	-
Ayan ve ark. 2014 (2)	1.50	4.00	9.50	6.33	1.12	-
Vieira ve Pereira 2015b	0.06	0.35	1.40	23.33	1.46	-
Poon ve Chan 2006 (1)	0.45	2.60	8.50	18.85	1.77	-
Poon ve Chan 2006 (2)	0.90	3.20	9.00	10.00	1.26	-
Poon ve Chan 2006 (3)	0.80	3.00	8.50	10.63	1.32	-
Arulrajah ve ark 2013a (1)	0.24	1.30	7.50	31.25	0.94	11.00
Arulrajah ve ark 2013a (2)	0.18	1.70	8.00	44.44	2.01	14.00
Cerni ve ark. 2012	0.70	0.90	6.00	85.71	1.93	26.50
Park 2003	0.10	1.90	10.50	105.0	3.44	-
Arulrajah ve ark. 2014a (1)	0.24	1.40	7.30	30.42	1.12	11.00
Arulrajah ve ark. 2014a (2)	0.36	1.70	7.50	20.83	1.07	37.00
Arulrajah ve ark. 2014a (3)	0.16	2.40	9.00	56.25	4.00	37.90
Arulrajah ve ark. 2014a (4)	0.20	2.70	9.70	48.50	3.76	33.14
Jimenez ve ark. 2012a	0.22	2.30	9.50	43.18	2.53	8.00
Kazmee ve Tutumluer 2015 (1)	10.00	11.50	12.50	1.25	1.06	-
Kazmee ve Tutumluer 2015 (2)	0.80	5.20	10.70	13.38	3.16	-
Disfani ve ark. 2014	0.10	1.40	7.00	70.00	2.80	-
Neves ve ark. 2013	0.22	1.50	10.75	48.86	0.95	-
Gabr ve Cameron 2012 (1)	0.15	1.50	7.00	46.67	2.14	-
Gabr ve Cameron 2012 (2)	0.25	2.20	8.50	34.00	2.28	-
Perez ve ark. 2013	0.30	2.30	9.00	30.00	1.96	-
Arulrajah ve ark. 2014c (1)	-	-	-	33.30	1.70	-
Arulrajah ve ark. 2014c (2)	-	-	-	46.90	2.70	-
Herrador ve ark. 2012	0.33	2.05	9.90	30.00	1.29	12.00
Blankengel 2005 (1)	0.40	4.30	9.50	23.75	4.87	-
Blankengel 2005 (2)	0.20	0.80	5.00	25.00	0.64	-
Tez Çalışması	0,24	1,60	10,05	41,87	1,06	11,68
D_{10} , D_{30} , D_{60} : %10, %30, %60'ının geçtiği çap, C_u : Uniformluk Katsayısı, C_c : Eğrilik Katsayısı, Y_i : Yassılık İndeksi						

İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzeme üzerinde yapılan modifiye kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optimum su içeriği (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) değerleri literatürdeki çalışmalarda kullanılan atık agregaların değerlerine benzemektedir. Ayrıca dane birim hacim ağırlığı, su emme ve Los Angeles aşınma yüzdeleri de literatürdeki çalışılan inşaat

yıkıntı atıkları ile uyumluluk göstermektedir. İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemenin fiziksel özelliklerinin literatürde çalışılan inşaat ve yıkıntı atığı malzemelere göre kıyaslanması Çizelge 4.3.'te verilmiştir.

İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemenin optimum su içeriğindeki CBR değeri yaklaşık % 100 (% 99.98) çıkmıştır. Literatürde benzer atık malzemeler üzerinde yapılan CBR deney sonuçları % 22-% 160 gibi geniş bir aralıkta değişmekle birlikte, CBR değerinin % 100 civarı olduğu birçok çalışma mevcuttur.

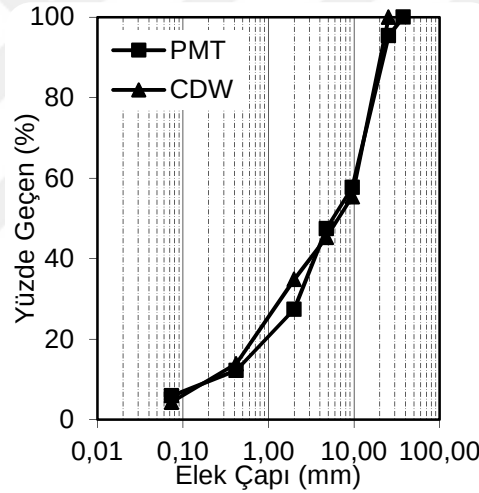


Çizelge 4.3. Fiziksel Özelliklerinin Literatür ile Karşılaştırılması

Önceki Çalışmalar	Fiziksel Özellikleri				
	γ_{kmaks} (kN/m ³)	(ω_{opt}) (%)	(γ_s) (kN/m ³)	LA Aşınma (%)	Su Emme (%)
Ayan ve ark. 2014 (1)	18.40	13.71	-	-	-
Ayan ve ark. 2014 (2)	18.90	10.53	-	-	-
Vieira ve Pereira 2015b	-	-	-	-	-
Poon ve Chan 2006 (1)	20.20	11.80	-	-	-
Poon ve Chan 2006 (2)	19.70	12.70	-	-	-
Poon ve Chan 2006 (3)	18.20	16.00	-	-	-
Arulrajah ve ark 2013a (1)	19.13	11.00	27,10 ^k - 26,00 ⁱ	44.00	4,70 ^k - 9,80 ⁱ
Arulrajah ve ark 2013a (2)	19.73	11.25	26,20 ^k - 25,80 ⁱ	41.00	6,20 ^k - 6,90 ⁱ
Cerni ve ark. 2012	19.20	12.00	25.70	37.00	7.72
Park 2003	22.10	9.00	25.27	32.90	1.43
Arulrajah ve ark. 2014a (1)	19.60	12.00	27,60 ^k - 26,50 ⁱ	28.00	4,66 ^k - 9,75 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014a (2)	19.50	12.20	29,00 ^k - 25,00 ⁱ	39.00	8,40 ^k - 18,60 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014a (3)	19.40	12.00	21,50 ^k - 18,00 ⁱ	36.00	5,72 ^k - 7,40 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014a (4)	20.30	11.50	21,90 ^k - 16,70 ⁱ	33.00	6,00 ^k - 8,13 ⁱ
Jimenez ve ark. 2012a	18.80	11.60	21.38	34.00	8.80
Kazmee ve Tutumluer 2015 (1)	-	-	-	33.50	-
Kazmee ve Tutumluer 2015 (2)	-	-	-	31.00	-
Disfani ve ark. 2014	20.38	11.75	-	28.00	-
Neves ve ark. 2013			-	-	-
Gabr ve Cameron 2012 (1)	19.20	11.50	26.00	39.00	8.90
Gabr ve Cameron 2012 (2)	19.90	11.00	25.50	37.00	5.50
Perez ve ark. 2013	22.30	5.60	-	38.00	4.72
Arulrajah ve ark. 2014c (1)	19.60	12.00	27,10 ^k - 26,00 ⁱ	28.00	4,70 ^k - 9,80 ⁱ
Arulrajah ve ark. 2014c (2)	20.20	10.70	26,20 ^k - 25,80 ⁱ	36.00	6,20 ^k - 6,90 ⁱ
Herrador ve ark. 2012	20.50	9.50	-	34.00	-
Blankengel 2005 (1)	18.30	9.70	-	31.00	5.20
Blankengel 2005 (2)	20.20	10.60	-	17.00	6.50
Tez Çalışması	20,77	9,70	26,10k- 26,30i	33,58	4,06k- 6,82i
γ_{kmaks} : Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, ω_{opt} : Optimum Su İçeriği, γ_s : Dane Birim Hacim Ağırlığı, LA Aşınma: Los Angeles Aşınma ^k : Kaba Dane, ⁱ : İnce Dane					

4.1.2. Doğal Agrega Karışımıyla Kıyaslama

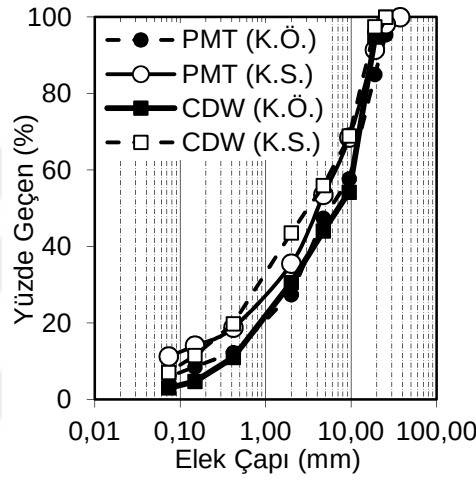
Bu kısımda inşaat ve yıkıntı atığı malzeme (CDW) üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deney sonuçları, doğal agrega karışımından elde edilen ve dolgularda sıkça kullanılan bir granüler malzeme (PMT) üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İki malzemenin gradasyonlarının karşılaştırması Şekil 4.1’de verilmiştir. Doğal (PMT) ve atık (CDW) malzeme üzerinde yapılan yassılık indeksi deneyi sonucunda, yassılık indeksleri sırasıyla %12.66 ve %11.68 olmak üzere birbirlerine oldukça benzerdir. Genel olarak iki malzemenin gradasyon özellikleri ve dane şekilleri birbirine çok yakındır.



Şekil 4.1. Gradasyonların Karşılaştırılması

Doğal (PMT) ve atık (CDW) malzemelerin aşınmaları ve parçalanmaları, Los Angeles deneyi ve kompaksiyon öncesi/sonrası elek analizleri ile kıyaslanmıştır. Los Angeles deneyi sonucunda doğal ve atık malzemelerin aşınmaları sırası ile %23.40 ve %33.58 olarak çıkmıştır. Sonuçlardan da çıkarılabileceği gibi, doğal agrega malzeme (PMT) danelerinin, inşaat ve yıkıntı atığı malzeme (CDW) danelerinden daha sert olduğu görülmüştür. Özellikle inşaat

yıkıntı atığı malzemenin içindeki tuğla parçalarının dayanımının düşük olmasının bu sonuçta büyük etkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu iki malzemenin kompaksiyon deneyi öncesi ve sonrası gradasyon değişimi Şekil 4.2.'de gösterilmekle birlikte, gradasyon değişimine bakıldığında iki malzemenin de modifiye kompaksiyon enerjisi sonrası parçalanmalarının benzer olduğu görülmüştür.

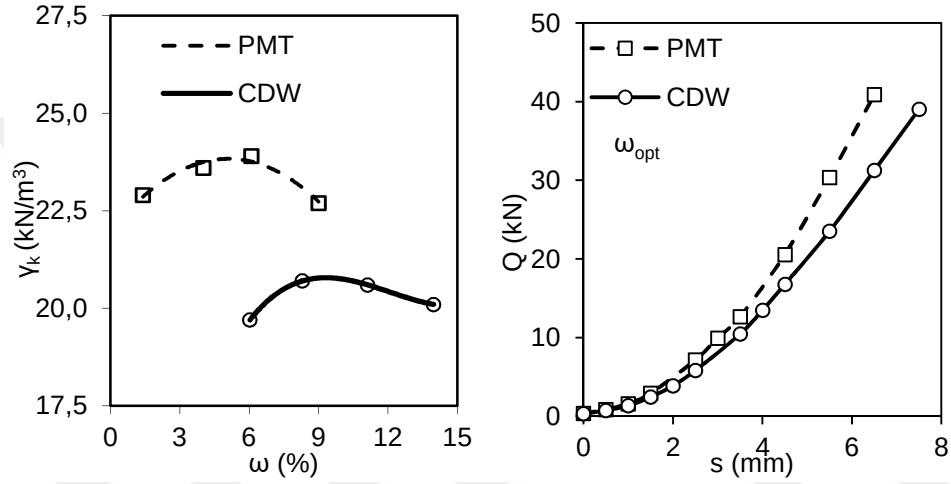


Şekil 4.2. Kompaksiyon Deneyine Göre Gradasyon Değişimi

Doğal (PMT) ve atık (CDW) malzemelerin kompaksiyon eğrilerinin ve CBR deneyine göre yük deformasyon değişiminin karşılaştırılması Şekil 4.3'te sunulmuştur. Eğrilerden de görülebileceği gibi doğal agrega malzemenin inşaat ve yıkıntı atığı malzemeye göre maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) daha yüksek optimum su içeriği (ω_{opt}) ise daha düşüktür. Bu fark literatürde, çalışılmış benzer inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerde de görülmüştür. Bu farkın inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin içerisindeki özellikle çimento bazlı danelerin yüksek su emmesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu durum inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerden inşa edilecek dolgularda optimum su içeriğine ulaşmak için doğal granüler malzemelere göre daha fazla su ihtiyacının olacağını göstermektedir. Bu

durum dolgu inşaatında göz önünde bulundurulmalıdır. Benzer bir öneri Cerni ve ark. (2012) tarafından, yaptığı çalışmada kullandığı inşaat ve yıkıntı atığı malzeme için de belirtilmiştir.

Çizelge 4.4'te inşaat ve yıkıntı atığı malzeme (CDW) ile doğal agrega malzemenin (PMT) özellikleri özetlenmiştir.



Şekil 4.3. Kompaksiyon ve CBR Eğrileri Karşılaştırması

Çizelge 4.4. Genel Özelliklerin Karşılaştırılması

Özellik	Birim	PMT	CDW
Üniformluk Katsayısı (C_u)	%	35.88	41.87
Eğrilik Katsayısı (C_c)	%	1.89	1.06
Yassılık İndeksi	%	12.66	11.68
Los Angeles Aşınması (LA)	%	23.40	33.58
Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)	kN/m ³	26.90 ⁱ -27.10 ^k	26.30 ⁱ -26.10 ^k
Su emme	%	0.40 ⁱ -0.36 ^k	6.82 ⁱ -4.06 ^k
Maks. Kuru Birim Hac. Ağırlık (γ_{kmaks})	kN/m ³	23.90	20.77
Optimum Su İçeriği (ω_{opt})	%	6.0	9.7
CBR	%	125.16	99.98
ⁱ İnce Dane (4.75 mm elek altı), ^k Kaba Dane (4.75 mm elek üzeri)			

4.2. Statik Yükleme Model Deneyler

Bu bölümde, çalışma kapsamında temin edilen inşaat ve yıkıntı atıklarının (CDW) geri dönüştürülmesi ile elde edilen granüler malzemenin, statik yüklere

maruz dolgularda kullanılabilirliğini araştırmak için yapılan plaka yükleme deneyleri sunulmuştur. Bu atık malzemelerden inşa edilecek dolgunun performansının daha iyi belirlenebilmesi için en elverişsiz zemin koşulları düşünülerek, dolgu yumuşak (zayıf) zemin üzerine yerleştirilmiş ve sonra deneylere tabi tutulmuştur.

Statik yüklemeli beş seri deney yapılmıştır. İlk seride dolgunun yerleştirileceği zayıf zemin üzerine direk (hiç dolgu yerleştirilmeden), yükleme yapılarak zayıf zeminin durumu belirlenmiştir. Daha sonraki seride zayıf zemin üzerine yerleştirilen, inşaat ve yıkıntı atıklarından oluşturulan farklı kalınlıklarda dolgu ve atık malzemenin performansının kıyaslanabilmesi için doğal agrega karışımından oluşturulan benzer kalınlıklardaki dolgu üzerinde deneyler yapılmıştır. Diğer serilerde inşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilen dolgunun, kaliteli doğal agrega malzemelerden inşa edilen dolguların performansını yakalayabilmesi için sırası ile geocell, geogrid ve geotekstil ile güçlendirilmesi durumlarında deneyler yapılmıştır.

Deneyler sonucunda, kPa cinsinden ifade edilen basınç (gerilme) (q) değerine karşılık, oluşan deplasmanın plaka çapına bölünmesi ile boyutsuzlaştırılarak yüzde cinsinden ifade edilen deplasman oranı (s/D) eğrileri verilmiştir. Eğriler yatay ekseninde basınç (gerilme), dikey ekseninde deplasman oranı şeklinde sunulmuştur.

Özellikle killi siltli ince daneli zeminler üzerinde yapılan plaka yükleme deneyleri sonucunda elde edilen yük-oturma eğrileri sık sık tam bir göçme yükünün belirlenmesine imkan sağlamamaktadır. Bu sebeple nihai taşıma kapasitesinin (q_u) tespit edilmesi zorlaşmaktadır. Literatürde, bu ve benzeri durumlarda nihai taşıma kapasitesi belirlenebilmesi için yaygınca kullanılan dört farklı yöntem olduğu görülmüştür (Lutenegger ve Adams, 1998; Keskin, 2009; Örnek 2009). Bu yöntemler genel hatlarıyla aşağıda açıklanmıştır.

- 0.1B Yöntemi: Bu yöntemde sınırlandırılmış bir oturma değerine karşılık gelen yük değeri, nihai taşıma kapasitesi değeri olarak alınır (Briaud ve Jeanjean, 1994) (B =temel genişliği)
- Teğet Kesiştirme Yöntemi: Oturma değerlerinde belirgin bir değişimin meydana geldiği noktaya karşılık gelen yük değeri, nihai taşıma kapasitesi değeri olarak alınır (Trautmann ve Kulhawy, 1988).
- Log-Log Yöntemi: Yük–oturma değerlerinde düzeltme yapılarak kesişim noktasına karşılık gelen yük değeri, nihai taşıma kapasitesi değeri olarak alınır (DeBeer, 1970).
- Hiperbolik Yöntem: Yük–oturma eğrisine uygun bir model seçilerek tahmini bir asimptot değere karşılık gelen yük değeri, nihai taşıma kapasitesi değeri olarak alınır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen yük-oturma eğrilerinden belirgin bir göçme yükünün elde edilemediği durumlarda diğer yöntemlere göre hesap etme yönünden daha pratik ve daha objektif değerler veren 0.1B yöntemi esas alınmıştır (Örnek, 2009). Bu sebeple deneylerden 0.10D ($s/D=10\%$) (çalışmada dairesel temeller kullanıldığı için 0.1B ifadesi 0.1D olarak tanımlanabilir) oturmasına karşılık gelen taşıma gücü değerleri bulunmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında yapılan deneylerden 0.05D ($s/D=5\%$) ve 0.15D ($s/D=15\%$) oturmalarına karşılık gelen taşıma gücü değerleri de belirlenerek deney sonuçları daha ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

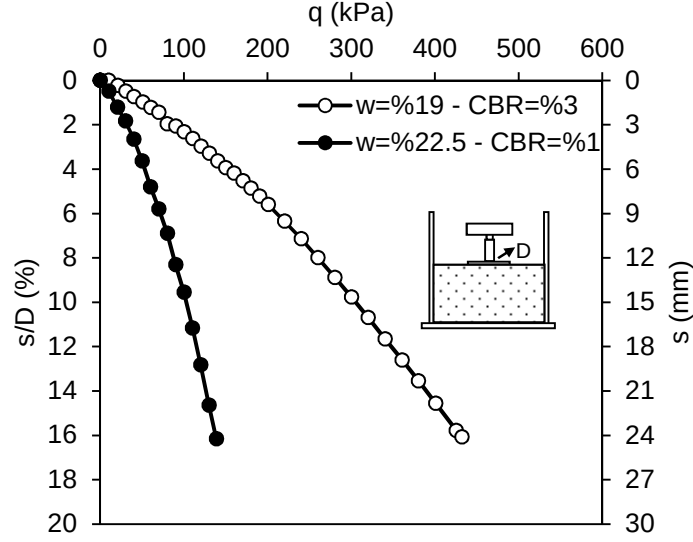
Deneyler sonucunda, zayıf zemin üzerine yerleştirilen granüler dolgunun veya granüler dolgu içerisine yerleştirilen geosentetik güçlendirmelerin etkisinin değerlendirilebilmesi için, bu unsurların taşıma gücündeki artış dereceleri Taşıma Kapasitesi Oranı (BCR) (Binquet ve Lee, 1975a) ile tanımlanmıştır. Bütün deneyler için Taşıma Kapasitesi Oranının (BCR) aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Demir, 2011).

$$BCR = \frac{q_r}{q_0} = \frac{\text{Güçlendirmeli Zemin Taşıma Gücü}}{\text{İnce Daneli (Tabii) Zemin Taşıma Gücü}} \quad (4.1)$$

Denklemdaki q_r granüler dolgu tabakası veya donatılı dolgu tabakası ile güçlendirilmiş ince daneli zeminden elde edilen taşıma gücü değerini, q_0 ise ince daneli zeminden elde edilen taşıma gücü değerini göstermektedir. Bütün deneyler için 0.05D ($s/D=\%5$), 0.10D ($s/D=\%5$) ve 0.15D ($s/D=\%15$) deplasman oranlarında elde edilen taşıma gücü değerlerine göre BCR değerleri hesaplanmış ve deneylerde elde edilen sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır.

4.2.1. Tabi Zemin Durumu (Seri I)

Model deneylerde, granüler dolgu (PMT, CDW) veya donatılı (geosentetik) granüler dolgu (CDW), tabi zemin (zayıf zemin koşullarına sahip CBR'ı 3'ün altında) üzerine yerleştirilmiştir. Hem yerleştirilen tabii zeminin durumu ve taşıma gücünün belirlenebilmesi amacı ile hem de dolgu veya donatılı dolgu durumunda güçlendirme derecelerinin belirlenmesi için (BCR'nin hesap edilebilmesi için), iki farklı su içeriğine sahip (%22.5 ve %19) dolgusuz tabii zemin üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, deney şartlarının kontrolü için tabii zemin 5 cm'lik tabakalar halinde ağırlık kontrollü yerleştirilmiş ayrıca her tabakada mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca yapılan mukavemet (vane ve penetrometre) ölçümleri sonrasında, su içeriği %22.5 olan tabi zeminde c_u yaklaşık olarak 25 kPa, su içeriği %19 olan tabi zeminde c_u yaklaşık olarak 80 kPa bulunmuştur. Deneyler sonucu elde edilen gerilme (q) deplasman (s) veya deplasman oranı (s/D) eğrisi Şekil 4.4'te sunulmuştur. Ayrıca temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında elde edilen zemin taşıma gücü değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Tabi Zemin Değerlendirmesi

Çizelge 4.5. Tabi Zemin İçin Taşıma Gücü Değerleri

No	$\omega(\%)$	$q_u(kPa)$	$s/D(\%)$
ZZ1	19	183.98	5
ZZ1	19	305.33	10
ZZ1	19	409.66	15
ZZ2	22.5	62.13	5
ZZ2	22.5	103.01	10
ZZ2	22.5	132.42	15

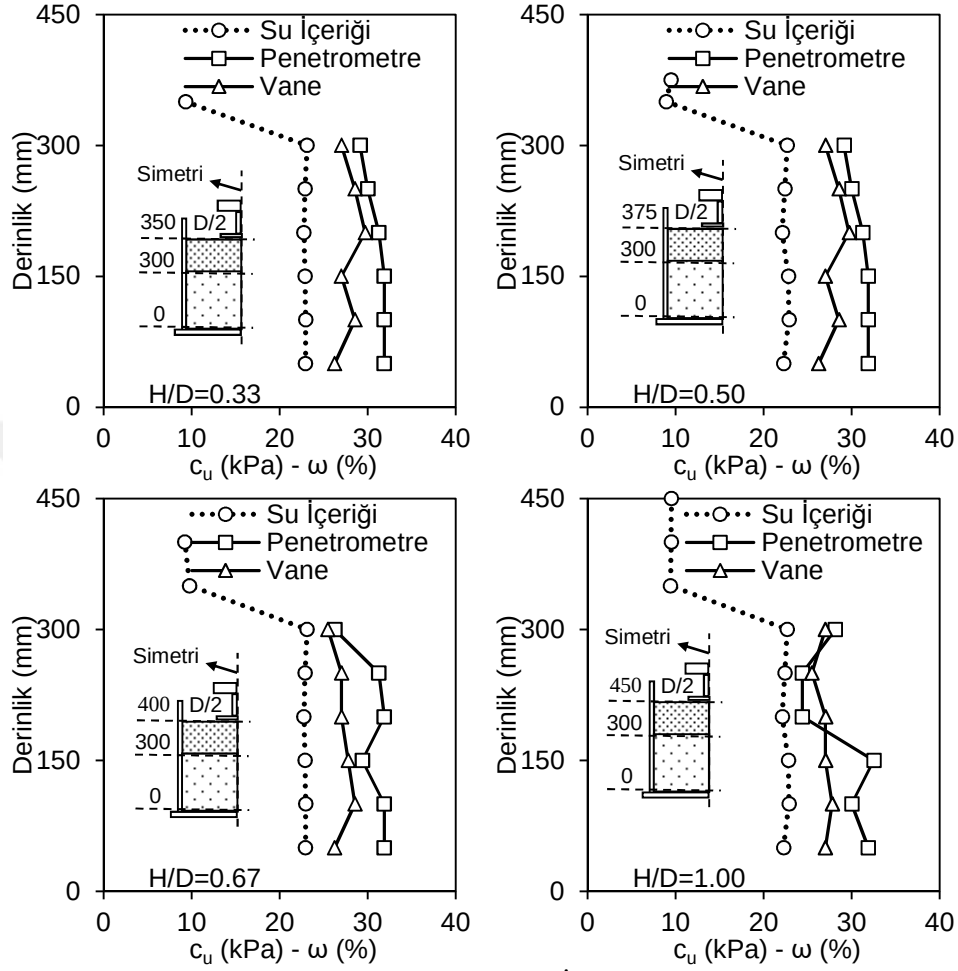
İnce daneli zeminde yapılan statik plaka yükleme deneyi sonrasında temel çapının %10'u kadar oturma baz alındığında taşıma gücü, %19 su içeriğinde 305.33 kPa çıkarken %22.5 su içeriğinde 103.01 kPa çıkmıştır. İki farklı su içeriği için taşıma gücünde oluşan benzer fark CBR değerlerinde de görülmektedir. Az bir su içeriği değişiminde (%3.5) oluşan bu farkın, %19 su içeriğine sahip zeminin, plastik limitin (%21) altında kalması ve %22.5 su içeriğindeki zeminin plastik limitin (%21) üstünde kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Granüler dolgu (PMT, CDW) veya donatılı (geosentetik) granüler dolgu (CDW) deneylerde dolgunun altındaki zayıf zeminin su içeriği, en elverişsiz koşulları yansıtmaması bakımından %22.5 olarak seçilmiştir.

4.2.2. Dolgu Kalınlığı Etkisi (Seri II)

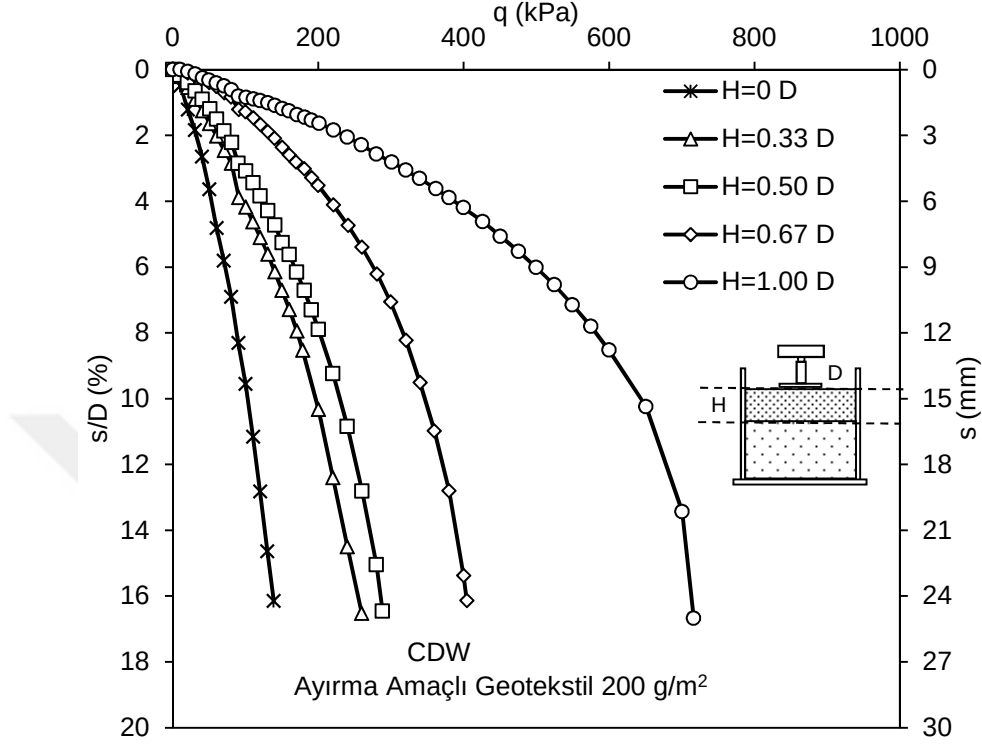
Bu seride zayıf zemin üzerine inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemeden, yükleme plakası çapına (D) göre dört farklı kalınlıkta ($H/D=0.33, 0.50, 0.67$ ve 1.00) dolgu yerleştirilmiş ve deneyler yapılarak dolgu kalınlığının etkisi incelenmiştir. Ayrıca atık malzemenin performansının kıyaslanabilmesi için doğal agrega malzemeden (PMT), aynı kalınlıklarda ($H/D=0.33, 0.50, 0.67$ ve 1.00) dolgu yerleştirilmiş ve deneyler yapılmıştır.

4.2.2.1. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Malzemeden (CDW) Dolgu

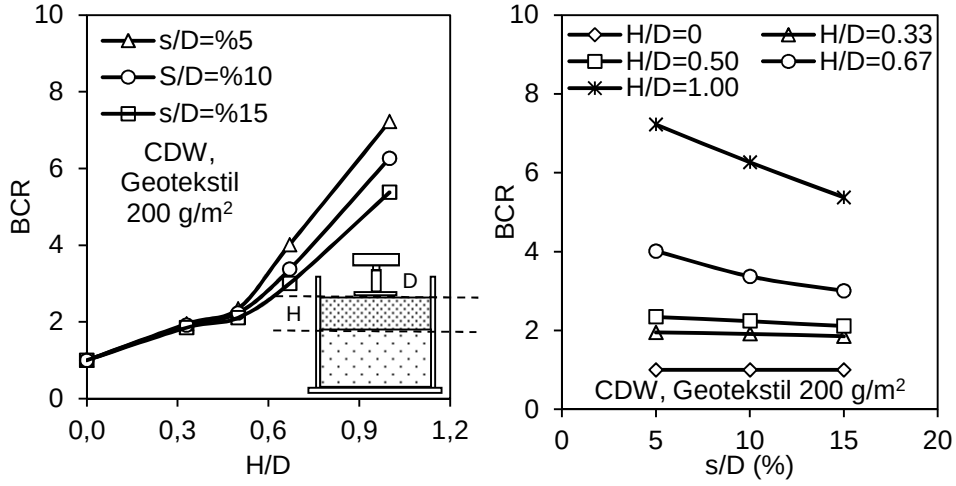
Zayıf zemin üzerine $H/D=0.33, 0.50, 0.67$ ve 1.00 (D, yükleme plakası çapı) olmak üzere dört farklı kalınlıkta inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemeden dolgu yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Her deneyde, deney şartlarının kontrolü için alttaki zayıf zemin 5 cm'lik tabakalar halinde ağırlık kontrollü yerleştirilmiş ayrıca her tabakada mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Üstteki granüler dolgu tabakası ise 5 cm'lik tabakalar halinde ağırlık kontrollü yerleştirilmiş ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.5'te verilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen gerilme (q) deplasman (s) veya deplasman oranı (s/D) eğrisi Şekil 4.6'da sunulmuştur. Ayrıca temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında dolgu tabakası kalınlığı oranı (H/D) ile BCR değişimi ve dolgu tabakası kalınlığına göre oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (CDW) İçin Deney Şartları Kontrolü



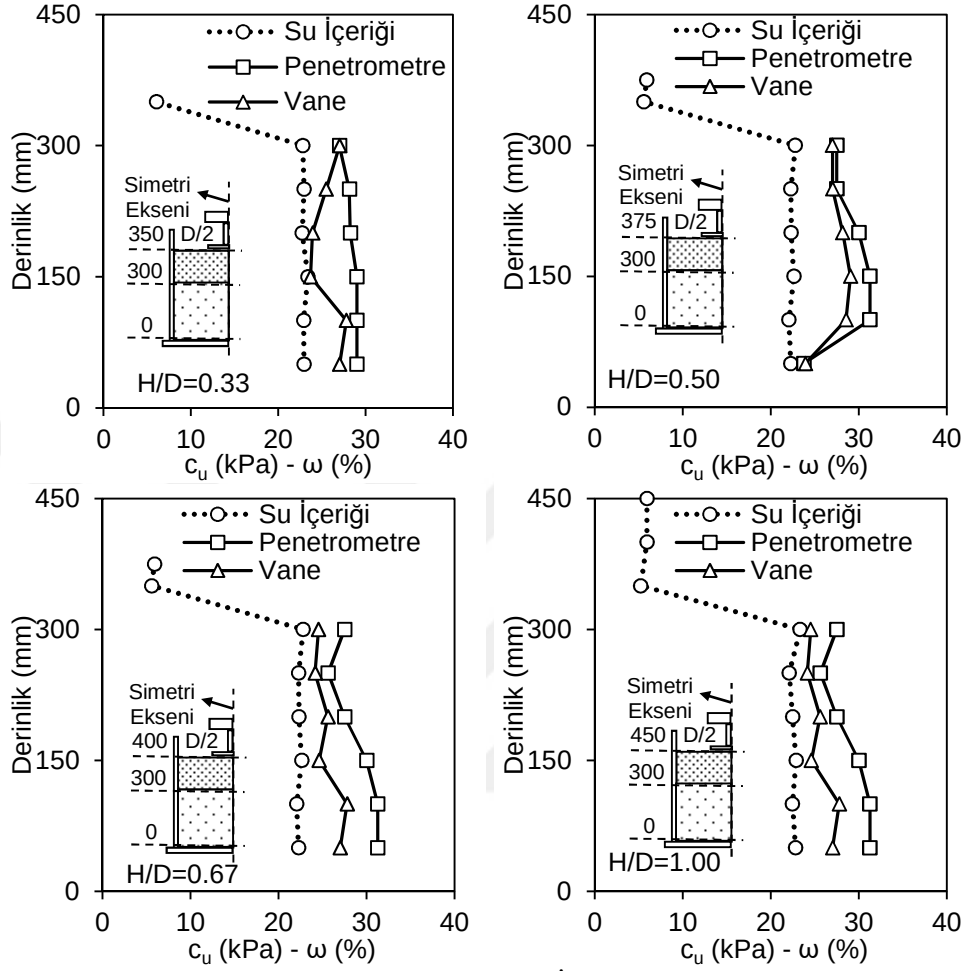
Şekil 4.6. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (CDW) İçin Gerilme Deplasman Eğrisi



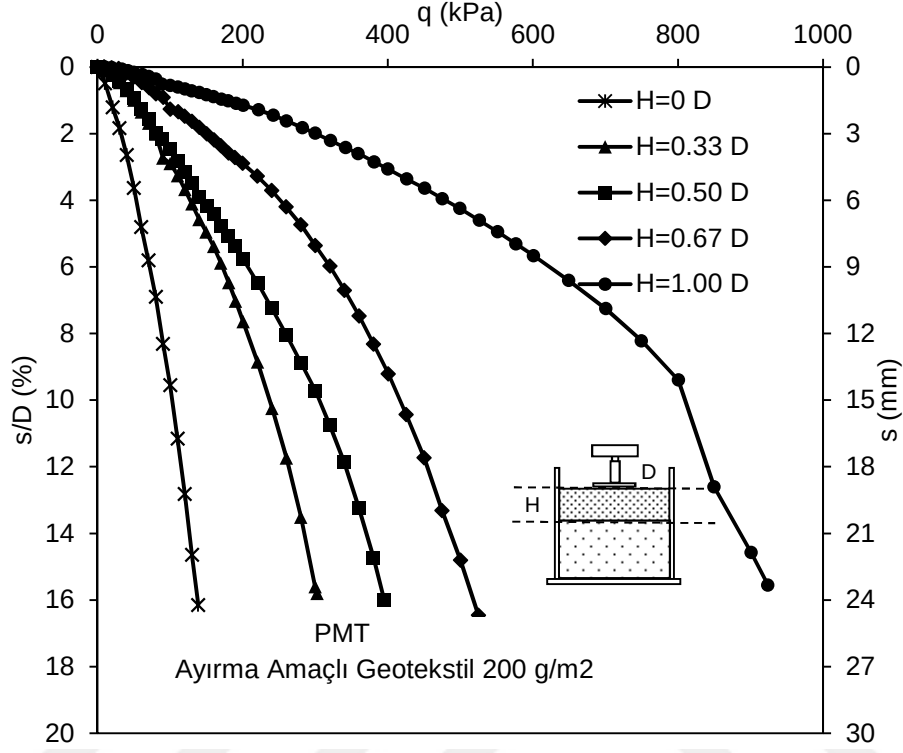
Şekil 4.7. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (CDW) İçin BCR Değişimi

4.2.2.2. Doğal Agregat Karışımı Malzemeden (PMT) Dolgu

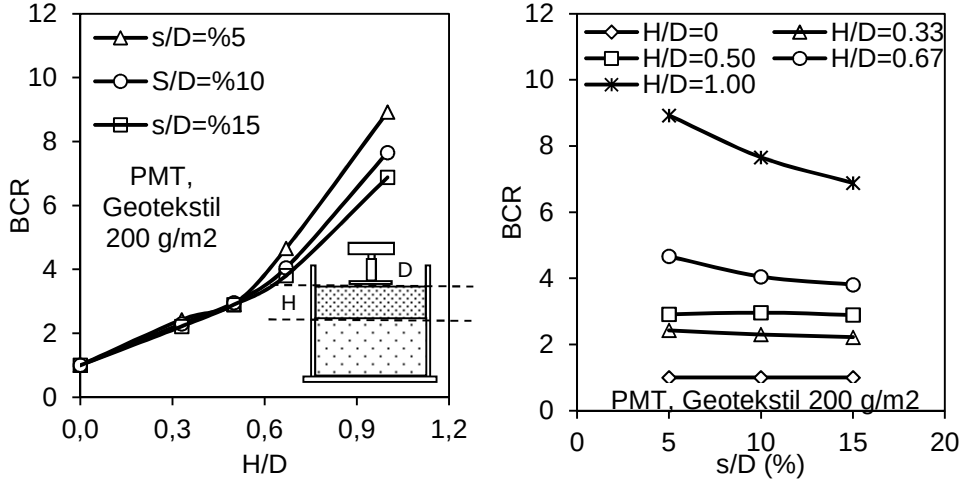
İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemeyi doğal agregat malzeme ile kıyaslayabilmek için, zayıf zemin üzerine $H/D=0.33, 0.50, 0.67$ ve 1.00 (D , yükleme plakası çapı) olmak üzere dört farklı kalınlıkta doğal agregat (PMT) malzemeden dolgu yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Her deneyde, deney şartları benzer şekilde ve aynı yöntemler kullanılarak kontrol edilmiştir. Üstteki granüler dolgu tabakası ise 5 cm 'lik tabakalar halinde ağırlık kontrollü yerleştirilmiş ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.8'de verilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen gerilme (q) deplasman (s) veya deplasman oranı (s/D) eğrisi Şekil 4.9'da sunulmuştur. Ayrıca temel çapının $\%5, \%10$ ve $\%15$ 'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında dolgu tabakası kalınlığı oranı (H/D) ile BCR değişimi ve dolgu tabakası kalınlığına göre oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (PMT) İçin Deney Şartları Kontrolü



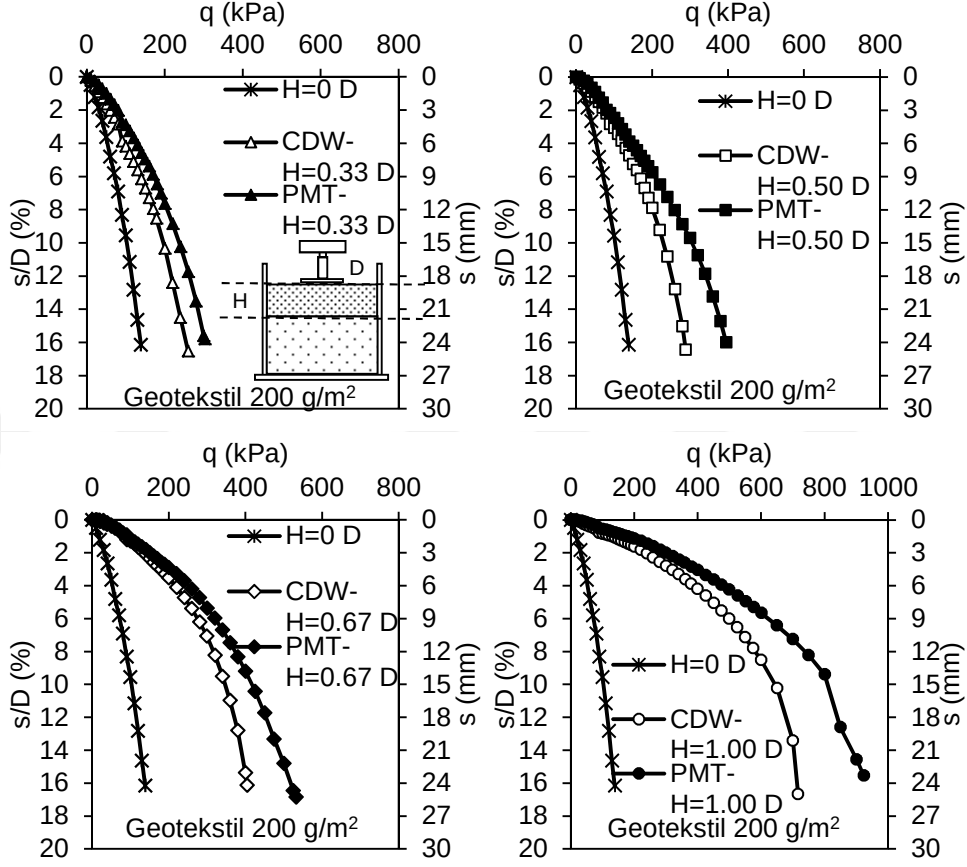
Şekil 4.9. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (PMT) İçin Gerilme Deplasman Eğrisi



Şekil 4.10. H/D=0.33, 0.50, 0.67 ve 1.00 (PMT) İçin BCR Değişimi

4.2.2.3. CDW ve PMT Dolgu Karşılaştırması

Zayıf zemin üzerine inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemeden veya doğal agrega (PMT) malzemeden farklı kalınlıklarda granüler dolgu tabakası yerleştirilip statik yükleme yapılan deneyler sonrasında, bu iki malzemenin gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrilerinin kıyaslanması Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Gerilme deplasman oranı eğrileri kıyaslandığında, PMT dolgulu deneyler biraz üste olmakla birlikte başlangıçta birbirine benzer davranış gösterdiği, deplasmanlar arttıkça (deplasman oranı duruma göre yaklaşık %5-%10’a ulaştıktan sonra) CDW dolgulu deneylerdeki gerilme artışının PMT dolgulu deneylerdeki gerilme artışının altında kaldığı görülmüştür. Aynı olmamakla birlikte benzer bir şekilde CBR deneyinde de deplasmanlar arttıkça CDW ile PMT malzeme arasındaki farkın arttığı görülmüştür. Bu durumun, CDW malzemesindeki danelerinin aşırı yük altında, PMT malzemesindeki danelerine göre daha çok parçalanmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. İki malzeme üzerinde yapılan Los Angeles deneyi sonuçlarında da, PMT malzemenin danelerinin aşınmaya karşı direncinin, CDW malzemeye göre yüksek olduğu görülmüştür. Bu deneyde CDW malzemenin aşınma oranı yüzdesi PMT malzemeye göre yaklaşık %44 daha fazla çıkmıştır. Temel çapının %5, %10 ve %15’ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında granüler dolgulu zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.

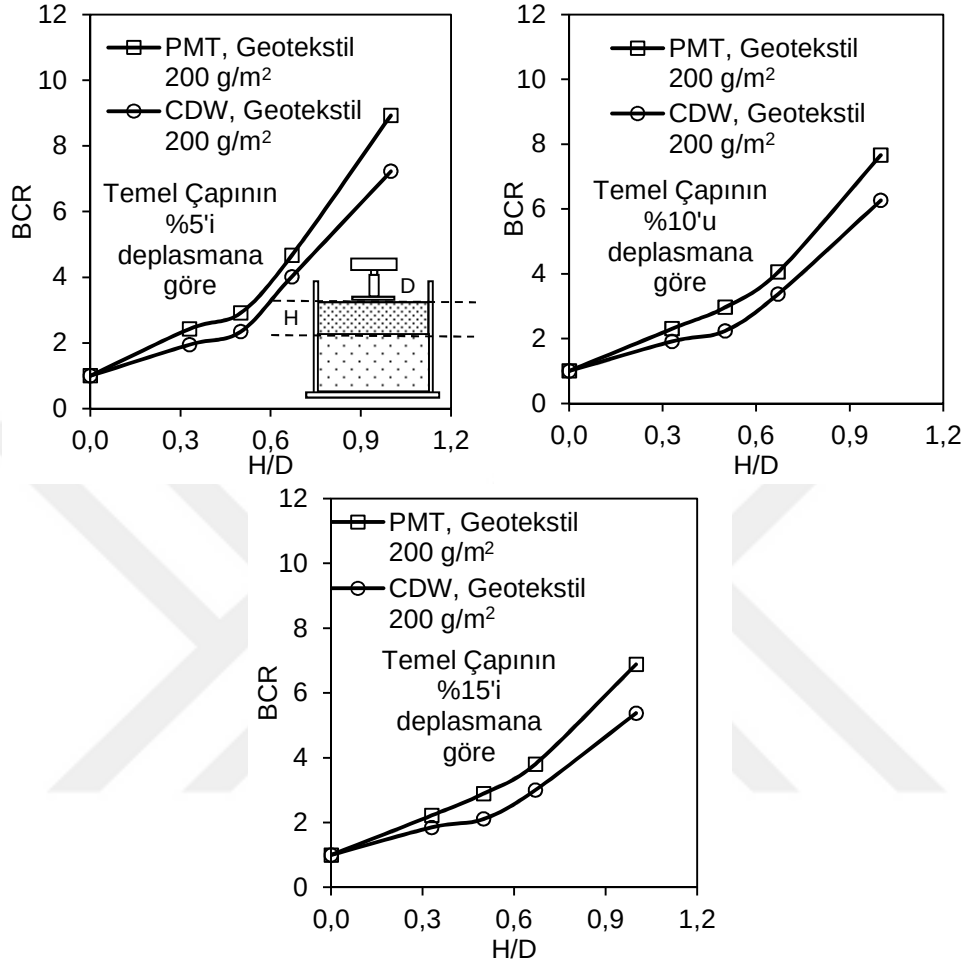


Şekil 4.11. CDW ve PMT'li Dolguların Gerilme Deplasman Eğrisi Kıyaslaması

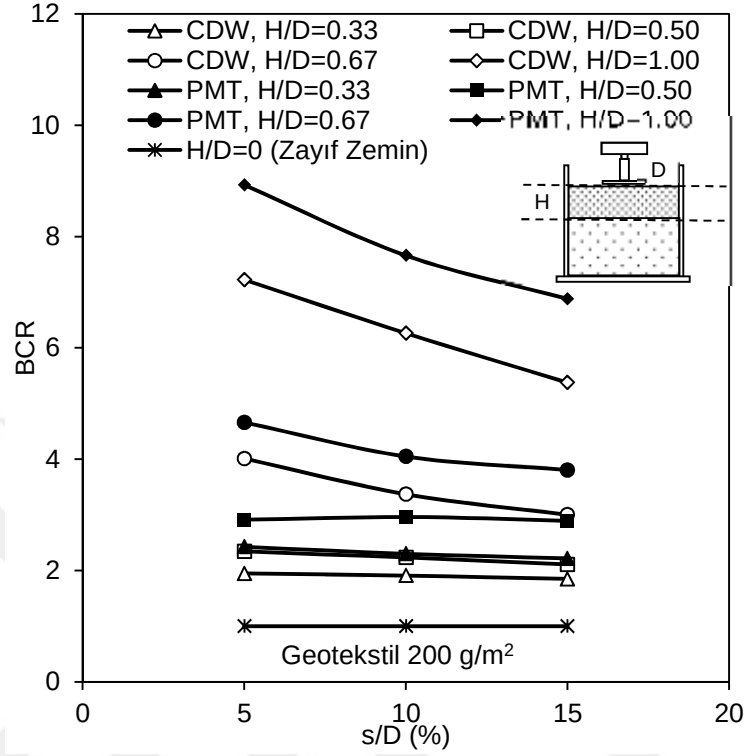
Çizelge 4.6. Dolgulu Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

No	H/D	$q_u(kPa)$		BCR		s/D(%)
		PMT	CDW	PMT	CDW	
CDW1 ve PMT1	0.33	150.75	120.99	2.43	1.95	5
CDW1 ve PMT1	0.33	236.88	196.76	2.30	1.91	10
CDW1 ve PMT1	0.33	293.75	244.86	2.22	1.85	15
CDW2 ve PMT2	0.50	180.90	145.60	2.91	2.34	5
CDW2 ve PMT2	0.50	305.01	230.20	2.96	2.23	10
CDW2 ve PMT2	0.50	383.14	279.26	2.89	2.11	15
CDW3 ve PMT3	0.67	289.53	249.22	4.66	4.01	5
CDW3 ve PMT3	0.67	417.02	347.17	4.05	3.37	10
CDW3 ve PMT3	0.67	503.88	397.65	3.81	3.00	15
CDW4 ve PMT4	1.00	554.57	448.75	8.93	7.22	5
CDW4 ve PMT4	1.00	788.84	645.11	7.66	6.26	10
CDW4 ve PMT4	1.00	911.07	711.88	6.88	5.38	15

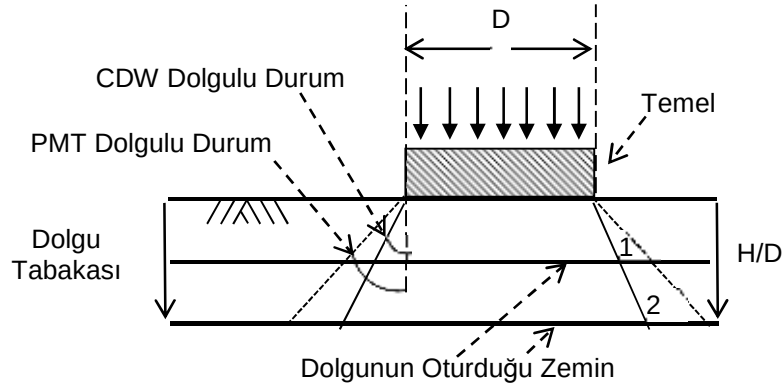
Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında dolgu tabakası kalınlığı oranı (H/D) ile BCR değişimi Şekil 4.12'de ve dolgu tabakası kalınlığına göre oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Aynı kalınlık oranlarında (H/D) ve bütün oturma oranları için (s/D), PMT malzemeli dolgunun BCR değerleri CDW malzemeli dolguya göre yüksek çıkmıştır. Kalınlık oranı (H/D) ve BCR değişimi incelendiğinde, dolgu kalınlığı arttıkça PMT dolgunun BCR oranının CDW dolguya göre daha çok arttığı görülmüştür. CDW malzemenin CBR değeri PMT malzemeye göre %20 daha az çıkmıştır. Bu iki malzemenin CBR değerlerinden de anlaşılabileceği gibi PMT malzeme ile, CDW malzemeye göre biraz daha rijit bir dolgu tabakası oluşturmak mümkündür. Dolgu kalınlığı arttıkça iki malzeme arasındaki BCR oranı farkının artmasının, PMT dolgunun CDW dolguya göre biraz daha rijit bir tabaka oluşturmasından dolayı, PMT dolgulu durumda CDW dolgulu duruma göre, yükü zayıf zemine dağıtma açısının daha fazla olmasından kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir. Bu durumda tabaka kalınlığının artması ile yük dağıtma açısı farkının sonucunda oluşacak taşıma gücü farkının, daha düşük tabaka kalınlığına göre daha çok olacağı düşünülmektedir. Bu durum Şekil 4.14'te farklı 1 ve 2 tabaka kalınlıkları için açıklanmıştır.



Şekil 4.12. CDW ve PMT'nin H/D'ye göre BCR Değişimi



Şekil 4.13. CDW ve PMT'nin s/D'ye göre BCR Değişimi



Şekil 4.14. Dolgu Kalınlığının Artması İle Açının Etkisinin Artması

Tez çalışmasındaki granüler dolgu deneylerin sonucunda elde edilen, dolgu tabakası kalınlığı oranı ile (H/D) taşıma kapasitesi oranı (BCR) değişimi

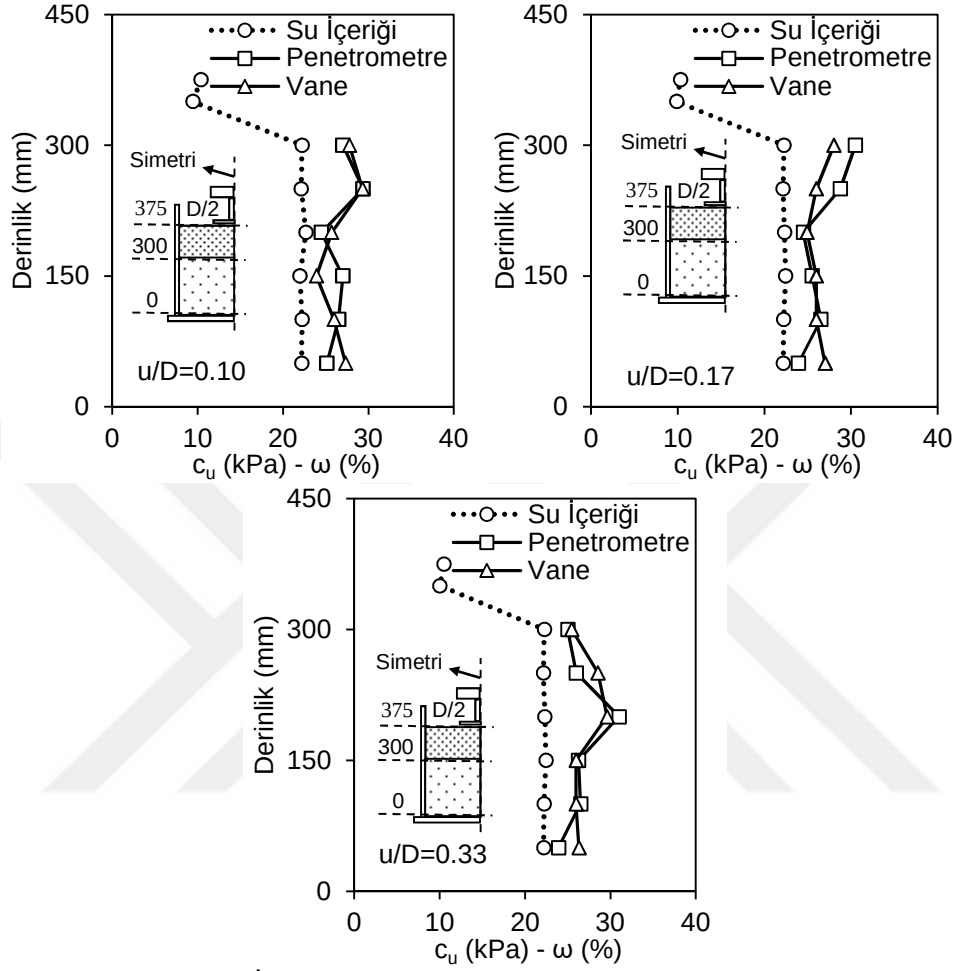
incelendiğinde, düşük dolgu kalınlıklarında ($H/D=0.33, 0.50$) taşıma kapasitesi oranının doğrusal arttığı, dolgu kalınlığı arttıkça taşıma kapasitesi artışının doğrusallıktan saparak başlangıçtakinden farklı bir şekilde arttığı görülmüştür. Özellikle yüksek dolgu kalınlıklarında görülen bu doğrusal olamayan artışın ölçek (boyut) etkisinin yönlendirmesiyle temel altındaki gerileme bölgesinin dolgunun içinde kalması ve zayıf zemine iletilen gerilmelerin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak tabaka kalınlığı ile taşıma kapasitesi oranı artışın doğrusal olduğu, düşük dolgu kalınlıklarının bu etkiden nispeten uzak olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca genellikle statik yüklemeli dolgularda yükün dolguya aktarıldığı temel boyutlarının yüksek olmasından dolayı temel altına yerleştirilen dolgu kalınlığının temel boyutuna oranının düşük kalmaktadır. Bu gibi sebepler düşünüldüğünde düşük dolgu kalınlığı oranlarında çalışmanın daha uygun olabileceğine karar verilerek geosentetik güçlendirmeler bu tip dolgularda yapılmıştır.

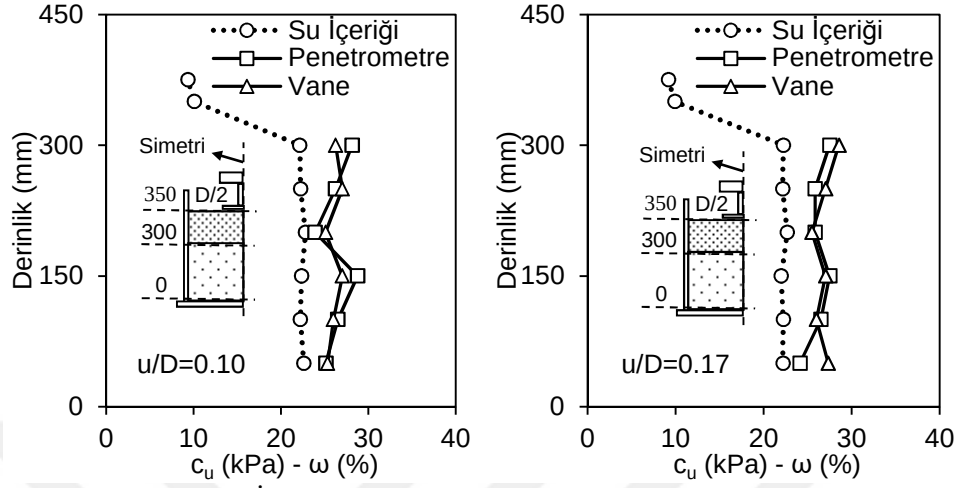
4.2.3. Geocell Güçlendirme Etkisi (Seri III)

Bu seride zayıf zemin üzerine, geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemedan dolgu yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deneylerde önce geocell iki farklı dolgu tabakası kalınlığının içerisinde, farklı derinliklere yerleştirilerek geocell donatının dolgu tabakası içerisindeki optimum yeri belirlenmiş, daha sonra iki farklı yüksekliğe sahip ve iki farklı hücre açıklığına sahip geocell ile deneyler yapılarak yükseklik ve açıklığın etkileri araştırılmıştır. Çalışmada geocell donatının hücre açıklığı, geocell donatının bir hücresinin alanına eşdeğer alandaki dairenin çapı (d), geocell donatının yüksekliği (h_c) olarak ifade edilmiştir.

4.2.3.1. Dolgu İçerisindeki Yerinin Etkisi (Geocell)

Kalınlığı 0.5D (H) olan dolgu içerisine, 0.10D, 0.17D ve 0.33D (u) olmak üzere üç farklı derinliğe ve kalınlığı 0.33D (H) olan dolgu içerisine, 0.10D ve 0.17D (u) olmak üzere iki farklı derinliğe geocell donatı yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde geocell donatının hücre açıklığı 0.62 D (d) ve yüksekliği 0.17 D (h_c) sabit olarak alınmıştır. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği $H/D=0.50$ için Şekil 4.15’de, $H/D=0.33$ için Şekil 4.16’da verilmiştir.

Şekil 4.15. $H/D=0.50$ İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Deney Şartları Kontrolü

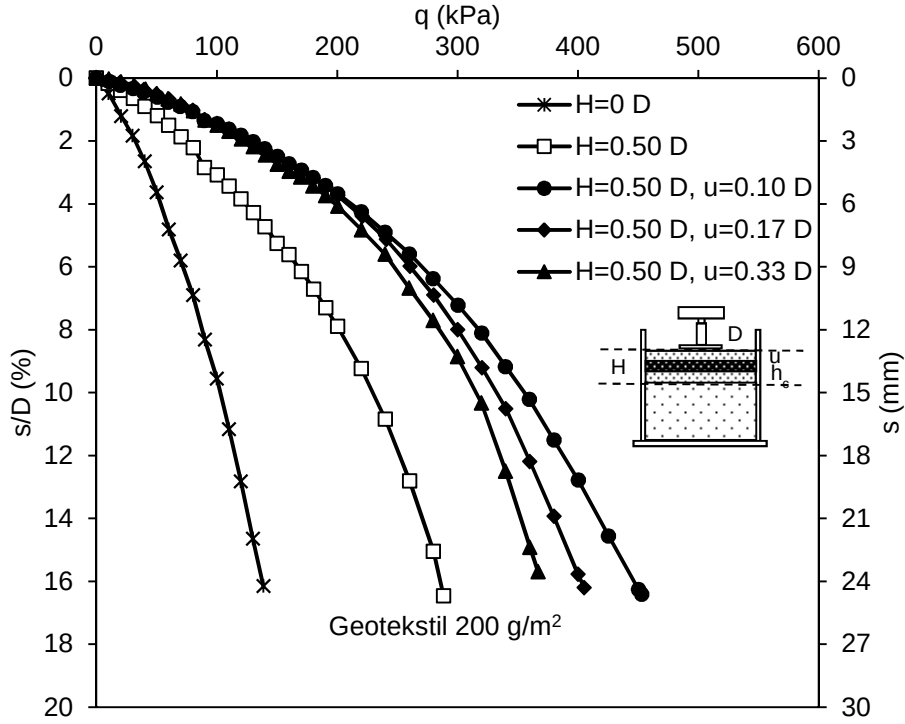


Şekil 4.16. H/D=0.33 İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Deney Şartları Kontrolü

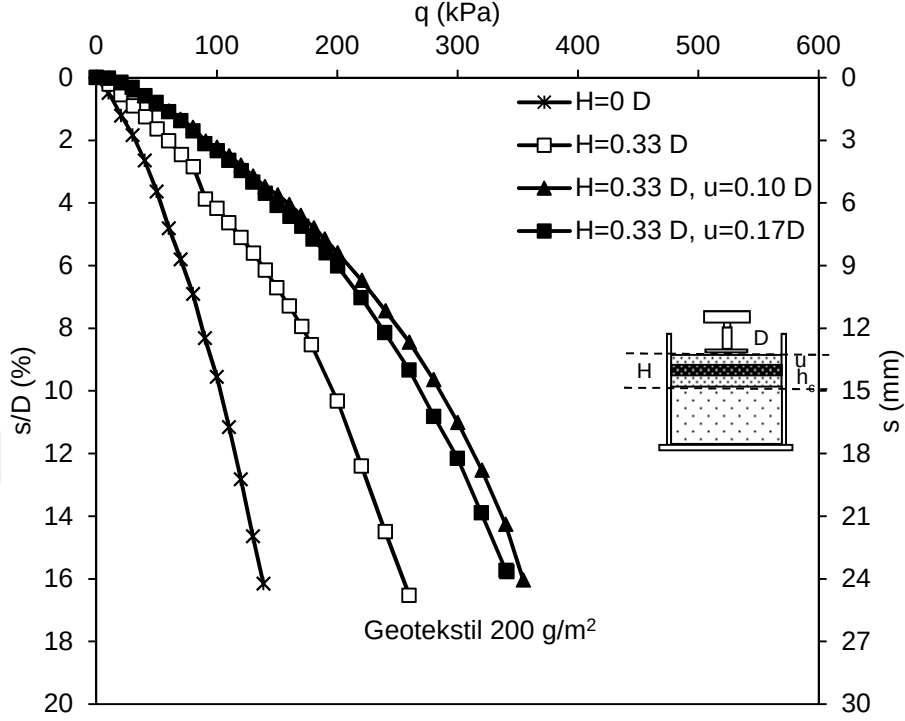
İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu içerisine, farklı derinliklere ($u/D=0.33$, 0.17 ve 0.10) hücre açıklığı $0.62 D$ (d) ve yüksekliği $0.17 D$ (h_c) olan geocell donatı yerleştirilen deneylerden, dolgu kalınlığı $0.5D$ (H) ve $0.33D$ (H) olan deneylerin gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrileri sırası ile Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de sunulmuştur. Her iki dolgu kalınlığı içinde, geocell donatı ile güçlendirilen durumlardaki eğrilerin davranışları birbirlerine benzemekle birlikte, bütün güçlendirmeli durumların aynı dolgu kalınlığındaki güçlendirmesiz duruma göre (aynı deplasman değerlerinde) daha çok yük aldığı görülmüştür. Bu durumun geocell donatının güçlendirme etkisi ile (düşey ve yatay sınırlandırma veya membran etkisi) dolgu tabakasının rijitlik artışı sonucunda gerilme yayma açısının artması ile zayıf zemine gelen gerilmelerin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca geocell donatının gömülme derinliği için, her iki dolgu kalınlığı içinde, en etkili performans (aynı deplasman oranındaki gerilme değeri) geocell donatının, temel çapının yüzde 10’una ($u/D=0.10$) denk gelen gömülme derinliğine yerleştirildiği durumda elde edilmiştir. Önceki yapılan bazı çalışmalarda araştırmacılar, kum dolgulu geocell donatı için optimum gömülme derinliğini, mevcut çalışmada elde edilen granüler inşaat ve yıkıntı atığı malzeme

dolgulu duruma benzer bir şekilde, temel çapının % 10'u olarak önermişlerdir (Dash ve ark, 2003; Tafreshi ve Dawson 2012). Ek olarak bazı araştırmacılar dolgu içerisine yerleştirilen geocell donatının zarar görmemesi için üzerinde bir örtü tabakası yerleştirmenin önemini vurgulamışlardır (Pokharel, 2010; Yang ve ark, 2012; Thakur ve ark, 2012). Bu sebeplerle yapılan deneylerde geocell donatı temel çapının %10'undan daha düşük bir derinliğe yerleştirilmemiştir.

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.7'da sunulmuştur.



Şekil 4.17. H/D=0.50 İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Gerilme Deplasman Eğrisi

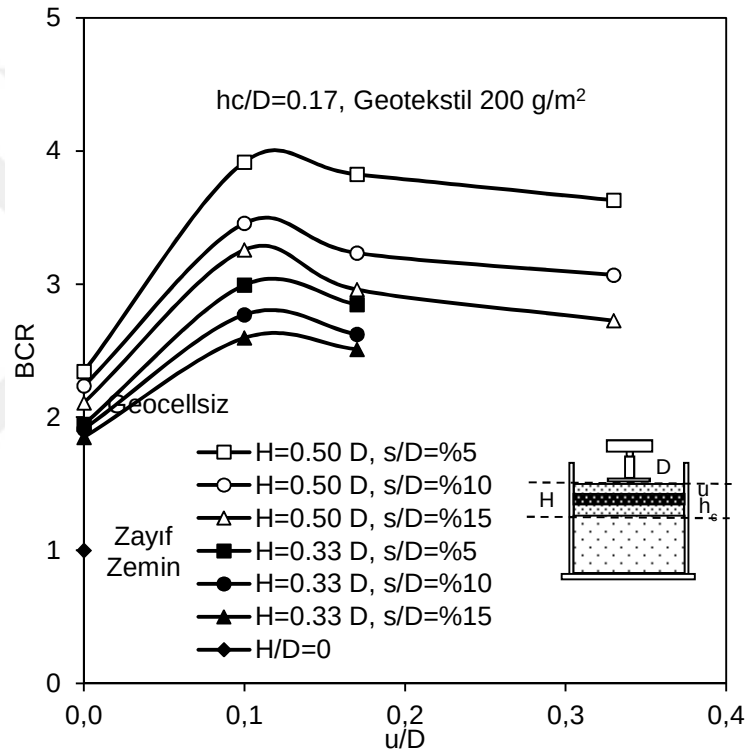


Şekil 4.18. H/D=0.33 İçin Farklı Gömülme Derinlikleride Gerilme Deplasman Eğrisi

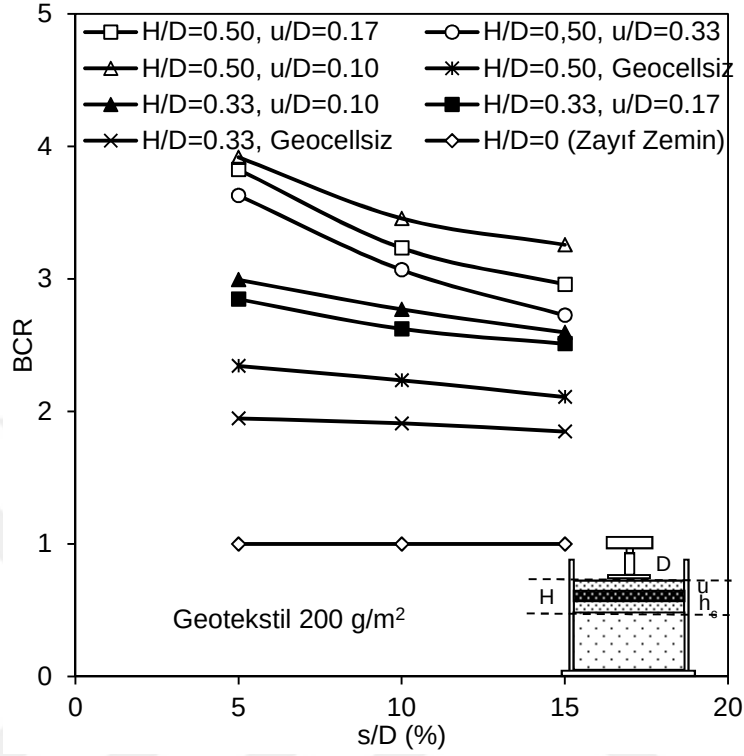
Çizelge 4.7. Geocell Güçlendirmeli Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

No	H/D	u/D	$q_u(kPa)$	BCR	s/D(%)
RCDW1	0.33	0.10	185.95	2.99	5
RCDW1	0.33	0.10	285.32	2.77	10
RCDW1	0.33	0.10	343.72	2.60	15
RCDW2	0.33	0.17	176.84	2.85	5
RCDW2	0.33	0.17	270.1	2.62	10
RCDW2	0.33	0.17	332.34	2.51	15
RCDW3	0.50	0.10	243.39	3.92	5
RCDW3	0.50	0.10	356.00	3.46	10
RCDW3	0.50	0.10	431.32	3.26	15
RCDW4	0.50	0.17	237.61	3.82	5
RCDW4	0.50	0.17	333.00	3.23	10
RCDW4	0.50	0.17	391.76	2.96	15
RCDW5	0.50	0.33	225.50	3.63	5
RCDW5	0.50	0.33	316.00	3.07	10
RCDW5	0.50	0.33	360.86	2.73	15

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında donatı gömülme derinliği oranı (u/D) ile BCR değişimi Şekil 4.19'da ve donatı gömülme derinliği oranına göre oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Hem deplasman oranları hem de farklı dolgu kalınlıkları için geocell donatısının dolgu içerisine yukarıdan temel çapının %10 derinliğe yerleştirme durumunda en yüksek BCR değerleri elde edilmiştir.



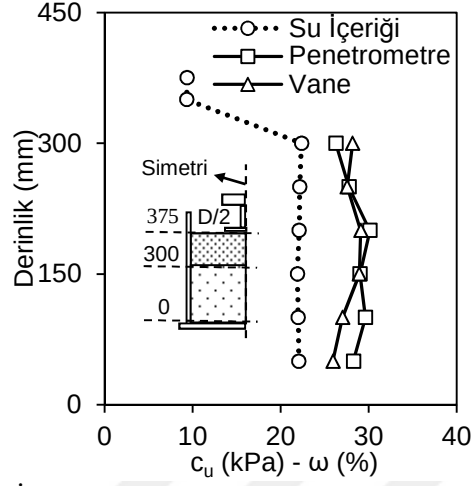
Şekil 4.19. Geocell Güçlendirmeli Durumda u/D 'ye göre BCR Değişimi



Şekil 4.20. Geocell Güçlendirmeli Durumda s/D'ye göre BCR Değişimi

4.2.3.2. Yüksekliğin Etkisi

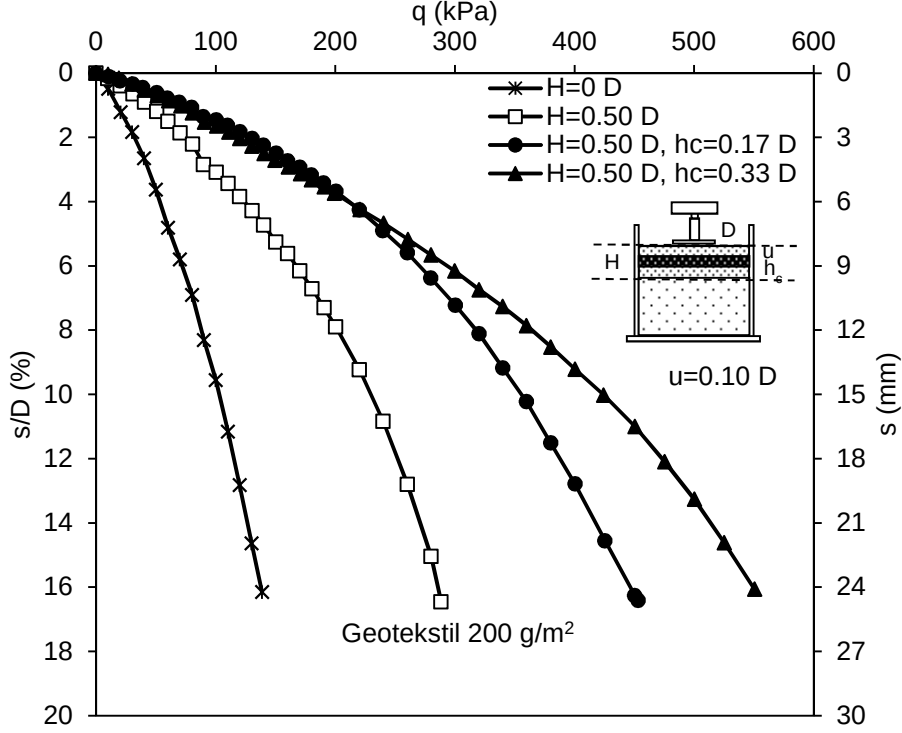
Zayıf zemin üzerine yerleştirilen geocell güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolguda, geocell yüksekliği etkisinin araştırılabilmesi için, hücre açıklığı 0.62 D (d) ve yüksekliği 0.33 D (h_c) olan geocell donatı ile güçlendirmeli durumda statik yüklemeli deney yapılmıştır. Deneyde geocell temel çapının %10'u derinliğine ($u/D=0.1$) yerleştirilmiştir. Deneyde derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.21'de sunulmuştur.

Şekil 4.21. $h_c/D=0.33$ İçin Deney Şartları Kontrolü

Yüksekliği 0.33 D olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu deney sonucunda elde edilen gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrisi ve diğer deneyle kıyaslaması Şekil 4.22’de sunulmuştur. Geocell donatı yüksekliğinin artırılması temel çapının yaklaşık %3.5’i (yaklaşık 5 mm) deplasman değerine kadar gözle görünür bir etki yapmaz iken, bu deplasman değerinden sonra deplasman arttıkça, basınç artışı kalın geocell güçlendirmede ($h_c=0.33$ D), ince geocell güçlendirmeye ($h_c=0.17$ D) göre, dikkate değer bir şekilde daha fazla olmuştur. Bu davranışın, kalın geocell güçlendirmede artırılmış sınırlandırma etkisinden dolayı, deplasman arttıkça membran etkisinin ince geocell güçlendirmeye göre daha çok armasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu şekilde artan deformasyonlarda, kalın geocell güçlendirmeli dolgunun rijitliği ve gerilme dağıtma açısının, ince geocell güçlendirmeli dolguya göre daha çok arttığı ve bunun sonucunda zayıf zemine gelen gerilmeleri daha çok azaldığı tahmin edilmektedir.

Temel çapının %5, %10 ve %15’ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında farklı yüksekliklerdeki geocell ile güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı

(CDW) dolgulu zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.8’de sunulmuştur.

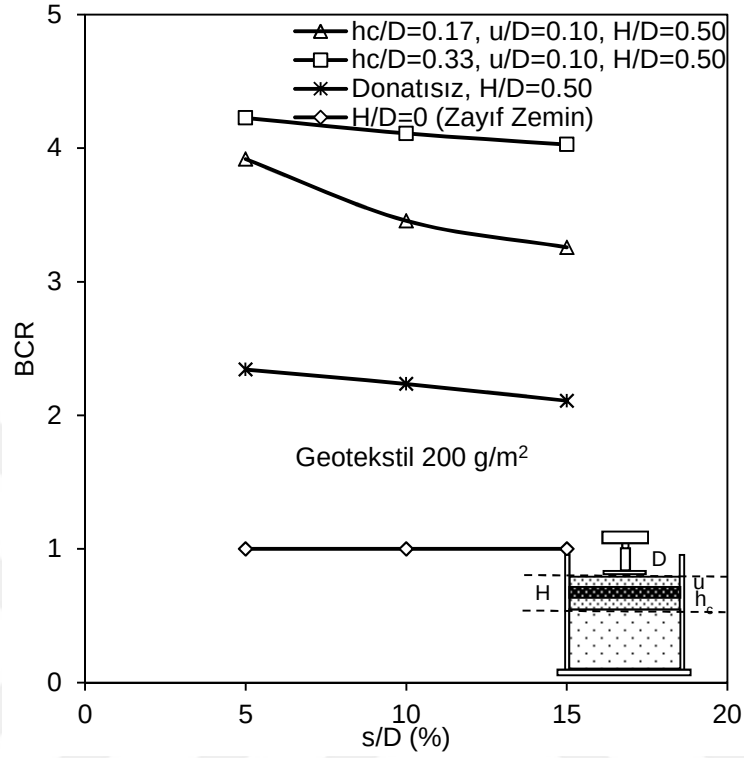


Şekil 4.22. Farklı Geocell Yüksekliği İçin Gerilme Deplasman Eğrisi

Çizelge 4.8. Farklı Geocell Yüksekliği İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

No	H/D	u/D	h_c/D	$q_u(kPa)$	BCR	s/D(%)
RCDW3	0.50	0.10	0.17	243.39	3.92	5
RCDW3	0.50	0.10	0.17	356.00	3.46	10
RCDW3	0.50	0.10	0.17	431.32	3.26	15
RCDW6	0.50	0.10	0.33	262.57	4.23	5
RCDW6	0.50	0.10	0.33	423.28	4.11	10
RCDW6	0.50	0.10	0.33	533.23	4.03	15

Temel çapının %5, %10 ve %15’ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında farklı yüksekliklerdeki geocell güçlendirme için, oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.23’te gösterilmiştir. Geocell yüksekliğinin artmasıyla, deplasman oranı arttıkça iyileştirme oranı da artmıştır.

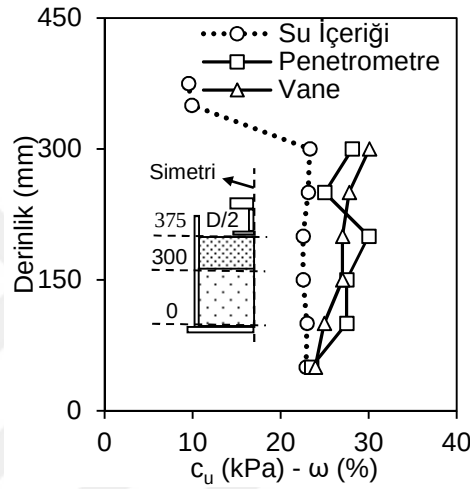


Şekil 4.23. Farklı Kalınlıktaki Geocell Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre BCR Değişimi

4.2.3.3. Hücre Açıklığının Etkisi

Literatürdeki mevcut çalışmalarda araştırmacılar, kumun dolgu malzemesi olarak kullanıldığı geocell güçlendirmeli deneylerde geocell donatının hücre açıklığının temel çapının 0.6 ile 0.8 katı arası olduğunda en etkili performansın elde edildiğini ifade etmişlerdir (Dash ve ark, 2003; Sireesh ve ark, 2009; Pokharel, 2010; Tafreshi ve Dawson 2012). Benzer şekilde, çalışma kapsamındaki yapılan geocell güçlendirmeli deneylerde geocell donatının hücre açıklığı oranı (d/D) 0.62 seçilerek, zayıf zemin üzerine yerleştirilen geocell güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgular için statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Ancak benzer deney şartlarında geocell donatı hücre açıklığının yaklaşık iki katına çıkması durumundaki oluşan davranış değişikliğinin incelenebilmesi amacıyla statik

yüklemeli deney yapılmıştır. Deney, yüksekliği $0.17 D$ (h_c) ve hücre açıklığı $1.25 D$ (d) olan geocell donatının, dolgu içerisine temel çapının %10'u derinliğine ($u/D=0.1$) yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Deneyde derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.24'te sunulmuştur.

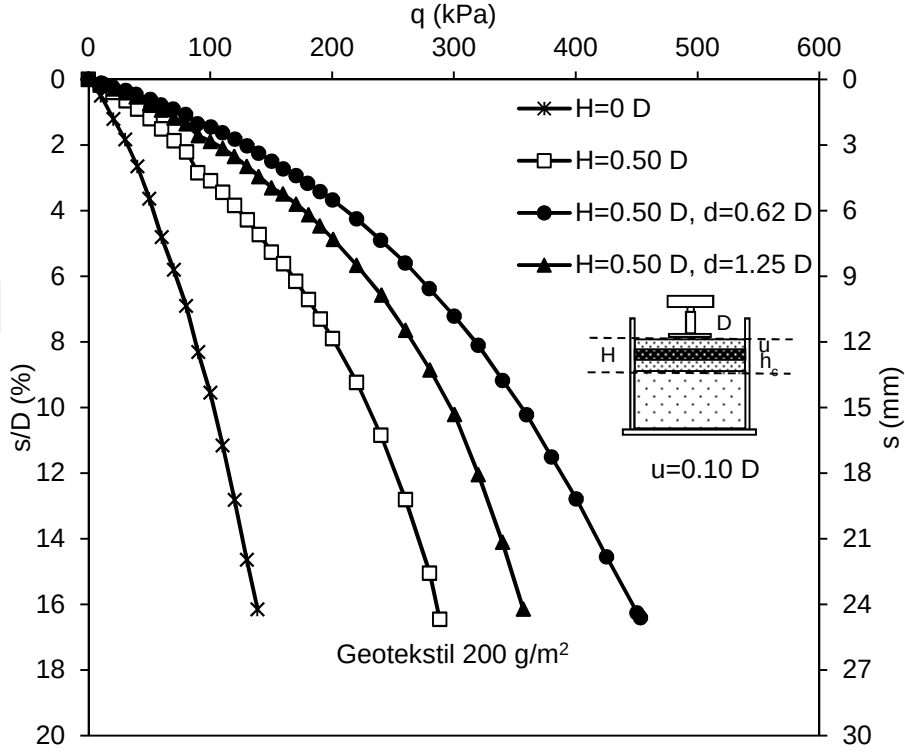


Şekil 4.24. $d/D=1.25$ İçin Deney Şartları Kontrolü

Hücre açıklığı $1.25D$ olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu deney sonucunda elde edilen gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrisi (hücre açıklığı $0.62D$ olan geocell güçlendirmeli durum ile birlikte) Şekil 4.25'te sunulmuştur. Hücre açıklığı artması ile aynı deplasman oranında elde edilen basınç değerleri önemli ölçüde azalmış ve bu azalış deplasman oranı değeri arttıkça artmıştır. Özellikle hücre açıklığının temel plakası çapından daha büyük olması durumunda, donatının düşey ve yatay sınırlandırma etkisinin çok azaldığı tahmin edilmekte, ayrıca bu durumda artan deplasmanlarda da membran etkisinin daha az olduğu düşünülmektedir.

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında farklı hücre açıklığına sahip geocell ile güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı

atığı (CDW) dolgulu zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.9'da sunulmuştur.



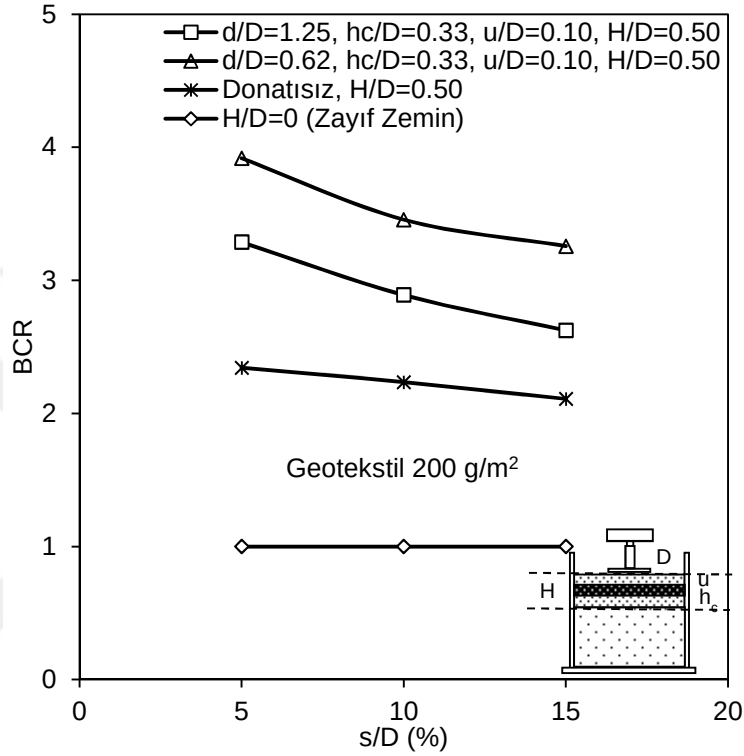
Şekil 4.25. Farklı Hücre Açıklığı için Gerilme Deplasman Eğrisi

Çizelge 4.9. Farklı Hücre Açıklığı İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

No	H/D	u/D	h_c/D	d/D	$q_u(kPa)$	BCR	s/D(%)
RCDW3	0.50	0.10	0.17	0.62	243.39	3.92	5
RCDW3	0.50	0.10	0.17	0.62	356.00	3.46	10
RCDW3	0.50	0.10	0.17	0.62	431.32	3.26	15
RCDW7	0.50	0.10	0.17	1.25	204.20	3.29	5
RCDW7	0.50	0.10	0.17	1.25	297.66	2.89	10
RCDW7	0.50	0.10	0.17	1.25	347.40	2.62	15

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında farklı hücre açıklığına sahip geocell güçlendirme için oturma

oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Hücre açıklığının artması ile bütün deplasman oranı değerlerinde güçlendirme derecesi düşmüştür.



Şekil 4.26. Farklı Hücre Açıklığına Sahip Geocell Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre BCR Değişimi

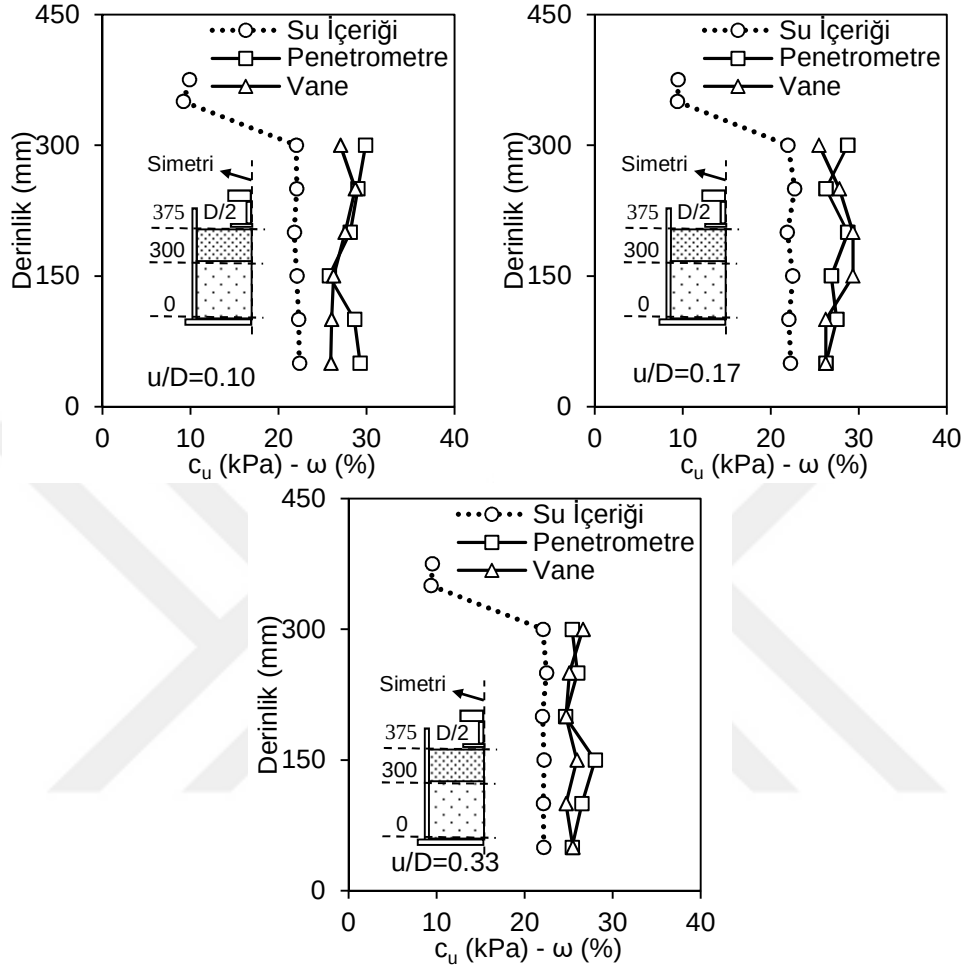
4.2.4. Geogrid Güçlendirme Etkisi (Seri IV)

Bu seride zayıf zemin üzerine, geogrid ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemeden dolgu yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deneylerde önce geogrid donatı dolgu içerisine, farklı derinliklere yerleştirilerek donatının dolgu içerisindeki optimum yeri belirlenmiş, daha sonra ilk donatıya göre farklı derinliklere yerleştirilen ikinci donatının optimum yeri belirlenmiştir. Çalışmada ilk donatının optimum gömülme derinliği (u) ve ikinci donatının ilk donatıya göre optimum konumu (h) araştırılmıştır.

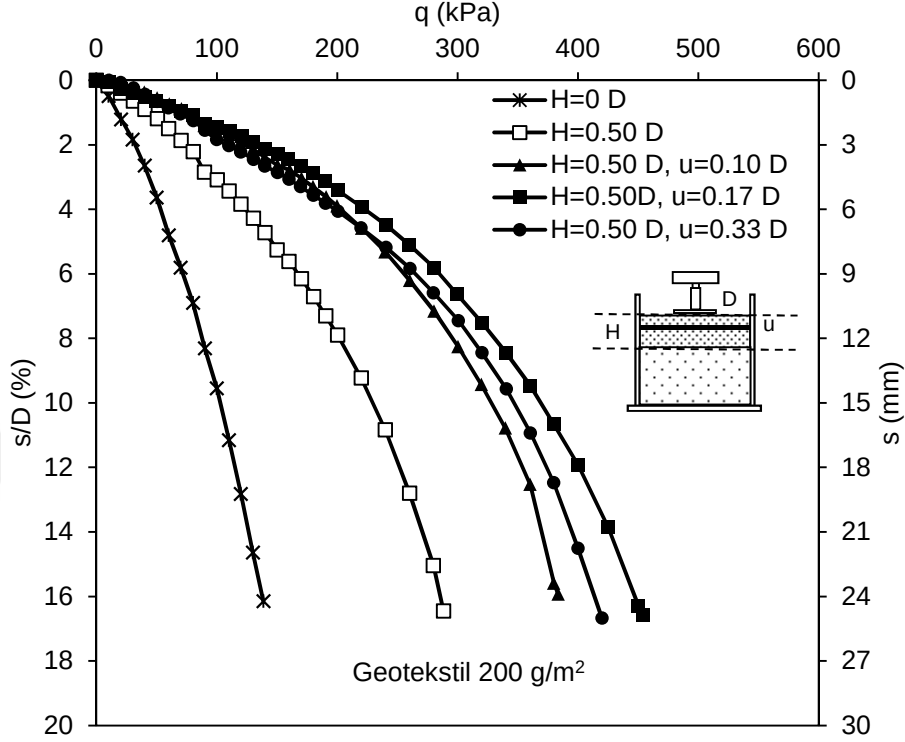
4.2.4.1. Dolgu İçerisindeki Yerinin Etkisi (Geogird)

Kalınlığı 0.5D (H) olan dolgu içerisine, 0.10D, 0.17D ve 0.33D (u) olmak üzere üç farklı derinliğe tek sıra geogrid donatı yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

Kalınlığı 0.5D (H) olan inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu içerisine, $u/D=0.33$, 0.17 ve 0.10 olmak üzere farklı derinliklere tek sıra geogrid donatı yerleştirilen deneylerin gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrileri Şekil 4.28’de sunulmuştur. Geogrid güçlendirmeli durumdaki eğrilerin davranışı birbirine benzemekle birlikte, bütün güçlendirmeli durumların güçlendirmesiz duruma göre (aynı deformasyonlarda) daha çok yük aldığı görülmüştür. Aynı deplasman oranlarına karşılık basınç değerlerine bakıldığında en yüksek basınç değerleri tek sıra geogrid donatının üstten temel çapının %17’sine ($u/D=0.17$), yani dolgu kalınlığının üçte birine ($u=H/3=0.33H=0.17D$) yerleştirildiğinde elde edilmiştir. Abu-Farsakh ve Chen (2011) tekrarlı yükleme ile kil üzerine geogrid güçlendirmeli granüler zeminde donatının optimum yerini, mevcut çalışmaya benzer şekilde dolgu kalınlığının üstten üçte biri derinliği olarak ifade etmişlerdir.



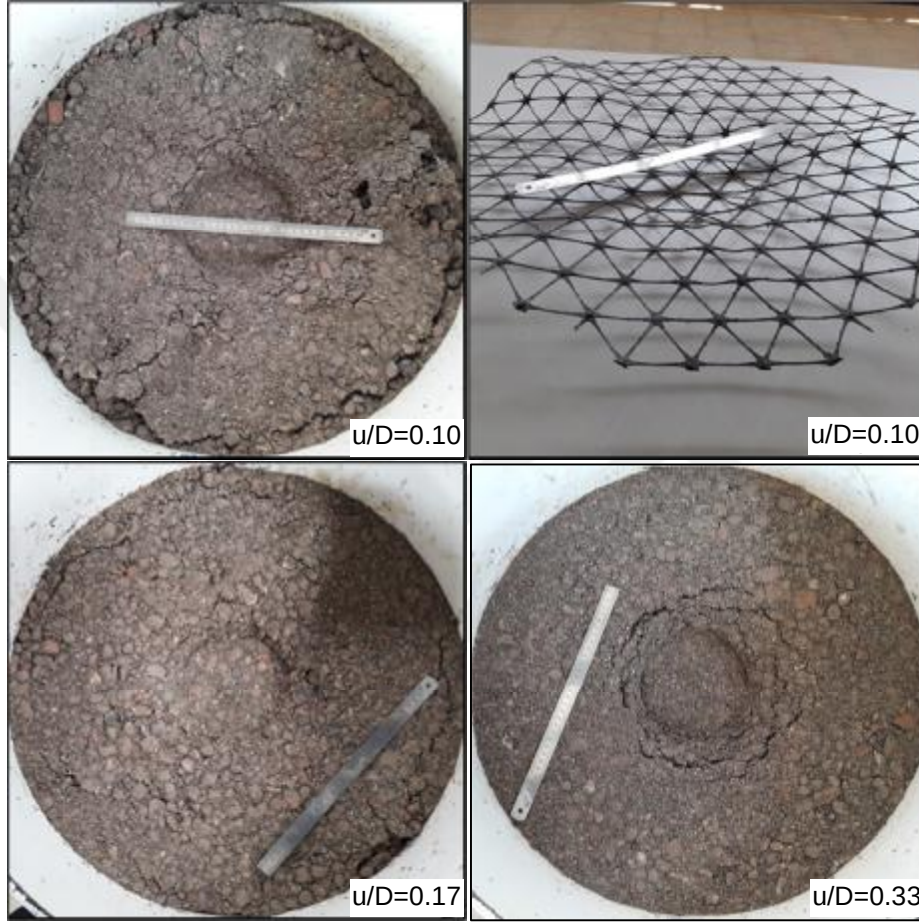
Şekil 4.27. Farklı Gömülme Derinlikleride (Geogrid) Deney Şartları Kontrolü



Şekil 4.28. Farklı Gömülme Derinlikleride (Geogrid) Gerilme Deplasman Eğrisi

Geogrid donatının çalışmada kullanılan inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) granüler malzeme ile (maksimum dane çapı yaklaşık olarak 20 mm) daha iyi kenetlenebilmesi için üstünde yaklaşık olarak temel çapının %17'si (yaklaşık 25 mm) kadar kalınlıkta bir tabaka bulunması gerektiği düşünülmektedir. Donatı yüzeye daha yakın bir yere yerleştirildiğinde, donatı ile zeminin kenetlenmesinin azaldığı bu sebeple dayanımın düştüğü tahmin edilmektedir. Ayrıca geogrid donatının ilk gömülme derinliği $u/D = \%17$ 'den düşük olduğu durumda kenetlenmenin az olmasının yanı sıra donatı üzerindeki örtü tabakasının sürşarj etkisi de azaldığı için, yükleme sırasında donatının kenarları kalkarak yüzeye çıkmış ve donatı aşırı zarar görmüştür. Bu durumda dayanımı etkilediği varsayılmaktadır. Donatı, $u/D = \%17$ derinliğe yerleştirildiğinde, donatıdaki

hareketlenme oldukça azalmış, daha derine yerleştirildiğinde ise hareketlenme yok olmuştur. Bu iki durumda ise yüzeyde bazı çatlaklar görülmüştür (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. $u/D=0.10$, 0.17 ve 0.33 Deney Sonucu Yüzey Görüntüsü ve $u/D=0.10$ Donatı Deformasyonu

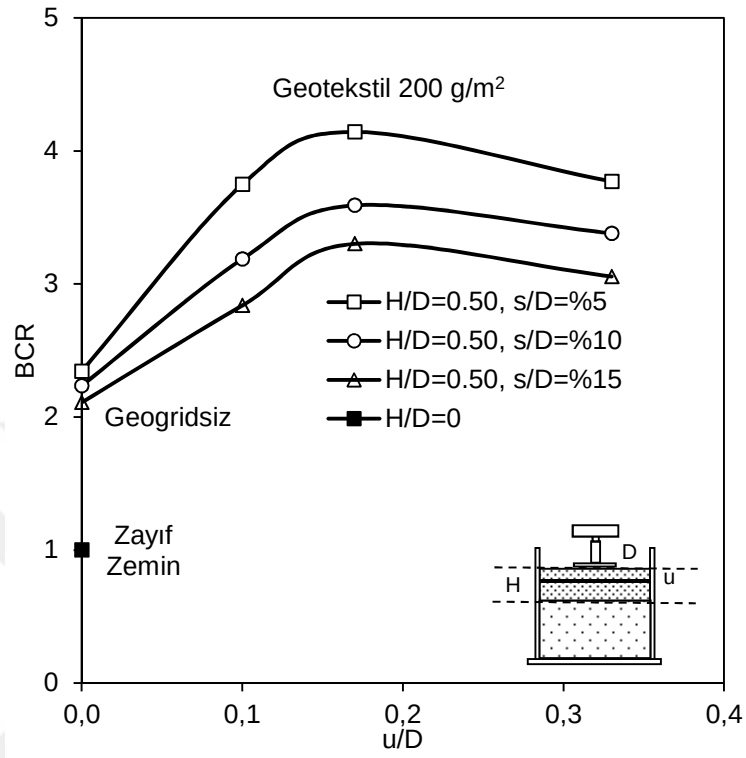
Donatı $u/D=0.17$ 'den daha derine yerleştirildiğinde, donatının temel altındaki gerilme bölgesinden dışarı doğru çıkmaya başlaması ve yükü zemine dağıtma açısını üst tarafa yerleştirilen donatı kadar arttıramamasından dolayı dayanımın düştüğü tahmin edilmektedir.

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında geogrid güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

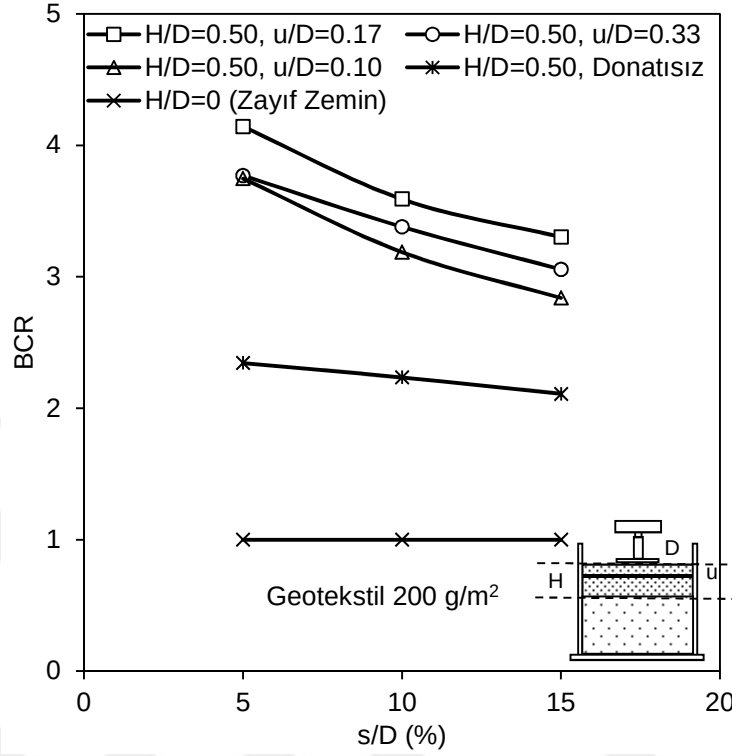
Çizelge 4.10. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

No	H/D	u/D	$q_u(kPa)$	BCR	s/D(%)
RCDW8	0.50	0.10	232.80	3.75	5
RCDW8	0.50	0.10	328.27	3.19	10
RCDW8	0.50	0.10	375.86	2.84	15
RCDW9	0.50	0.17	257.34	4.14	5
RCDW9	0.50	0.17	369.79	3.59	10
RCDW9	0.50	0.17	437.21	3.30	15
RCDW10	0.50	0.33	234.22	3.77	5
RCDW10	0.50	0.33	348.13	3.38	10
RCDW10	0.50	0.33	404.66	3.06	15

Tek sıra geogrid güçlendirmeli durumda, temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında donatı gömülme derinliği oranı (u/D) ile BCR değişimi Şekil 4.30'da ve donatı gömülme derinliği oranına göre oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Hem deplasman oranları hem de farklı gömülme derinlikleri için geogrid donatısının dolgu içerisine yukarıdan temel çapının %17 derinliğe yerleştirme durumunda en yüksek BCR değerleri elde edilmiştir.



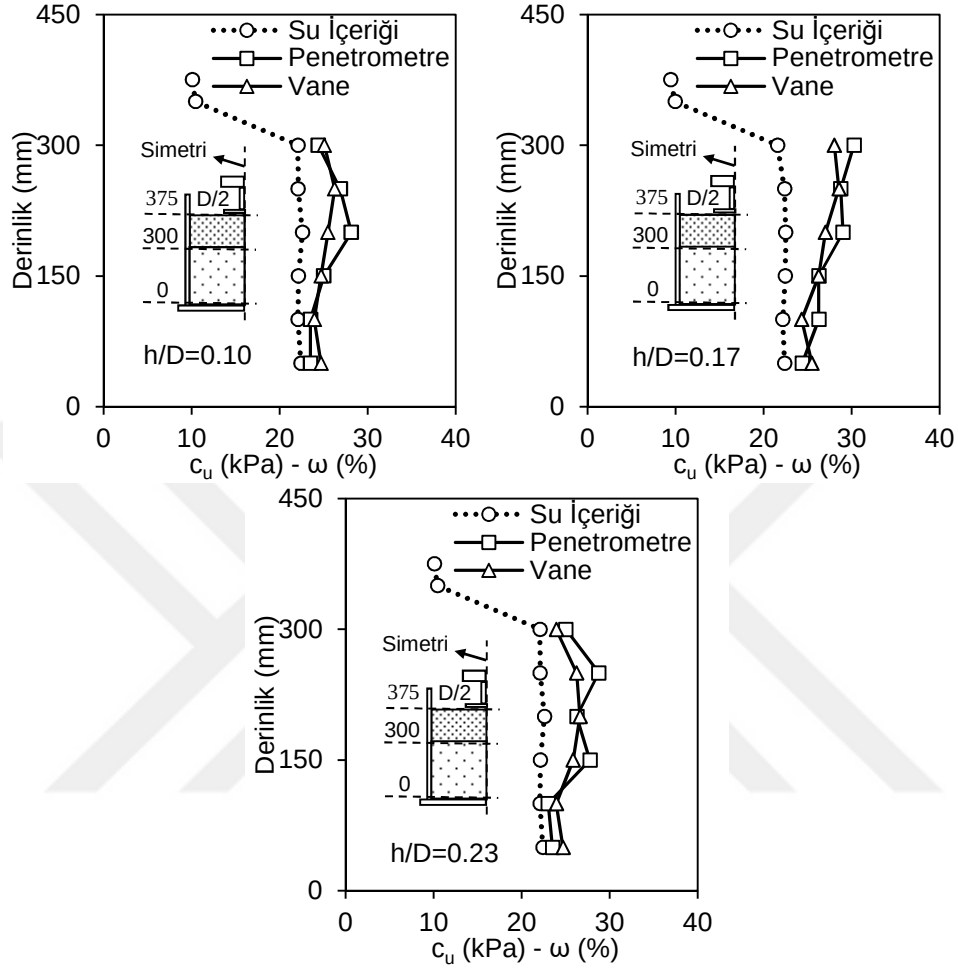
Şekil 4.30. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda u/D'ye göre BCR Değişimi



Şekil 4.31. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda s/D'ye göre BCR Değişimi

4.2.4.2. Donatılar Arası Mesafenin Etkisi

Önceki deneylerde, zayıf zemin üzerine yerleştirilen tek sıra geogrid güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolguda, geogrid donatı yüzeyden temel çapının %17'si derinliğe yerleştirildiğinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Aynı şartlarda çift sıra geogrid güçlendirmeli durumda ikinci geogrid donatısının yerinin belirlenebilmesi için, ilk donatıyı yüzeyden temel çapının %17'si derinliğine (u), ikinci donatıyı ise sırası ile ilk donatıya göre temel çapının %10'u, %17'si ve %23'ü (h) kadar mesafeye yerleştirerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.32'de gösterilmiştir.

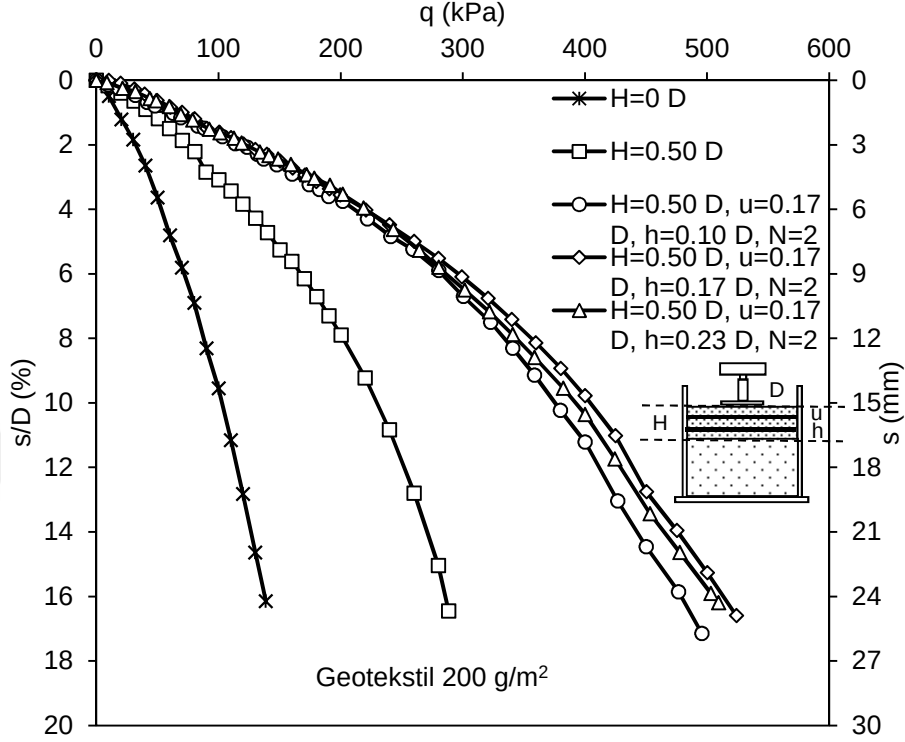


Şekil 4.32. Çift Sıra Güçlendirme Durumunda Deney Şartları Kontrolü

Kalınlığı $0.5D$ (H) olan inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu içerisine, ilk donatının $u/D=0.17$ 'ye ve ikinci donatının ilk donatıya göre $h/D=0.10$, 0.17 ve 0.23 olmak üzere farklı mesafelere yerleştirildiği, çift sıra geogrid güçlendirmeli deneylerin gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrileri Şekil 4.33'te sunulmuştur. Farklı donatılar arası mesafeye sahip deneylerde elde edilen gerilme deplasman eğrileri birbirine benzemekle birlikte, donatılara arası mesafe temel çapının %17'si ($h/D=0.17$), yani dolgu kalınlığının üçte biri olduğu durumda aynı deplasman oranlarına karşılık diğer durumlara göre daha çok yük aldığı

görülmüştür. Geogrid donatının çalışmada kullanılan inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) granüler malzeme (maksimum dane çapı yaklaşık olarak 20 mm) ile daha iyi kenetlenebilmesi için donatının üstünde olduğu gibi altında da yaklaşık olarak temel çapının %17'si (yaklaşık 25 mm) kadar kalınlıkta bir tabaka bulunması gerektiği düşünülmektedir. Donatının altında ve üstünde bu kalınlıktan düşük kalınlıklarda tabaka olursa, kenetlenme azaldığı için dayanımın biraz düştüğü tahmin edilmektedir. Chan (2007) geotekstil ve geogrid kullanarak yaptığı deneysel çalışmada mevcut çalışmaya benzer bir şekilde donatılara arası mesafeyi temel boyutunun %17'si olarak önermiştir. Ayrıca Demir (2011) arazide yaptığı zayıf zemin üzerine stabilize dolgulu deneyler sonucunda donatılar arası mesafenin temel çapının %17'si olmasını tavsiye etmiştir.

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında çift sıra geogrid güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.



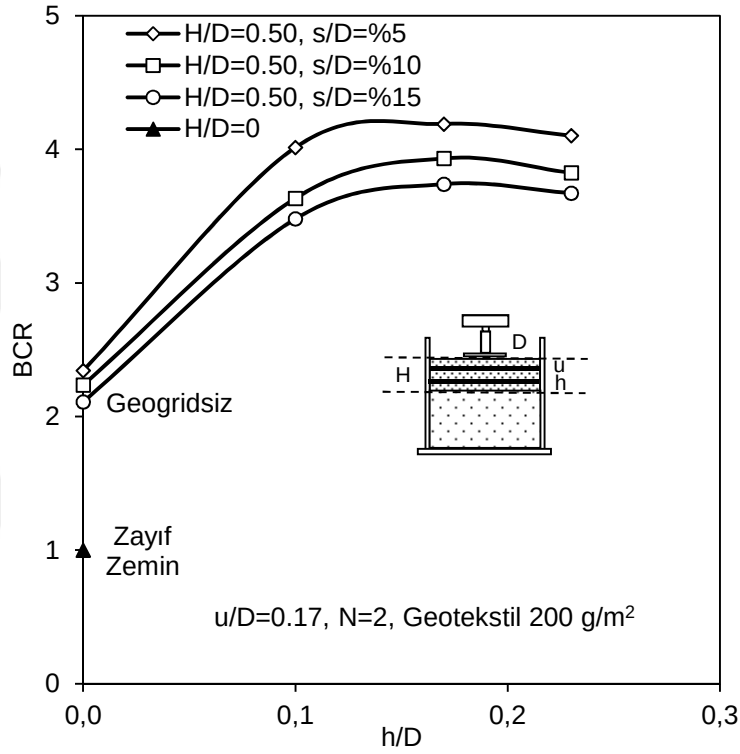
Şekil 4.33. Çift Sıra Güçlendirme Durumunda Gerilme Deplasman Eğrisi

Çizelge 4.11. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

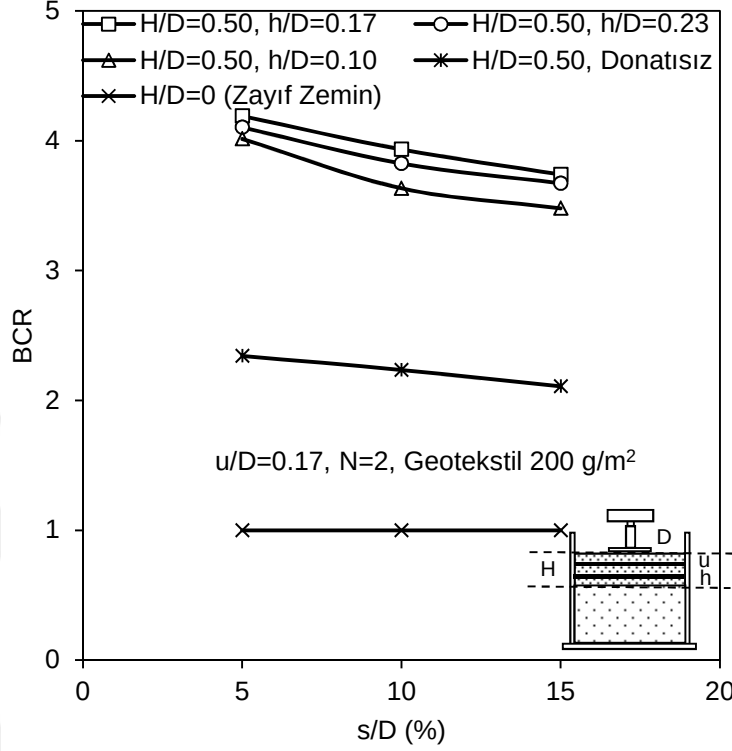
No	H/D	u/D	h/D	$q_u(kPa)$	BCR	s/D(%)
RCDW11	0.50	0.17	0.10	249.40	4.01	5
RCDW11	0.50	0.17	0.10	374.27	3.63	10
RCDW11	0.50	0.17	0.10	460.75	3.48	15
RCDW12	0.50	0.17	0.17	260.31	4.19	5
RCDW12	0.50	0.17	0.17	405.05	3.93	10
RCDW12	0.50	0.17	0.17	495.15	3.74	15
RCDW13	0.50	0.17	0.23	254.91	4.10	5
RCDW13	0.50	0.17	0.23	393.90	3.82	10
RCDW13	0.50	0.17	0.23	486.21	3.67	15

Çift sıra geogrid güçlendirmeli durumda, temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında donatı gömülme derinliği oranı (u/D) ile BCR değişimi Şekil 4.34'te ve donatı gömülme derinliği

oranına göre oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Bütün oturma oranları için ikinci donatı ilk donatıya göre temel çapının %17'si kadar bir mesafeye yerleştirildiğinde en yüksek BCR değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.34. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda h/D 'ye göre BCR Değişimi

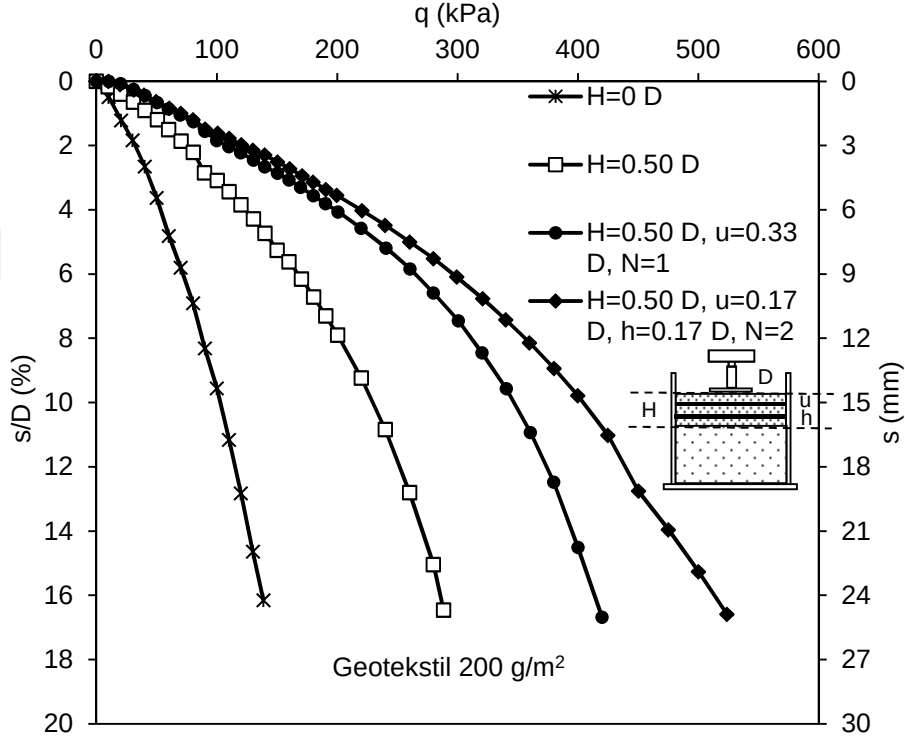


Şekil 4.35. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre BCR Değişimi

4.2.4.3. Donatı Sayısının Etkisi

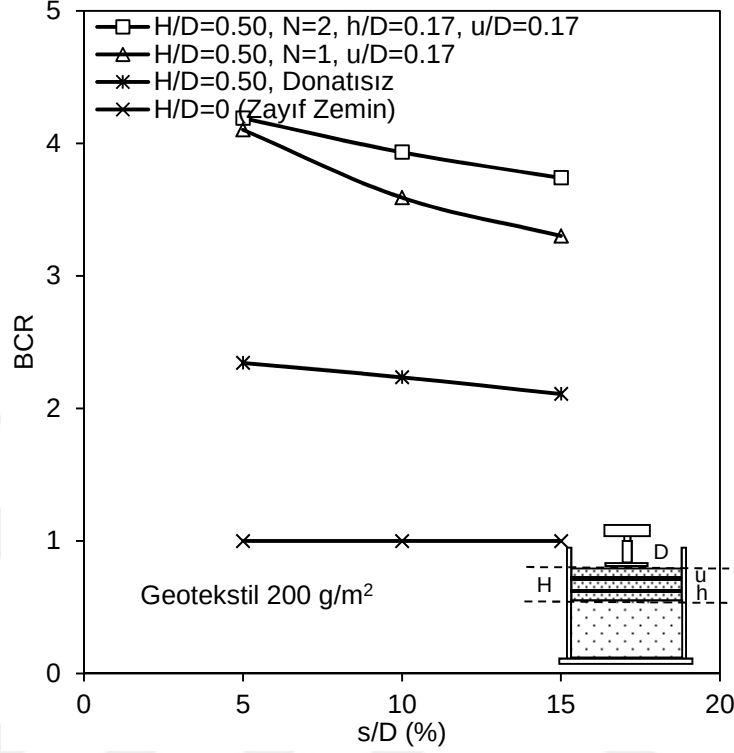
Zayıf zemin üzerine kalınlığı $0.5D$ (H) olan inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu içerisine, tek sıra ($u/D=0.17$, $N=1$) ve çift sıra ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$, $N=2$) geogrid güçlendirmeli deneylerin kıyaslanabilmesi için gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrileri Şekil 4.36'da sunulmuştur. Geogrid sayısının birden ikiye çıkarılması temel çapının yaklaşık %3.5'i (yaklaşık 5 mm) deplasman değerine kadar gözle görünür bir etki yapmaz iken, bu deplasman değerinden sonra deplasman arttıkça, çift geogrid güçlendirmeli durumdaki basınç artışı tek güçlendirmeli duruma göre, dikkate değer bir şekilde daha fazla olmuştur. Bu davranışın, çift geogrid güçlendirmeli durumda, artan güçlendirilmiş tabaka sayısı ile ilgili olarak artan kenetlenme etkisi ve özellikle membran etkisi ile doğrudan alakalı olduğu düşünülmektedir. Özellikle eklenen ikinci donatının artan

deformasyonlarda dolgunun rijitliğini ve dolayısı ile gerilme dağıtma açısını arttırdığı, bunun sonucunda zayıf zemine gelen gerilmelerin azaldığı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.36. Çift Sıra Güçlendirme Durumunda Gerilme Deplasman Eğrisi

Tek ve çift sıra geogrid güçlendirmeli deneylerde, temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği Şekil 4.37'te gösterilmiştir. Donatı sayısının ikiye çıkarılması ile deplasman oranı arttıkça iyileştirme oranının da arttığı görülmüştür.



Şekil 4.37. Tek ve Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda s/D 'ye göre BCR Değişimi

4.2.5. Geotekstil Etkisi (Seri V)

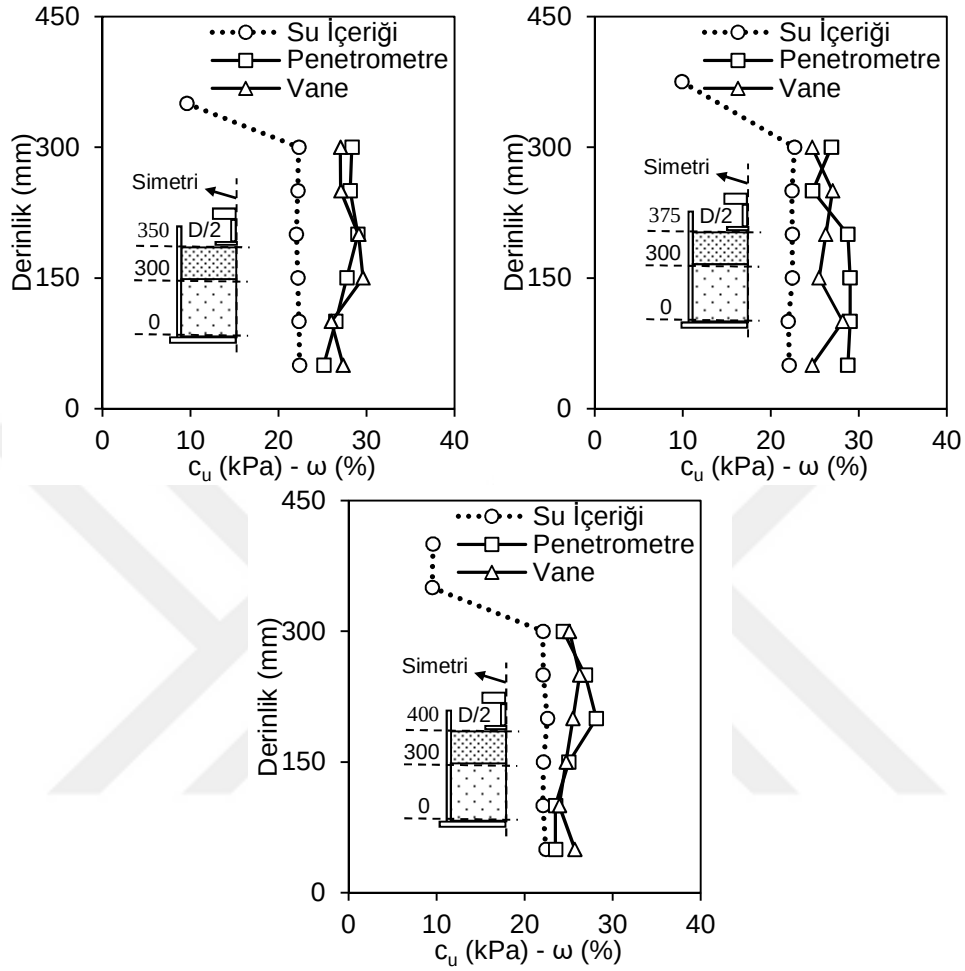
Bu seride öncelikle ayırma amacı ile zayıf zemin ve dolgu tabakası arasında yerleştirilen geotekstilin (200g/m^2) etkisi araştırılmıştır. Bu sebeple zayıf zemin üzerine hiçbir şey koyulmadan farklı kalınlıklara sahip ($H/D=0.33$, 0.50 ve 0.67) inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilmiş ve statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Daha sonra güçlendirme amacı ile zayıf zemin ve dolgu tabakası arasında yerleştirilen geotekstilin (600g/m^2) etkisi araştırılmıştır. Bu sebeple zayıf zemin üzerine güçlendirme amacı ile geotekstil (600g/m^2) serilmiş, üzerine ise farklı kalınlıklarda ($H/D=0.33$ ve 0.50) inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. En son deneyler birbirleri ile kıyaslanarak geotekstil etkisi yorumlanmıştır.

4.2.5.1. Ayırma Amaçlı Geotekstilin Etkisi (Geotekstil 200 g/m²)

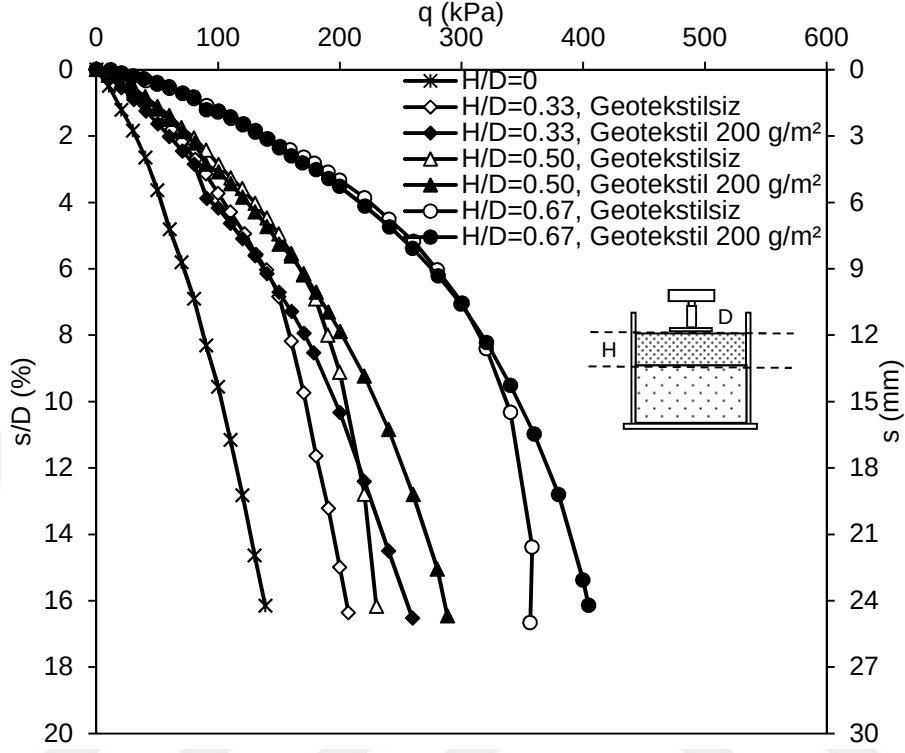
Zayıf zemin ile dolgu arasına ayırma amaçlı yerleştirilen geotekstilin etkisinin değerlendirilebilmesi için, zayıf zemin üzerine geotekstil serilmeden 0.33D, 0.50D ve 0.67 D (H) olmak üzere üç farklı kalınlıkta inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.38’de gösterilmiştir.

Ara yüzeye geotekstil serilmeden 0.33D, 0.50D ve 0.67 D (H) olmak üzere üç farklı kalınlıkta inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilen deneylerin gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrileri ara yüzeye ayırma amaçlı geotekstil yerleştirilen deneylerle birlikte Şekil 4.39’da sunulmuştur. Aynı dolgu kalınlığı için, ayırma amaçlı ara yüzeye yerleştirilen geotekstili (200 g/m²) deneylerin gerilme deplasman eğrileri geotekstilsiz deneylerle temel çapının (D) yaklaşık %7 ile %8 (yaklaşık 10-12 mm) deplasman değerlerine kadar oldukça benzerdir. Bu deplasman değerlerine kadar geotekstilin dikkate değer bir etkisi görülmemiştir. Ancak artan deplasman değerlerinde geotekstilli deneylerin basınç artış oranının geotekstilsiz deneylere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Özellikle artan deformasyon değerlerinde ayırma amaçlı geotekstilin dolgu malzemesinin zayıf zemine batmasını engellemesi sonucunda böyle bir davranışın elde edildiği düşünülmektedir.

Temel çapının %5, %10 ve %15’ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında ara yüzeyi geotekstilsiz inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.38. Geotekstilsiz Durumunda Deney Şartları Kontrolü



Şekil 4.39. Geotekstilsiz ve Ayırma Amaçlı Geotekstilli Durumda Gerilme Deplasman Eğrisi

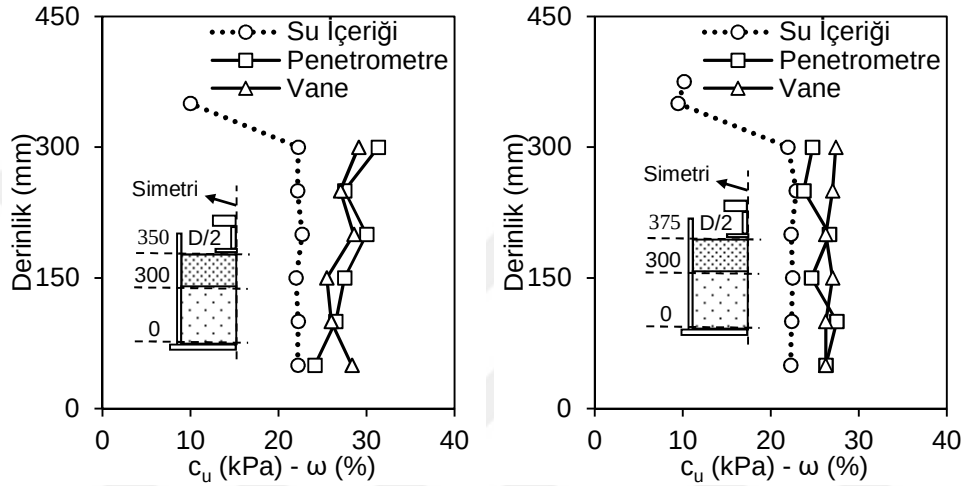
Çizelge 4.12. Geotekstilsiz Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

No	H/D	Geotekstil (g/m^2)	$q_u(\text{kPa})$	BCR	s/D(%)
CDW5	0.33	-	117.97	1.90	5
CDW5	0.33	-	171.12	1.66	10
CDW5	0.33	-	200.00	1.51	15
CDW6	0.50	-	148.09	2.38	5
CDW6	0.50	-	205.68	2.00	10
CDW6	0.50	-	227.99	1.72	15
CDW7	0.67	-	255.80	4.12	5
CDW7	0.67	-	337.06	3.27	10
CDW7	0.67	-	356.90	2.70	15

4.2.5.2. Güçlendirme Amaçlı Geotekstilin Etkisi (Geotekstil 600 g/m^2)

Geotekstilin güçlendirme etkisini araştırabilmek için, zemin ile inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu arasına güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2)

yerleştirilerek statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deneyler, 0.33D ve 0.50D olmak üzere iki farklı dolgu kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.

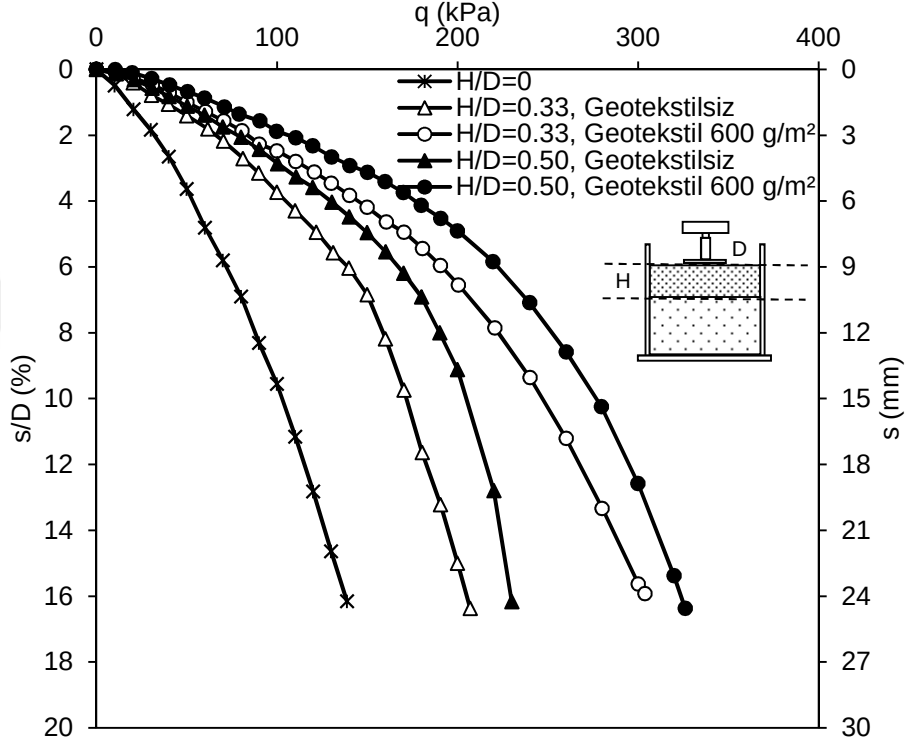


Şekil 4.40. Güçlendirme Amaçlı Geotekstilli Durumunda Deney Şartları Kontrolü

Ara yüzeye güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) serilerek 0.33D ve 0.50D (H) olmak üzere iki farklı kalınlıkta inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilen deneylerin gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrileri geotekstilsiz deneylerle birlikte Şekil 4.41'de sunulmuştur. Geotekstil güçlendirmeli durumdaki eğrilerin davranışı birbirine benzemekle birlikte, güçlendirmeli durumlarda, aynı kalınlıktaki (dolgu) güçledirmesiz duruma göre (aynı deplasmanlarda) biraz daha fazla yük aldığı görülmüştür. Güçlendirmeli ve güçledirmesiz durumlarda eğrilerin davranışları birbirine oldukça benzemektedir. Aradaki dayanım farkının güçlendirmeli durumdaki membran etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında ara yüzeye güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) yerleştirilen

inşaat ve yıkıntı atığı malzeme dolgulı zeminlerin taşıma gücü ve BCR değerleri Çizelge 4.13'te verilmiştir.



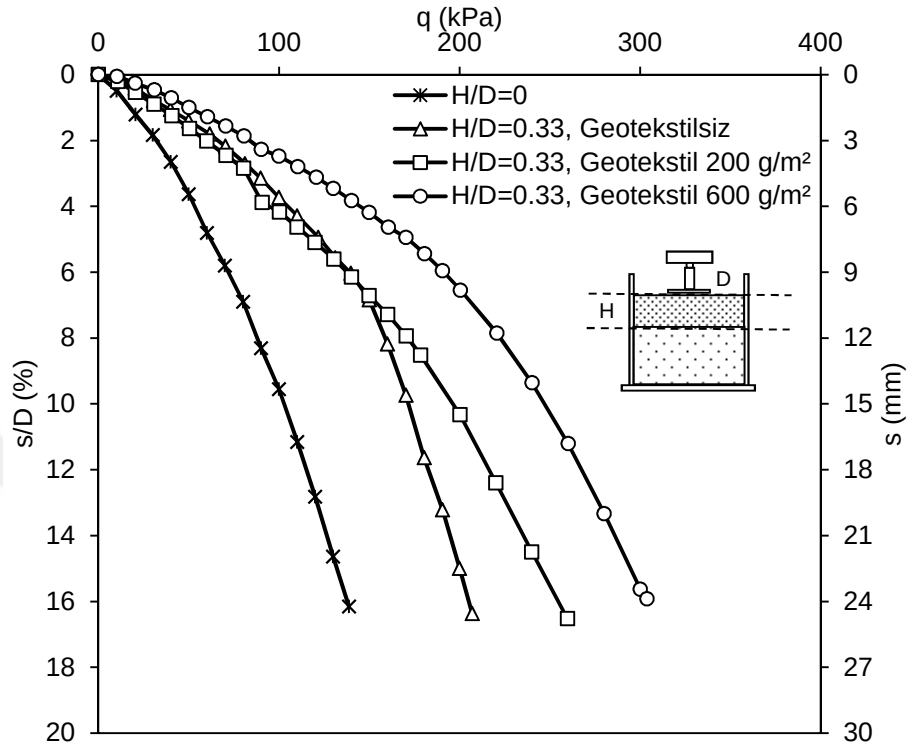
Şekil 4.41. Geotekstilsiz ve Güçlendirme Amaçlı Geotekstilli Durumda Gerilme Deplasman Eğrisi

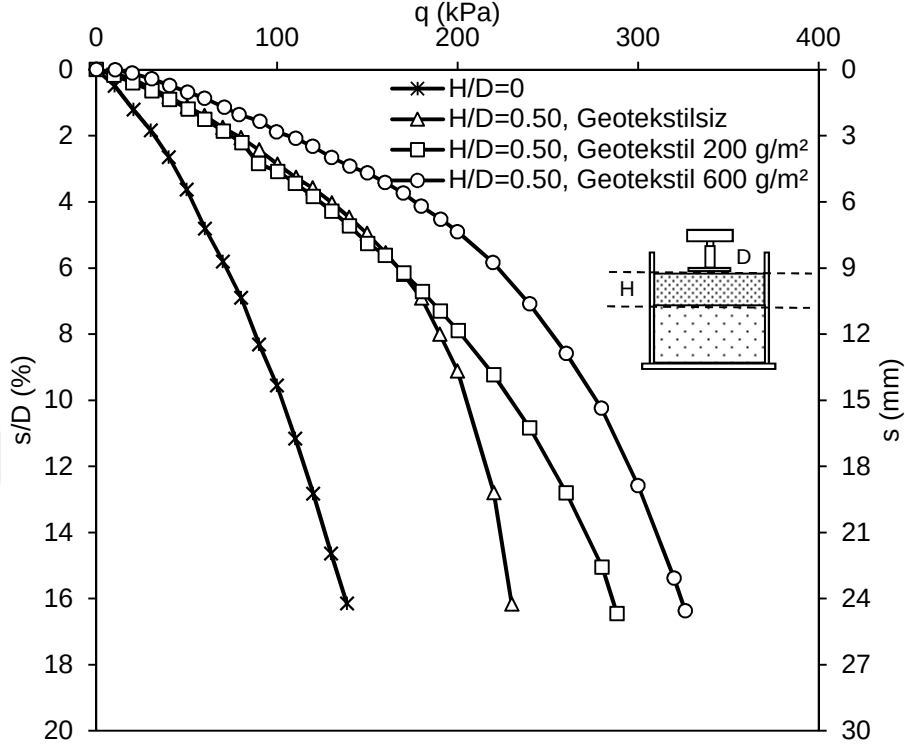
Çizelge 4.13. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Durum İçin Taşıma Gücü ve BCR Değerleri

No	H/D	Geotekstil (g/m ²)	q_u (kPa)	BCR	s/D(%)
RCDW14	0.33	600	171.35	2.76	5
RCDW14	0.33	600	247.74	2.41	10
RCDW14	0.33	600	294.94	2.23	15
RCDW15	0.50	600	202.50	3.26	5
RCDW15	0.50	600	276.75	2.69	10
RCDW15	0.50	600	317.71	2.40	15

4.2.5.3. Geotekstil Etki Değerlendirmesi

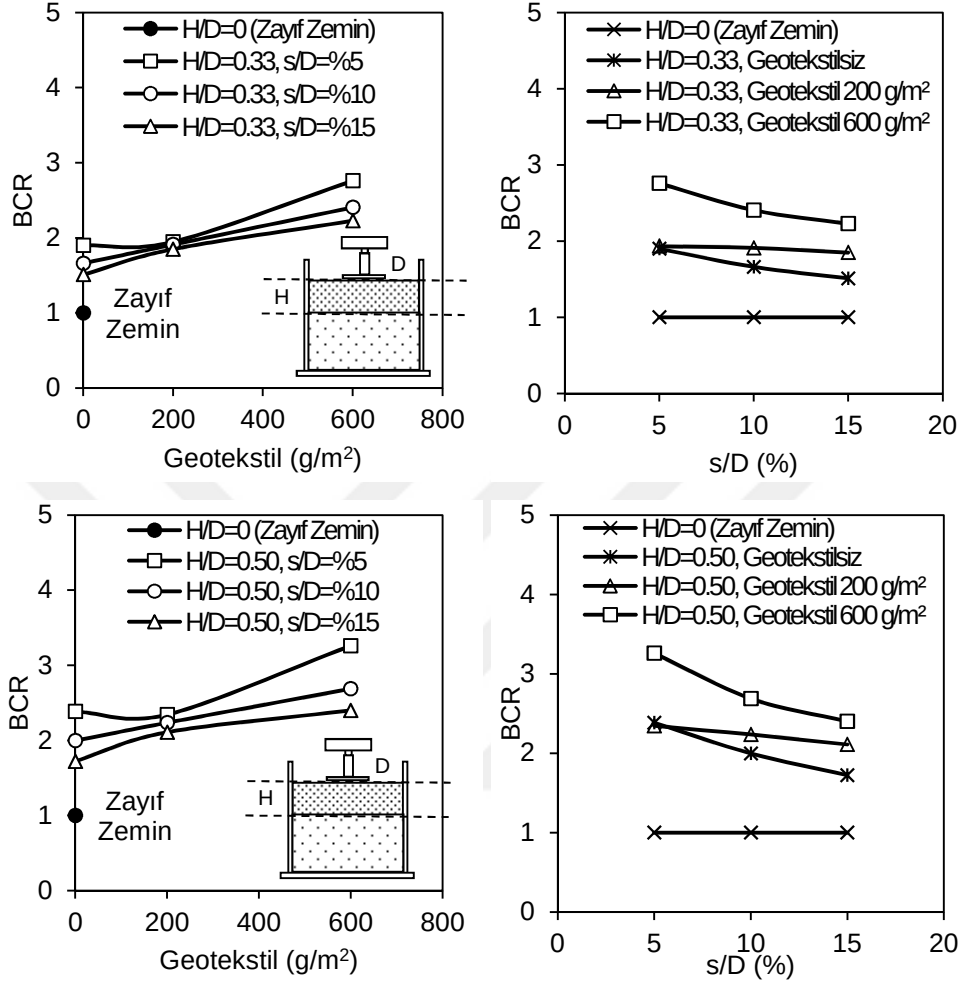
Zayıf zemin ile dolgu tabakası ara yüzeyi geotekstilsiz ve ara yüzeyinde ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) ile güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) olan deneylerin gerilme deplasman veya deplasman oranı eğrileri kıyaslaması, dolgu kalınlığı $0.33D$ ve $0.50D$ için sırası ile Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te gösterilmiştir. Her iki dolgu kalınlığı içinde ayırma amaçlı geotekstilin basınç deplasman eğrisindeki etkisi sadece ileri deplasman değerlerinde (yaklaşık $s/D=7-8$, yaklaşık $10-12 \text{ mm}$) görülürken, güçlendirme amaçlı geotekstilin etkisi bütün deplasman değerlerinde açıkça görülmüştür. Ara yüzeyde ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) ile güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) yerleştirilen deneylerin basınç deplasman eğrisi davranışı birbirine benzemekle birlikte, aynı deplasman değerlerinde güçlendirme amaçlı yerleştirilen durumda daha yüksek basınç değerleri elde edilmiştir. Subaida ve ark., (2009) zayıf zemin ve dolgu arasına geotekstil yerleştirilerek yaptıkları deneyler sonucunda geotekstilin rijitliğinin taşıma gücünü önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Deplasman değerlerinin ve geosentetiğin rijitliğinin artması ile membran etkisinin arttığı bir çok çalışmada vurgulanmıştır (Giroud ve Noiray, 1981; Palmeira ve Antunes, 2010). Tez kapsamında yapılan deneylerde güçlendirme amaçlı geotekstilin rijitliği ayırma amaçlı geotekstilin rijitliğinin yaklaşık üç katıdır. Özellikle artan deformasyonlarda güçlendirme amaçlı olan geotekstilin membran etkisinin daha fazla olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.42. $H/D=0.33$ İçin Geotekstil Değişiminin Gerilme Deplasman Eğrisi



Şekil 4.43. H/D=0.50 İçin Geotekstil Değişiminin Gerilme Deplasman Eğrisi

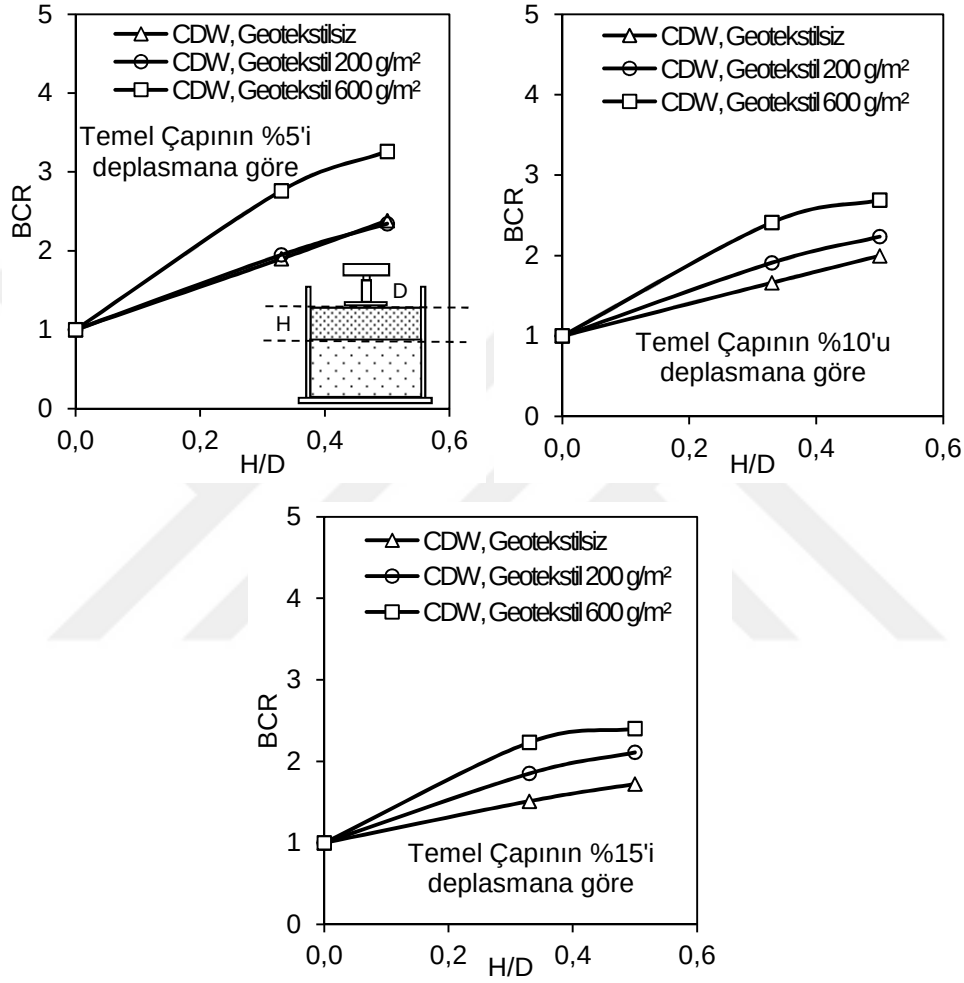
Geotekstil etkisinin değerlendirilebilmesi için, temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri (s/D) dikkate alındığında ara yüzeydeki geotekstilin durumu ile (ağırlık alan oranı- g/m^2) BCR değişimi grafiği çizilmiştir. Ek olarak geotekstil etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi açısından ara yüzeydeki geotekstilin durumuna göre oturma oranı (s/D) ile BCR değişimi grafiği de çizilmiştir. Bu grafikler dolgu tabakası kalınlığı $0.33D$ ve $0.50D$ (H) için Şekil 4.44'te gösterilmiştir. Her iki dolgu kalınlığı için özellikle deplasman oranı %5 ve %10 değerlerinde ayırma amaçlı geotekstil ($200 g/m^2$) yerleştirilmesinin BCR üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığı ancak %15 deplasman oranında BCR değerini artırdığı görülmüştür. Ayrıca güçlendirme amaçlı yerleştirilen geotekstil ($600 g/m^2$), bütün deplasman oranlarında BCR değerini artırmıştır.



Şekil 4.44. H/D, s/D ve Geotekstil Türüne Göre BCR Değişimi

Zayıf zemin ile dolgu arasında geotekstil yerleştirilen durumda dolgu tabakası kalınlığının etkisinin daha iyi değerlendirilebilmesi için, geotekstilin çeşidine göre dolgu tabakası kalınlığı ve BCR değişimi grafiği Şekil 4.45'te sunulmuştur. Eğrilere göre dolgu tabakası kalınlığı arttıkça geotekstilin iyileştirme etkisi azalmıştır. Benzer şekilde Subaida ve ark., (2009) zayıf zemin ve dolgu arasında geotekstil yerleştirilerek yaptıkları deneyler sonucunda geotekstilin ince

dolgular için taşıma kapasitesini arttırdığını dolgu kalınlığı arttıkça iyileştirmenin azaldığını belirtmişlerdir.



Şekil 4.45. Farklı Geotekstiller İçin Dolgu Tabakası Kalınlığı ile BCR Değişimi

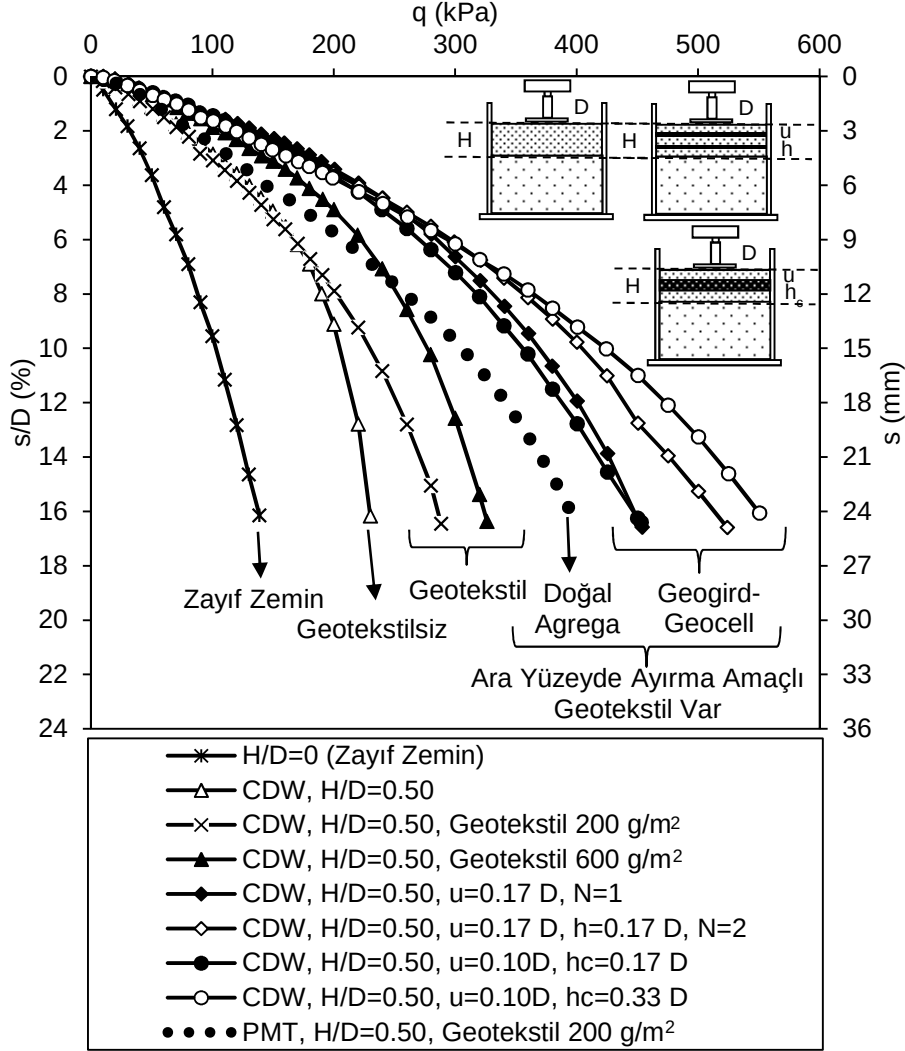
4.2.6. Statik Yüklerde Geosentetik Güçlendirmelerin Değerlendirilmesi

İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemeden inşa edilen dolgunun doğal agregalardan (PMT) inşa edilen dolgu performansını yakalayabilmesi için yapılan farklı tipteki geosentetik güçlendirmelerin etkisi Şekil 4.46'da verilen gerilme

deplasman eğrileri ile kıyaslanmıştır. Şekil 4.46'da daha önceki deneylerde belirlenen optimum konfigürasyonlarda tek ve çift sıra geogrid ($N=1, 2$), kalın ve ince geocell ($h_c/D=0.33, 0.17$) güçlendirmeli durum ile ara yüzeye yerleştirilen farklı geotekstilli durumları, doğal agregadan inşa edilen dolgu durumu ve zayıf zemin durumu ile kıyaslanarak verilmiştir. Güçlendirme amacı ile ara yüzeye geotekstilin (600 g/m^2) yerleştirildiği deney ve kıyaslama amacı geotekstilsiz deneylerin dışındaki tüm dolgulu deneylerde dolgu ile zayıf zemin arasına ayırma amacı ile geotekstil (200 g/m^2) yerleştirilmiştir.

Şekil 4.46'da görüldüğü gibi, doğal agregada (PMT) dolgulu deneyin inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu deneyin biraz üzerinde olmakla birlikte başlangıçta birbirine benzer davranış gösterdiği, deplasmanlar arttıkça (deplasman oranı duruma göre yaklaşık %5-%10'a ulaştıktan sonra) inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu deneydeki gerilme artışının doğal agregada dolgulu deneydeki gerilme artışının altında kaldığı ve bu sebeple de gerilme deplasman davranışlarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Genel olarak inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun performansı (aynı deplasman değerlerinde elde edilen basınç değerleri) doğal agregada (PMT) dolgunun performansına göre biraz düşük çıkmıştır. Ancak az bir geosentetik iyileştirme ile (ince bir geocell veya tek sıra geogrid vb.) inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun performansının doğal agregada dolgu performansını geçebildiği görülmüştür. İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu ara yüzeye yerleştirilen geotekstil (600 g/m^2) ile güçlendirildiği durumda ise, deplasman oranı yaklaşık %8'e kadar doğal agregada (PMT) dolgunun performansını yakalamakta fakat artan deplasmanlarda doğal agregada dolgunun basınç artışı daha çok olmaktadır.

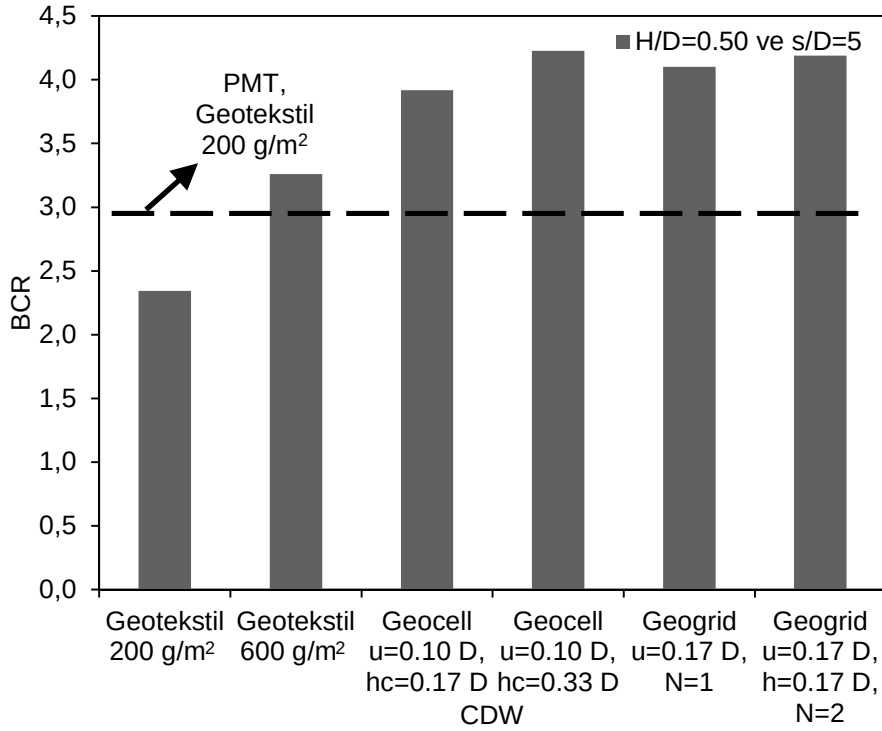
Yaklaşık %4 deplasman oranına kadar geogrid ve geocell güçlendirmeli inşaat yıkıntı atığı (CDW) dolgular, aynı deplasman oranlarında benzer basınç değerleri almıştır. Ancak artan deplasman değerlerinde yüksekliği $h_c=0.33D$ olan geocell ile güçlendirmeli durum ve çift sıra geogrid güçlendirme durum diğer güçlendirmeli durumlara göre biraz daha fazla basınç almışlardır.



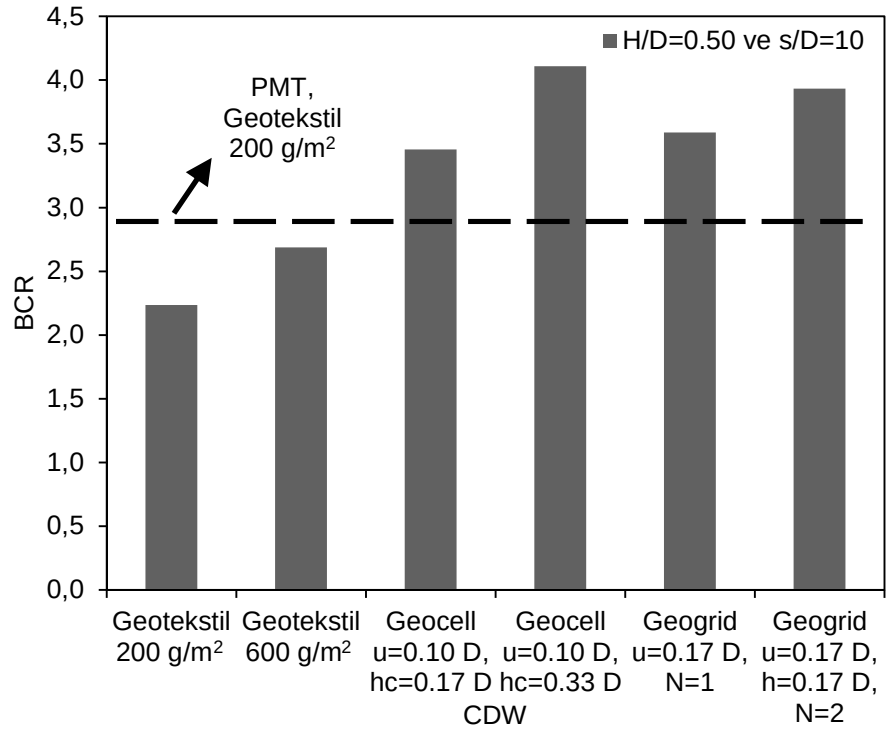
Şekil 4.46. Gerilme Deplasman Eğrileri İle Geosentetik Güçlendirmelerin Değerlendirilmesi

Temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri dikkate alındığında farklı geosentetiklerle güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu zeminlerin BCR değişimi, doğal agregra (PMT) dolgulu zeminin BCR değerleri ile birlikte sırası ile Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'da gösterilmiştir.

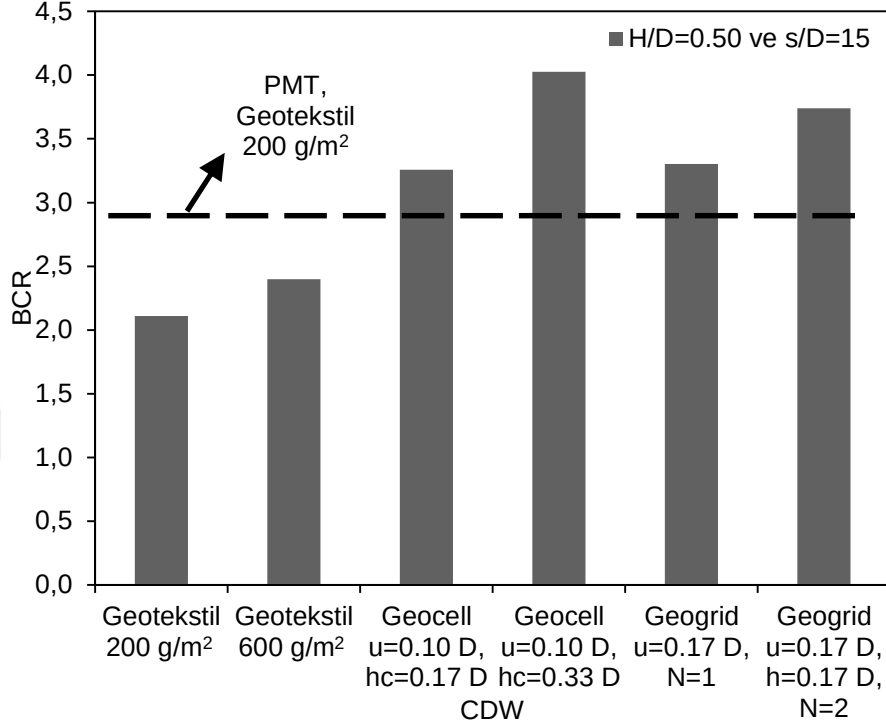
Deplasman oranı değeri $s/D=5$ olduğunda, geotekstil (600 g/m^2) güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu, doğal agrega (PMT) dolgudan daha fazla BCR değerine sahiptir. Ancak artan deplasman oranlarında doğal agrega dolgunun BCR değeri daha fazladır. Deplasman oranı $s/D=5$, 10 ve 15 olduğunda geogrid ve geocell güçlendirmeli durumlardaki BCR değerleri doğal agrega dolgulu durumdan fazla çıkmıştır. Deplasman oranı değeri %5 iken geocell ve geogrid güçlendirmeli durumlardaki BCR değerleri kısmen birbirine yakınken, artan deplasman oranlarında aradaki farkın açıldığı görülmüştür. Her üç deplasman oranında da en yüksek BCR değerleri, yüksekliği $h_c=0.33D$ olan geocell ile güçlendirmeli durumda elde edilmiştir.



Şekil 4.47. $s/D=5$ İçin Geosentetik Güçlendirmelerin BCR Değerlendirilmesi



Şekil 4.48. s/D=10 İçin Geosentetik Güçlendirmelerin BCR Değerlendirilmesi

Şekil 4.49. $s/D=15$ İçin Geosentetik Güçlendirmelerin BCR Değerlendirilmesi

4.3. Tekrarlı Yükleme Model Deneyler

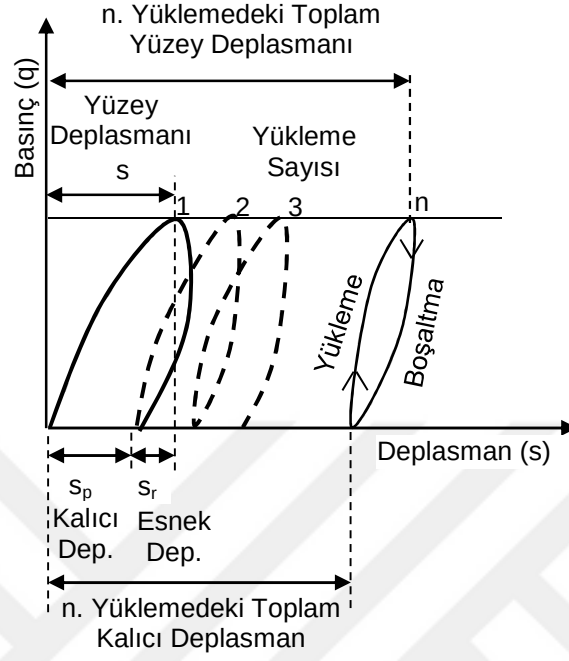
Bu bölümde, çalışma kapsamında temin edilen inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesi ile elde edilen granüler malzemenin tekrarlı yüklere maruz dolgularda (trafik yükleri, petrol tankları ve benzeri) kullanılabilirliğini araştırmak için yapılan plaka yükleme deneyleri sunulmuştur. Bu atık (CDW) malzemelerden inşa edilecek dolgunun tekrarlı yükler altındaki performansının daha iyi belirlenebilmesi için en elverişsiz zemin koşulları düşünülerek, dolgu yumuşak (zayıf) zemin üzerine yerleştirilmiş ve sonra deneylere tabi tutulmuştur.

Tekrarlı yükleme deneylerinde statik yükleme deneyleri gibi beş seride gerçekleştirilmiştir. Güçlendirmeli deneylerde statik yükleme deneylerinde elde edilen optimum donatı konfigürasyonları temel alınmıştır. İlk seride dolgunun yerleştirileceği zayıf zemin üzerine direk (hiç dolgu yerleştirilmeden), tekrarlı

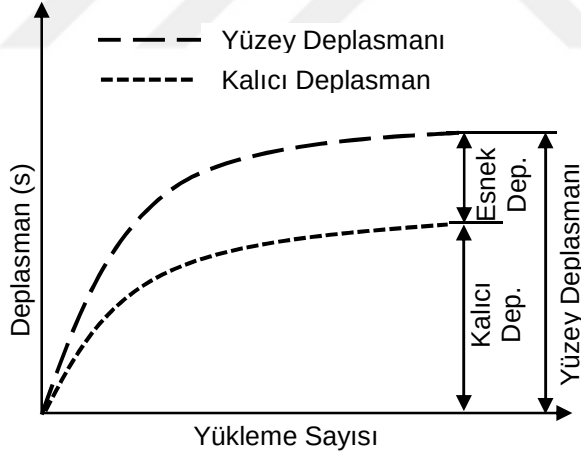
yüklemeye yapılarak zayıf zeminin tekrarlı yükler karşısındaki davranışı belirlenmiştir. Daha sonraki seride zayıf zemin üzerine yerleştirilen, inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu ve atık malzemenin performansının kıyaslanabilmesi için doğal agrega (PMT) dolgu üzerinde deneyler yapılmıştır. Diğer serilerde inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun, kaliteli doğal agrega dolgunun performansını yakalayabilmesi için sırası ile geocell, geogrid ve geotekstil ile güçlendirilmesi durumlarında deneyler yapılmıştır.

Tekrarlı yükleme 140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa (80 kN'luk çift tekerli eşdeğer dingil yükü) olmak üzere dört kademede ve her kademede yaklaşık 10 kere istenilen yüke kadar yükleme, sıfıra kadar boşaltma ve tekrar istenilen yüke kadar yükleme döngüsü şeklinde gerçekleştirilmiştir. Her yükleme kademesindeki yükleme boşaltma sonrasında oluşan toplam yüzey deplasmanı ve kalıcı deplasman değeri ile esnek deplasman oranı belirlenmiştir (Pokharel, 2010; Mehrjardi ve ark., 2012). Şekil 4.50'de deneyler sonucunda elde edilen, yükleme boşaltma aşamalarında uygulanan basınç ve oluşan deplasman grafiği gösterilmiştir. Ayrıca şekilde kalıcı deplasman (permanent-plastic displacement), esnek deplasman (resilient-elastic displacement), yüzey deplasmanı (surface-footing displacement), toplam kalıcı deplasman (cumulative permanent displacement) ve toplam yüzey deplasmanı (cumulative surface displacement) değerleri de açıklanmıştır. Şekil 4.51'de ise deneyler sonucunda elde edilen deplasman ve yükleme sayısı grafiği gösterilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen bütün sonuçları birbirleri ile kıyaslanarak sunulmuştur.

Tekrarlı plaka yükleme deneylerinde, her basınç kademesi için (140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa) ilk yüklemede oluşan yüzey deplasmanı ve o basınç kademesinde yapılan bütün tekrarlı yüklemeler için ayrı ayrı hesap edilen esnek deplasman oranları dolgunun yükleme deplasman davranışını büyük ölçüde belirlemiştir.



Şekil 4.50. Tekrarlı Yükleme Deneylerinde Basınç Deplasman Eğrisi



Şekil 4.51. Tekrarlı Yükleme Deneylerinde Yükleme Sayısı Deplasman Eğrisi

Esnek deplasman oranı aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi her yüklemede oluşan yüzey deplasmanın o yüklemede oluşan esnek deplasmana göre

yüzdesi şeklinde belirlenmiştir (Pokharel, 2010; Acharya, 2011; Thakur ve ark., 2012).

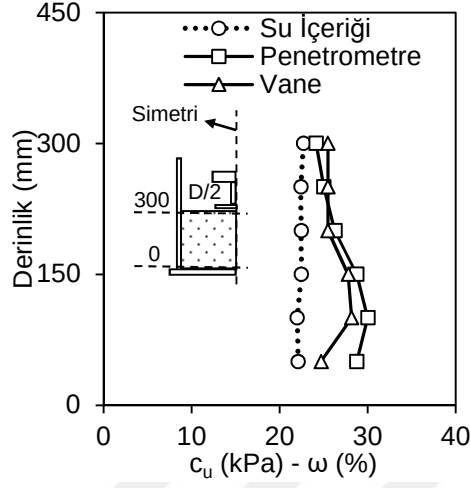
n. Yüklemedeki Esnek Deplasman Oranı

$$= \left(\frac{\text{n. Yüklemedeki Esnek Deplasman}}{\text{n. Yüklemedeki Yüzey Deplasmanı}} \right) * 100 \quad (4.2)$$

Bazı araştırmacılar tekrarlı yüklemeli (trafik yüklemeleri gibi) model deneylerde oluşabilecek ölçek etkisine karşı, yükün verileceği yükleme plakasının çapı için plakanın altında kullanılan dolgu zeminin D_{50} çapının 15 katından daha büyük olması gerektiğini belirtmişlerdir (Hsieh ve Mao, 2005; Mehrjardi ve ark., 2012). Tez çalışmasında kullanılan yükleme plakasının çapı dolgu malzemelerinin D_{50} çapından yaklaşık olarak 20 kat daha fazla olarak seçilmiştir.

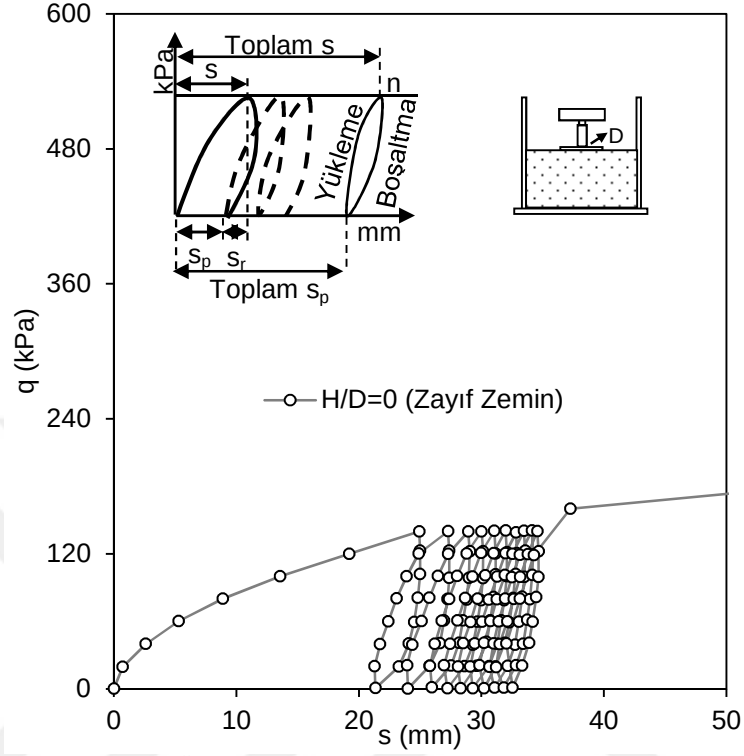
4.3.1. Tabi Zemin Durumu (Seri VI)

Tekrarlı yüklemeli deneylerde de statik yüklemeli deneylerdeki gibi granüler dolgu (PMT, CDW) veya donatılı (geosentetik) granüler dolgu (CDW) tabi zemin (zayıf zemin koşullarına sahip CBR'ı 3'ün altında) üzerine yerleştirilmiştir. Bu sebeple tabi zeminin tekrarlı yükler karşısındaki davranışının belirlenebilmesi ve granüler dolgulu deneylerle kıyaslanabilmesi için tabi zemin üzerinde tekrarlı yüklemeli deney gerçekleştirilmiştir. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve su içeriği Şekil 4.52'de verilmiştir.

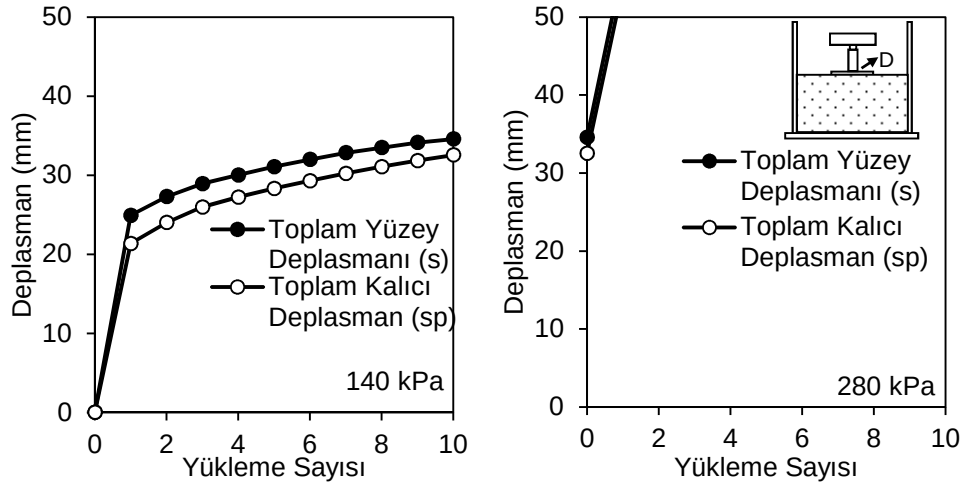


Şekil 4.52. Tabi Zemin Üzerine Tekrarlı Yükleme Deney Şartları Kontrolü

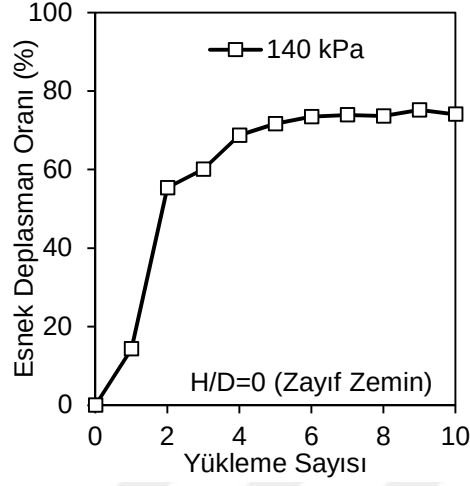
Tabi zemin üzerine yapılan tekrarlı yüklemeli deneyde ilk yük aşaması olan 140 kPa basınçta on tekrarlı yükleme yapıldıktan sonra, ikinci yük kademesi 280 kPa basınçta ilk yüklemeyi bitirmeden deplasman sınırı olan 50 mm'ye ulaşılmıştır. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ve yüzey deplasmanı (s) eğrisi Şekil 4.53'te gösterilmiştir. Ayrıca farklı gerilme düzeyleri için yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi Şekil 4.54'te, esnek deplasman oranı değişimi Şekil 4.55'te sunulmuştur.



Şekil 4.53. Tabi Zemin Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi



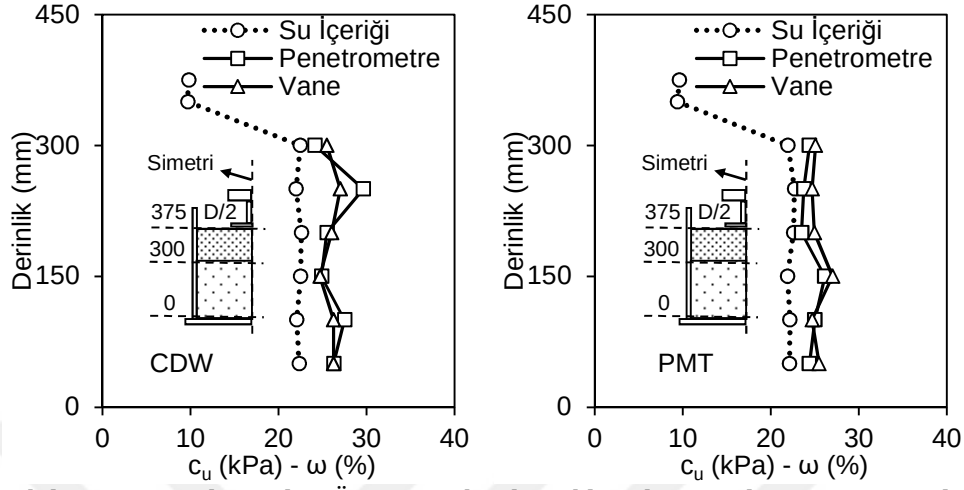
Şekil 4.54. Tabi Zemin Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi



Şekil 4.55. Tabi Zemin Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi

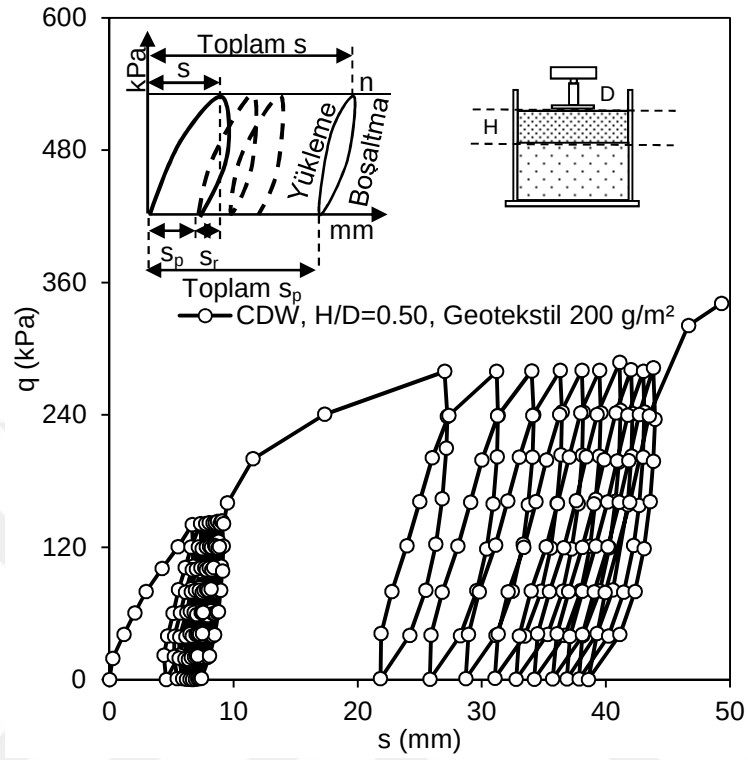
4.3.2. Dolgu Tipinin Etkisi (Seri VII)

Bu seride önce zayıf zemin üzerine inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deney yapılmış ve dolgunun davranışı belirlenmiştir. Daha sonra inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun performansının kıyaslanabilmesi için zayıf zemin üzerine doğal agrega (PMT) dolgu yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deney yapılmıştır. Deneylerin her ikisinde de dolgu kalınlığı $H/D=0.50$ 'dir ve dolgu ile zayıf zemin arasına ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) yerleştirilmiştir. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.56'da gösterilmiştir.

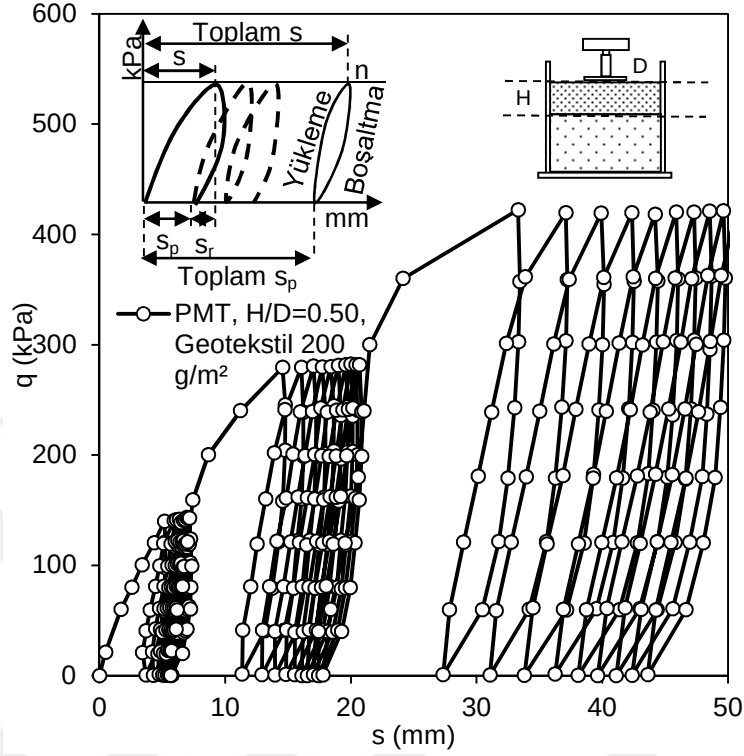


Şekil 4.56. Granüler Dolgu Üzerine Tekrarlı Yüklemeli Deneylerin Deney Şartları Kontrolü

İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu tekrarlı yüklemeli deneyin ilk iki yük kademesinde (140 kPa ve 280 kPa) 10'ar yükleme yapıldıktan sonra, üçüncü yük kademesindeki (420 kPa) ilk yükleme bitmeden deplasman sınırı olan 50 mm'ye ulaşılmıştır. Doğal agrega (CDW) dolgulu tekrarlı yüklemeli deneyin ilk iki yük kademesinde (140 kPa ve 280 kPa) 10'ar yükleme yapıldıktan sonra, üçüncü yük kademesinin (420 kPa) onuncu yüklemesinde deplasman sınırı olan 50 mm'ye ulaşılmıştır. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ve yüzey deplasmanı (s) eğrileri sırasıyla Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de gösterilmiştir.

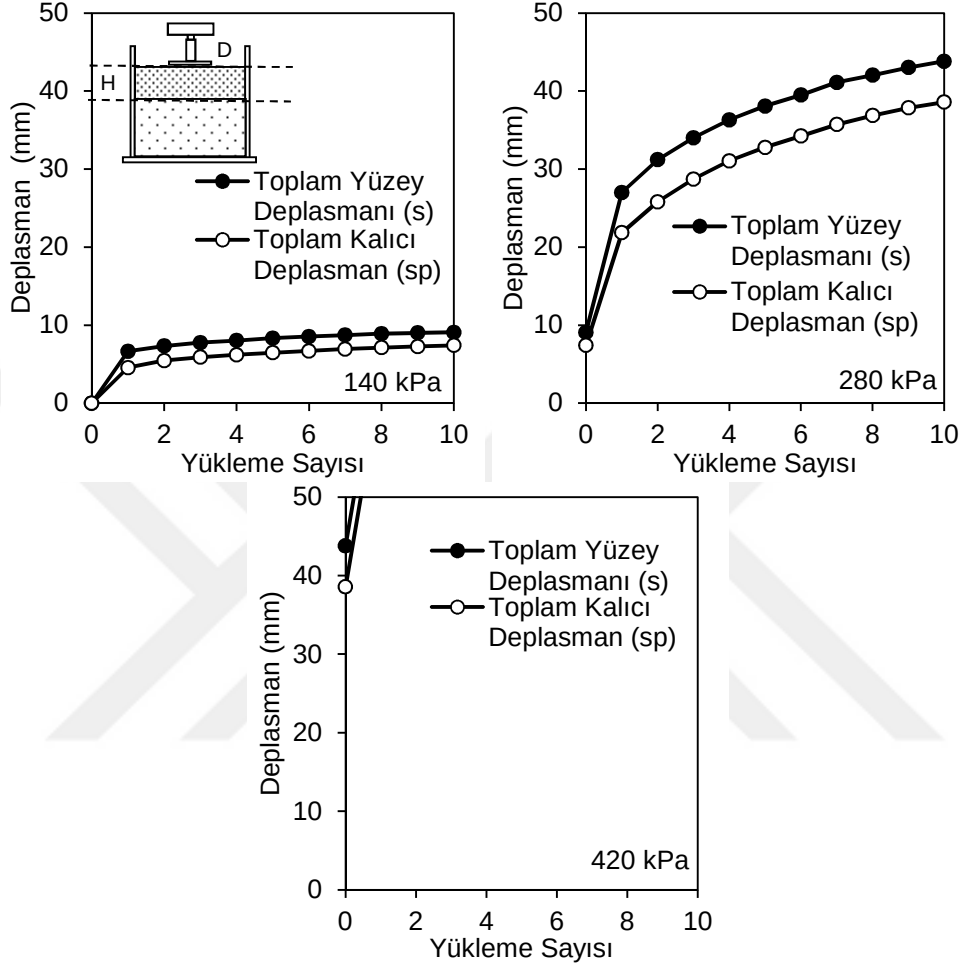


Şekil 4.57. CDW Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

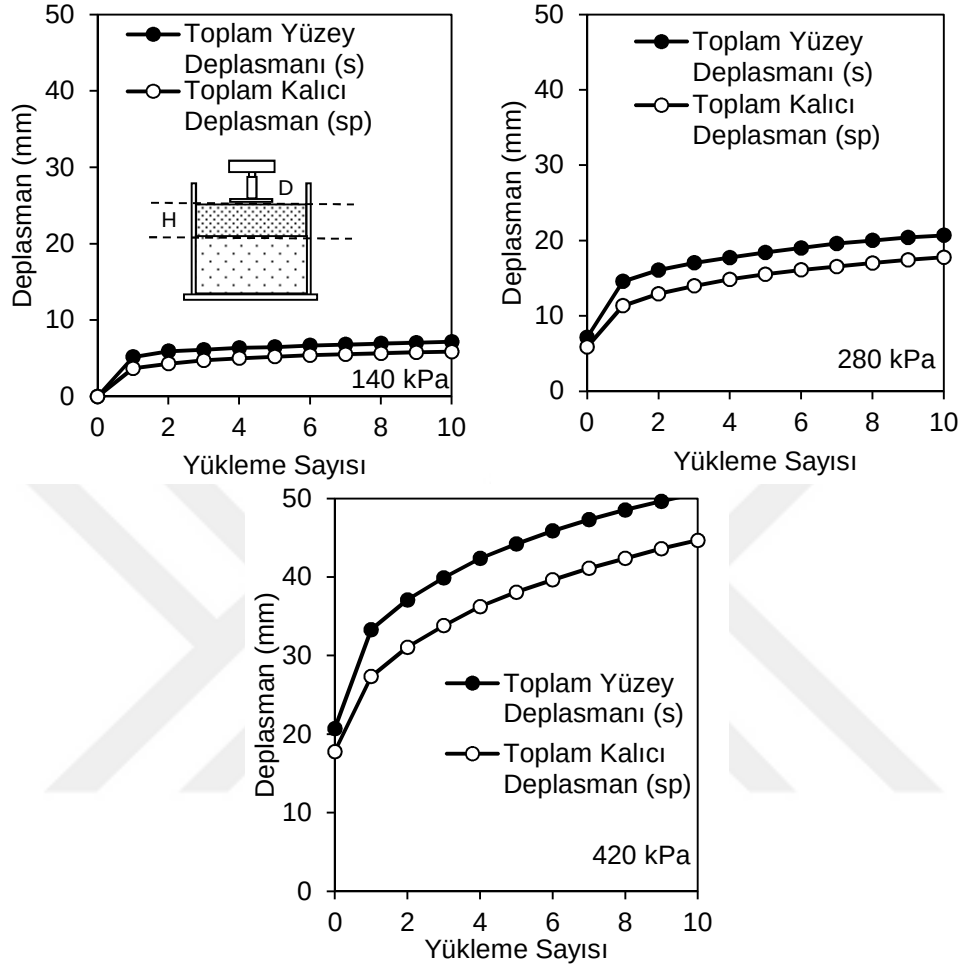


Şekil 4.58. PMT Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

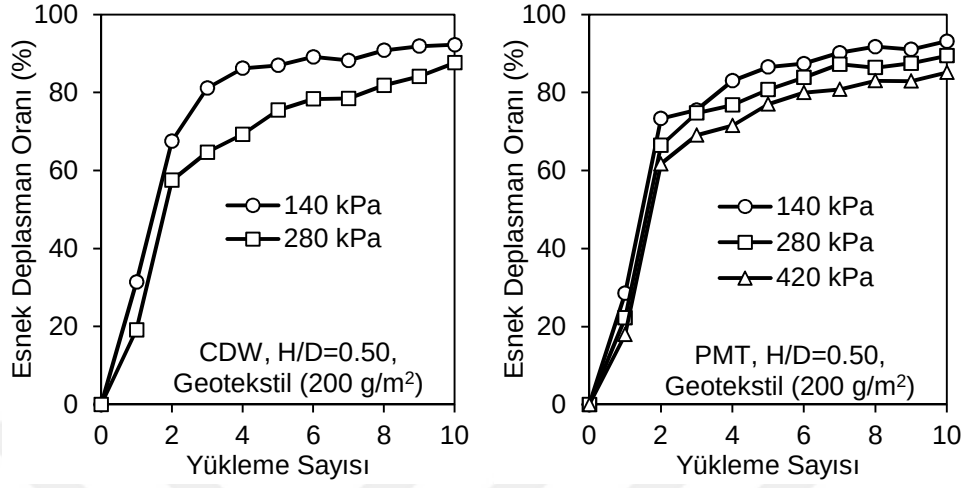
Farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi CDW dolgu için Şekil 4.59’da, PMT dolgu için Şekil 4.60’da sunulmuştur. CDW dolguda 140 kPa ve PMT dolguda 140 kPa ile birlikte 280 kPa basınç kademelerinde tekrarlı yükler arttıkça yüzey ve kalıcı deplasman değerlerinin artış hızının az olduğu görülmüştür. Ancak CDW dolguda 280 kPa basınç kademesinde, PMT dolguda ise 420 kPa basınç kademesinde tekrarlı yükleme sayısı arttıkça hem yüzey hem de kalıcı deplasman değerlerinde hızlı bir artış gözlenmiştir. Ayrıca hem inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) hem de doğal agrega (PMT) için farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık esnek deplasman oranı değişimi Şekil 4.61’de gösterilmiştir. Her iki dolgulu durumda da (CDW, PMT) tekrarlı yüklerdeki gerilme düzeyi arttıkça esnek deplasman oranı düşmüştür.



Şekil 4.59. CDW Dolgulu Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi

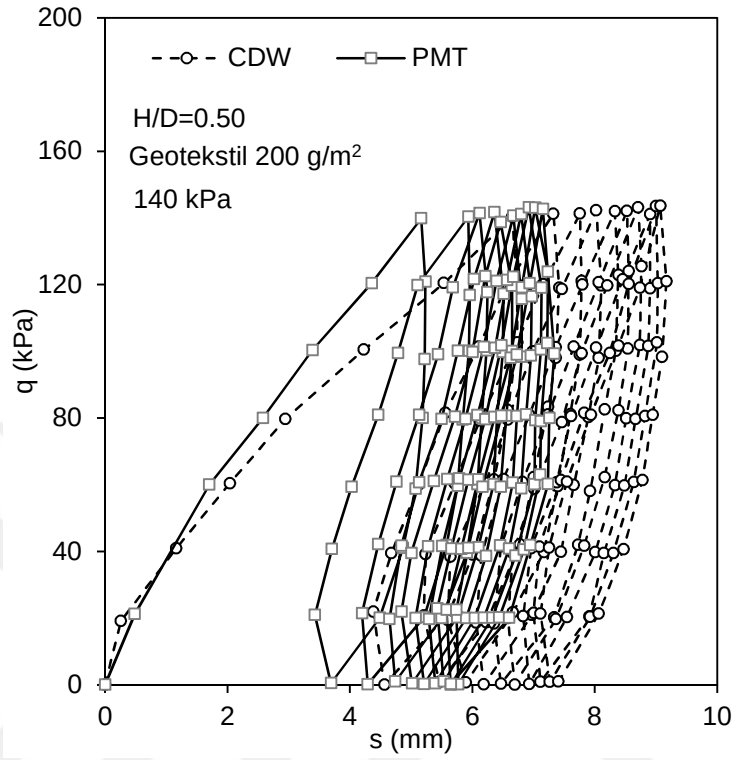


Şekil 4.60. PMT Dolgulu Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi

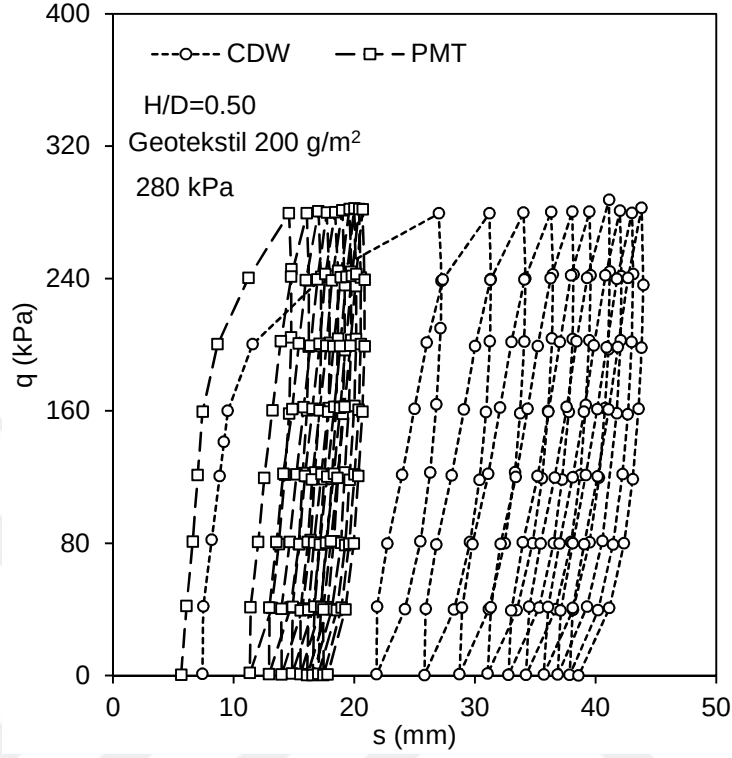


Şekil 4.61. CDW ve PMT Dolgulu Durumda Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi

İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) ile doğal agrega (PMT) dolgulu durumların gerilme (q)-yüzey deplasmanı (s) eğrilerinin kıyaslanması 140 kPa basınç için Şekil 4.62’de 280 kPa basınç için Şekil 4.63’te sunulmuştur.

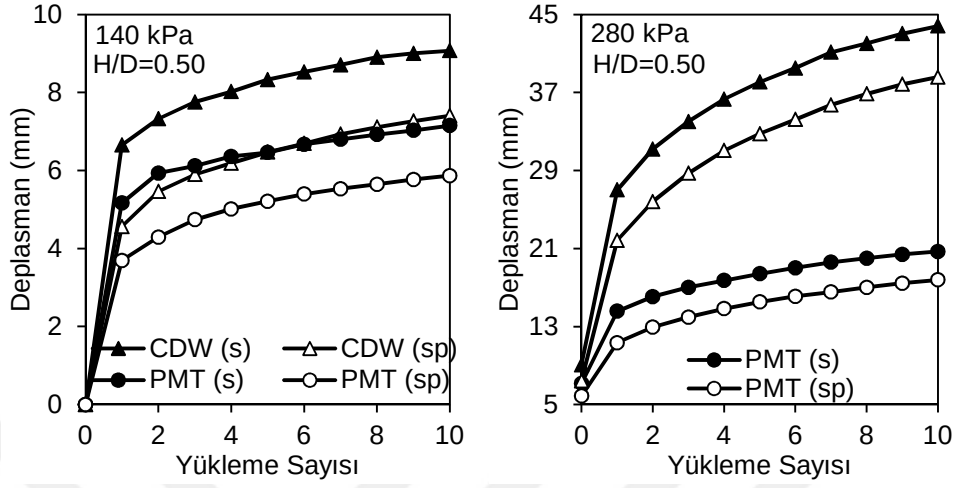


Şekil 4.62. CDW ve PMT Dolgulu Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması (140 kPa)

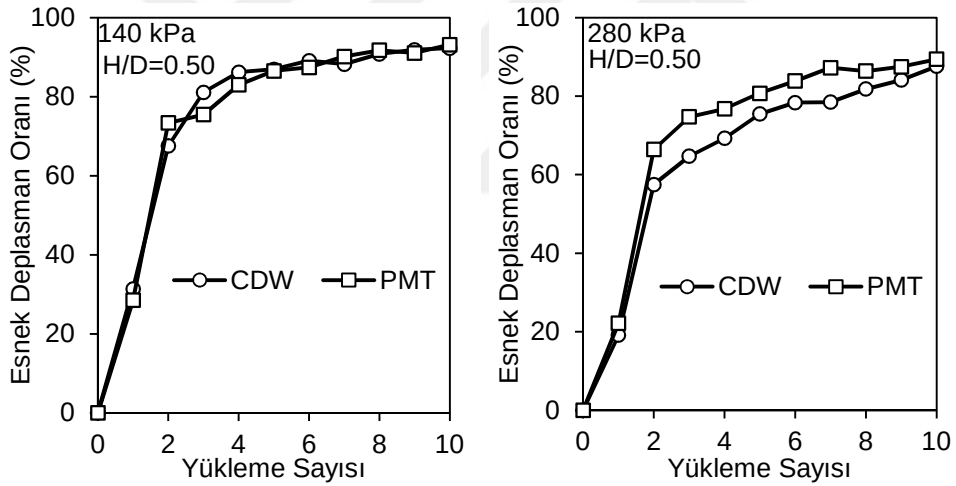


Şekil 4.63. CDW ve PMT Dolgulu Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması (280 kPa)

İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) ile doğal agregat (PMT) dolgulu durumların farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi kıyaslanması Şekil 4.64'te, esnek deplasman oranı değişiminin kıyaslanması Şekil 4.65'te sunulmuştur.



Şekil 4.64. CDW ve PMT Dolgu Durumunda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslanması



Şekil 4.65. CDW ve PMT Dolgulu Durumunda Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslanması

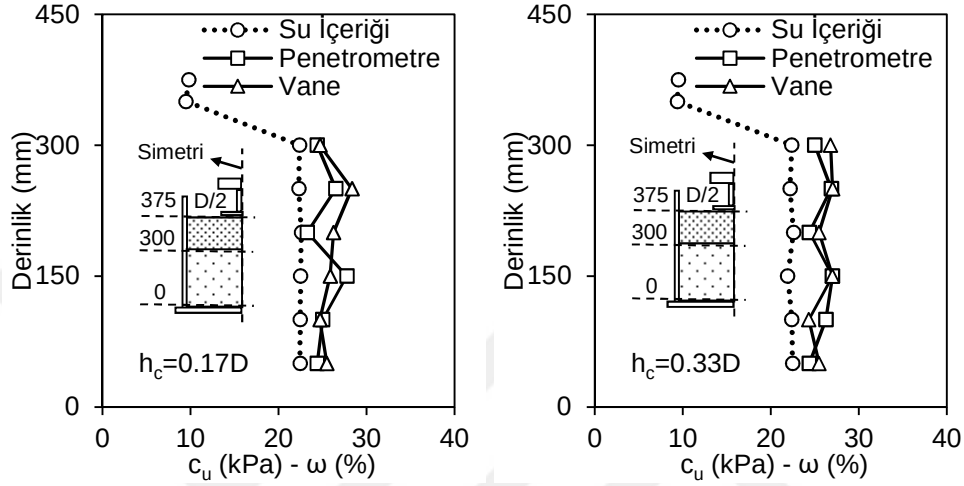
İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu ile doğal agrega (PMT) dolgu için genel bir karşılaştırma yapılırsa, 140 kPa basınç kademesindeki artan tekrarlı yüklerde her iki dolgunun esnek deplasman oranları birbirine çok yakındır. Bu basınç kademesindeki artan tekrarlı yüklerde, kalıcı deplasmanların artış hızları da

birbirlerine benzemektedir. Ancak bu basınç kademesinin sadece ilk yüklemesinde CDW dolgu PMT dolguya göre biraz daha fazla deplasman yaptığı için iki dolgunun yüzey ve kalıcı deplasman değerleri arasında fark oluşmuştur. Sonraki basınç kademesindeki (280 kPa) artan tekrarlı yüklerde ise PMT dolgunun esnek deplasman oranları daha fazla, kalıcı deplasman oranı artışı ise daha az olduğu gözlenmiştir. Ayrıca bu basınç kademesinin ilk yüklemesinde PMT dolgu CDW dolguya göre daha az deplasman yapmıştır. Bu sebeplerle 280 kPa basınç kademesinde CDW ile PMT dolgu arasında hem yüzey deplasmanlarında hem de kalıcı deplasmanlarda önemli bir fark olduğu gözlemlenmiştir. CDW dolgudaki aşırı artan deplasmanlar sonucunda bir sonraki yük kademesinde (420 kPa) ilk yükleme tamamlanamazken (50 mm deplasman sınırı geçilmiş), PMT dolguda bu yük kademesinde de on tekrarlı yükleme yapılabilmektedir.

4.3.3. Geocell Güçlendirme Etkisi (Seri VIII)

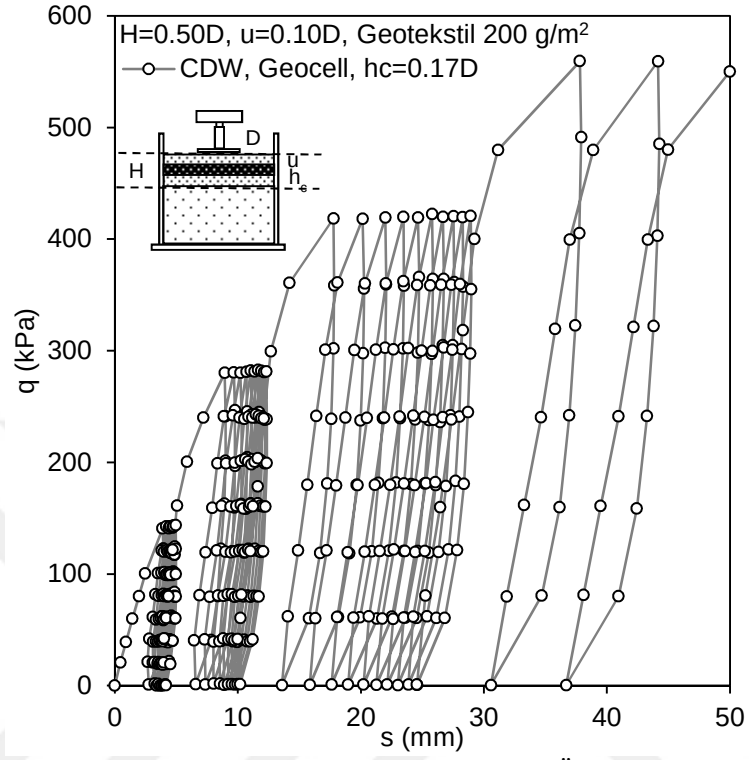
Bir önceki seride inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun tekrarlı yükler altındaki performansının (yüzey deplasmanı, kalıcı deplasman ve esnek deplasman oranı) doğal agrega (PMT) dolguya göre biraz düşük olduğu gözlemlenmiştir. Statik yüklemeler sonucunda da inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun taşıma kapasitesi doğal agrega dolgudan düşük çıkmış, fakat az bir güçlendirme ile bu sorun ortadan kaldırılmıştır. Statik yüklemelerdekine benzer bir şekilde az bir güçlendirme yapılarak inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun performansının artırılması düşünülmüştür. Bu sebeple bu seride zayıf zemin üzerine, geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden dolgu yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deneylerde kalınlığı $H/D=0.50$ olan inşaat ve yıkıntı atığı dolgu içerisine $u/D=0.10$ derinliğine (statik yüklemelerde optimum olarak belirlenen derinlik) iki farklı yüksekliğe sahip ($h_c/D=0.17$ ve 0.33) geocell donatı yerleştirilmiştir. Bu şekilde tekrarlı yüklemelerde geocell donatının yüksekliğinin etkisi de incelenmiştir. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka

için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.66'da gösterilmiştir.

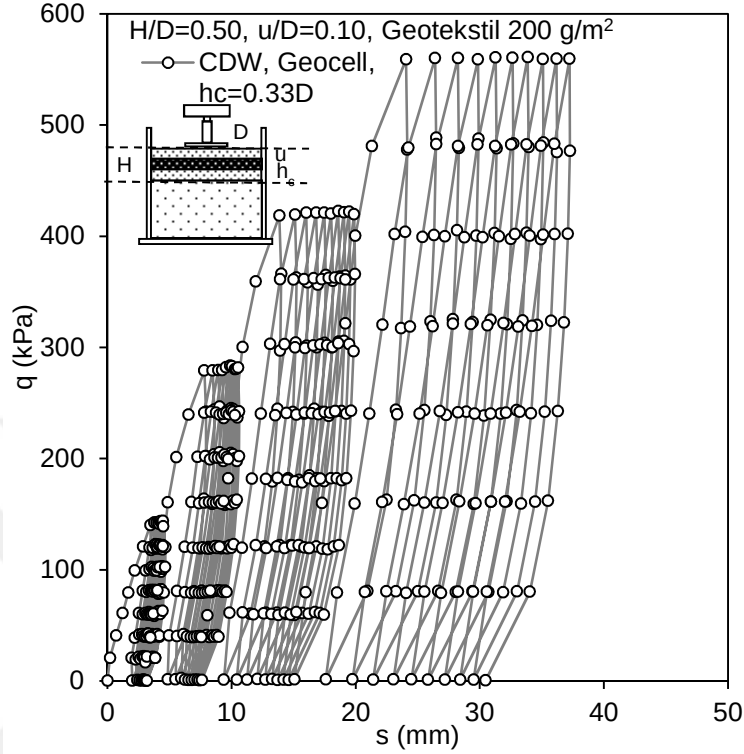


Şekil 4.66. Geocell Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Deneylerinin Deney Şartları Kontrolü

Yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu tekrarlı yüklemeli deneyin ilk üç yük kademesinde (140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa) 10'ar yükleme yapıldıktan sonra dördüncü yük kademesindeki (560 kPa) üçüncü yüklemede deplasman sınırı olan 50 mm'ye ulaşılmıştır. Yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu tekrarlı yüklemeli deneyde ise dört yük kademesinde de (140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa) 10'ar yükleme yapılmış ve en son yüklemede toplam yüzey deplasmanı 37.23 mm olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ve yüzey deplasmanı (s) eğrileri sırasıyla Şekil 4.67 ve Şekil 4.68'de gösterilmiştir.



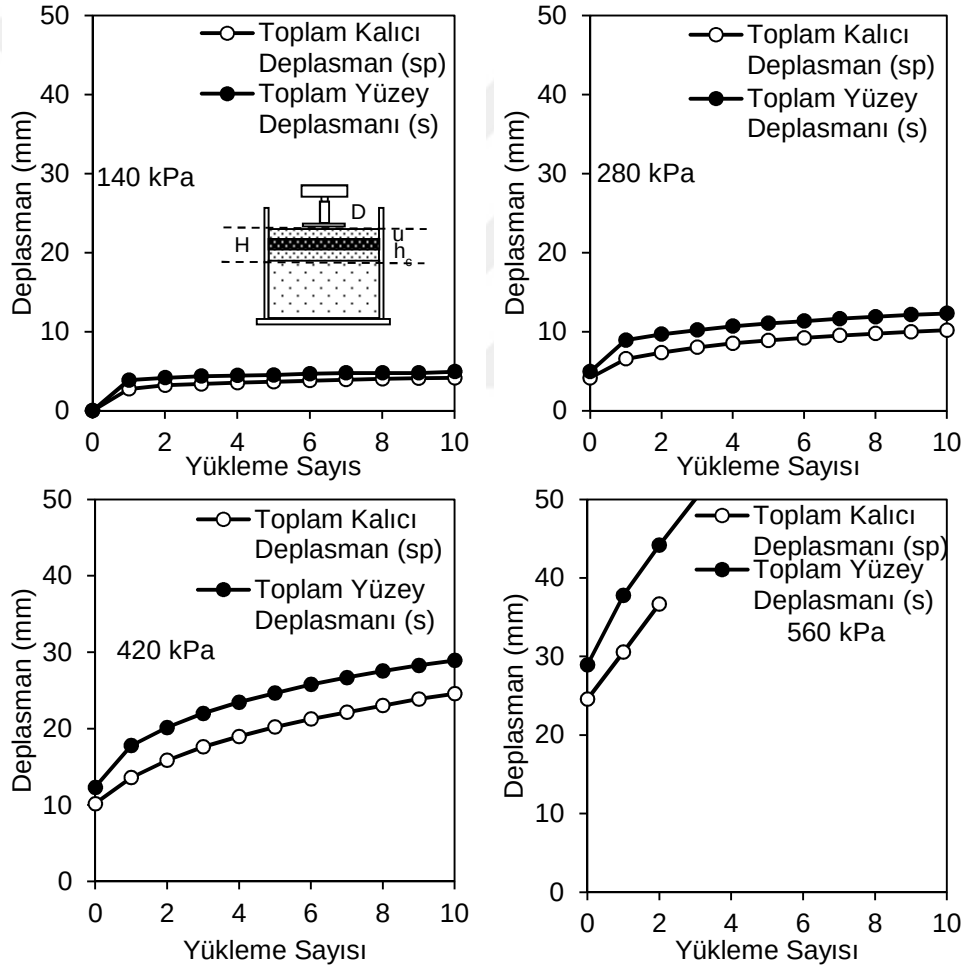
Şekil 4.67. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi



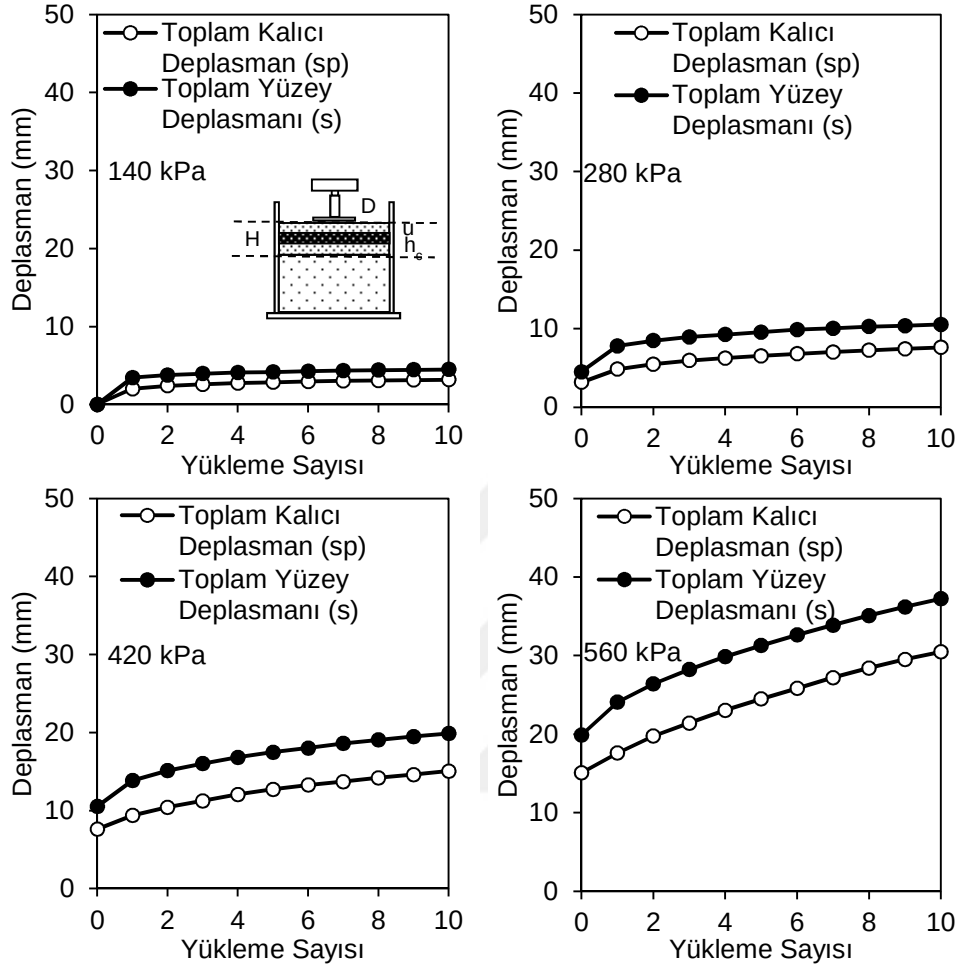
Şekil 4.68. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

Farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi $h_c/D=0.17$ olan geocell güçlendirmesi için Şekil 4.69’da, $h_c/D=0.33$ olan geocell güçlendirmesi için Şekil 4.70’te sunulmuştur. Yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell güçlendirmeli durumda, ilk iki basınç kademesinde (140 kPa ve 280 kPa) tekrarlı yükler arttıkça yüzey ve kalıcı deplasman değerlerinin artış hızının az olduğu görülmüştür. Ancak sonraki basınç kademesinde (420 kPa) tekrarlı yükleme sayısı arttıkça hem yüzey hem de kalıcı deplasman değerlerinde nispeten hızlı bir artış gözlenmiştir. Yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell güçlendirmeli durumda ise, ilk üç basınç kademesinde (140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa) tekrarlı yükler arttıkça yüzey ve kalıcı deplasman değerlerinin artış hızının az olduğu görülmüştür. Ancak sonraki basınç

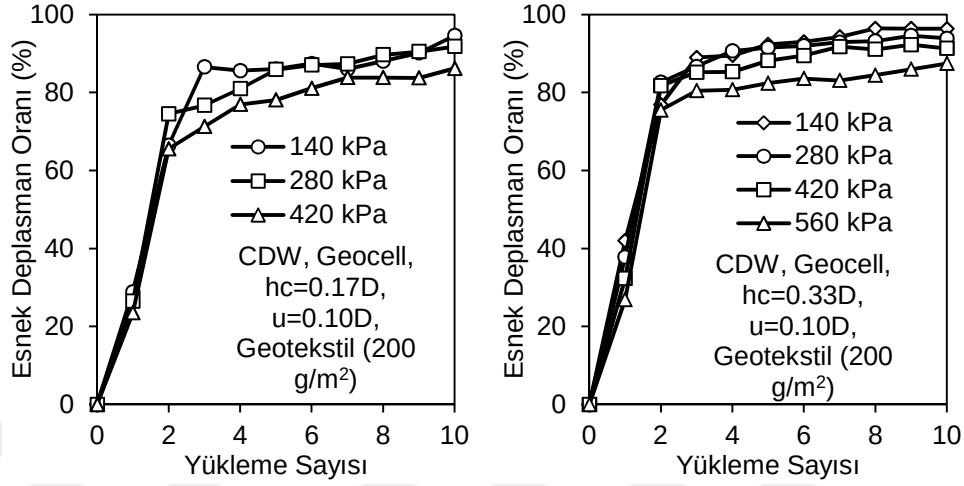
kademesinde (560 kPa) tekrarlı yükleme sayısı arttıkça hem yüzey hem de kalıcı deplasman değerlerinde nispeten hızlı bir artış gözlenmiştir. Ayrıca her iki geocell güçlendirmeli durum içinde farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık esnek deplasman oranı değişimi Şekil 4.71’de gösterilmiştir. İki farklı yüksekliğe sahip güçlendirme içinde ilk iki yük kademesindeki (140 kPa ve 280 kPa) esnek deplasman oranları birbirlerine benzerken, gerilme düzeyi arttıkça (üçüncü veya dördüncü yük kademelerinde) esnek deplasman oranları düşmüştür.



Şekil 4.69. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Yükleme Sayısı Değişimi



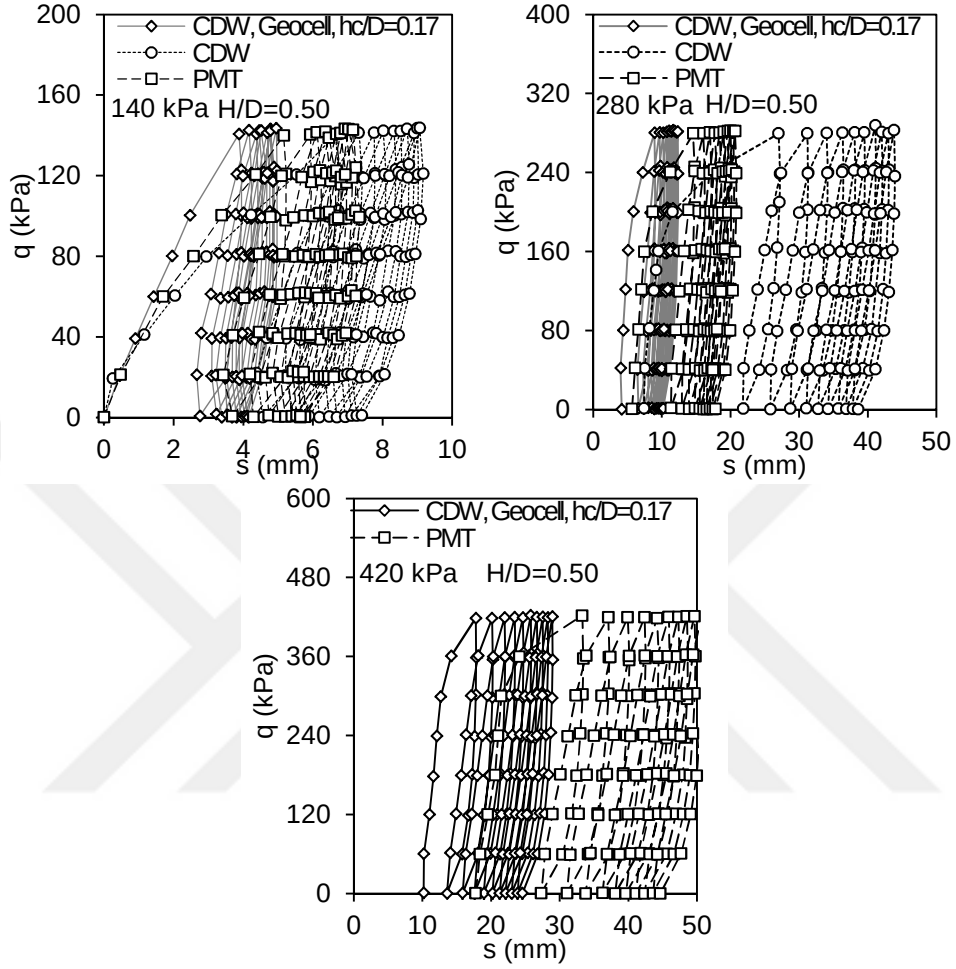
Şekil 4.70. Geocell Güçlendirmeli ($h_g/D=0.33$) Durumda Yüklemeye Sayısı Deplasman Değişimi



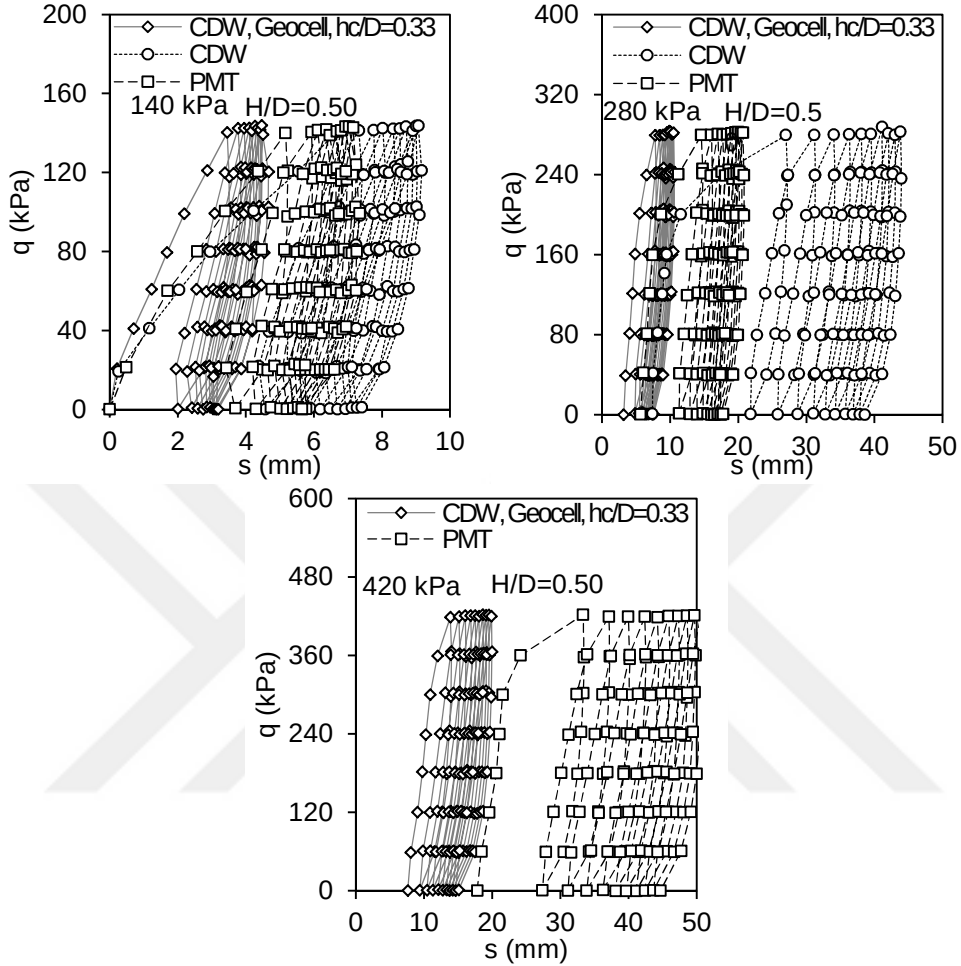
Şekil 4.71. Geocell Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi

4.3.3.1. Doğal Agregada Dolgu ile Karşılaştırılması (Geocell)

Yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun, güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atığı (CDW) dolgu ve doğal agregada (PMT) dolgu ile gerilme (q)-yüzey deplasmanı (s) eğrileri bakımından kıyaslanması Şekil 4.72’de gösterilmektedir. Benzer şekilde yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun kıyaslanması ise Şekil 4.73’te gösterilmiştir. Tekrarlı yüklemedeki bütün yük kademelerinde inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu durumda elde edilen yüzey ve kalıcı deplasman değerleri doğal agregada dolguya göre daha fazla çıkmıştır. Ancak inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yüksekliği $h_c/D=0.17$ veya 0.33 olan bir geocell ile güçlendirildiğinde doğal agregalardan daha az yüzey ve kalıcı deplasman değerlerine sahip olmuştur.



Şekil 4.72. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması

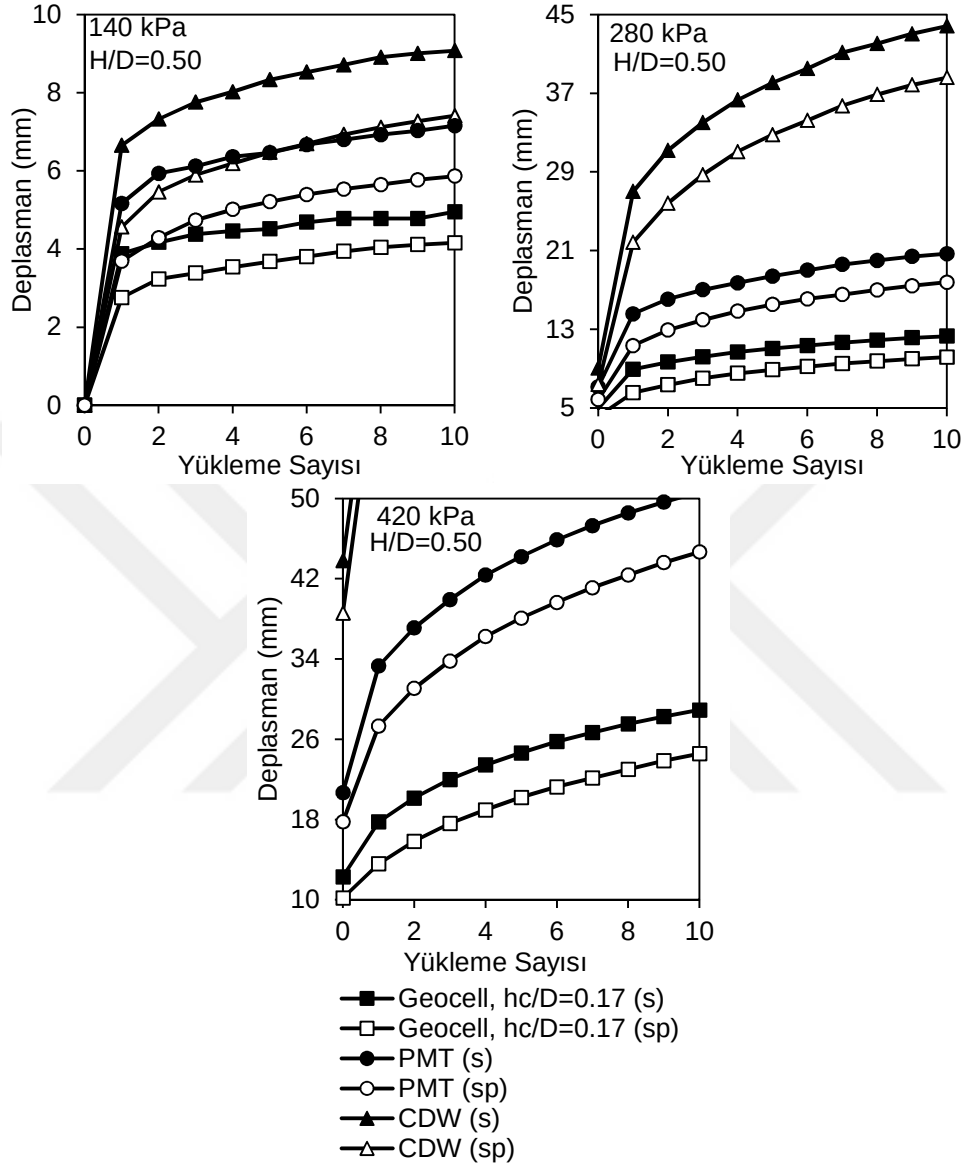


Şekil 4.73. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması

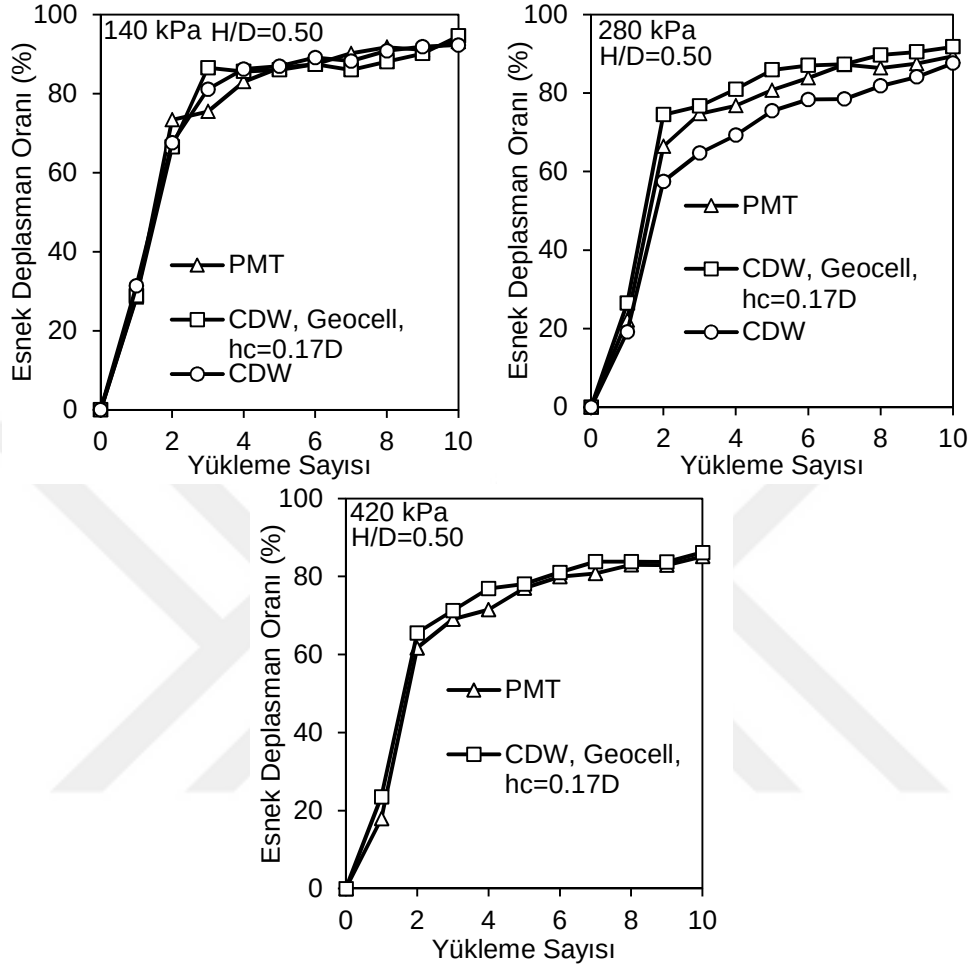
Yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun, güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atığı (CDW) dolgu ve doğal agrega (PMT) dolgu ile yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişiminin kıyaslanması Şekil 4.74'te, esnek deplasman oranı değişiminin kıyaslanması Şekil 4.75'te sunulmuştur. Benzer şekilde yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun kıyaslanması ise Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de gösterilmiştir. Geocell güçlendirme

artan basınç kademelerinde daha çok olmakla birlikte, inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun esnek deplasman oranlarını arttırarak esnek deplasman oranlarının doğal agrega (PMT) dolgunun esnek deplasman oranlarına benzer yada daha yüksek değerlere ulaşmasını sağlamıştır. Yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu, güçlendirilmemiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu ile doğal agrega (PMT) dolgunun esnek deplasman oranlarının ilk basınç kademesinde (140 kPa) birbirlerine benzediği görülmüştür. Sonraki basınç kademelerinde (280 kPa ve 420 kPa) geocell ($h_c/D=0.17$) güçlendirmeli dolgunun esnek deplasman oranlarının az bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. Yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun, güçlendirilmemiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu ile doğal agrega (PMT) dolguya göre bütün basınç kademelerinde (140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa) esnek deplasman oranları yüksek çıkmıştır.

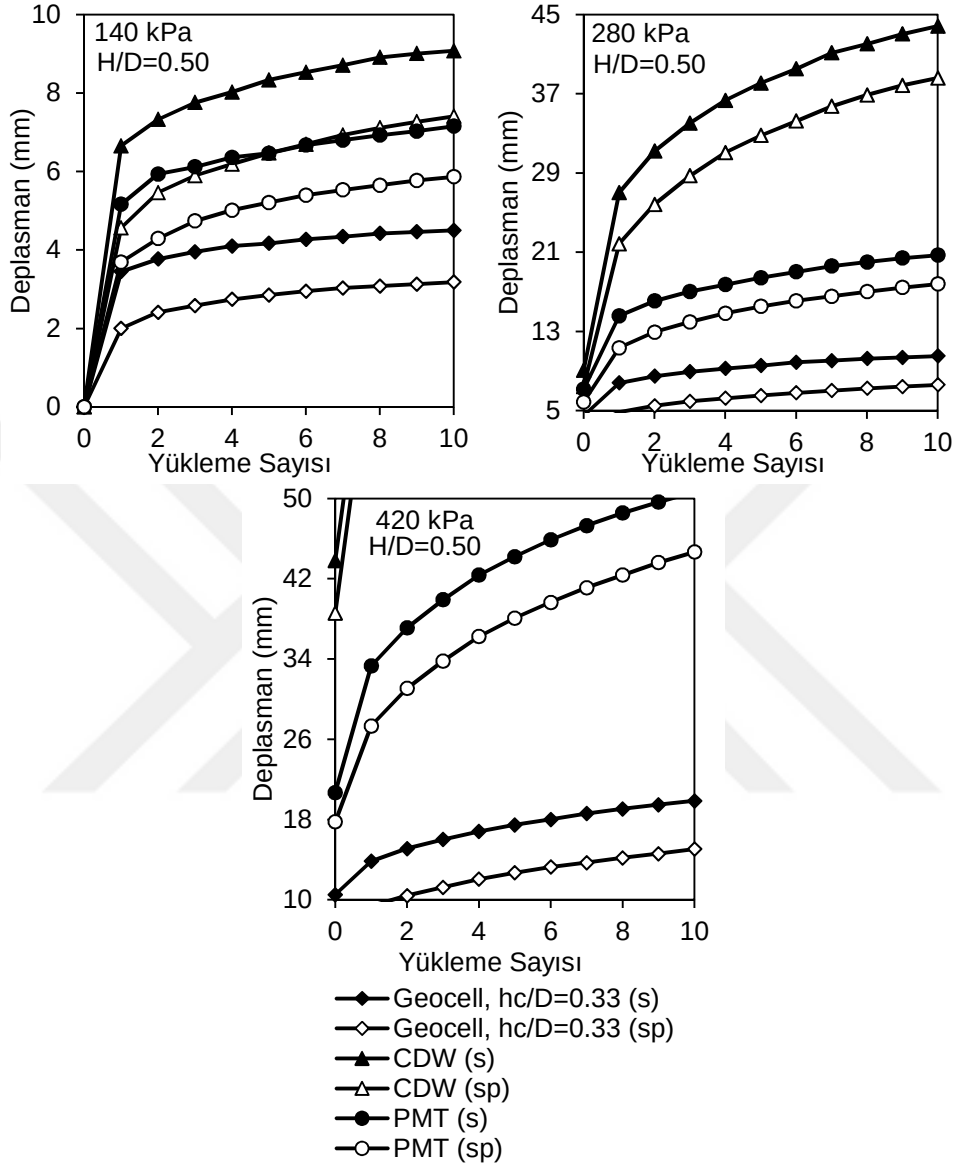
İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun geocell donatı ile güçlendirilmesi durumunda, bütün basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atığı (CDW) dolgulu ve doğal agrega (PMT) dolgulu durumlara göre daha az deplasman değerleri elde edilmiştir.



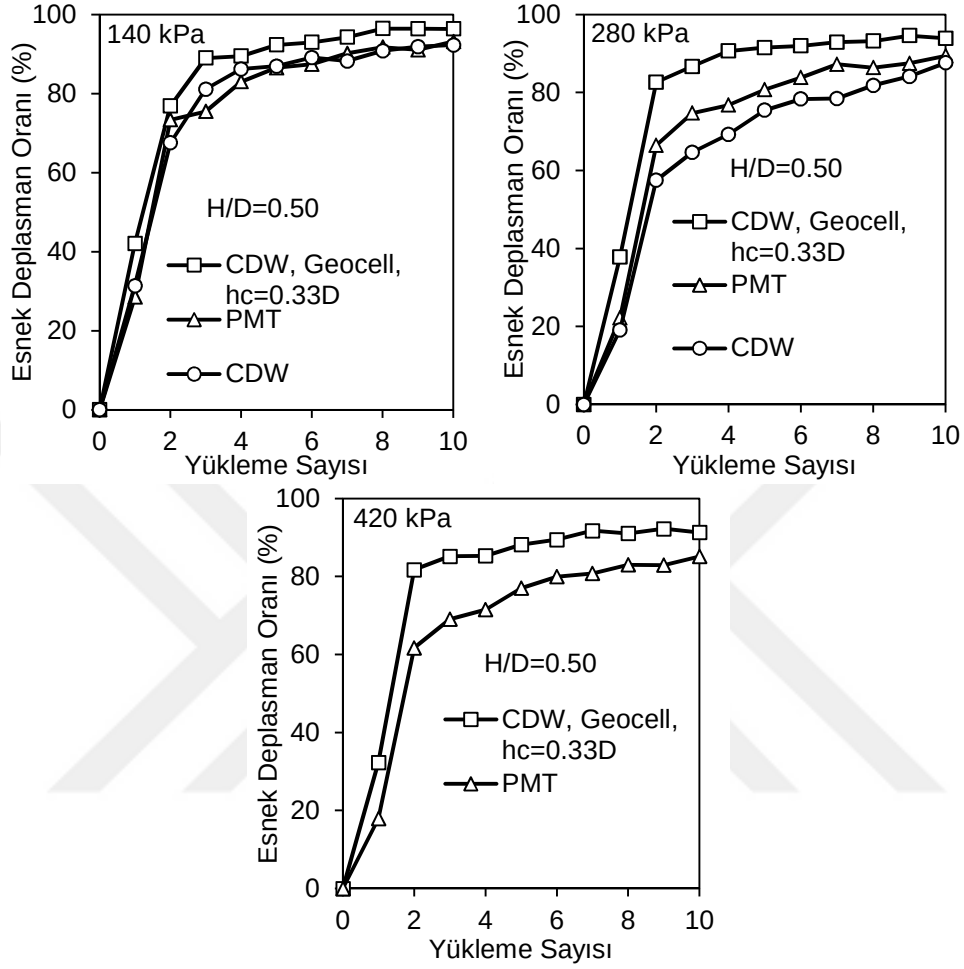
Şekil 4.74. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslaması



Şekil 4.75. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.17$) Durumda Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması



Şekil 4.76. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Durumda Yüklemeye Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslaması



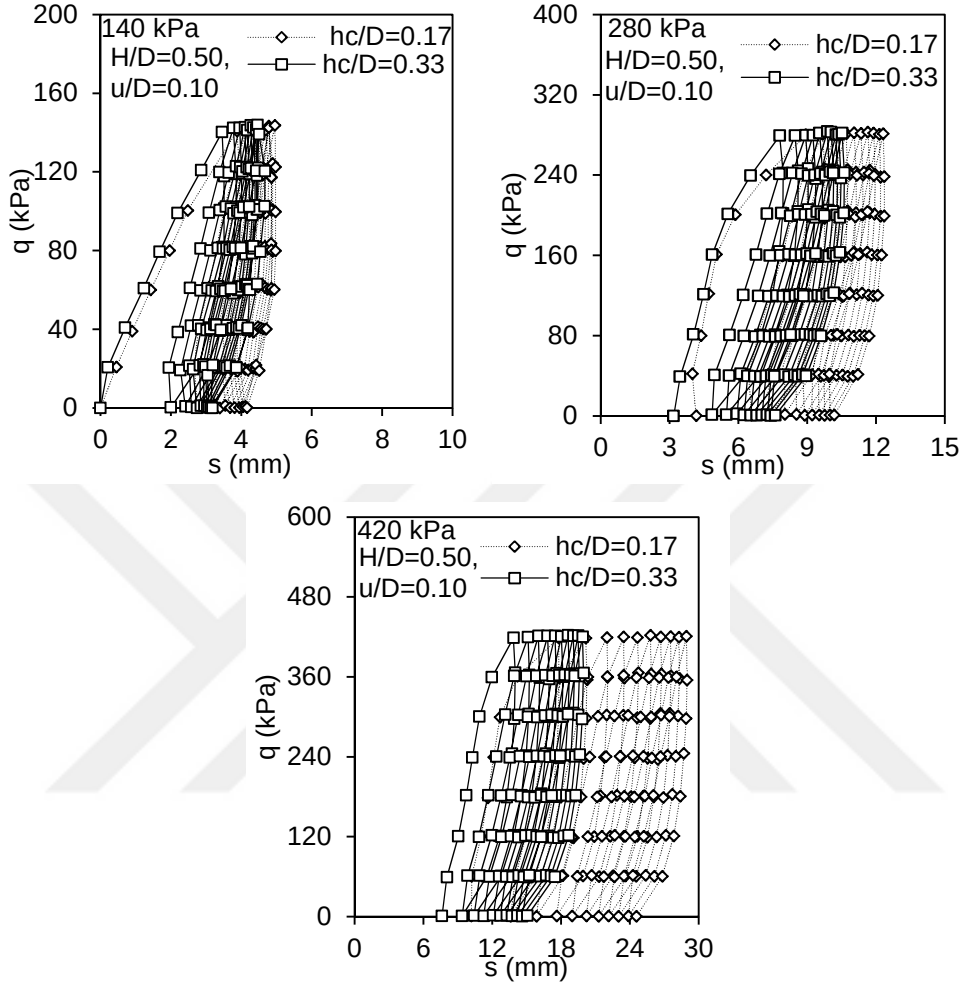
Şekil 4.77. Geocell Güçlendirmeli ($h_c/D=0.33$) Durumda Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması

4.3.3.2. Geocell Yüksekliğinin Tekrarlı Yüklemelerdeki Etkisi

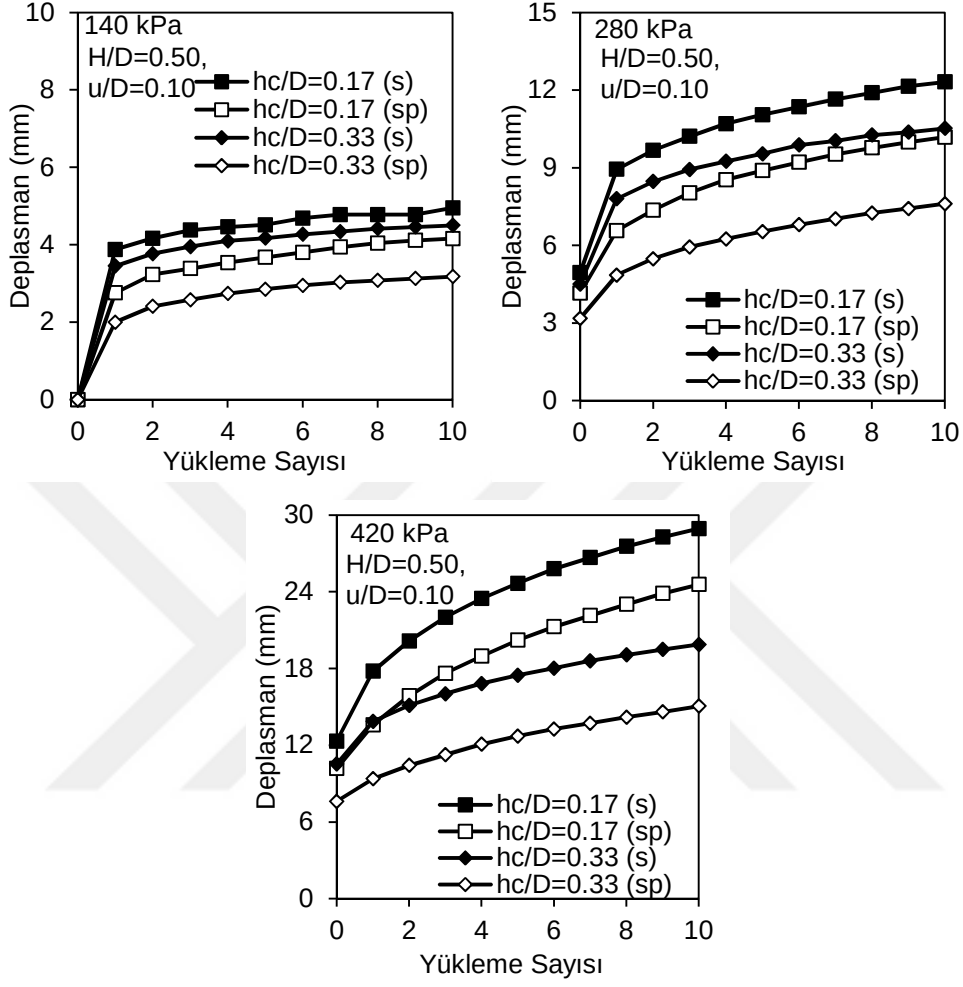
Geocell ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu için geocell donatının yüksekliğine göre gerilme (q)-yüzey deplasmanı (s) eğrileri değişimi Şekil 4.78’de sunulmuştur. Ayrıca geocell donatının yüksekliğine göre yüklemeye sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişiminin kıyaslanması Şekil 4.79’da, esnek deplasman oranı değişiminin kıyaslanması Şekil 4.80’de gösterilmektedir. Bütün basınç kademelerindeki tekrarlı yükler sonucunda

inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirildiğinde, yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirilen duruma göre daha az yüzey ve kalıcı deplasman değerlerine sahip olmuştur. Ayrıca iki güçlendirme durumu arasındaki deplasman farkı basınç kademeleri arttıkça artmıştır. Özellikle üçüncü basınç kademesinde (420 kPa) yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirilen dolgunun yüzey ve kalıcı deplasman değerleri, yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirilen dolguya göre çok daha hızlı bir artış içine girmiştir.

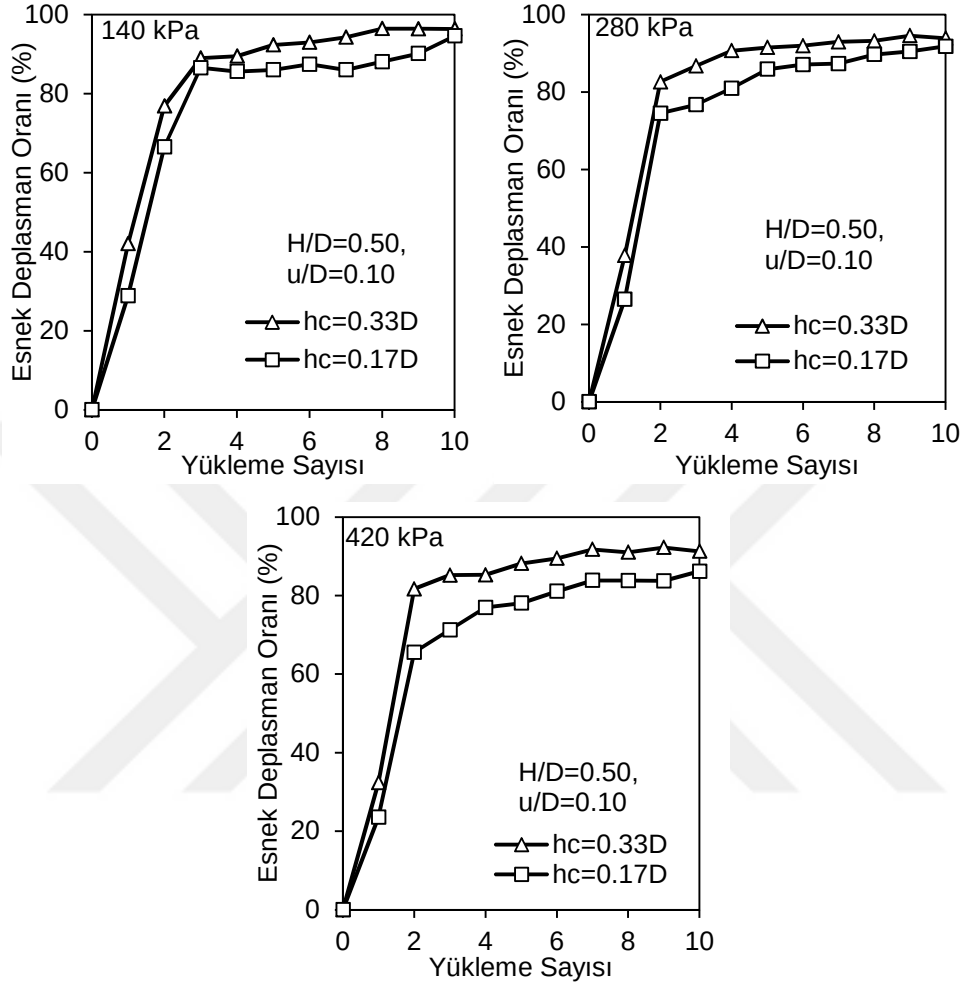
Bütün basınç kademelerindeki tekrarlı yükler sonucunda inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirildiğinde, yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirilen duruma göre daha çok esnek deplasman oranlarına sahip olmuştur. İki güçlendirme durumu arasındaki esnek deplasman oranı farkı basınç kademeleri arttıkça artmıştır. Geocell donatının yüksekliği arttıkça dolgu daha esnek davranmıştır. Ayrıca geocell donatı yüksekliğinin artması durumunda, bütün basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde daha az deplasman değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.78. Geocell Yüksekliğinin Gerilme Deplasman Davranışına Etkisi



Şekil 4.79. Geocell Yüksekliğinin Yükleme Sayısı Deplasman Eğrisine Etkisi

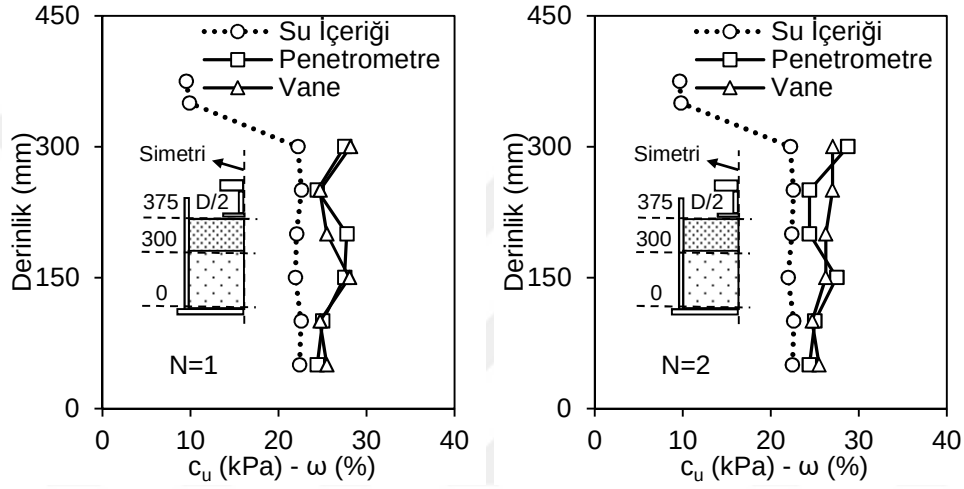


Şekil 4.80. Geocell Yüksekliğinin Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Eğrisine Etkisi

4.3.4. Geogrid Güçlendirme Etkisi (Seri IX)

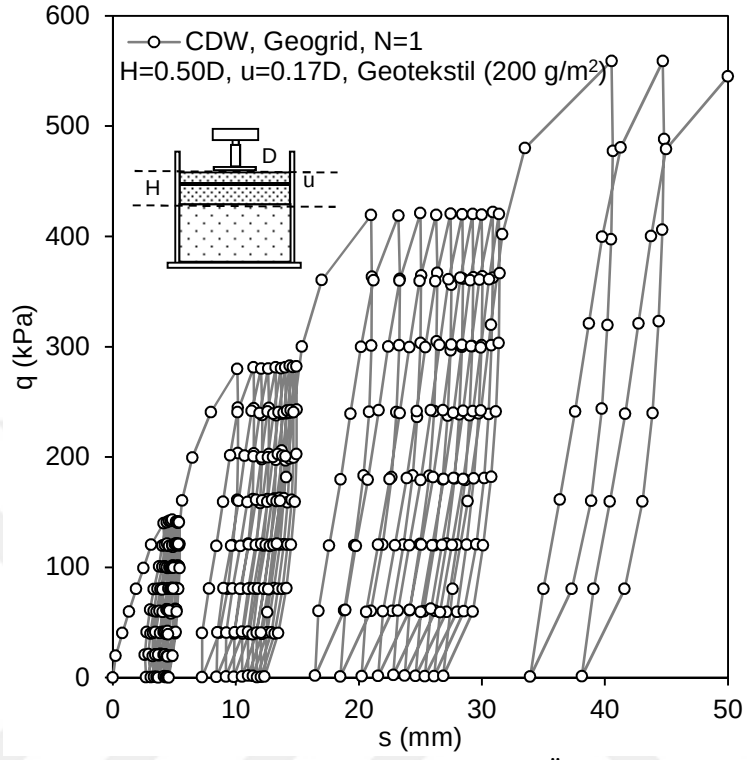
Bu seride zayıf zemin üzerine, geogrid ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deneyler yapılmıştır. Önce kalınlığı $H/D=0.50$ olan inşaat ve yıkıntı atığı dolgu içerisine $u/D=0.17$ derinliğine (statik yüklemelerde optimum olarak belirlenen derinlik) tek sıra geogrid donatı yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deney yapılmıştır. Sonra aynı kalınlıktaki dolgu

içerisine $u/D=0.17$ ve $h/D=0.17$ (statik yüklemelerde optimum olarak belirlenen konfigürasyon) derinliklere çift sıra geogrid donatı yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deney yapılmıştır. Deneylerden derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.81’de gösterilmiştir.

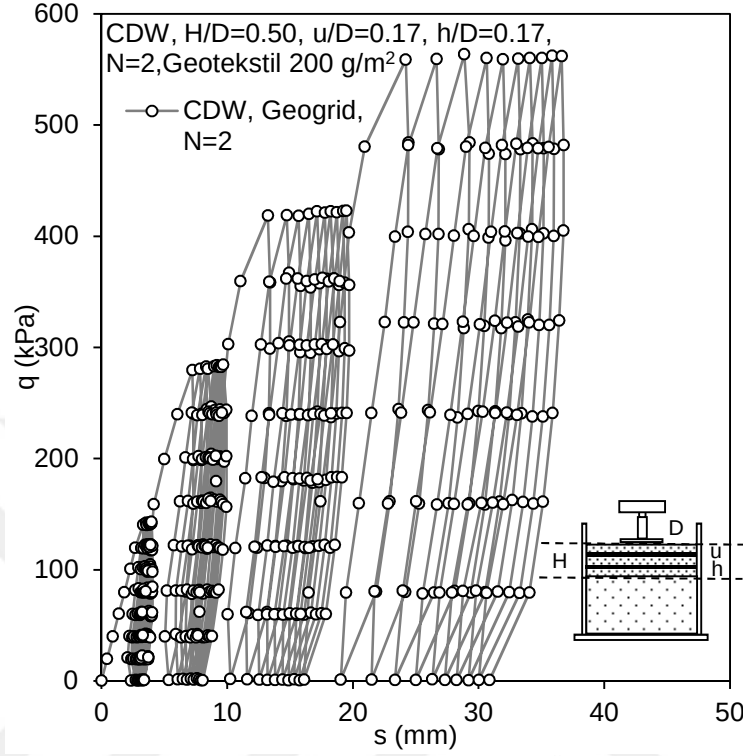


Şekil 4.81. Geogrid Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı Yüklemeli Deneylerin Deney Şartları Kontrolü

Tek sıra geogrid ($u/D=0.17$) ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu tekrarlı yüklemeli deneyin ilk üç yük kademesinde (140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa) 10’ar yükleme yapıldıktan sonra dördüncü yük kademesindeki (560 kPa) üçüncü yüklemede deplasman sınırı olan 50 mm’ye ulaşılmıştır. Çift sıra geogrid ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$) ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu tekrarlı yüklemeli deneyde ise dört yük kademesinde de (140 kPa, 280 kPa 420 kPa ve 560 kPa) 10’ar yükleme yapılmış ve en son yüklemede toplam yüzey deplasmanı 36.62 mm olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ve yüzey deplasmanı (s) eğrileri sırasıyla Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’te gösterilmiştir.



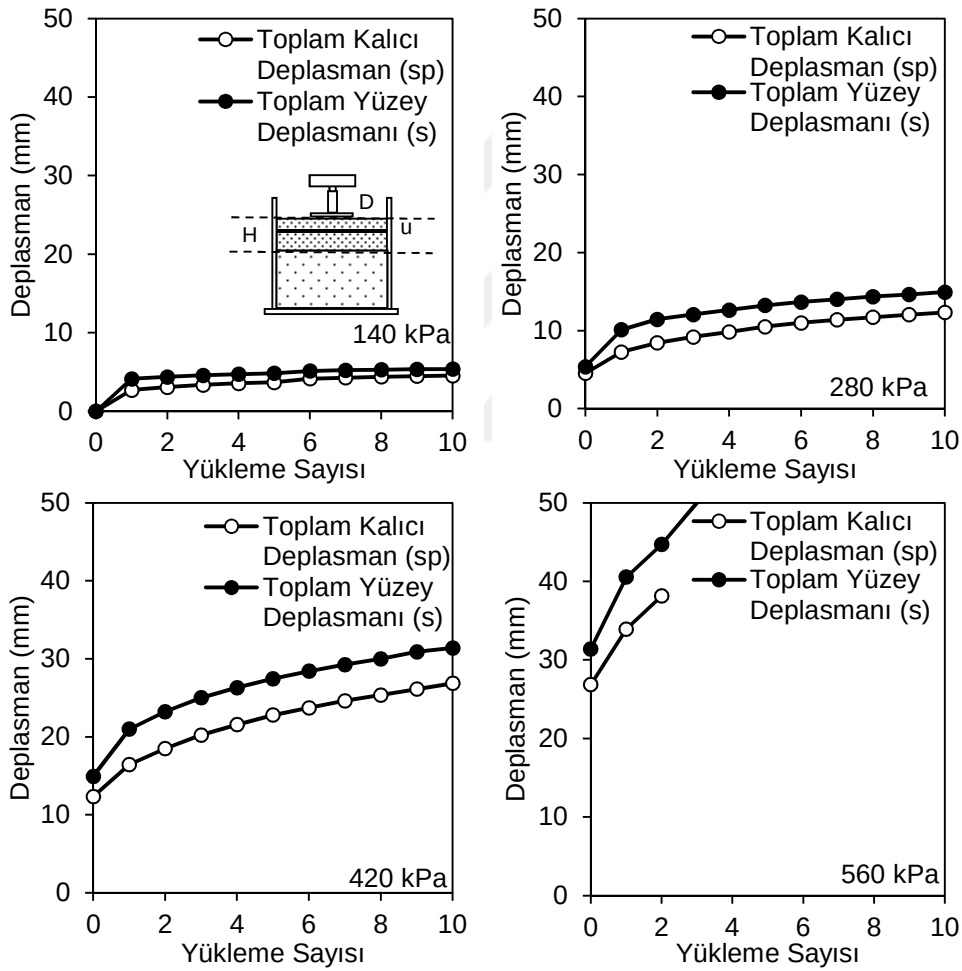
Şekil 4.82. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi



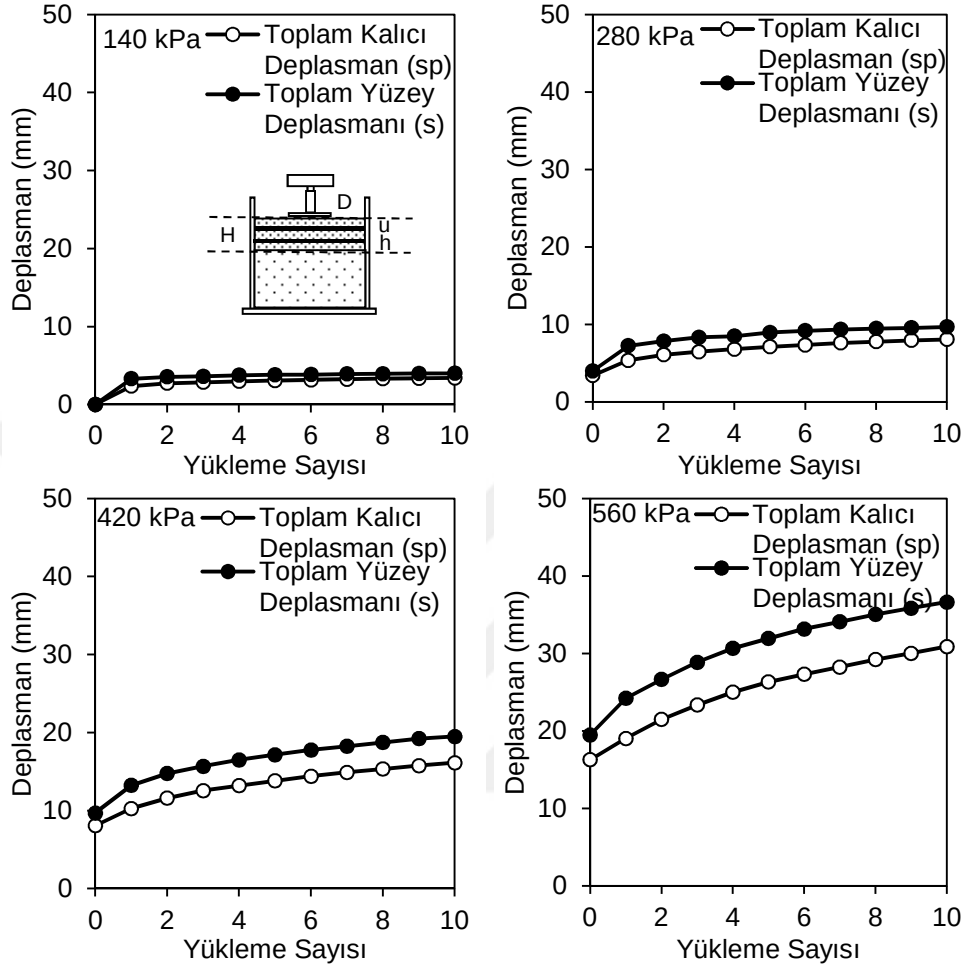
Şekil 4.82. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Dolgu Üzerine Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

Farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi tek sıra geogrid güçlendirmesi ($u/D=0.17$) için Şekil 4.83'te, çift sıra geogrid güçlendirmesi ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$) için Şekil 4.84'te sunulmuştur. Tek sıra geogrid güçlendirmeli durumda ($u/D=0.17$), ilk iki basınç kademesinde (140 kPa ve 280 kPa) tekrarlı yükler arttıkça yüzey ve kalıcı deplasman değerlerinin artış hızının az olduğu görülmüştür. Ancak sonraki basınç kademesinde (420 kPa) tekrarlı yükleme sayısı arttıkça hem yüzey hem de kalıcı deplasman değerlerinde nispeten hızlı bir artış gözlenmiştir. Çift sıra geogrid güçlendirmeli durumda ise ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$), ilk üç basınç kademesinde (140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa) tekrarlı yükler arttıkça yüzey ve kalıcı deplasman değerlerinin artış hızının az olduğu görülmüştür. Ancak sonraki basınç

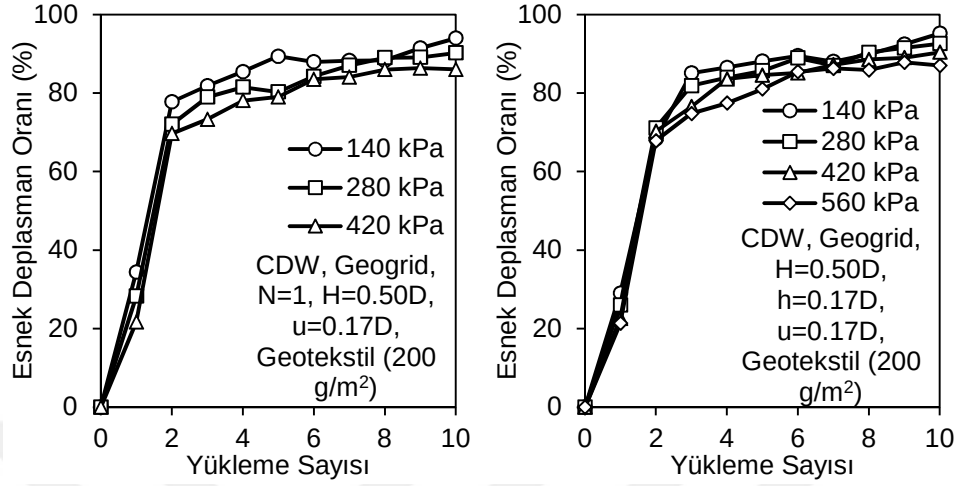
kademesinde (560 kPa) tekrarlı yükleme sayısı arttıkça hem yüzey hem de kalıcı deplasman değerlerinde nispeten hızlı bir artış gözlenmiştir. Ayrıca her iki geogrid güçlendirmeli durum içinde farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık esnek deplasman oranı değişimi Şekil 4.85'te gösterilmiştir. Hem tek hem de çift sıra geogrid güçlendirmeli durumda, basınç değeri arttıkça esnek deplasman oranlarında az bir miktar düşüş görülmüştür.



Şekil 4.83. Tek Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi



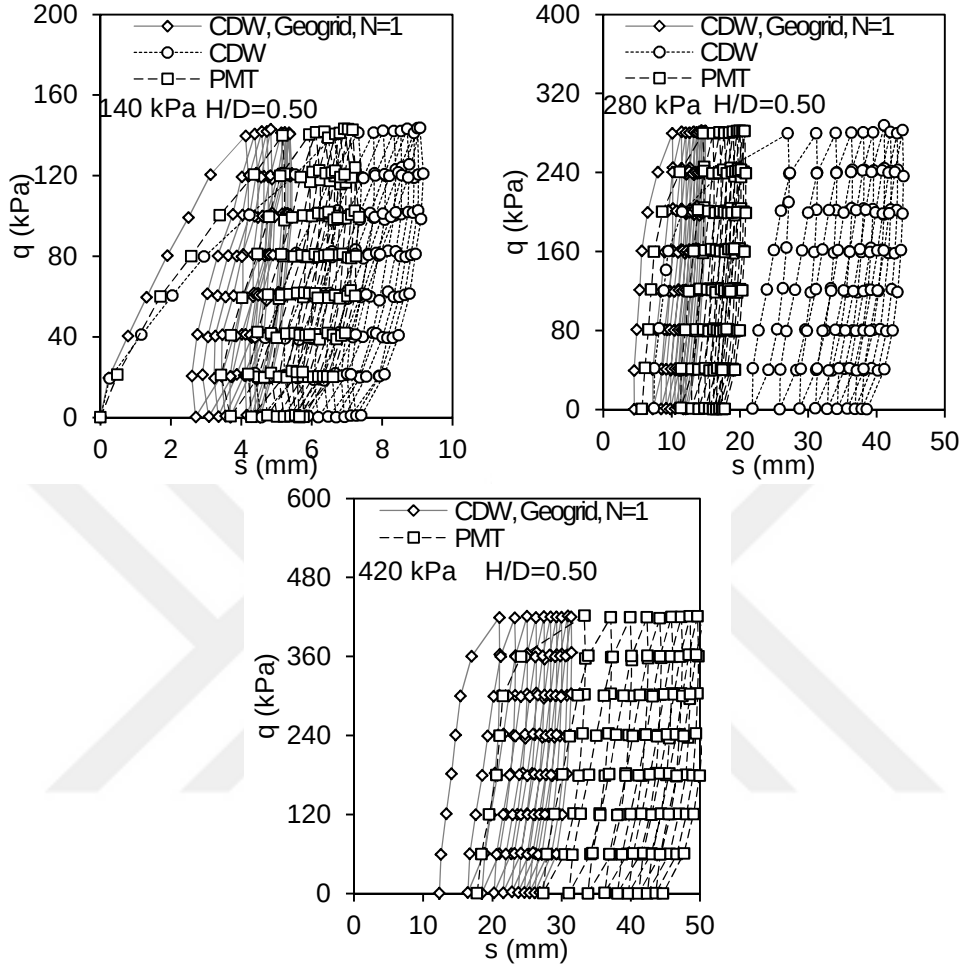
Şekil 4.84. Çift Sıra Geogrid Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi



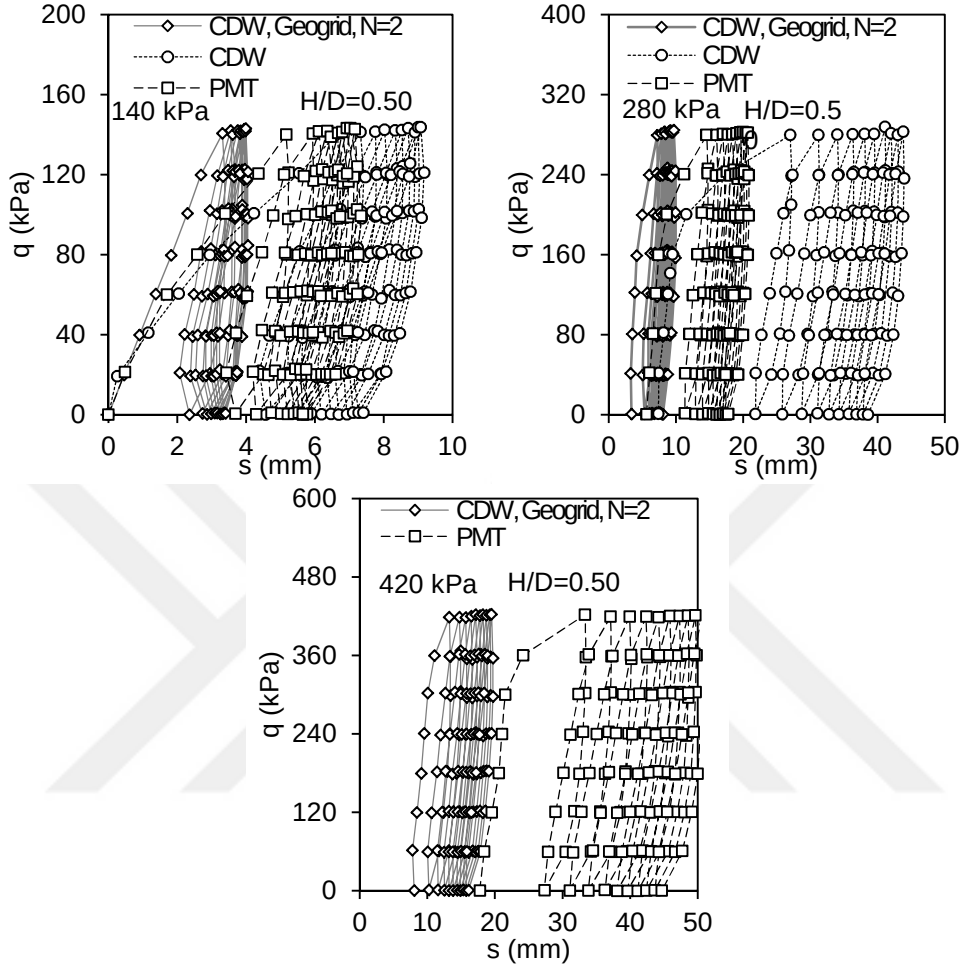
Şekil 4.85. Geogrid Güçlendirmeli Durumda Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi

4.3.4.1. Doğal Agregaya Dolgu ile Karşılaştırılması (Geogrid)

Tek sıra geogrid ($u/D=0.17$) ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun, güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atığı (CDW) dolgu ve doğal agregaya (PMT) dolgu ile gerilme (q)-yüzey deplasmanı (s) eğrileri bakımından kıyaslanması Şekil 4.86'da gösterilmektedir. Benzer şekilde çift sıra geogrid ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$) ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun kıyaslanması ise Şekil 4.87'de gösterilmiştir. Tekrarlı yüklemedeki bütün yük kademelerinde inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu durumda elde edilen yüzey ve kalıcı deplasman değerleri doğal agregaya (PMT) dolguya göre daha fazla çıkmıştır. Ancak inşaat ve yıkıntı atığı dolgu tek ($u/D=0.17$) veya çift sıra ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$) geogrid ile güçlendirildiğinde doğal agregalardan daha az yüzey ve kalıcı deplasman değerlerine sahip olmuştur.



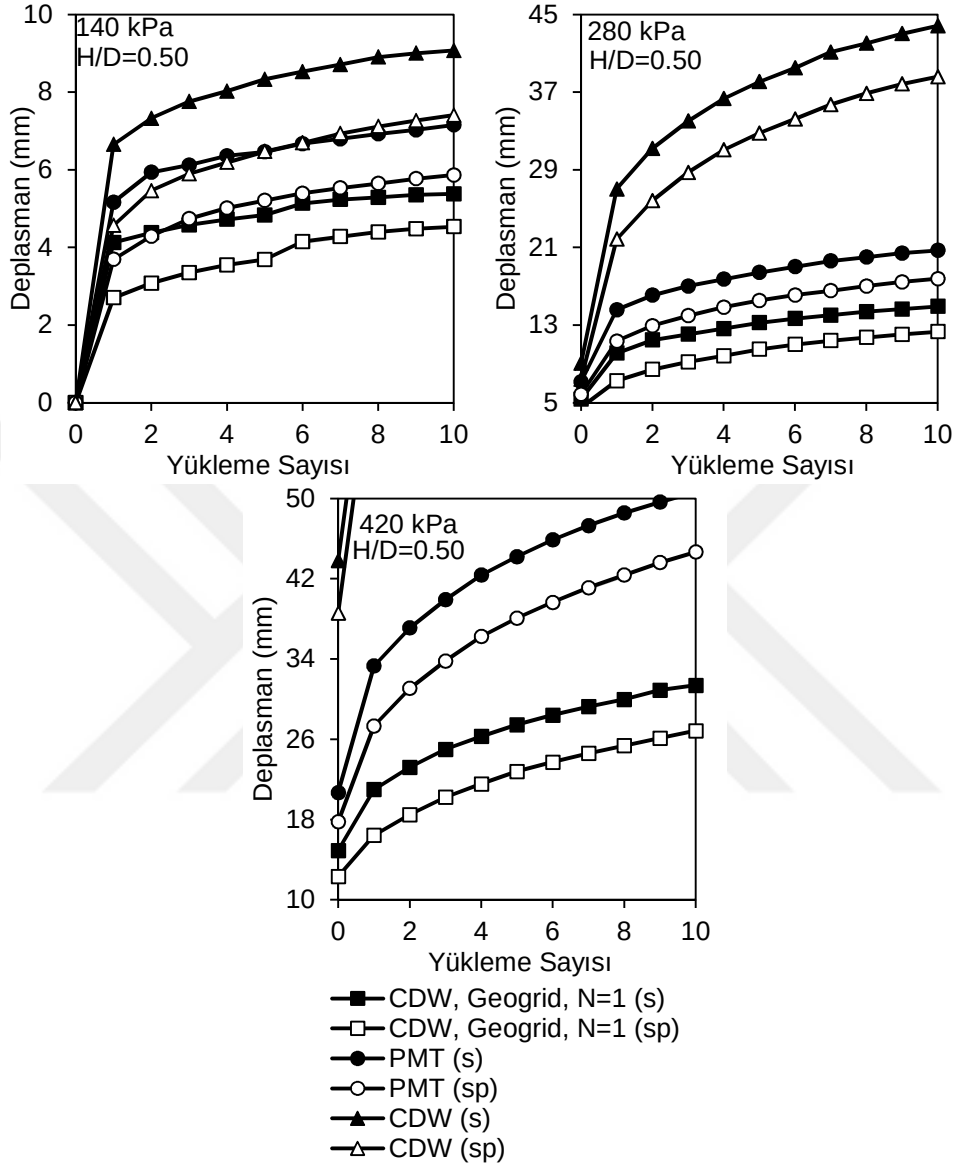
Şekil 4.86. Tek Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması



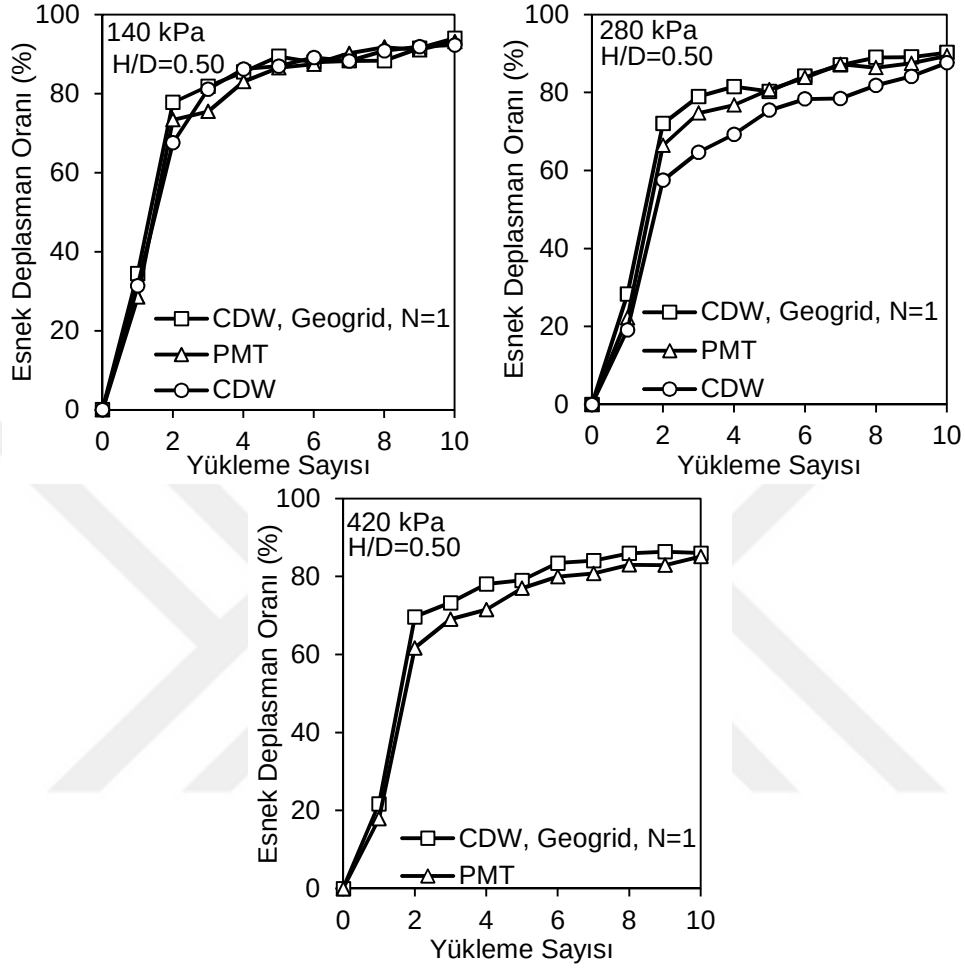
Şekil 4.86. Çift Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Gerilme Deplasman Değişimi Kıyaslanması

Tek sıra geogrid ($u/D=0.17$) ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgunun, güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atığı (CDW) dolgu ve doğal agreg (PMT) dolgu ile yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişiminin kıyaslanması Şekil 4.87’de, esnek deplasman oranı değişiminin kıyaslanması Şekil 4.88’de sunulmuştur. Benzer şekilde çift sıra geogrid ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$) ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun kıyaslanması ise Şekil 4.89 ve Şekil 4.90’da gösterilmiştir. Hem tek hem de çift

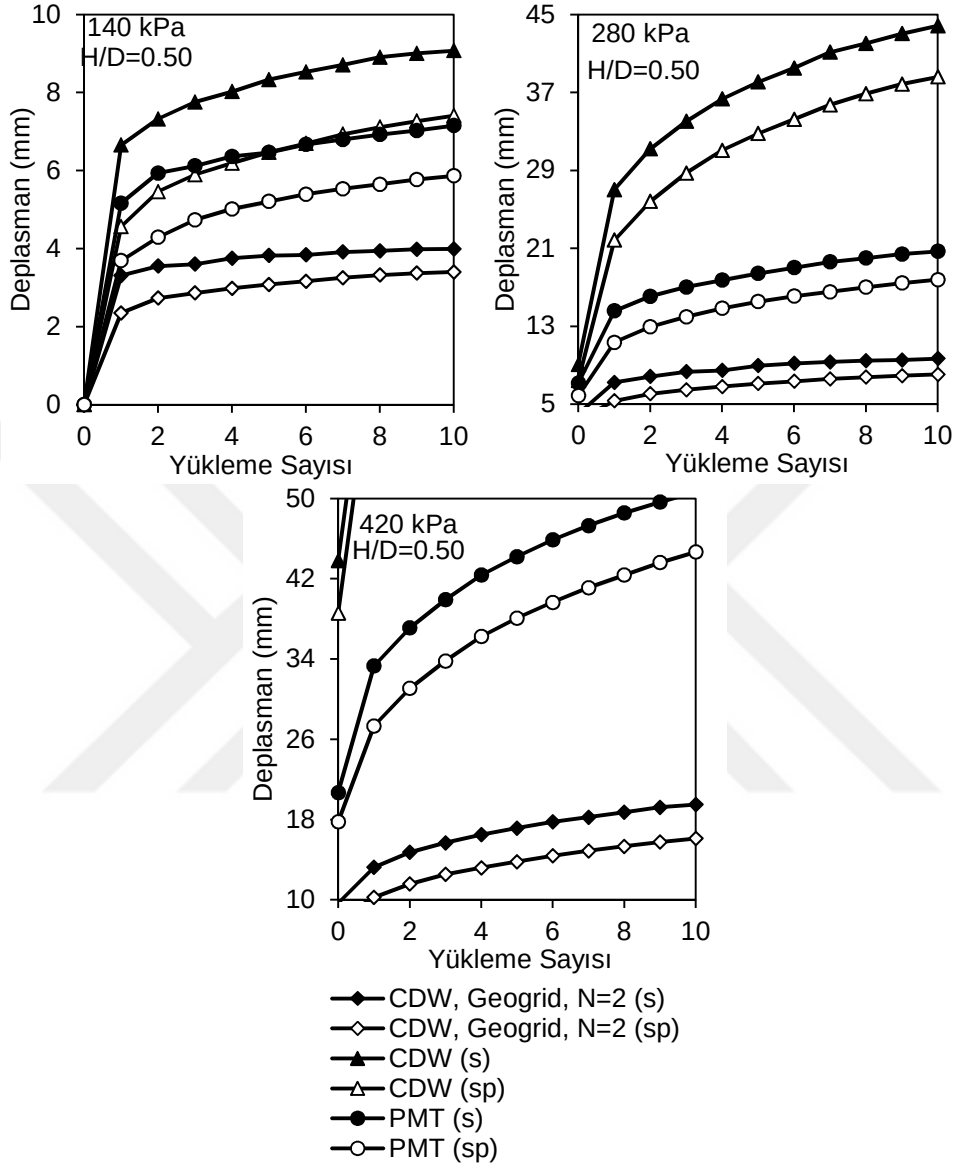
geogrid güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolguların ilk yük kademesindeki (140 kPa) esnek deplasman oranları, doğal agreg (PMT) dolgu ve güçlendirilmemiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolguya oldukça yakındır. Hem tek hem de çift sıra geogrid güçlendirmeli durumda ikinci ve üçüncü yük kademelerinde (280 kPa ve 420 kPa) esnek deplasman oranı hem doğal agreg (PMT) dolgudan hem de güçlendirmesiz inşaat ve yıkıntı (CDW) atığı dolgudan bir miktar daha fazla çıkmıştır. Ayrıca her iki güçlendirmeli durumda da, bütün basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atığı dolgulu ve doğal agreg dolgulu duruma göre daha az deplasman değerleri elde edilmiştir.



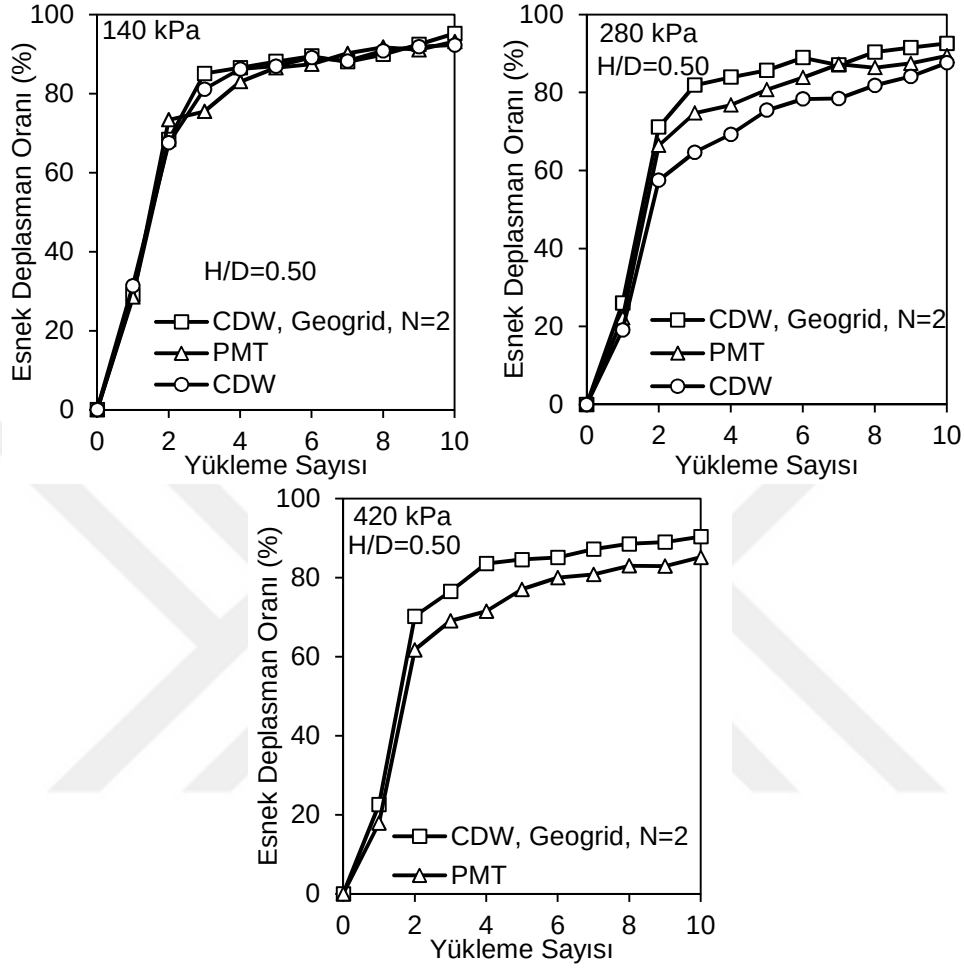
Şekil 4.87. Tek Sıra Geogrid Güçlendirme Durumunda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslaması



Şekil 4.88. Tek Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması



Şekil 4.89. Çift Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslaması



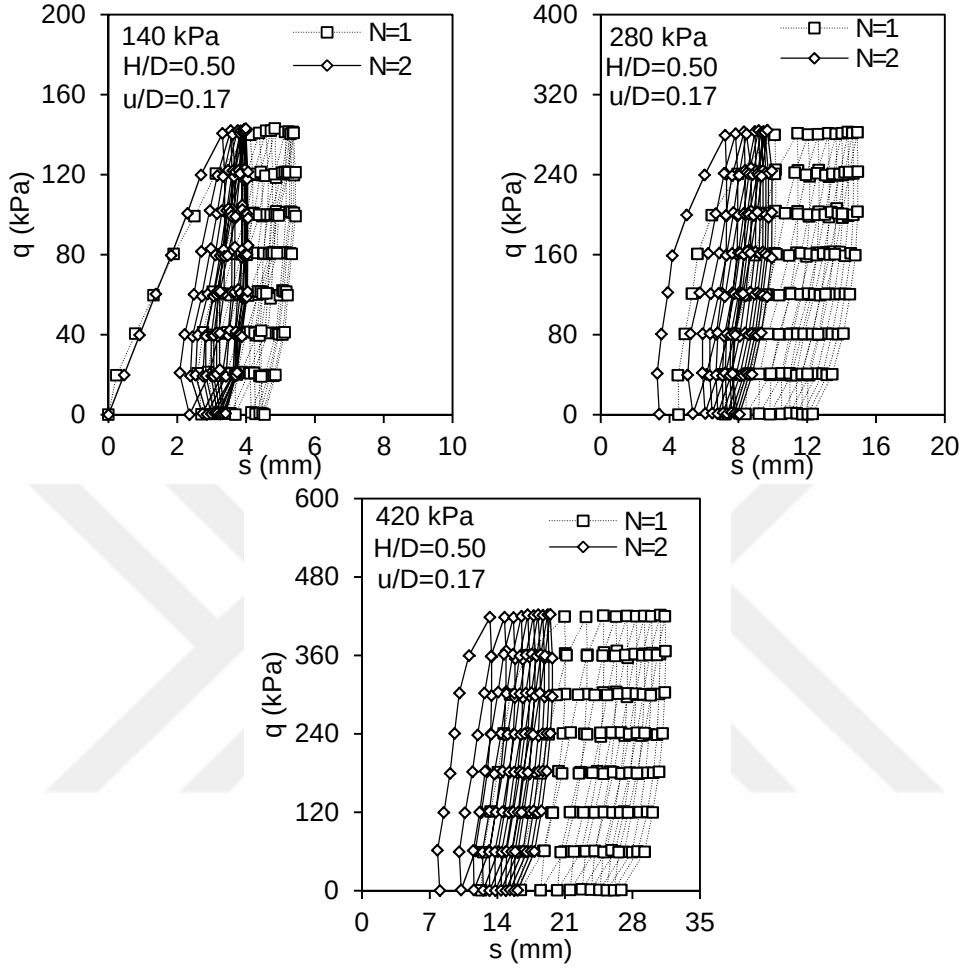
Şekil 4.90. Çift Sıra Geogrid Güçlendirme Durumda Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi Kıyaslaması

4.3.4.2. Geogrid Güçlendirme Sayısının Tekrarlı Yüklemelerdeki Etkisi

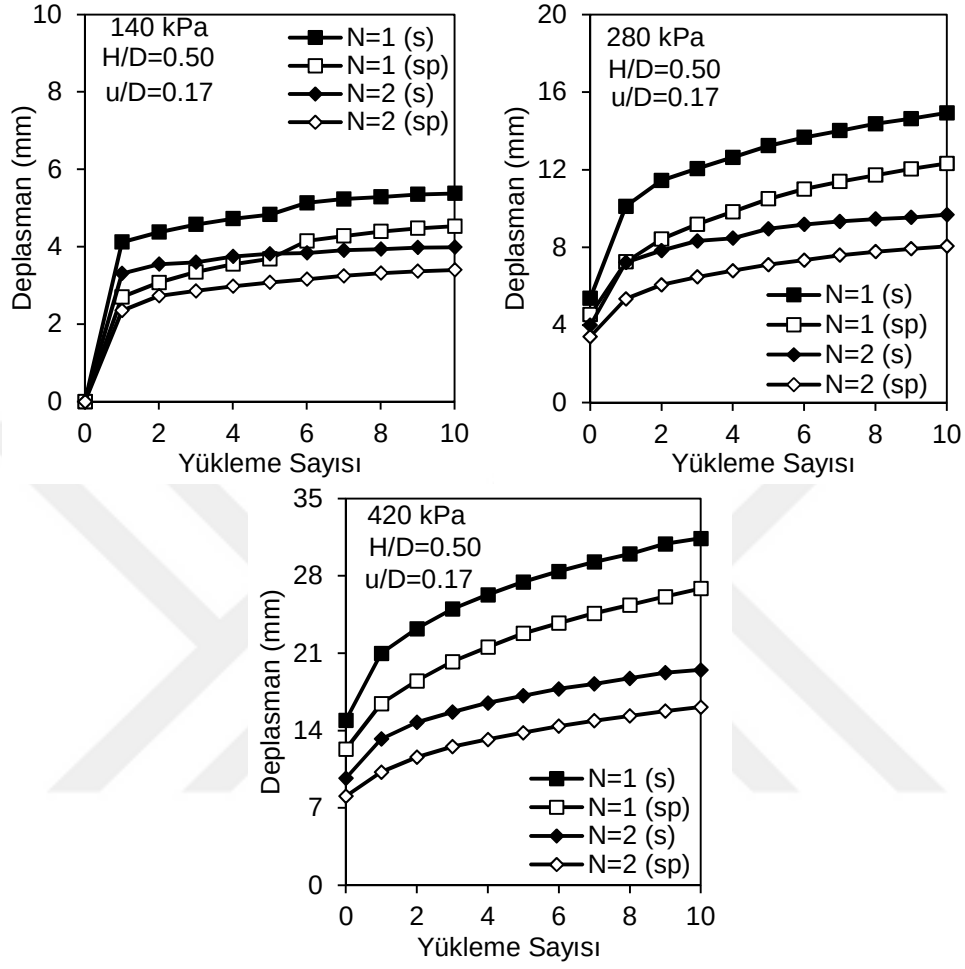
Geogrid ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu için güçlendirme sayısına göre gerilme (q)-yüzey deplasmanı (s) eğrileri değişimi Şekil 4.91’de sunulmuştur. Ayrıca geogrid güçlendirme sayısına göre yüklemeye sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişiminin kıyaslanması Şekil 4.92’de, esnek deplasman oranı değişiminin kıyaslanması Şekil 4.93’te gösterilmektedir. Bütün basınç kademelerindeki tekrarlı yükler sonucunda

inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu çift sıra geogrid ($u/D=0.17$, $h/D=0.17$) ile güçlendirildiğinde, tek sıra geogrid ($u/D=0.17$) ile güçlendirilen duruma göre daha az yüzey ve kalıcı deplasman değerlerine sahip olmuştur. Ayrıca iki güçlendirme durumu arasındaki deplasman farkı basınç kademeleri arttıkça artmıştır. Özellikle üçüncü basınç kademesinde (420 kPa) tek sıra geogrid ile güçlendirilen dolgunun yüzey ve kalıcı deplasman değerleri, çift sıra geogrid ile güçlendirilen dolguya göre çok daha hızlı bir artış içine girmiştir.

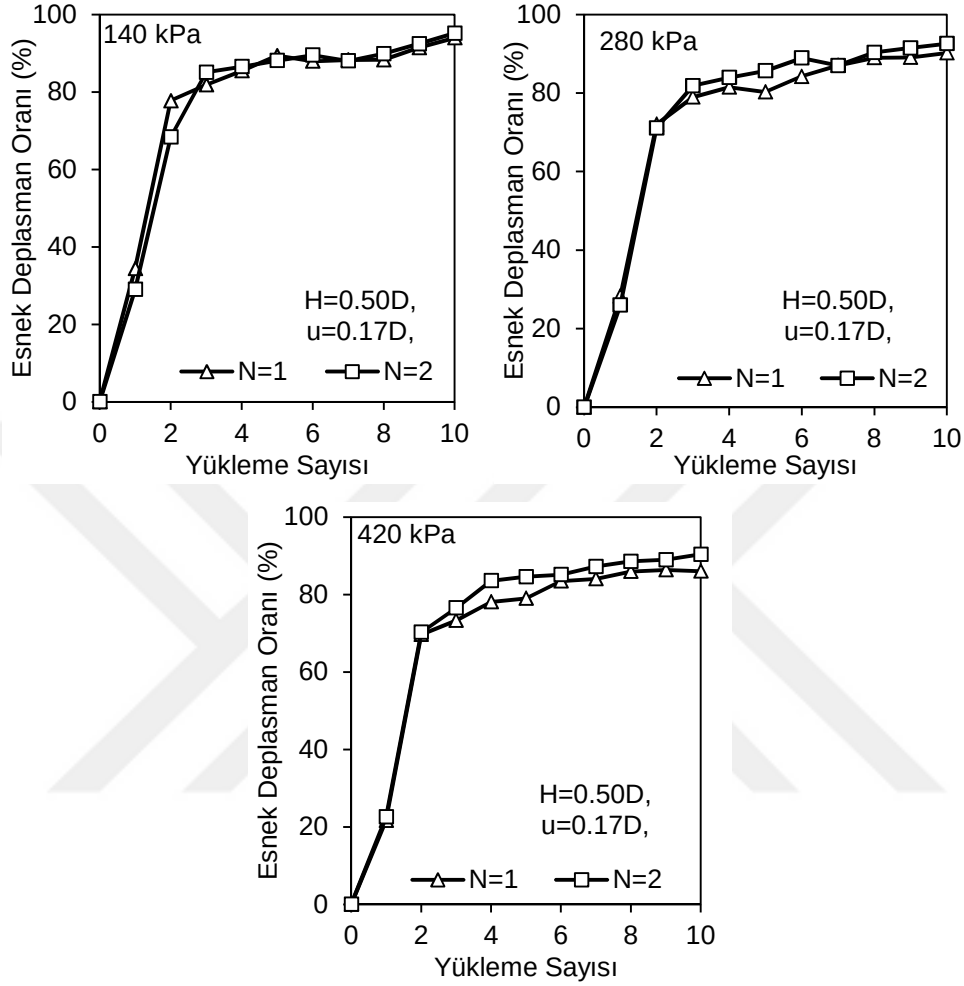
İlk basınç kademesinde tek ve çift sıra geogrid güçlendirmeli durumlardaki esnek deplasman oranları birbirlerine benzerken ikinci ve üçüncü basınç kademesinde çift sıra geogrid ile güçlendirilen durumun esnek deplasman oranları tek sıra güçlendirmeli duruma göre biraz daha fazla değere sahip olmuştur. Ayrıca geogrid donatı sayısının artması durumunda, bütün basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde daha az deplasman değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.91. Geogrid Sayısının Gerilme Deplasman Davranışına Etkisi



Şekil 4.92. Geogrid Sayısının Yüklem Sayısı Deplasman Eğrisine Etkisi



Şekil 4.93. Geogrid Sayısının Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Eğrisine Etkisi

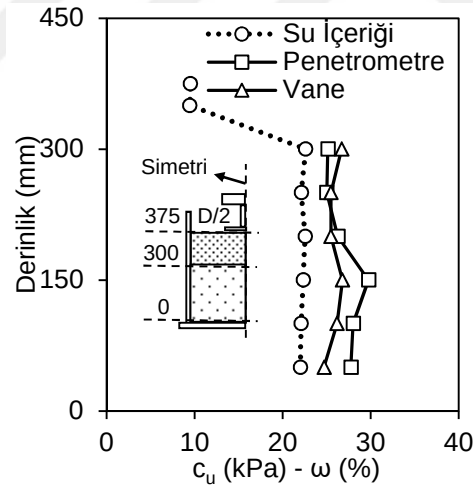
4.3.5. Geotekstil Etkisi (Seri X)

Bu seride öncelikle ayırma amacı ile zayıf zemin ve dolgu tabakası arasına yerleştirilen geotekstilin (200g/m^2) etkisi araştırılmıştır. Bu sebeple zayıf zemin üzerine doğrudan (geotekstilsiz) inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu yerleştirilmiş ($H/D=0.50$) ve tekrarlı yüklemeli deney yapılmıştır. Daha sonra güçlendirme amacı ile zayıf zemin ve dolgu tabakası arasına yerleştirilen geotekstilin (600g/m^2) etkisi

doğal agrega (PMT) dolgu ile de kıyaslanarak incelenmiştir. Bu nedenle zayıf zemin üzerine güçlendirme amacı ile geotekstil (600g/m^2) serilmiş, üzerine ise inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu ($H/D=0.50$) yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deney yapılmıştır. En son deneyler birbirleri ile kıyaslanarak geotekstil etkisi yorumlanmıştır.

4.3.5.1. Tekrarlı Yüklerde Ayırma Amaçlı Geotekstil Etkisi

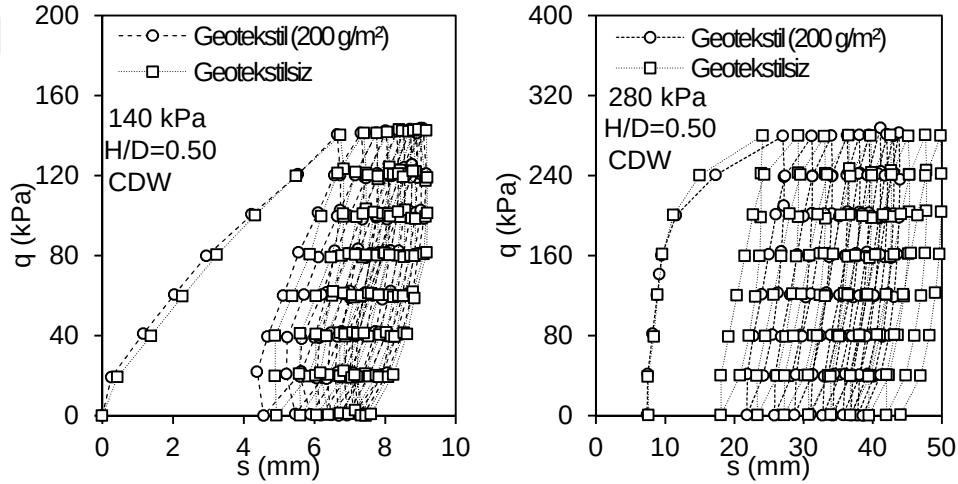
Ayırma amacı ile zayıf zemin ile dolgu arasına yerleştirilen geotekstilin (200g/m^2) tekrarlı yükler altındaki etkisinin değerlendirilebilmesi için, zayıf zemin üzerine geotekstil yerleştirilmeden inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu ($H/D=0.50$) yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deney yapılmıştır. Deneyde derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.94'te gösterilmiştir.



Şekil 4.94. Geotekstilsiz Durumunda Tekrarlı Yüklemeli Deneyin Deney Şartları Kontrolü

Zayıf zemin ile inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu arasına ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) yerleştirilerek yapılan tekrarlı yüklemeli deneyin ilk iki yük

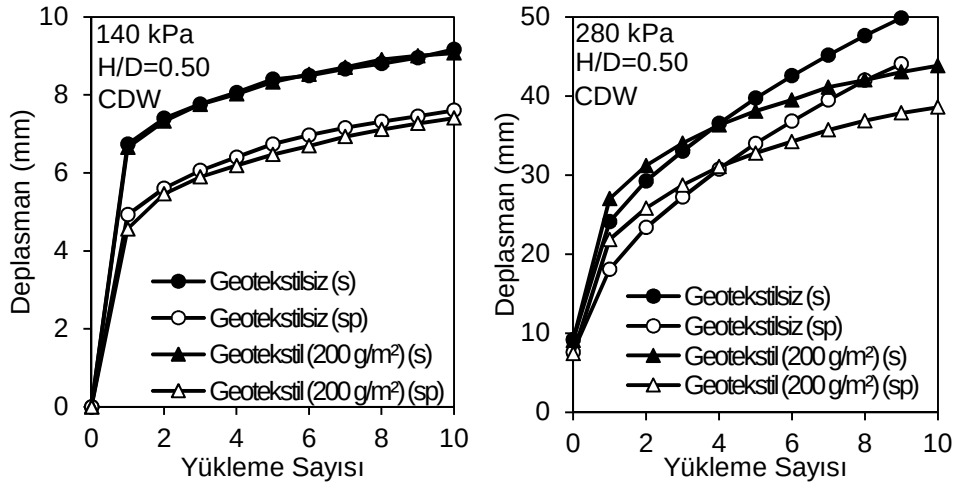
kademesinde (140 kPa ve 280 kPa) 10'ar yükleme yapıldıktan sonra üçüncü yük kademesindeki (420 kPa) ilk yükleme bitmeden deplasman sınırı olan 50 mm'ye ulaşılmıştır. Ara yüzeye geotekstil yerleştirilmeden yapılan tekrarlı yüklemeli deneyde ise ilk yük kademesinde 10 yükleme yapılmış ikinci yük kademesinin dokuzuncu yüklemesinde deplasman sınırı olan 50 mm'ye ulaşılmıştır. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ve yüzey deplasmanı (s) eğrileri Şekil 4.95'te gösterilmiştir.



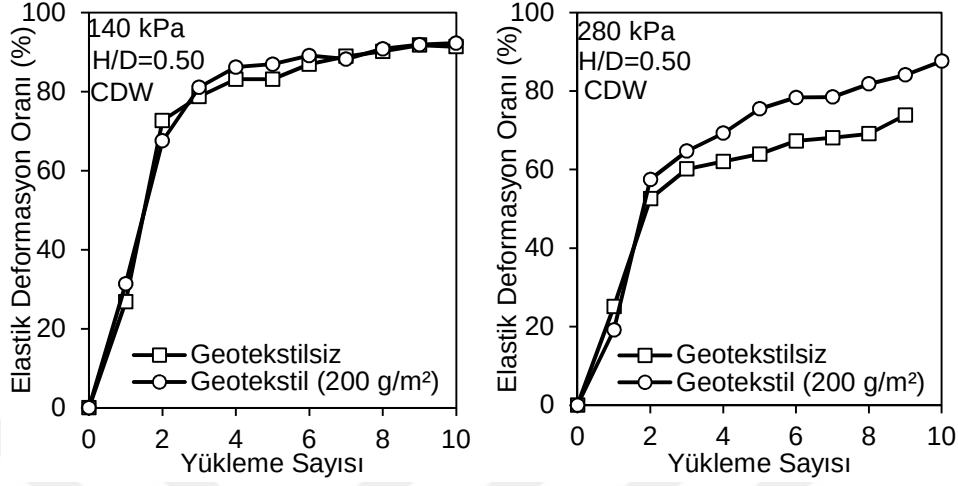
Şekil 4.95. Ayırma Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

Farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi Şekil 4.96'da, yükleme sayısına karşılık esnek deplasman oranı değişimi Şekil 4.97'de sunulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, ayırma amaçlı geotekstilin (200 g/m^2) 140 kPa ve 280 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemeler sonucu oluşan deplasmanlara pek bir etkisi olmadığı görülmüştür. İlk yük kademesinde (140 kPa) ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m^2) durum ile geoteksilsiz durumun esnek deplasman oranları birbirine çok benzerdir. Dolayısı ile bu yük kademesinde (140 kPa) iki deneyin hem toplam yüzey deplasmanları hem de toplam kalıcı deplasmanları birbirlerine

çok yakın çıkmıştır. Sonuç olarak ilk yük kademesinde (140 kPa) ayırma amaçlı geotekstilin (200 g/m^2) kayda değer bir etkisi saptanmamıştır. Ancak ikinci yük kademesinde (280 kPa) ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m^2) durumun esnek deplasman oranları geotekstilsiz duruma daha yüksek çıkmıştır. İkinci yük kademesinin (280 kPa) dördüncü yüklemeinden sonra geotekstilsiz durumdaki toplam yüzey ve kalıcı deplasmanların artış hızı ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m^2) durumdan fazla olmuştur. Bunun sonucunda geotekstilsiz durum bu yük kademesindeki (280 kPa) dokuzuncu yüklemede deplasman sınırına ulaşmıştır. Geotekstilsiz duruma göre deplasmanların nispeten daha az arttığı ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m^2) durumda ise ikinci basınç kademesindeki (280 kPa) onuncu yüklemeden sonra bile deplasman sınırına ulaşılmamış ve bir sonraki basınç kademesine geçilebilmiştir. Özellikle ikinci yük kademesinde (280 kPa) geotekstilsiz durumda granüler malzemenin zayıf zemine batması sonucunda kalıcı deplasmanların daha çok olduğu (yük boşaltıldığında deplasmanlar dönüyor), ayırma amaçlı geotekstilli durumda ise geotekstilin granüler malzemenin zayıf zemine batmasını engelleyerek kalıcı deplasmanları azalttığı düşünülmektedir.



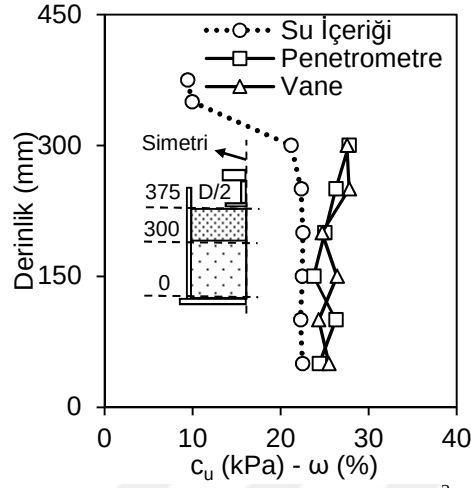
Şekil 4.96. Ayırma Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yükleme Sayısı Deplasman Değişimi



Şekil 4.97. Ayırma Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yükleme Sayısı Esnek Deplaman Oranı Değişimi

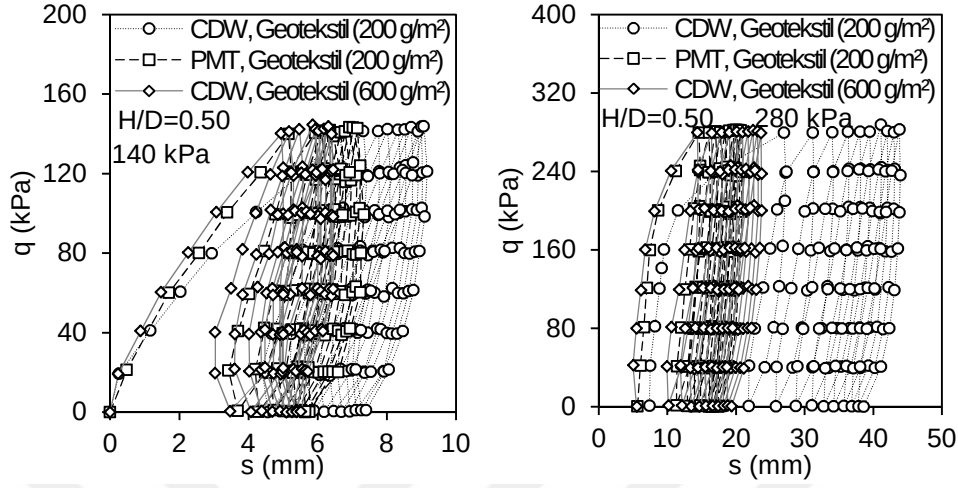
4.3.5.2. Tekrarlı Yüklerde Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Etkisi ve Doğal Agrega Dolgu ile Karşılaştırılması

Geotekstilin güçlendirme etkisini araştırabilmek için, yumuşak zemin ile inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu arasına güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) yerleştirilerek tekrarlı yüklemeli deney yapılmıştır. Deneyde derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemeti ve hem zayıf zemin hem de granüler dolgudaki su içeriği Şekil 4.98’de gösterilmiştir.



Şekil 4.98. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil (600 g/m²) Yerleştirilen Tekrarlı Yüklemeli Deneyin Deney Şartları Kontrolü

Zayıf zemin ile inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu arasına güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m²) yerleştirilerek yapılan tekrarlı yüklemeli deneyin ilk iki yük kademesinde (140 kPa ve 280 kPa) 10'ar yükleme yapıldıktan sonra üçüncü yük kademesindeki (420 kPa) ikinci yükleme bitmeden deplasman sınırı olan 50 mm'ye ulaşılmıştır. Bu deneyin sonuçları, zayıf zeminle dolgu arasına ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m²) yerleştirilen, doğal agregaya ile inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu üç deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ve yüzey deplasmanı (s) eğrileri Şekil 4.99'da gösterilmiştir.

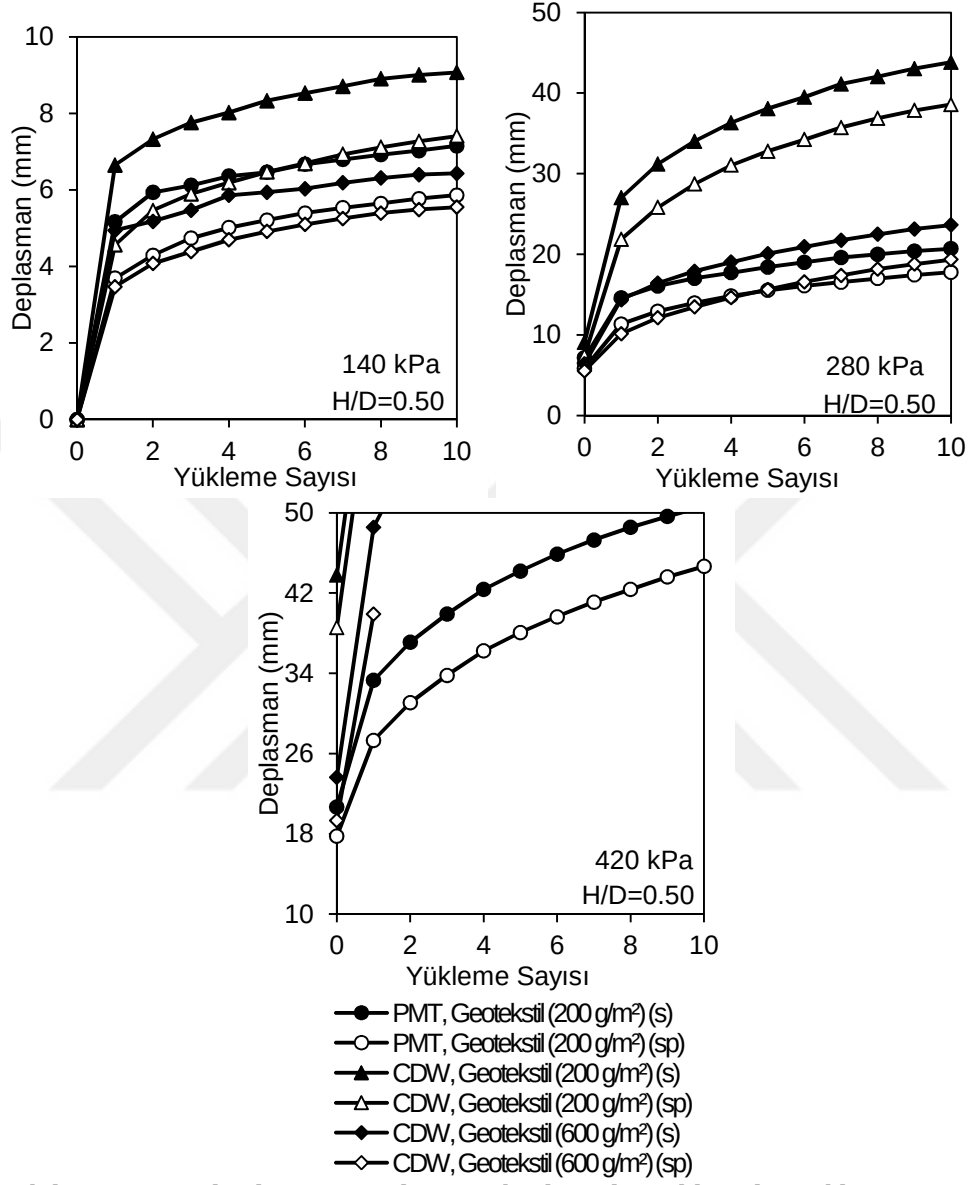


Şekil 4.99. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

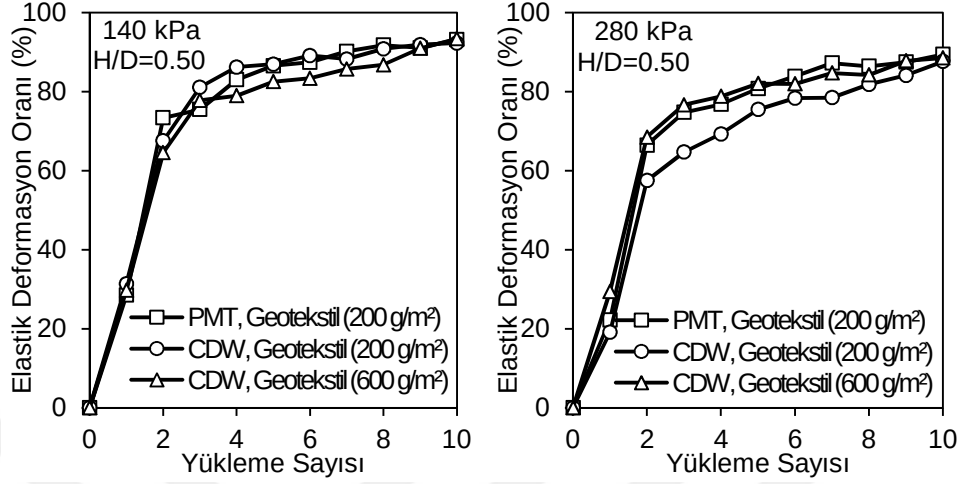
Farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi Şekil 4.100’de, yükleme sayısına karşılık esnek deplasman oranı değişimi Şekil 4.101’de sunulmuştur. Üç basınç kademesinde (140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa) inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu için güçlendirme amaçlı geotekstilli (600 g/m²) durumda tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan toplam yüzey ve toplam kalıcı deplasman değerlerinin ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m²) duruma göre daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca geotekstil güçlendirme ile bütün basınç kademelerindeki ilk yüklemeler sonucu oluşan deplasmanlar da düşmüştür. Ek olarak geotekstil güçlendirmeli ve güçlendirmesiz deneyler kıyaslandığında, ilk basınç kademesindeki (140 kPa) esnek deplasman oranları birbirlerine benzemekle birlikte, ikinci basınç kademesinde (280 kPa) güçlendirme amaçlı geotekstilli (600 g/m²) durumun esnek deplasman oranları ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m²) duruma göre daha yüksek çıkmıştır. Özellikle ikinci yük kademesinde güçlendirme amaçlı geotekstilli (600 g/m²) durumdaki deplasman oranlarının ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m²)

duruma göre oldukça az olmasının güçlendirme amaçlı yerleştirilen geotekstilde oluşan membran etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu geotekstil (600 g/m²) ile güçlendirildiğinde, 140 kPa basınç kademesindeki ilk yüklemede güçlendirmeli durum güçlendirmesiz doğal agrega (PMT) dolgulu duruma göre daha az deplasman yaparken, ilerleyen basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde güçlendirmesiz doğal agrega dolgulu durum geotekstil güçlendirmeli duruma göre daha az deplasman yapıştır. Ayrıca 140 kPa ve 280 kPa basınç kademelerindeki artan tekrarlı yüklerde esnek deplasman oranları birbirine çok yakın çıkmıştır. İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu geotekstil ile güçlendirildiğinde güçlendirmesiz doğal agrega (PMT) dolguya benzer esnek deplasman oranlarına sahip olmasına rağmen, 280 ve 420 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemeler sonucu oluşan deplasmanlar daha düşük olduğu için doğal agrega (PMT) dolgulu durum geotekstil (600 g/m²) güçlendirmeli duruma göre daha iyi bir performans göstermiştir. Özellikle üçüncü basınç kademesi için (420 kPa) güçlendirme amaçlı geotekstilli (600 g/m²) durumda toplam yüzey ve toplam kalıcı deplasman değerleri çok hızlı bir artış göstermiş ve bu basınç kademesindeki (420 kPa) ikinci yükleme tamamlanmadan deplasman sınırına ulaşılmıştır. Ancak doğal agrega (PMT) dolgulu durumda aynı basınç kademesinde (420 kPa) onuncu yüklemeye kadar yükleme yapılmış ve onuncu yüklemede deplasman sınırına ulaşılmıştır.



Şekil 4.100. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yüklemeye Sayısı Deplasman Değişimi

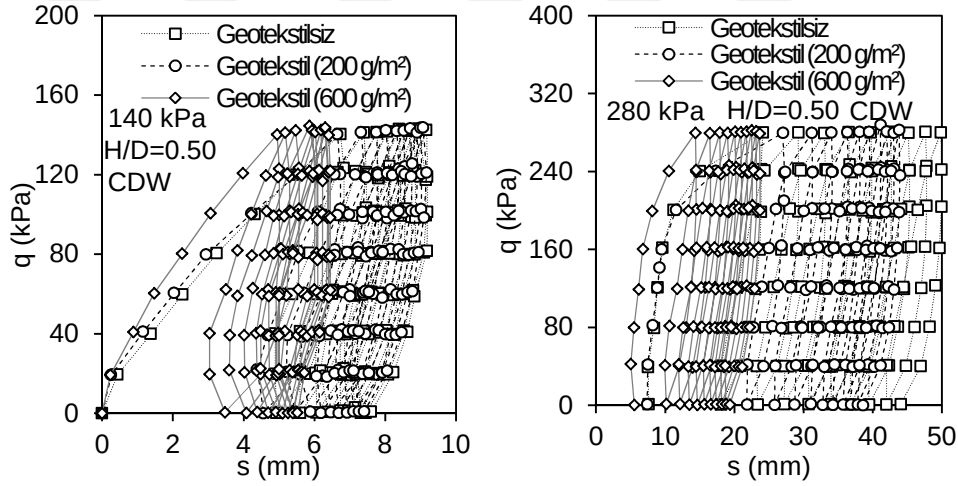


Şekil 4.101. Güçlendirme Amaçlı Geotekstil Yerleştirildiğinde Yükleme Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimi

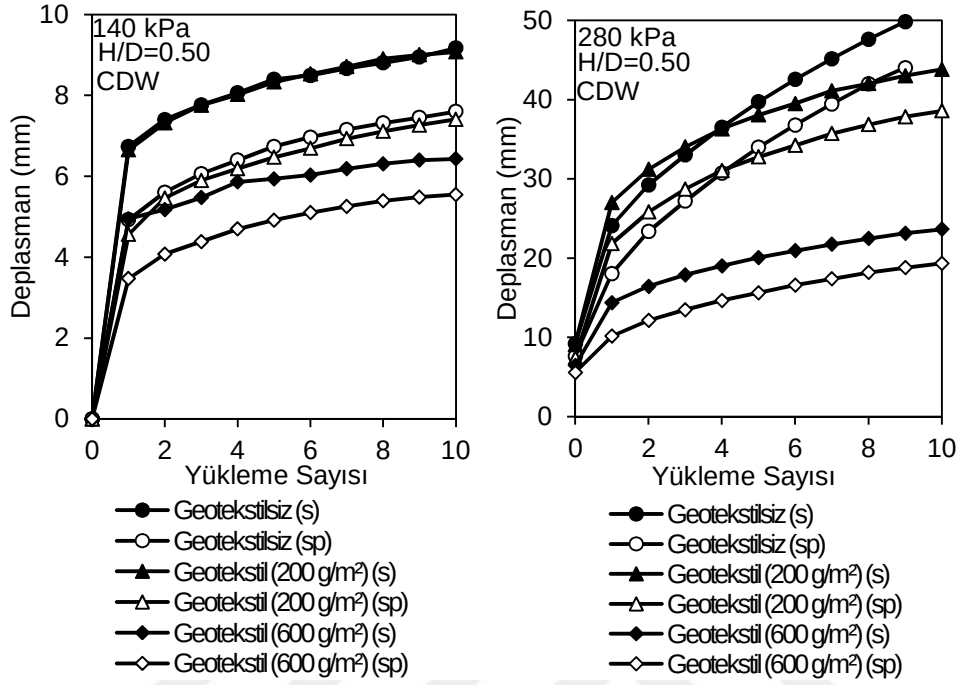
4.3.5.1. Tekrarlı Yüklere Geotekstil Etkisi Değerlendirmesi

Zayıf zemin ile inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu tabakası ara yüzeyi geotekstilsiz ve ara yüzeyinde ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) ile güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) olan tekrarlı yüklemeli deneyler sonucunda elde edilen gerilme (q) ve yüzey deplasmanı (s) eğrileri kıyaslaması Şekil 4.102’de gösterilmiştir. Ayrıca bu üç deney için farklı gerilme düzeylerinde yükleme sayısına karşılık, toplam yüzey deplasmanı ve toplam kalıcı deplasman değişimi kıyaslaması Şekil 4.103’te, yükleme sayısına karşılık esnek deplasman oranı değişimi kıyaslaması ise Şekil 4.104’te sunulmuştur. Ara yüzey geotekstilsiz ve ara yüzeyinde ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) ile güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) olan üç deney kıyaslandığında, ilk yük kademesinde (140 kPa) esnek deplasman oranları birbirlerine yakınken, ikinci yük kademesinde (280 kPa) güçlendirme amaçlı geotekstilli (600 g/m^2) durumun esnek deplasman oranları en yüksek, geotekstilsiz durumun da en düşük çıkmıştır. Ayrıca güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) yerleştirilen durumda, bütün basınç kademelerindeki ilk yüklemeler sonucunda oluşan deplasmanlar ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m^2)

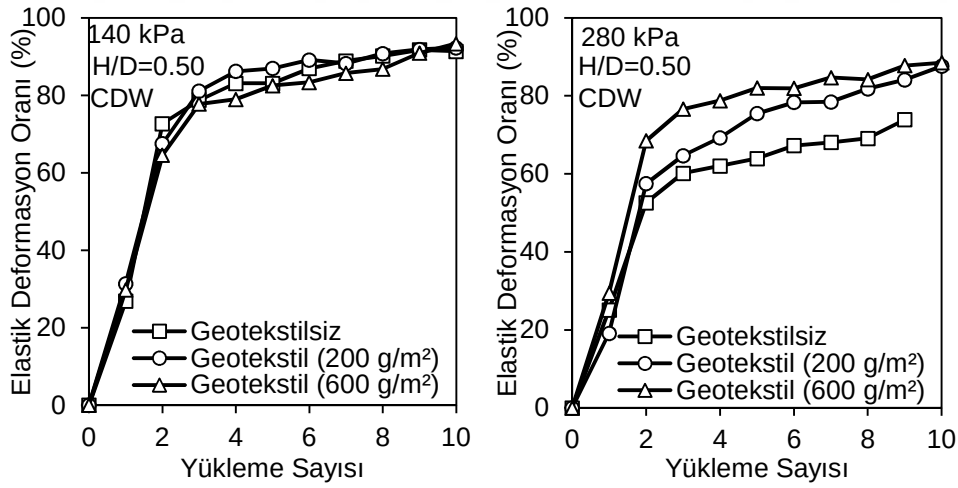
ve geotekstilsiz duruma göre daha az çıkmıştır. Ayırma amaçlı geotekstilli (200 g/m²) ve geotekstilsiz durumlarda, basınç kademelerindeki ilk yüklemeler sonucu oluşan deplasmanlar birbirlerine yakın değerlere sahiptir. Zayıf zemin ile dolgu arasında güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m²) yerleştirilmesi hem ilk basınç kademesindeki (140 kPa) hem de ikinci basınç kademesindeki (280 kPa) tekrarlı yükler sonucu oluşan toplam ve yüzey deplasman değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. Zayıf zemin ile dolgu arasında ayırma amaçlı geotekstil yerleştirildiğinde ise sadece ikinci yük kademesinin (280 kPa) dördüncü yüklemesinden sonra toplam yüzey ve kalıcı deplasman değerlerinde bir azalma görülmüştür.



Şekil 4.102. Tekrarlı Yüklemeli Deneylerde Geotekstilin Gerilme Deplasman Değişimine Etkisi



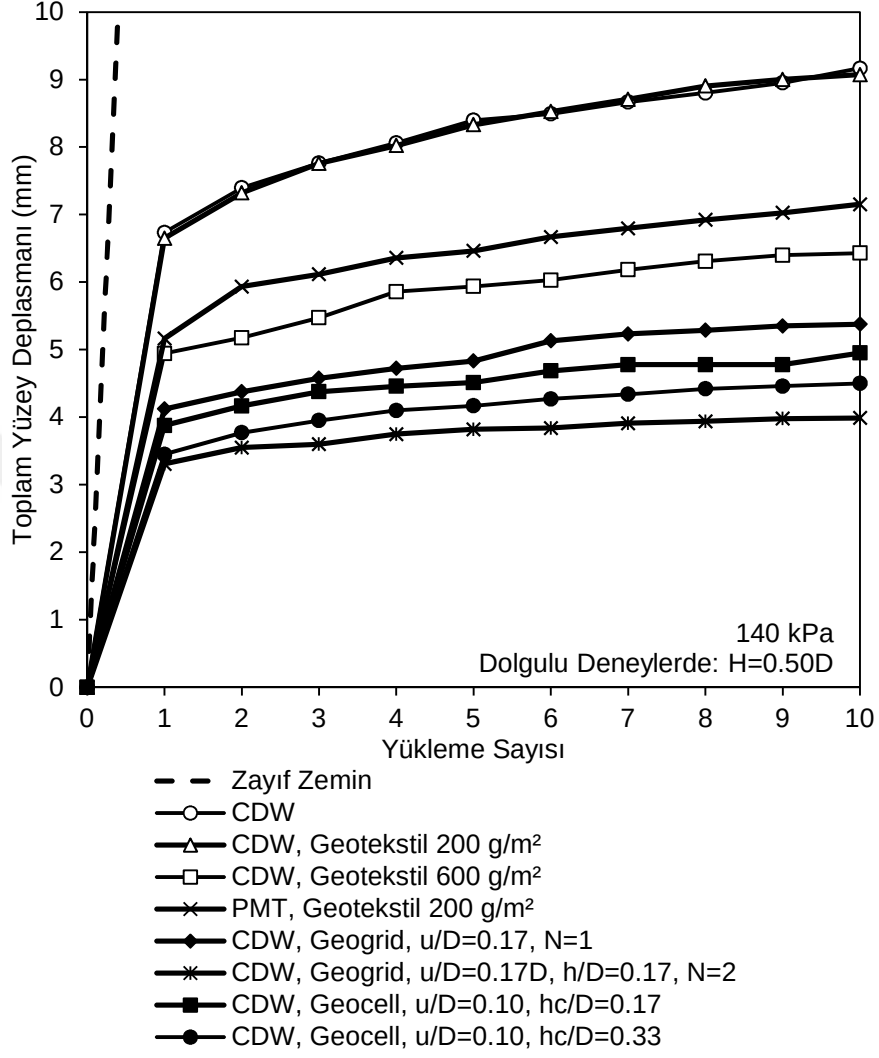
Şekil 4.103. Tekrarlı Yüklemeli Deneylerde Geotekstilin Yüklemeye Sayısı Deplasman Değişimine Etkisi



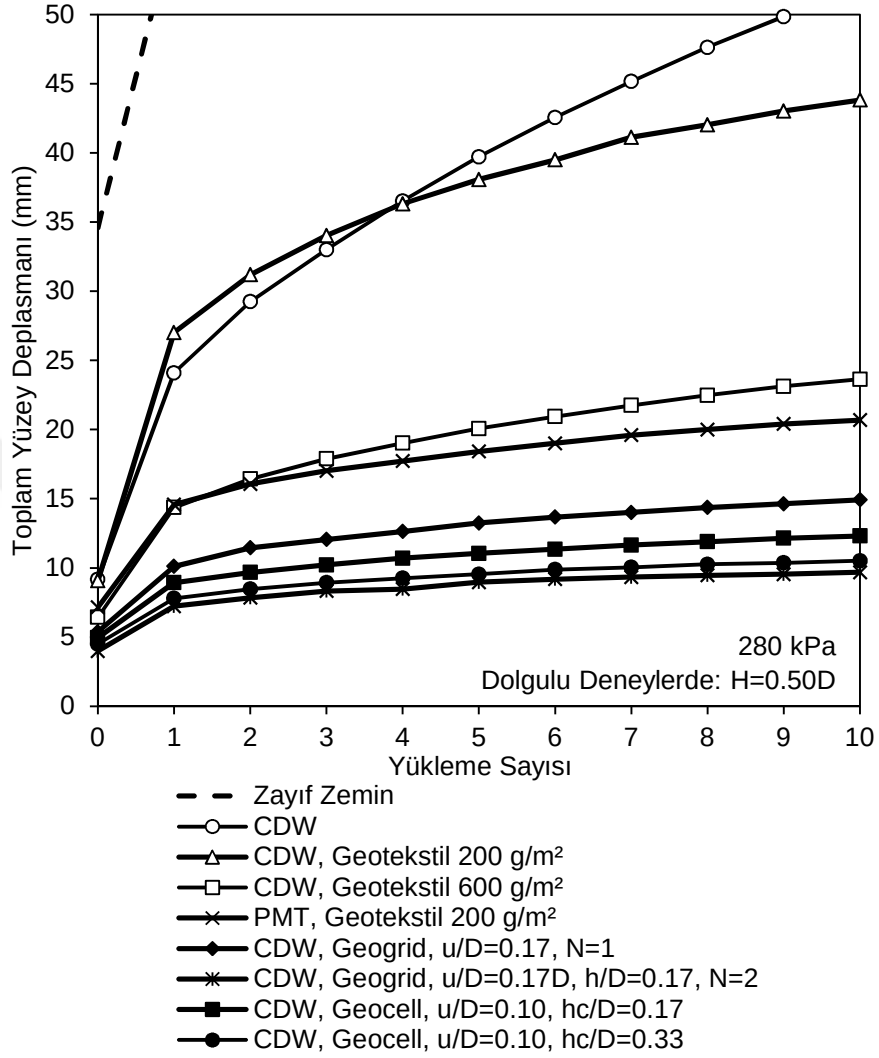
Şekil 4.104. Tekrarlı Yüklemeli Deneylerde Geotekstilin Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi

4.3.6. Tekrarlı Yüklerde Geosentetik Güçlendirmelerin Karşılaştırması

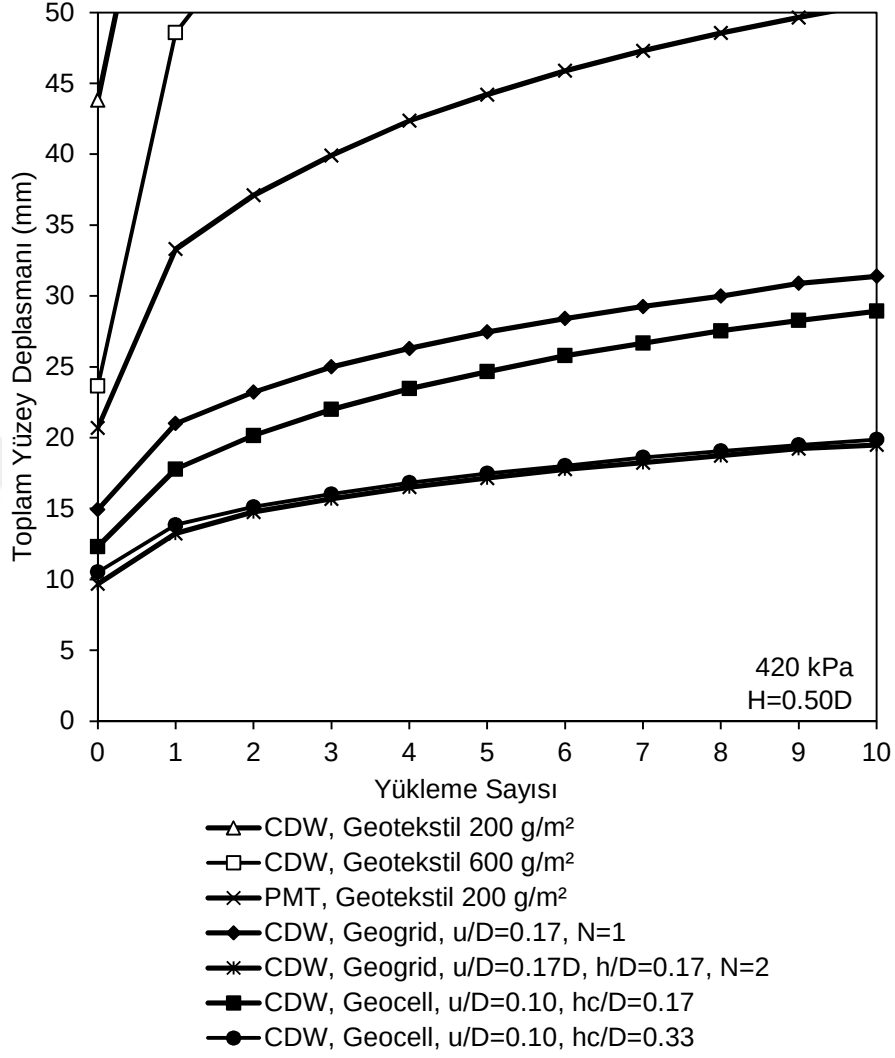
Bu bölümde inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu zeminin, doğal agrega (PMT) dolgulu zeminin tekrarlı yükler altındaki performansını yakalayabilmesi için yapılan farklı tipteki geosentetik güçlendirmelerin etkisi kıyaslanmıştır. Bu sebeple statik yüklemeli deneylerde belirlenen optimum konfigürasyonlarda yapılan güçlendirmeli (tek ve çift sıra geogrid, kalın ve ince geocell güçlendirmeli durum ile ara yüzeye yerleştirilen farklı geotekstilli durumları) tekrarlı yüklemeli deneyler, doğal agrega dolgulu zemin ve zayıf zemin üzerinde yapılan tekrarlı yüklemeli deneylerle karşılaştırılarak güçlendirmenin etkisi yorumlanmıştır. Tekrarlı yüklemeli deneyler sonucunda, tekrarlı yükleme sayısına karşılık toplam yüzey deplasmanı değişimi 140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa basınç kademeleri için sırası ile Şekil 4.105, Şekil 4.106, Şekil 4.107 ve Şekil 4.108 gösterilmiştir.



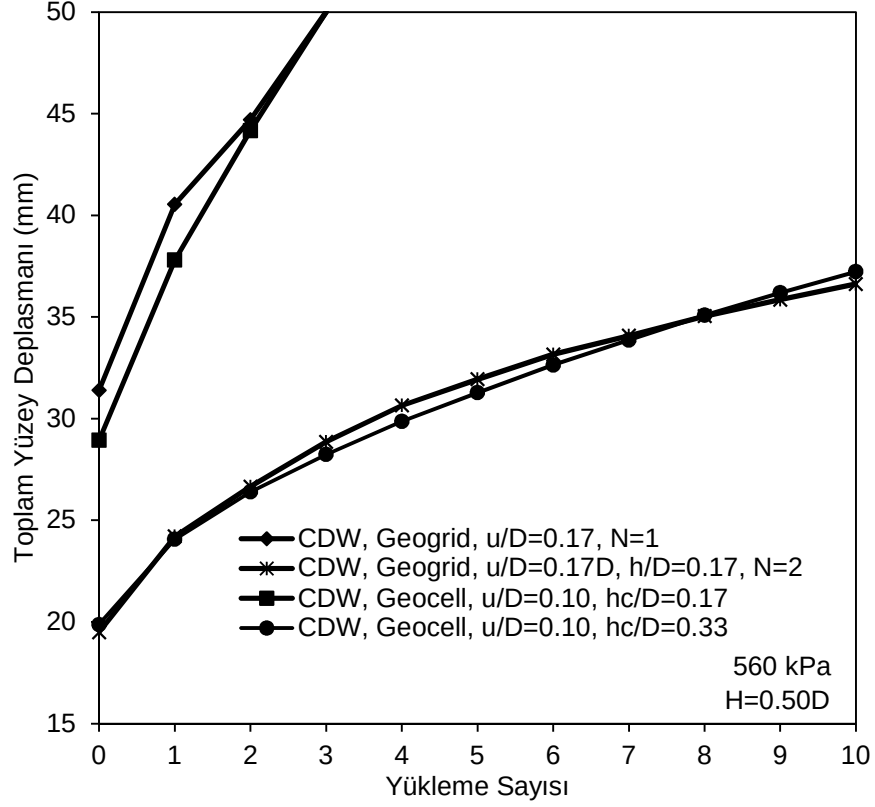
Şekil 4.105. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine Etkisi (140 kPa)



Şekil 4.106. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine Etkisi (280 kPa)



Şekil 4.107. Geosentetiklerin Yüklem Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine Etkisi (420 kPa)

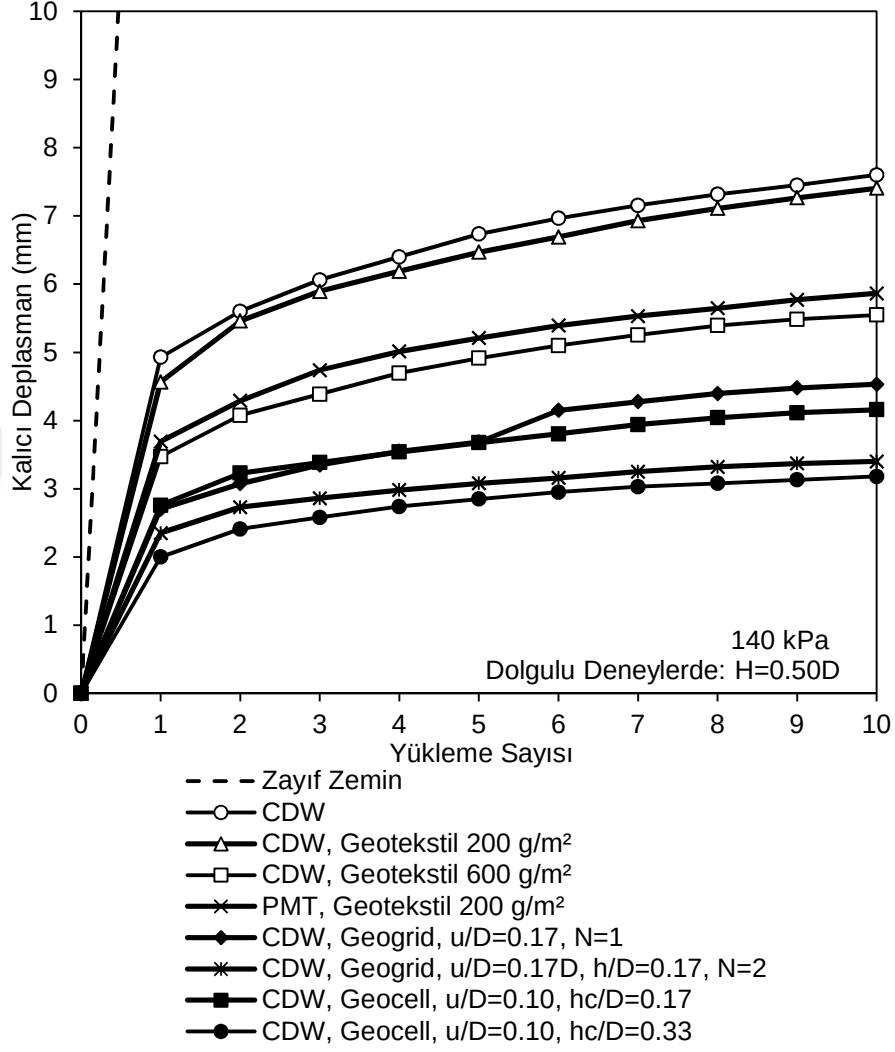


Şekil 4.108. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Yüzey Deplasman Değişimine Etkisi (560 kPa)

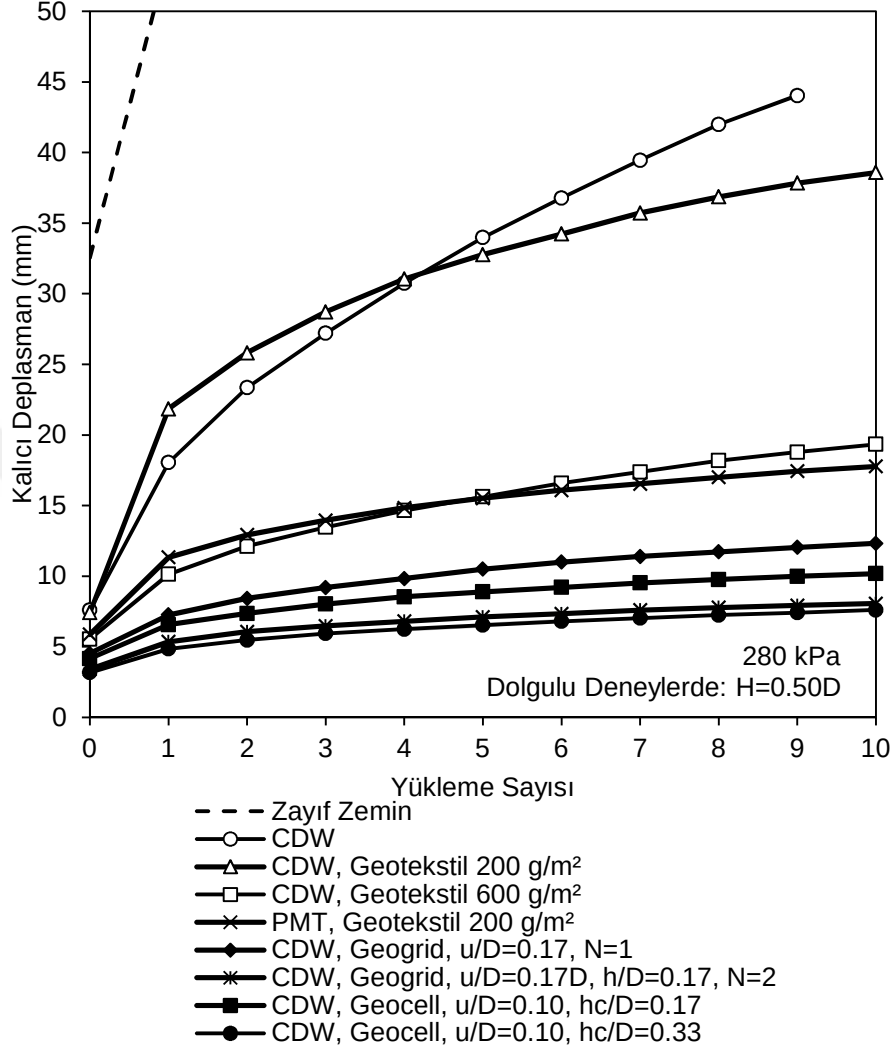
Tekrarlı yük sayısına karşılık oluşan toplam yüzey deplasmanları incelendiğinde, bütün basınç kademeleri için inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu geogrid (tek ve çift) veya geocell (farklı kalınlıkta) ile güçlendirildiğinde doğal agrega (PMT) dolgulu duruma göre daha az deplasman değerlerine sahip olabilmektedir. İnşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgu geotekstil (600 g/m²) ile güçlendirildiğinde ise, ilk basınç kademesinde (140 kPa) doğal agrega (PMT) dolguya göre daha az deplasman yapmış, sonraki basınç kademesinde (280 kPa) ise tekrarlı yüklemeye sayısı arttıkça doğal agrega dolguya göre daha çok deplasman yapmıştır. Geogrid ve geocell güçlendirmeli durumlar ise ilk basınç kademesinde (140 kPa) birbirine yakın deplasman değerlerine sahipken, sonraki basınç

kademelerinde çift sıra geogrid ve yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durumlarda tek sıra geogrid ve yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirmeli durumlara göre daha az deplasman değerlerine sahip olmuşlardır. Genel olarak dört basınç kademesinde en düşük deplasman değerleri birbirine oldukça yakın değerler alan çift sıra geogrid ve yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durumlarda elde edilmiştir.

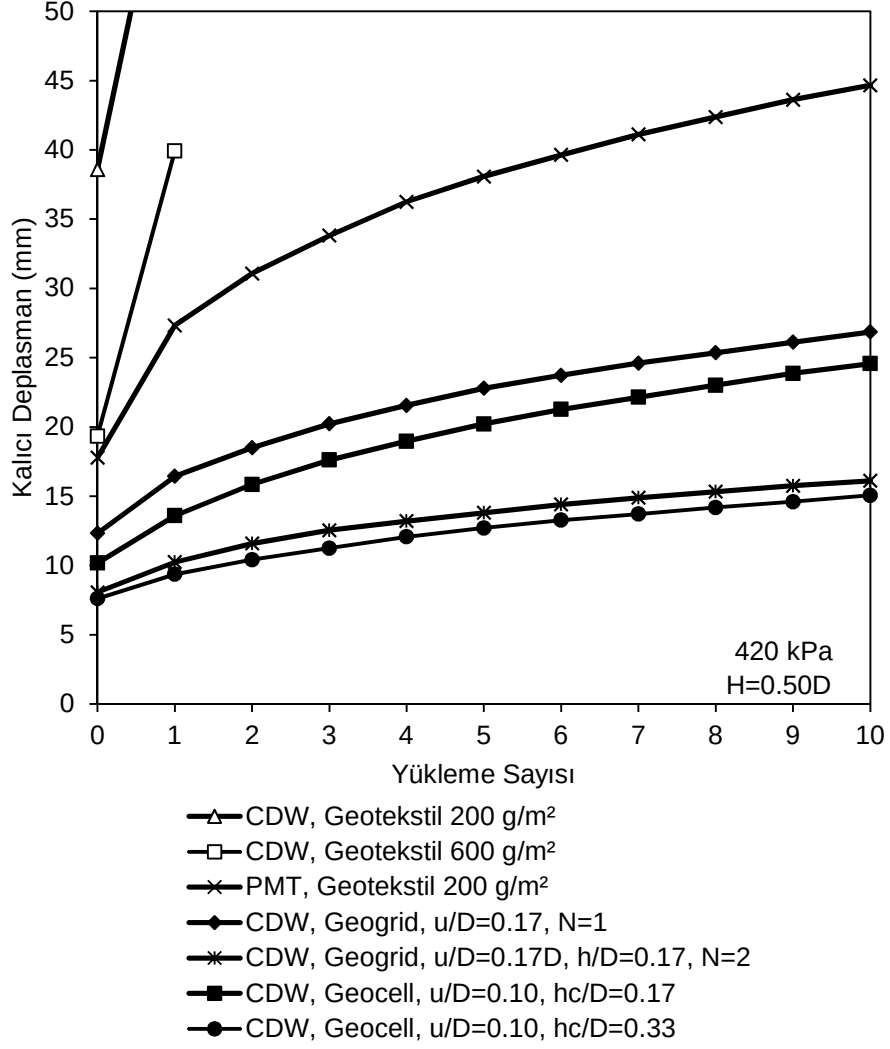
Tekrarlı yüklemeli deneyler sonucunda, tekrarlı yükleme sayısına karşılık kalıcı deplasman değişimi 140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa basınç kademeleri için sırası ile Şekil 4.109, Şekil 4.110, Şekil 4.111 ve Şekil 4.112’de sunulmuştur.



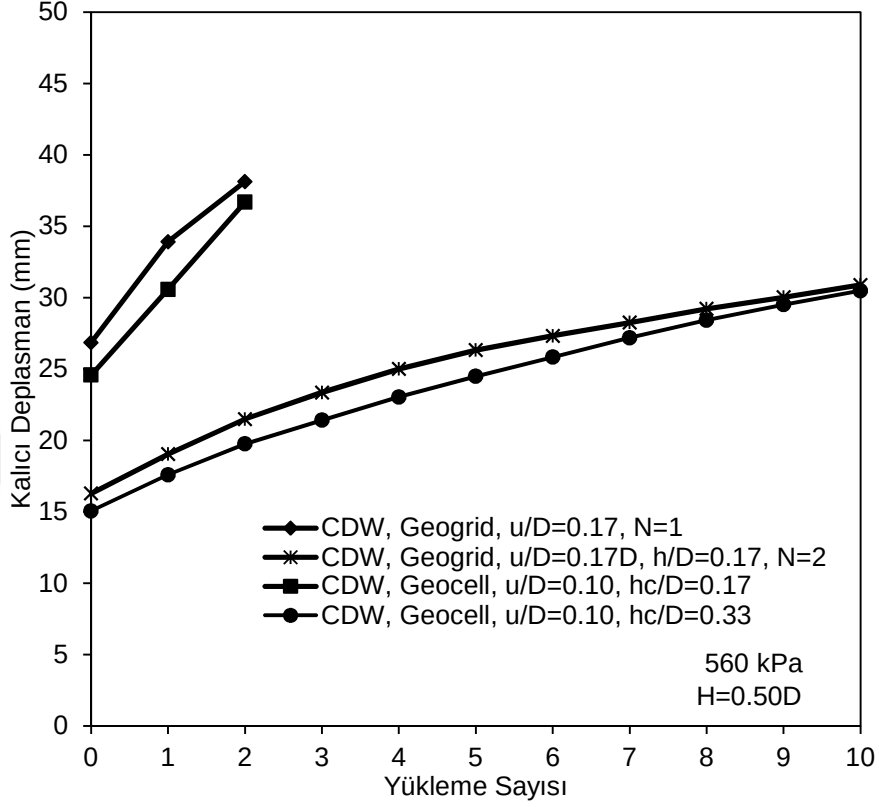
Şekil 4.109. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine Etkisi (140 kPa)



Şekil 4.110. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine Etkisi (280 kPa)



Şekil 4.111. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine Etkisi (420 kPa)

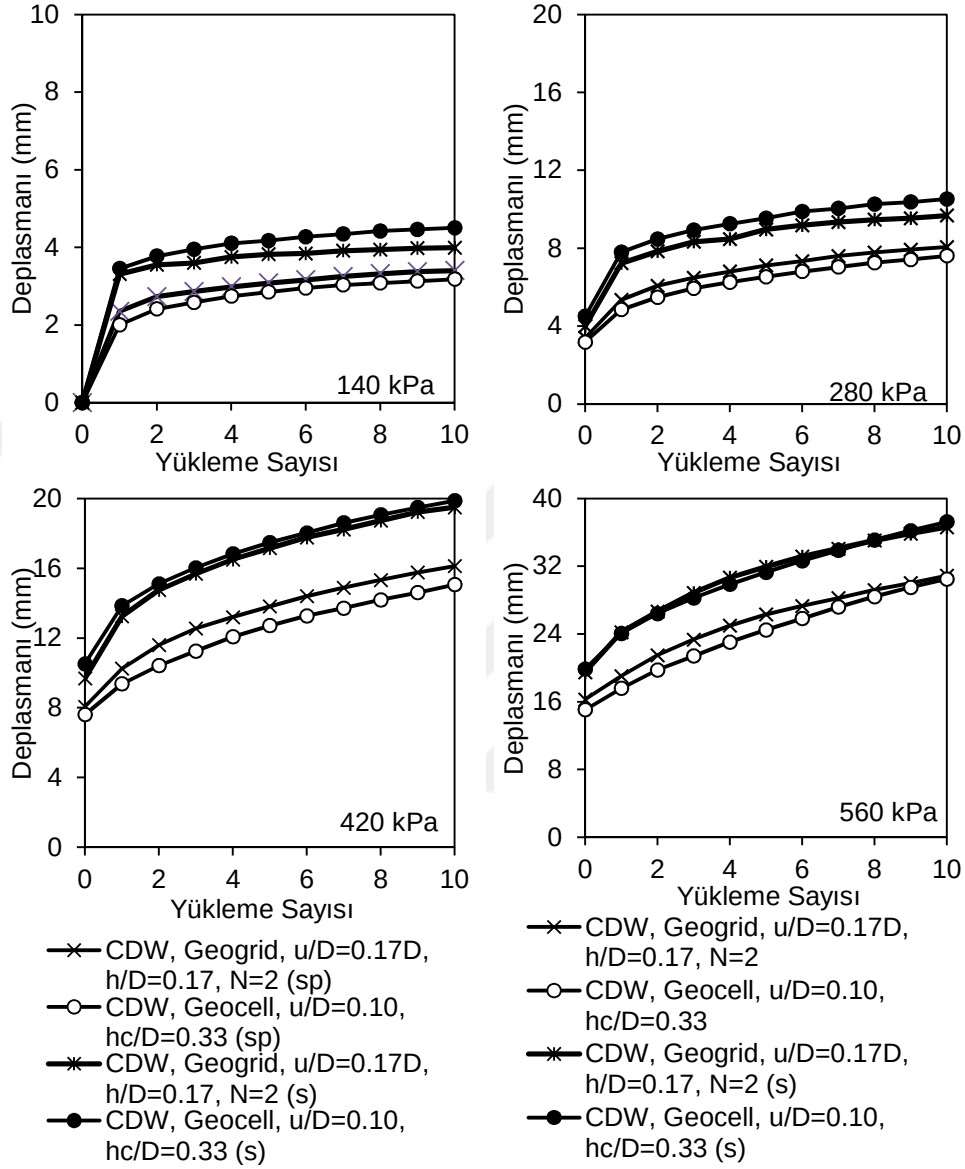


Şekil 4.112. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Kalıcı Deplasman Değişimine Etkisi (560 kPa)

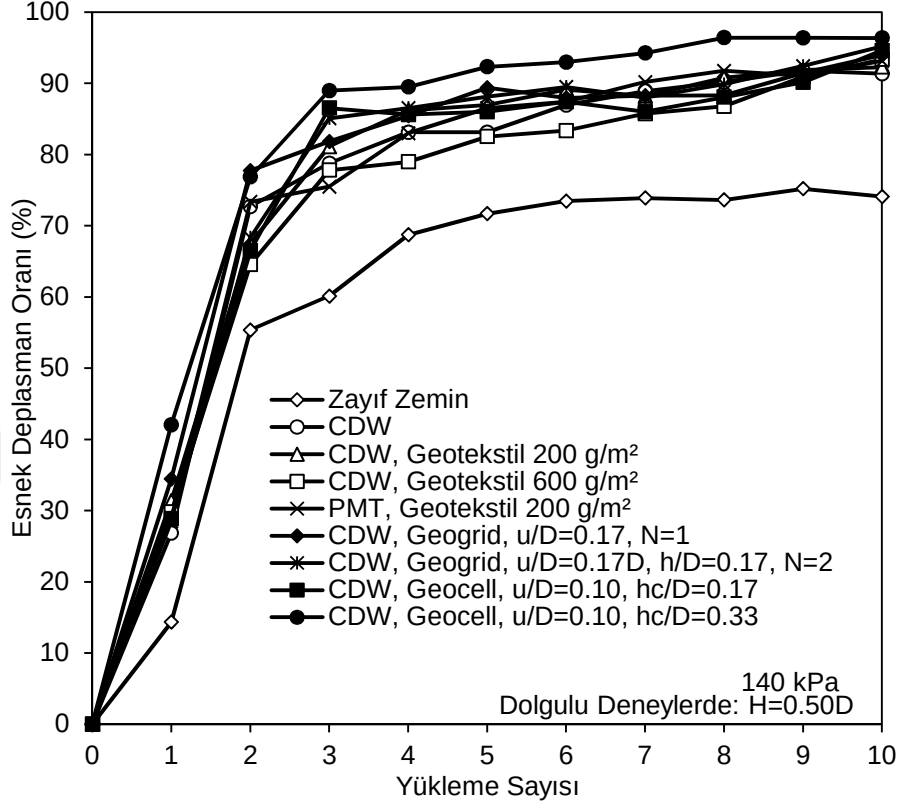
Tekrarlı yük sayısına karşılık oluşan toplam kalıcı deplasmanları incelendiğinde, yüzey deplasmanı değerlerinde elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ancak farklı olarak en az deplasman değerleri yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durumda elde edilmiş, çift sıra geogrid güçlendirmeli durumda ise yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durumdan az bir miktar daha fazla deplasman değerleri elde edilmiştir. Yüzey deplasmanı değerleri incelendiğinde bu iki durumdaki deplasman değerleri birbirlerine oldukça yakın seyretmekte iken, kalıcı deplasman değerlerinde yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durumda en düşük deplasman değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.113'te bu iki durum farklı gerilme düzeylerinde

gösterilmiştir. Bu duruma özellikle yüksekliği fazla olan geocell güçlendirmeli durumun geogrid güçlendirmeli duruma göre daha esnek davranması yol açtığı düşünülmektedir. Benzer bir durum tek sıra geogrid güçlendirmeli durum ile yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirmeli durumun arasında söz konusu olmadığı görülmüştür.

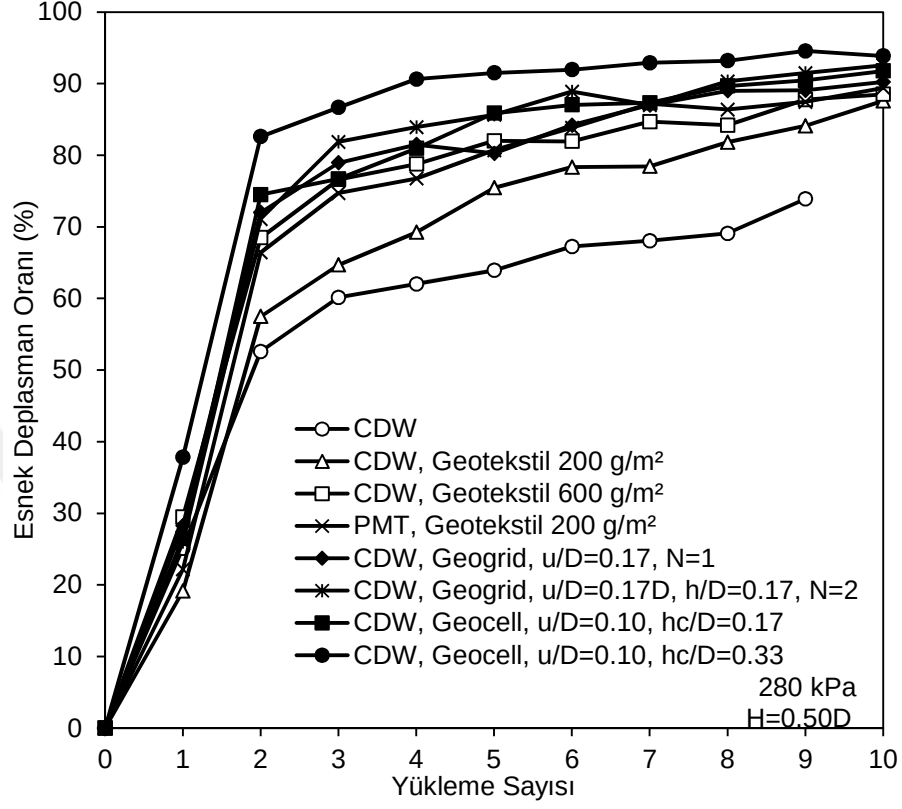
Ayrıca yükleme sayısına karşılık esnek deplasman oranı değişimi 140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa basınç kademeleri için sırası ile Şekil 4.114, Şekil 4.115, Şekil 4.116 ve Şekil 4.117’de gösterilmiştir. İlk yük kademesinde (140 kPa) yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durumun esnek deplasman oranları biraz daha yüksek çıkarken diğer güçlendirmeli durumlar birbirlerine yakın esnek deplasman oranı değerlerine sahip olmuşlardır. Yük kademesi arttıkça yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durum ve çift sıra geogrid güçlendirmeli durum diğer güçlendirmeli durumlardan bir miktar daha yüksek esnek deplasman oranlarına sahip olmuşlardır. Genel olarak bütün güçlendirmeli durumlar doğal agrega dolgunun esnek deplasman oranlarına yakın yada daha fazla esnek deplasman oranı değeri almışlardır. Bütün basınç kademelerinde en yüksek esnek deplasman oranları ise yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durum da elde edilmiştir. Bu durumun esnek deplasman oranlarının daha fazla olması çift sıra geogrid güçlendirmeli duruma göre daha az kalıcı deplasman değerlerine sahip olmasına yol açmıştır. Her yük kademesinin onuncu yüklemeindeki esnek deplasman oranları baz alınarak tekrarlı yüklemeli deneylerin esnek deplasman oranı yük kademesi değişimi grafiği Şekil 4.118’de sunulmuştur. Bu grafikte de yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durum başta olmak üzere onunla birlikte çift sıra güçlendirmeli durumun diğer güçlendirmeli durumlara göre daha esnek davranışa sahip olduğu görülmüştür.



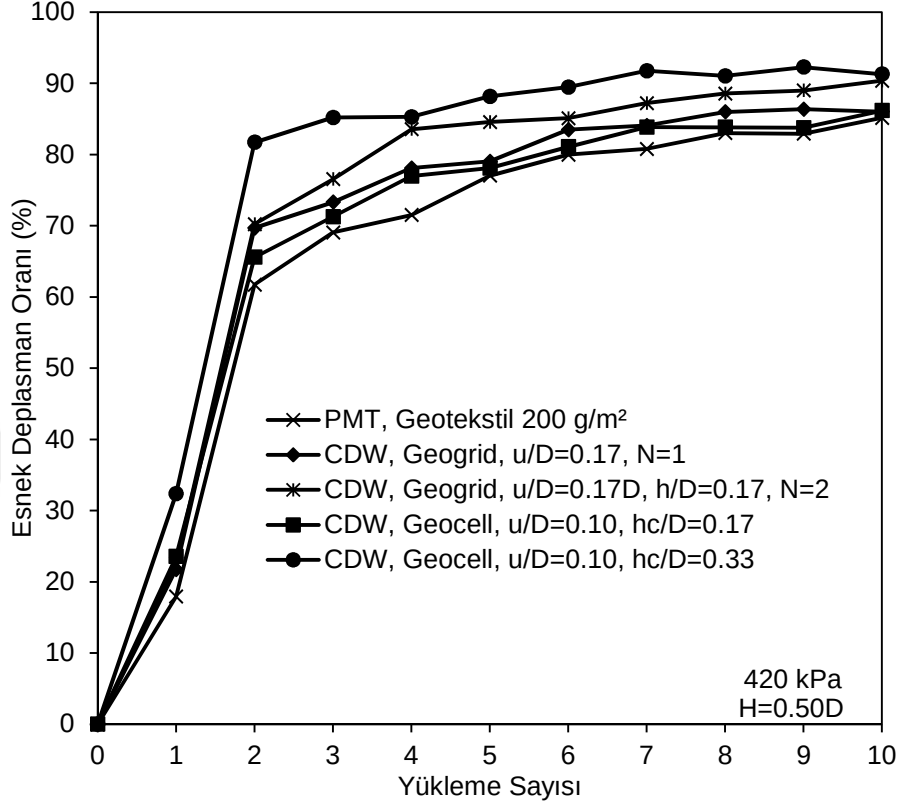
Şekil 4.113. Geocell ve Geogrid Yüklemeye Sayısı Deplasman Değişimi Kıyaslaması



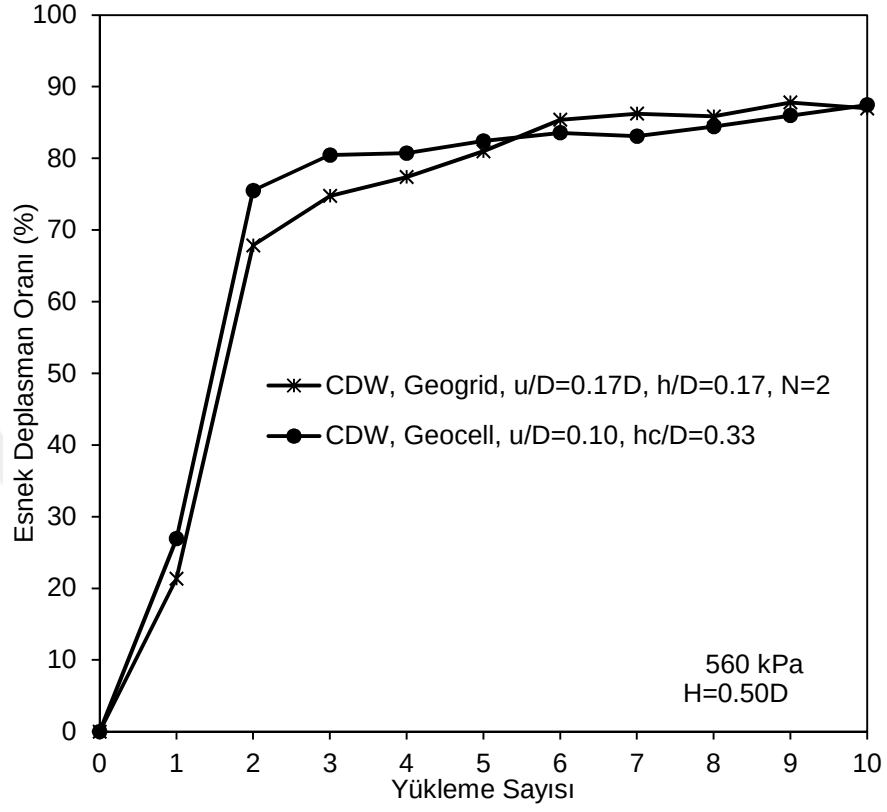
Şekil 4.114. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (140 kPa)



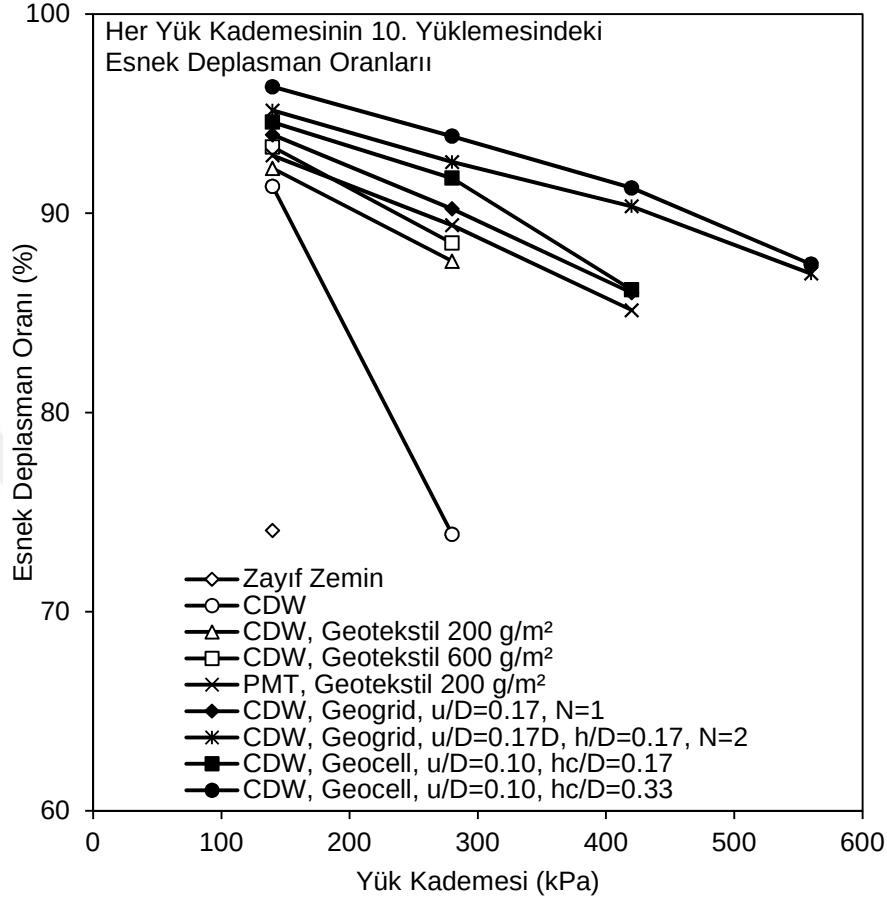
Şekil 4.115. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (280 kPa)



Şekil 4.116. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (420 kPa)



Şekil 4.117. Geosentetiklerin Yüklemeye Sayısı Esnek Deplasman Oranı Değişimine Etkisi (560 kPa)



Şekil 4.118. Geosentetiklerin Esnek Deplasman Oranı Yük Kademesi Değişimine Etkisi

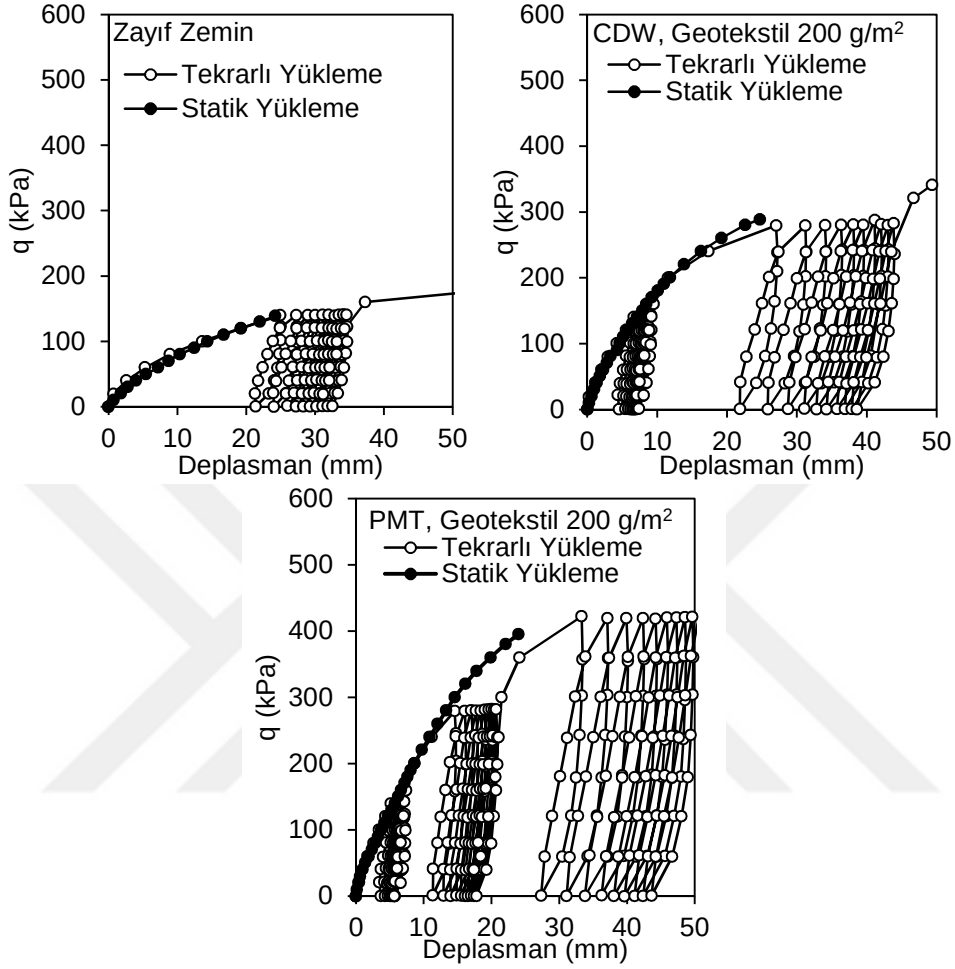
Genel olarak bütün yük kademelerinde yüzey deplasmanı, kalıcı deplasman ve esnek deplasman oranı bakımından inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) dolgulu durum, doğal agreg (PMT) dolgulu durumda daha düşük performans göstermiştir. Ancak inşaat ve yıkıntı atığı dolguya hafif bir geosentetik güçlendirme yapıldığında (tek veya çift sıra geogrid ya da yüksekliği 0.17-0.33D kadar bir geocell), doğal agreg dolgunun performansını yakalamak hatta geçmek mümkün olmaktadır. İnşaat ve yıkıntı atığı dolgu ara yüzeye yerleştirilen geotekstil (600 g/m²) ile güçlendirildiği durumda ise, düşük basınçlarda (140 kPa) doğal agreg

dolgunun performansını yakalamakta fakat artan basınç kademelerinde doğal agrega dolgunun performansı geotekstil (600 g/m²) güçlendirmeli durumu geçmektedir.

4.4. Statik ve Tekrarlı Yükleme Model Deneylerin Karşılaştırılması

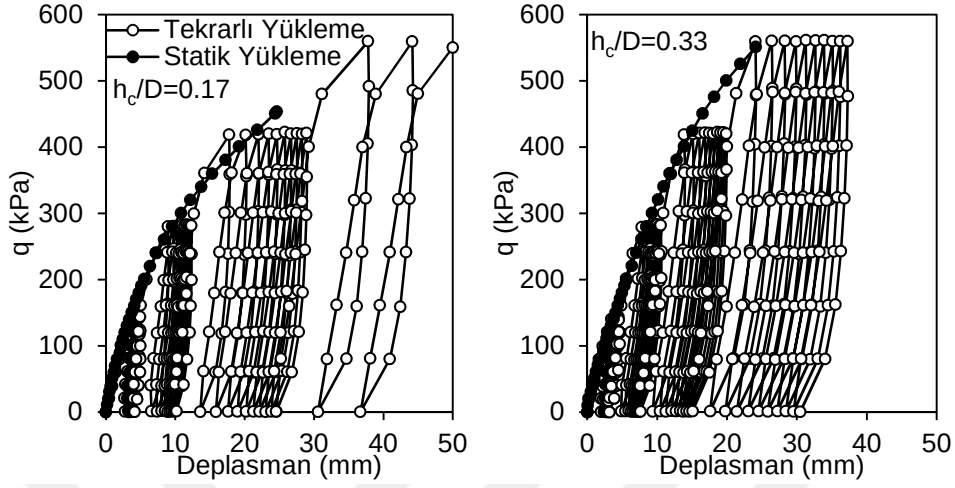
Bu bölümde öncelikle tekrarlı yükleme yapılan dokuz deney sonucunda elde edilen gerilme ve deplasman (yüzey deplasmanı) davranışları aynı şartlarda statik yükleme yapılan deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Burada statik yükleme deneyinde sonucunda elde edilen gerilme deplasman grafiği tekrarlı yükleme deney sonucunda elde edilen gerilme deplasman (yüzey deplasmanı) eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra statik yükleme deneylerden elde edilen gerilme deplasman sonuçlarının, tekrarlı yükleme deneylerdeki farklı basınç kademelerine göre oluşacak deplasman değerleri ile ilişkisine değinilmiştir. Burada ise tekrarlı yükleme deneydeki bir basınç kademesinde ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yüklemede oluşan deplasman değerlerinin, uygulanan basınç değeri ile ilişkisi incelenmiş ve bu ilişki statik yükleme deneydeki temel çapının %5, %10 ve %15'i deplasmanlara karşılık oluşan basınç değerlerine göre yorumlanmıştır.

İnşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum ile doğal agrega dolgulu durum için tekrarlı ve statik yükleme deneylerde elde edilen gerilme deplasman değişimi Şekil 4.119'da gösterilmiştir.



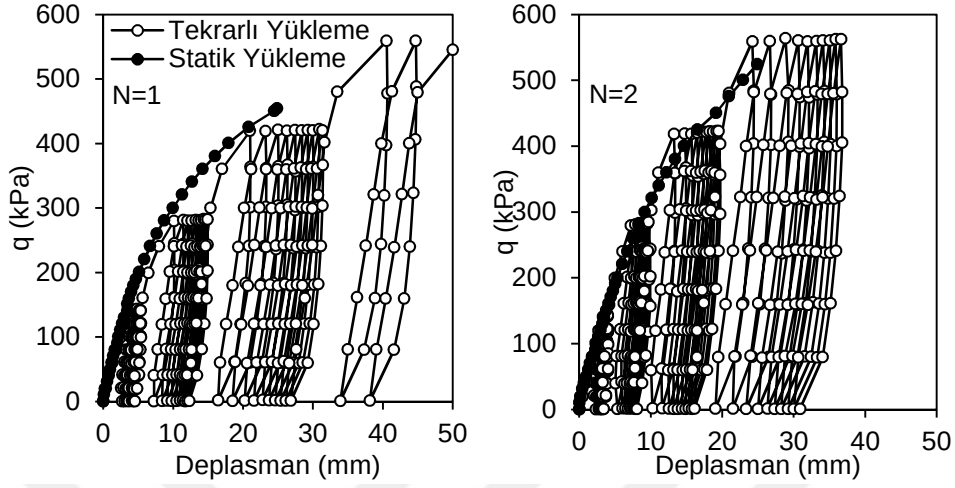
Şekil 4.119. Zayıf Zemin ve Dolgulu Zeminde Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

Geocell güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için tekrarlı ve statik yüklemeli deneylerde elde edilen gerilme deplasman değişimi Şekil 4.120’de gösterilmiştir. Kıyaslanan deneylerde inşaat ve yıkıntı atığı dolgu kalınlığı ($H/D=0.50$) ile geocell donatı gömülme derinliği ($u/D=0.10$) sabit olup, sadece geocell donatı yüksekliği (h_c/D) değişmektedir.



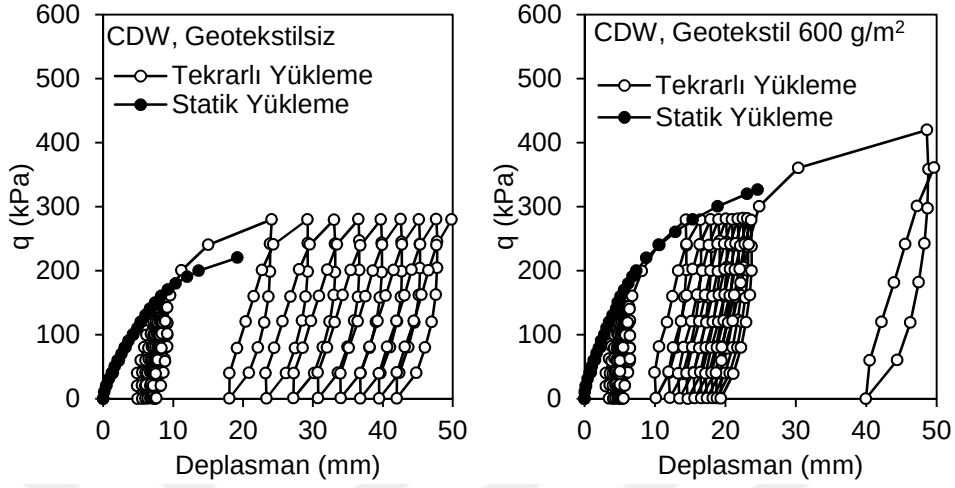
Şekil 4.120. Geocell Güçlendirmeli Durumda Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

Geogrid güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için tekrarlı ve statik yüklemeli deneylerde elde edilen gerilme deplasman değişimi Şekil 4.121’de gösterilmiştir. Kıyaslanan deneylerde inşaat ve yıkıntı atığı dolgu kalınlığı ($H/D=0.50$) ile tek ve çift sıra geogrid donatılı durumun her ikisinde de ilk geogrid donatının gömülme derinliği ($u/D=0.17$) sabit olup, çift sıra geogrid donatılı durumda ($N=2$) donatılar arası mesafe $h/D=0.17$ ’dir.



Şekil 4.121. Geogrid Güçlendirmeli Durumda Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

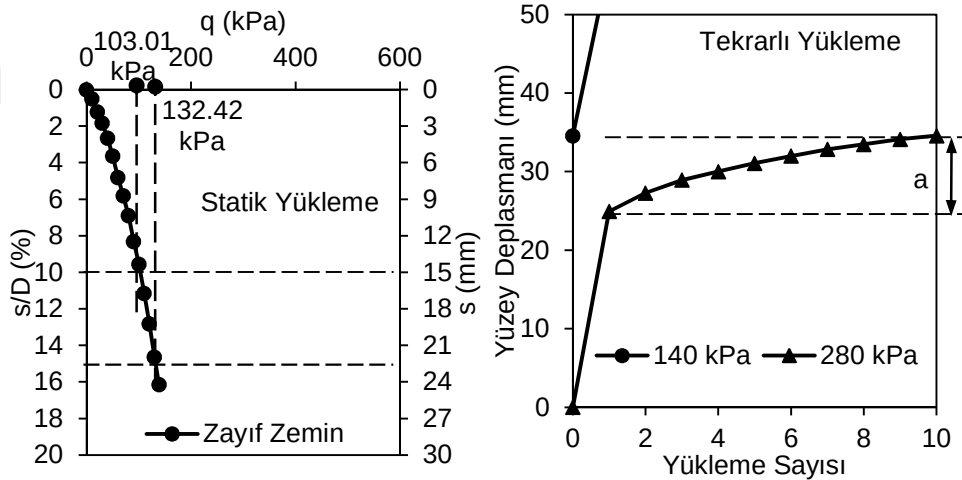
Zayıf zemin ile inşaat ve yıkıntı atığı dolgu ara yüzeyine güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) yerleştirildiği durum ve ara yüzey geoteksilsiz durumda tekrarlı ve statik yüklemeli deneylerde elde edilen gerilme deplasman değişimi Şekil 4.122’de gösterilmiştir. Kıyaslanan deneylerde inşaat ve yıkıntı atığı dolgu kalınlığı ($H/D=0.50$) sabittir.



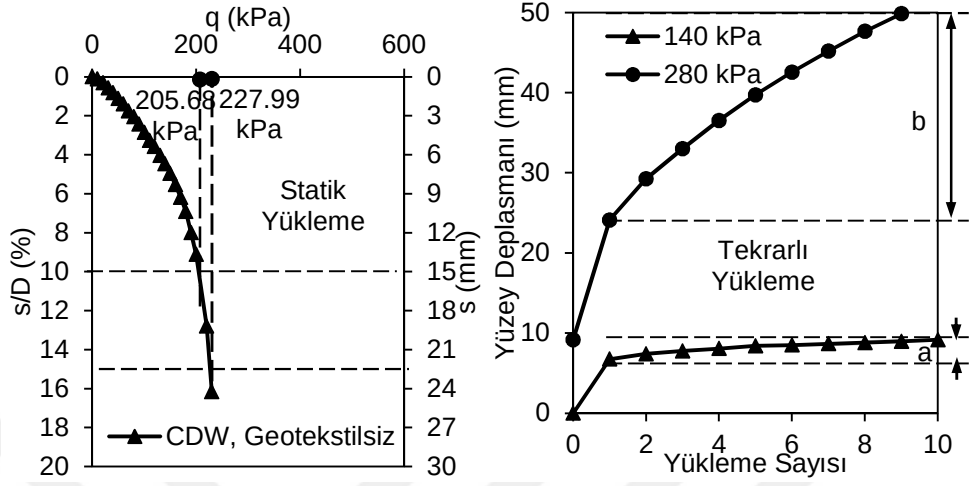
Şekil 4.122. Geotekstil Güçlendirmeli Durumda Statik ile Tekrarlı Yükleme Gerilme Deplasman Değişimi

Statik ve tekrarlı yüklemeli deneylerden gerilme düzeyi ve buna karşılık deplasman değerleri, statik yüklemeli deneyden elde edilen gerilme deplasman eğrisi ve tekrarlı yüklemeli deneyden elde edilen farklı gerilme düzeylerindeki yükleme sayısı deplasman (yüzey deplasmanı) eğrisi birlikte verilerek karşılaştırılmıştır. Grafikler, statik yüklemeli deney sonucunda gerilme deplasman eğrisi temel çapının %10'u ve %15'i deplasmana karşılık basınç değerini gösteriri şekilde, tekrarlı yükleme deney sonucunda tekrarlı yükleme deplasman eğrisi bir basınç kademesinde ilk yüklemekten sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı artışını gösterir şekilde (a, b, c, d) işaretlenerek sunulmuştur. Zayıf zemin için karşılaştırma grafiği Şekil 4.123'te verilmiştir. Ara yüzeyi geotekstilsiz inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum, ara yüzeye ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) yerleştirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum ile doğal agrega dolgulu durum için ise grafikler sırası ile Şekil 4.124, Şekil 4.125 ve Şekil 4.126'da gösterilmiştir. Ara yüzeye güçlendirme amaçlı geotekstil (600 g/m^2) yerleştirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için grafik Şekil 4.127'de sunulmuştur. Geocell (yüksekliği $h_c/D=0.17$ ve $h_c/D=0.17$ olan) veya geogrid (tek ve çift sıra) ile güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu

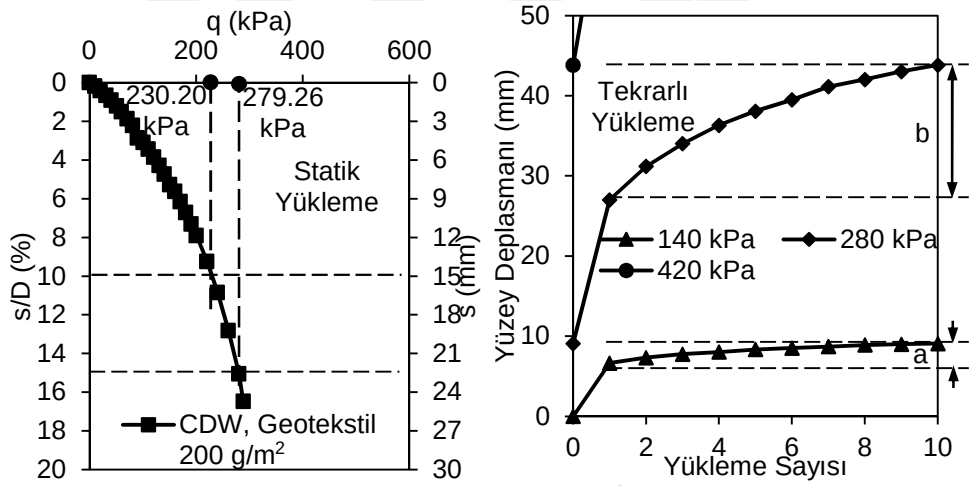
durumlar için grafikler sırası ile Şekil 4.128, Şekil 4.129, Şekil 4.130 ve Şekil 4.131’de verilmiştir. Ayrıca statik yüklemeli deney sonucunda gerilme deplasman eğrisi temel çapının %5’i, %10’u ve %15’i deplasmana karşılık basınç değeri, tekrarlı yükleme deney sonucunda bir basınç kademesinde ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı artışı değerleri (a, b, c, d değerleri) Çizelge 4.14’te topluca sunulmuştur.



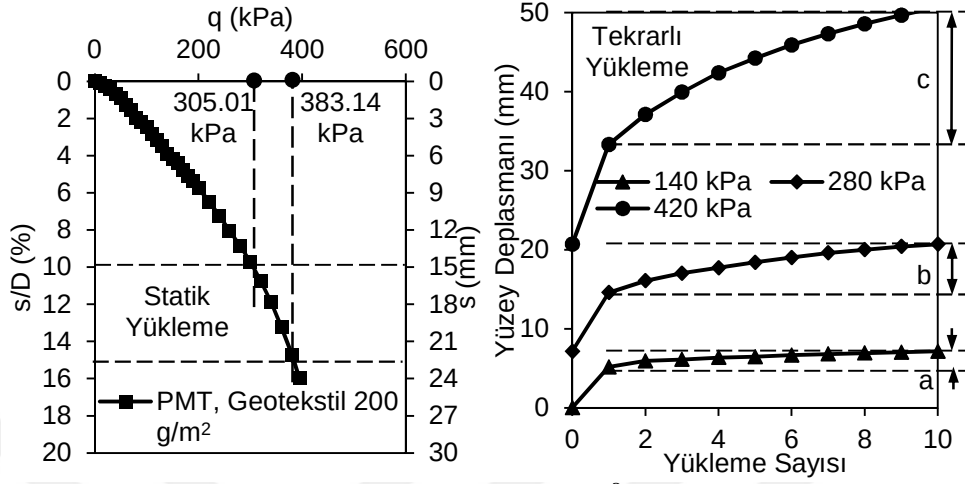
Şekil 4.123. Zayıf Zemin Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



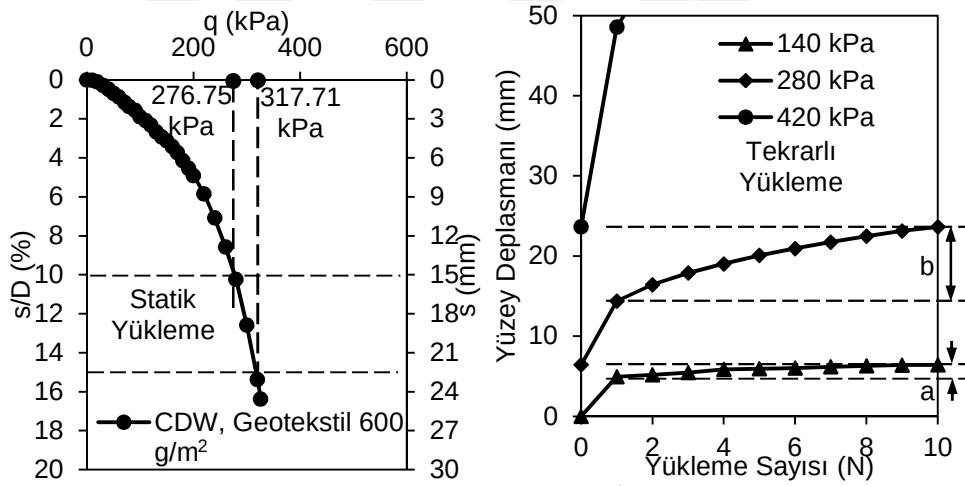
Şekil 4.124. CDW Dolgulu (Geotekstilsiz) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



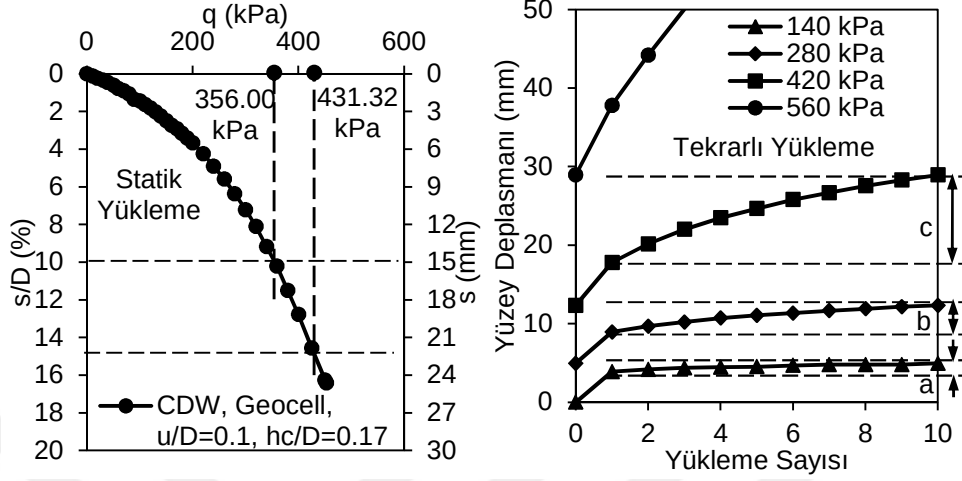
Şekil 4.125. CDW Dolgulu (Geotekstil 200 g/m²) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



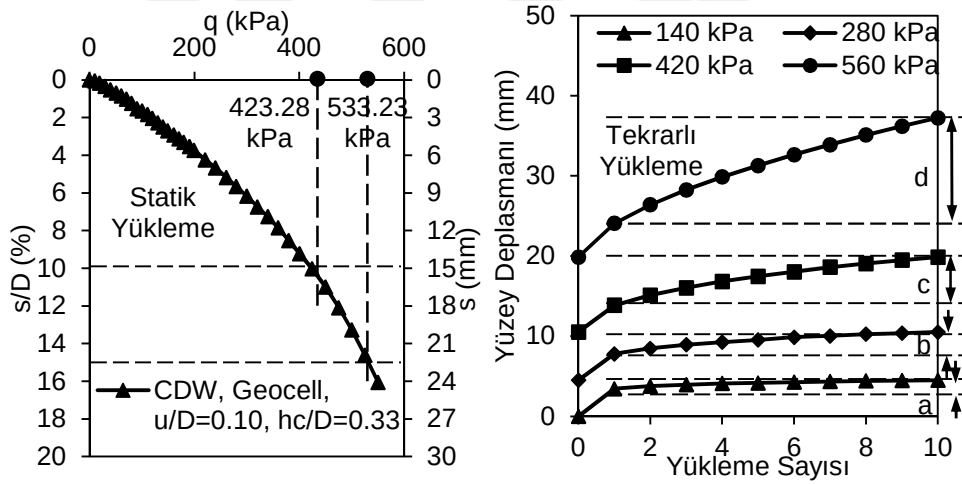
Şekil 4.126. PMT Dolgulu (Geotekstil 200 g/m²) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



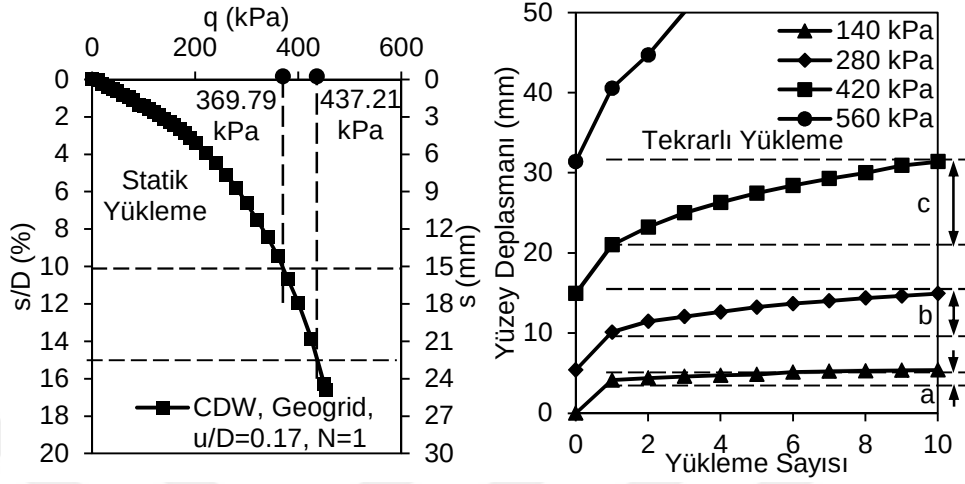
Şekil 4.127. CDW Dolgulu (Geotekstil 600 g/m²) Durum Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



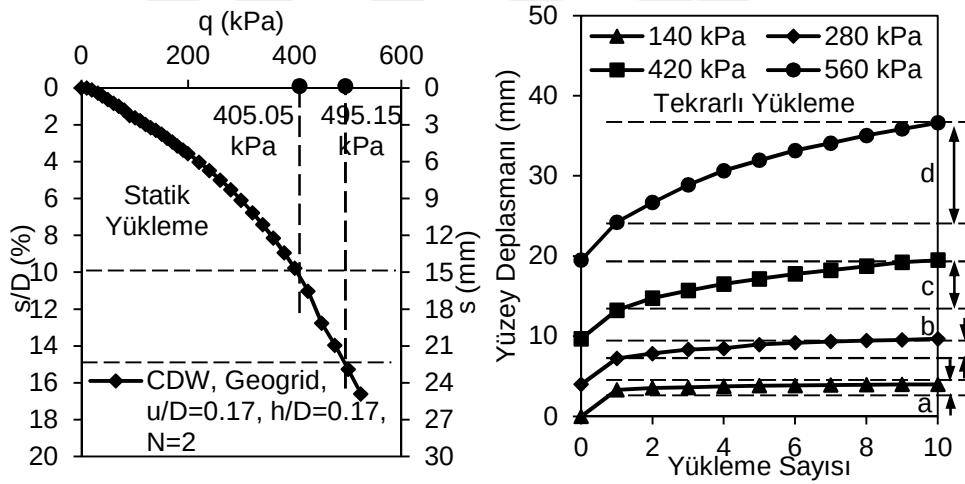
Şekil 4.128. Geocell $h_c/D=0.17$ 'li Durumu Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



Şekil 4.129. Geocell $h_c/D=0.33$ 'lü Durumu Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



Şekil 4.130. Tek Sıra Geogrid'li Durumu Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması



Şekil 4.131. Çift Sıra Geogrid'li Durumu Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması

Çizelge 4.14. Statik ile Tekrarlı Yükleme Deplasman Davranışı Karşılaştırması

Deneyler	Statik Yükleme			Tekrarlı Yükleme			
	Temel Çapının %5, %10 ve %15'i Deplasmana (s/D) Karşılık Basınç Değerleri (kPa)			Basınç Kademesindeki İlk Yüklemeden Sonraki Dokuz Tekrarlı Yüklemede Oluşan Yüzey Deplasmanı (mm)			
	%5	%10	%15	140 kPa	280 kPa	420 kPa	560 kPa
	kPa	kPa	kPa	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)
Zayıf Zemin	62.13	103.01	132.42	9.65			
CDW, Geotekstilsiz	148.09	205.68	227.99	2.43	25.90		
CDW, Geotekstil 200 (g/m ²)	145.60	230.20	279.26	2.42	16.81		
PMT, Geotekstil 200 (g/m ²)	180.90	305.01	383.14	1.99	6.12	16.7	
CDW, Geotekstil 600 (g/m ²)	202.50	276.75	317.71	1.49	9.27		
CDW, Geocell, h _c /D=0.17	243.39	356.00	431.32	1.07	3.37	11.15	
CDW, Geocell, h _c /D=0.33	262.57	423.28	533.23	1.05	2.72	6.02	13.16
CDW, Geogrid, N=1	257.34	369.79	437.21	1.26	4.81	10.04	
CDW, Geogrid, N=2	260.31	405.05	495.15	0.68	2.45	6.25	12.41

Geotekstil (600 g/m²) ile güçlendirilmiş durumlarda, tekrarlı yüklemedeki basınç değeri statik yüklemedeki temel çapının %5'i deplasmana karşılık basınç değeri değerinden az olduğunda 1.49 mm gibi az deplasman (ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı) elde edilmiştir. Ancak bu deneylerde tekrarlı yüklemedeki basınç yaklaşık temel çapının %10'u deplasmana karşılık basınç olduğunda deplasman 9.27 mm, temel çapının %15'inden fazla deplasmana karşılık basınç olduğunda ise deplasman dokuz yüklemeyi tamamlamadan iki yüklemede yaklaşık 25 mm'ye ulaşmıştır.

Yüksekliği h_c/D=0.17 olan geocell ile güçlendirilmiş ve tek sıra geogrid ile güçlendirilmiş durumlarda, tekrarlı yüklemedeki basınç değeri statik yüklemedeki temel çapının %5'i deplasmana karşılık basınç değeri değerinden az olduğunda

1.07 mm ile 1.26 mm gibi az deplasman (ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı) elde edilmiştir. Ancak bu deneylerde tekrarlı yüklemedeki basınç yaklaşık temel çapının %15'i deplasmana karşılık basınç olduğunda deplasmanlar 11.15 mm ile 10.40 mm, temel çapının %15'inden fazla deplasmana karşılık basınç olduğunda ise deplasmanlar dokuz yüklemeyi tamamlamadan üç yüklemede yaklaşık 20 mm'ye ulaşmıştır.

Yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirilmiş ve çift sıra geogrid ile güçlendirilmiş durumlarda, tekrarlı yüklemedeki basınç değeri statik yüklemedeki temel çapının %5'i deplasmana karşılık basınç değeri değerinden az olduğunda 1.05 mm ile 0.68 mm gibi az deplasman (ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı) elde edilmiştir. Ancak bu deneylerde tekrarlı yüklemedeki basınç yaklaşık temel çapının %10'u deplasmana karşılık basınç olduğunda deplasmanlar 6.02 mm ile 6.25 mm, temel çapının %15'inden fazla deplasmana karşılık basınç olduğunda ise deplasmanlar 13.16 ile 12.41 gibi yüksek değerler aldığı görülmüştür.

Statik ve tekrarlı yüklemeli deneyler incelendiğinde, tekrarlı yüklemedeki basınç değeri, statik yüklemedeki temel çapının %5'i deplasmana karşılık basınç değerinden az olduğunda, ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı değerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Tekrarlı yüklemedeki basınç değeri yaklaşık olarak statik yüklemedeki temel çapının %10'u deplasmana karşılık basınç değeri olduğunda, ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı değeri, temel çapının %5'i deplasmana karşılık basınç değerine göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tekrarlı yüklemedeki basınç değeri, statik yüklemedeki temel çapının %15'i deplasmana karşılık basınç değerinden fazla olduğunda, ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme sonucunda oluşan yüzey deplasmanı değerinin aşırı fazla olduğu görülmüştür.

4.5. İstatistiksel Analiz

Bu bölümde statik ve tekrarlı deney sonuçları üzerinde öncelikle çoklu doğrusal (linear) regresyon analizi (MLR) ve çoklu doğrusal olmayan (nonlinear) regresyon analizi (MNLR) olmak üzere regresyon analizleri yapılmıştır. Daha sonra ise regresyon ve kümeleme için kullanılan uç düğümlerinde doğrusal regresyon fonksiyonlarına sahip bir tip ikili karar ağacı modeli olan M5T metot ile analizler yapılmıştır.

4.5.1. Regresyon Analizleri

Mühendislik problemlerinde, bilinmeyen bir değişkenin başka değişkenler ile bulunması ya da tahmin edilmesi, bu değişkene göre tasarım yapacak mühendisleri için çok önemli ve oldukça pratik bir yoldur. Bahsi geçen değişkenler arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için öncelikle regresyon ve korelasyon analiz yöntemleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Eğer değişkenler arasında bir ilişki mevcutsa bu ilişkinin belirlenmesi için matematiksel fonksiyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Değişkenler arasındaki matematiksel fonksiyonlarla ifade edilen ilişki, duruma göre bir doğru (linear) ve ya bir eğri (nonlinear) olabilmektedir. (Kocaman, 2008).

İki değişkenli bir regresyon fonksiyonunda değişkenlerden biri bağımlı (y), diğeri bağımsız (x) değişken olarak tanımlanmaktadır. Bağımsız değişken sayısı bir olan regresyon analizine basit regresyon analizi denirken, birden çok bağımsız değişkene sahip regresyon analizine çoklu regresyon analizi denilmektedir. Matematiksel açıdan regresyon analizlerinde doğrusal bir ilişki kullanılması daha kolaydır ve tercih edilen bir yöntemdir. Basit regresyon analizinde, iki değişken arasındaki ilişki $y=ax+b$ şeklinde belirtilmektedir. Buradaki “a” ve “b” değerleri regresyon katsayıları olarak isimlendirilir. En küçük kareler yöntemi vasıtası ile değişkenler (x ve y) arasındaki en iyi ilişki tespit edilmektedir. Bu yöntemle göre, çizilen eğriden serpilme diyagramındaki noktalara olan dikey uzaklıkların kareleri toplamı minimum olmalıdır (Sivrikaya, 2004; Kocaman, 2008, Örnek, 2009;

Demir, 2011). Bu yöntemde a ve b değerleri gözlenen değerler (y_i) ve hesaplanan değerler (y_x) farklarının karelerinin toplamı minimum olacak şekilde aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} S_{xy} &= \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \\ SS_x &= \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \\ SS_y &= \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$b = \frac{S_{xy}}{SS_x} \quad a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (4.4)$$

Regresyon analizinde değişkenler arasındaki ilişkinin yönü, derecesi ve istatistiksel anlamlılığı, korelasyon analizi yapılarak tespit edilirken bu korelasyonun derecesine korelasyon katsayısı (r) denilmektedir. Değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olması halinde en çok kullanılan ölçü Pearson korelasyon (r_p) katsayısıdır. Normal dağılmış X ve Y değişkenleri için n elemanlı ($X_i Y_i$) çiftlerinden oluşan bir örnekten korelasyon katsayısı aşağıdaki denklemle belirlenmektedir (Kocaman, 2008; Demir, 2011).

$$r_p = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{SS_x SS_y} \quad (4.5)$$

Birçok çalışmada $0.9 < r_p < 1$ durumunda, değişkenler arasında “güçlü ilişki” bulunduğu, $0.5 < r_p < 0.9$ ise, “orta derecede”, $0 < r_p < 0.5$ ise “zayıf bir ilişki”

bulunduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada r_p katsayısı r olarak gösterilmiştir (Kocaman, 2008; Demir, 2011).

Basit doğrusal regresyon analizlerinin yanı sıra, daha çok bilgisayar paket programları yardımı ile yapılan doğrusal olmayan (non-linear) basit regresyon analizleri de mevcuttur. Bu çalışmada deney sonuçları üzerinde gerçekleştirilen regresyon analizlerinde “Minitab 17” programı kullanılmış ve değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren en ideal denklem belirlenmiştir.

4.5.1.1. Çoklu Doğrusal (Linear) Regresyon Analizi (MLR)

Basit doğrusal regresyon analizinden farklı olarak çoklu doğrusal regresyon analizi, tek bağımsız değişken yerine n adet bağımsız değişken ile yapılabilmektedir. Çoklu doğrusal regresyondaki her bir bağımsız değişkene basit doğrusal regresyondaki bağımsız değişken için kullanılan hesap yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemde birden fazla değişkenin olmasından dolayı regresyon doğrusunun iki boyutlu düzlemsel bir grafikte gösterilememektedir (Heperkan ve Kesgin, 2003). Aşağıdaki ifade çoklu doğrusal regresyon analizini belirtmektedir.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_j x_j + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (4.6)$$

Denklemdaki, y_i bağımlı değişken, $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ bağımsız değişkenler, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ bağımsız değişkenlere ait bilinmeyen parametreler, ε_i ise hata terimidir. Ayrıca denklemdaki $i=1,2,\dots,n$ ve n , gözlem sayılarını ifade etmektedir. Bağımsız değişkenlere ait katsayıların ($\beta_1, \dots, \beta_k$) pozitif veya negatif olması, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenlerin arasındaki ilişkiyi belirlemektedir. Eğer bağımsız bir değişkenin katsayısı negatif ise o değişken arttıkça bağımlı değişken azalırken, pozitifse tam tersi olmaktadır (Demir, 2011).

Bu çalışmada, statik ve tekrarlı yüklemeli durumlardaki deneyler için ayrı ayrı çoklu doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır. Statik yüklemeli deneylerde inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu ve doğal agrega dolgulu olmak üzere iki adet güçlendirmesiz ve geocell geogrid ile geotekstil güçlendirmeli olmak üzere üç adet, toplamda beş adet analiz yapılmıştır. Tekrarlı yüklemeli deneylerde ise geocell, geogrid ve geotekstil güçlendirmeli deneyler için üç adet analiz yapılmıştır. Statik ve tekrarlı yüklemeler için bahsi geçen çoklu doğrusal regresyon modelleri aşağıdaki denklemlerde sırası ile ifade edilmiştir.

$$BCR = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{S}{D}\right) + \beta_2\left(\frac{H_{CDW}}{D}\right)$$

$$BCR = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{S}{D}\right) + \beta_2\left(\frac{H_{PMT}}{D}\right)$$

$$BCR = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{S}{D}\right) + \beta_2\left(\frac{H}{D}\right) + \beta_3\left(\frac{u}{D}\right) + \beta_4\left(\frac{h_c}{D}\right) + \beta_5\left(\frac{d}{D}\right)$$

$$BCR = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{S}{D}\right) + \beta_2\left(\frac{u}{D}\right) + \beta_3\left(\frac{h}{D}\right) + \beta_4 N$$

$$BCR = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{S}{D}\right) + \beta_2\left(\frac{H}{D}\right) + \beta_3(g/m^2) \quad (4.7)$$

$$s_p = \beta_0 + \beta_1(q) + \beta_2(N_c) + \beta_3\left(\frac{h_c}{D}\right)$$

$$s_p = \beta_0 + \beta_1(q) + \beta_2(N_c) + \beta_3(N)$$

$$s_p = \beta_0 + \beta_1(q) + \beta_2(N_c) + \beta_3(g/m^2) \quad (4.8)$$

Denklemlerdeki N_c tekrarlı yükleme sayısını göstermekte olup H/D dolgu kalınlığı inşaat ve yıkıntı atığı dolgu ve doğal agrega dolgu için karışmasın diye H_{CDW}/D ve H_{PMT}/D ile ifade edilmiştir.

4.5.1.2. Çoklu Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Regresyon Analizi (MNLR)

Lineer olmayan regresyon analizi de lineer regresyon analizine benzer yaklaşımları kullanmaktadır. Ancak lineer olmayan regresyonda lineer regresyondan farklı olarak bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında lineer olmayan bir ilişki kurulmaktadır. Bu analizlerde en yaygın kullanılan model denklemler üstel ve polinom model denklemler olmak üzere, farklı tip model denklemlerde kullanılabilmektedir. Bu model denklemlerde bir kaç bilinmeyen parametre mevcuttur. Bu parametreler üzerinde ilişki kurulan değişken ve bağımlı parametreler kullanılarak bulunmaktadır. Bu metotta üstel model denklemler kullanılarak bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir (Demir, 2011).

$$y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_n^{\beta_n} \quad (4.9)$$

Denklemdaki y bağımlı değişkeni, $X_1, \dots, X_n$ bağımsız değişkenleri, $\beta_1, \dots, \beta_n$ de bağımsız değişkenlerin model parametrelerini göstermektedir. Çalışma kapsamında yapılan çoklu doğrusal olmayan regresyon analizleri de, çoklu doğrusal regresyon analizleri gibi statik ve tekrarlı yüklemeli durumlardaki deneyler için ayrı ayrı yapılmıştır. Statik yüklemeli deneylerde inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu ve doğal agrega dolgulu olmak üzere iki adet güçlendirmesiz ve geocell ile geotekstil güçlendirmeli olmak üzere iki adet, toplamda dört adet analiz yapılmıştır. Tekrarlı yüklemeli deneylerde ise geocell, geogrid ve geotekstil güçlendirmeli deneyler için üç adet analiz yapılmıştır. Statik ve tekrarlı yüklemeler

için bahsi geçen çoklu doğrusal regresyon modelleri aşağıdaki denklemlerde sırası ile ifade edilmiştir.

$$BCR = \beta_0 \left(\frac{S}{D}\right)^{\beta_1} \left(\frac{H_{CDW}}{D}\right)^{\beta_2}$$

$$BCR = \beta_0 \left(\frac{S}{D}\right)^{\beta_1} \left(\frac{H_{PMT}}{D}\right)^{\beta_2}$$

$$BCR = \beta_0 \left(\frac{S}{D}\right)^{\beta_1} \left(\frac{H}{D}\right)^{\beta_2} \left(\frac{u}{D}\right)^{\beta_3} \left(\frac{h_c}{D}\right)^{\beta_4} \left(\frac{d}{D}\right)^{\beta_5}$$

$$BCR = \beta_0 \left(\frac{S}{D}\right)^{\beta_1} \left(\frac{H}{D}\right)^{\beta_2} (g/m^2)^{\beta_3} \quad (4.10)$$

$$s_p = \beta_0 (q)^{\beta_1} (N_c)^{\beta_2} \left(\frac{h_c}{D}\right)^{\beta_3}$$

$$s_p = \beta_0 (q)^{\beta_1} (N_c)^{\beta_2} (N)^{\beta_3}$$

$$s_p = \beta_0 (q)^{\beta_1} (N_c)^{\beta_2} (g/m^2)^{\beta_3} \quad (4.11)$$

4.5.1.3. Statik Yükllemeli Durumda MNR ve MLNR Analizleri

Statik yükllemeli deneyler sonucunda BCR'nin (Taşıma Kapasitesi Oranı) farklı değişkenlerle ilişkisi çoklu doğrusal regresyon (MLR) analizleri ve çoklu doğrusal olmayan regresyon (MNLR) analizleri ile incelenmiştir. İnşaat ve yıkıntı atığı dolgulu ve doğal agrega dolgulu olmak üzere iki adet güçlendirmesiz durum için 52'şer veri kullanılarak yapılan MLR ve MNLR analizleri sırası ile aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

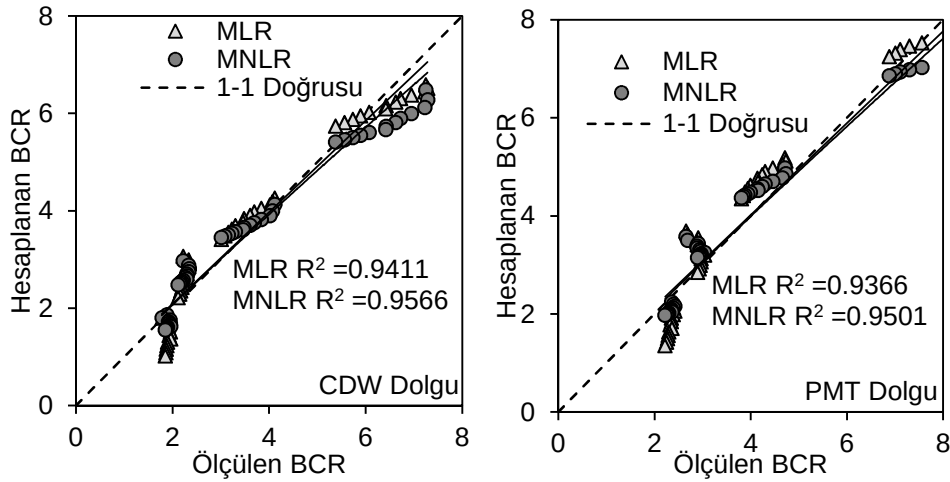
$$BCR = (-0.2440) + (-0.0706)\left(\frac{S}{D}\right)(\%) + 7.0464\left(\frac{H_{CDW}}{D}\right) \quad (4.12)$$

$$BCR = 7.3338 \left(\frac{S}{D}\right)(\%)^{(-0.1118)} \left(\frac{H_{CDW}}{D}\right)^{1.1237} \quad (4.13)$$

$$BCR = (-0.4930) + (-0.0701)\left(\frac{S}{D}\right)(\%) + 8.7980\left(\frac{H_{PMT}}{D}\right) \quad (4.14)$$

$$BCR = 8.5199 \left(\frac{S}{D}\right)(\%)^{(-0.0801)} \left(\frac{H_{PMT}}{D}\right)^{1.1223} \quad (4.15)$$

Ayrıca, CDW dolgulu ve PMT dolgulu güçlendirmesiz durumlar için, deneyler sırasında ölçüm aletlerinin sağladığı veriler kullanılarak elde edilen BCR değerleri ile, MLR ve MNLR analizleri sonunda elde edilen eşitlikler kullanılarak hesap edilen BCR değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.132’de sunulmuştur.



Şekil 4.132. BCR Değerlerinin Karşılaştırılması (CDW ve PMT Dolgulu Durum)

Ortalama mutlak hata, CDW dolgulu durumda MLR ve MNLR analizi için sırası ile 0.38 ve 0.36 çıkarken, PMT dolgulu durumda ise MLR ve MNLR analizi

için sırası ile 0.51 ve 0.47 çıkmıştır. Güçlendirmesiz durumda her iki dolgu tipi içinde MNLR analizinde MLR analizine göre daha yüksek korelasyon katsayısı ve daha düşük ortalama mutlak hata elde edilmiştir.

Geocell (91 veri), geogrid (78 veri) ve geotekstil (78 veri) ile güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durumlar için yapılan MLR analizi sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 1.96 + (-0.04988) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (4.453) \left(\frac{H}{D} \right) + (-1.635) \left(\frac{u}{D} \right) \\ & + (3.240) \left(\frac{h_c}{D} \right) + (-0.9257) \left(\frac{d}{D} \right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 3.839 + (-0.05719) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (0.078) \left(\frac{u}{D} \right) + (1.178) \left(\frac{h}{D} \right) \\ & + (0.1563)N \end{aligned} \quad (4.17)$$

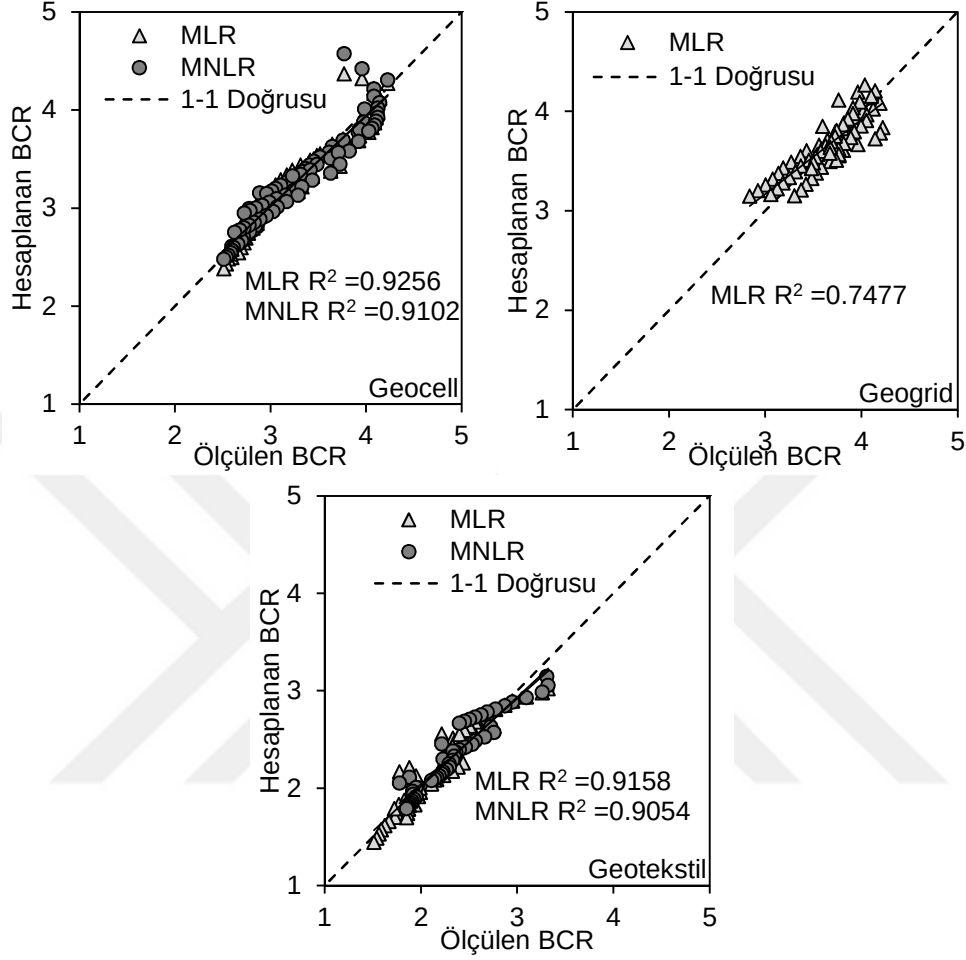
$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 1.4122 + (-0.04276) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (2.040) \left(\frac{H}{D} \right) \\ & + (0.00127)(g/m^2) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Geocell ve geotekstil ile güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durumlar için yapılan MNLR analizi sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda sunulmuştur. Geogrid güçlendirme durumunda MNLR analizi yapılırken kullanılan Ln fonksiyonunun sıfır değerinde tanımsız olması sebebi ile (tek sıra güçlendirmeli durumda, h=0) azalan verilerden dolayı bu durumda MNLR analizi yapılmamıştır.

$$\text{BCR} = 6.8073 \left(\frac{S}{D}\right) (\%)^{(-0.1179)} \left(\frac{H}{D}\right)^{(0.5764)} \left(\frac{u}{D}\right)^{(-0.0978)} \left(\frac{h_c}{D}\right)^{(0.1992)} \left(\frac{d}{D}\right)^{(-0.2656)} \quad (4.19)$$

$$\text{BCR} = 1.0602 \left(\frac{S}{D}\right) (\%)^{(-0.1028)} \left(\frac{H}{D}\right)^{(0.3590)} (g/m^2)^{(0.2267)} \quad (4.20)$$

Geosentetik güçlendirmeli durumlar için, deneyler sırasında ölçüm aletlerinin sağladığı veriler kullanılarak elde edilen BCR değerleri ile, MLR ve MNLR analizleri sonunda elde edilen eşitlikler kullanılarak hesap edilen BCR değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.133’de sunulmuştur.



Şekil 4.133. BCR Değerlerinin Karşılaştırılması (Geosentetik Güçlendirmeli Durum)

Ortalama mutlak hata, geocell güçlendirmeli durumda MLR ve MNLR her iki analizi içinde 0.10 çıkarken, geotekstil güçlendirmeli durumda MLR ve MNLR her iki analizi içinde 0.09 ve geogrid güçlendirmeli durumda MLR analizi için 0.13 çıkmıştır. Geocell ve geotekstil güçlendirmeli durumda MLR ve MNLR analizleri korelasyon katsayıları (MLR, MNLR ye göre az bir miktar daha fazla) ve ortalama mutlak hataları birbirine çok yakındır. Geogrid güçlendirmeli durumdaki MLR analizi sonucunda ise korelasyon katsayısı nispeten daha düşük çıkmıştır.

4.5.1.4. Tekrarlı Yükleme Durumunda MNR ve MLNR Analizleri

Tekrarlı yükleme deneyler sonucunda toplam kalıcı deplasmanın (s_p) farklı değişkenlerle ilişkisi çoklu doğrusal regresyon (MLR) analizleri ve çoklu doğrusal olmayan regresyon (MNLR) analizleri ile incelenmiştir. Geocell (72 veri), geogrid (72 veri) ve geotekstil (61 veri) ile güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durumlar için yapılan MLR analizi sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda sunulmuştur.

$$s_p = (-3.23) + (0.05691)(q)(\text{kPa}) + (0.4790)(N_c) + (-23.15)\left(\frac{h_c}{D}\right) \quad (4.21)$$

$$s_p = (-2.37) + (0.06115)(q)(\text{kPa}) + (0.479)(N_c) + (-4.588)(N) \quad (4.22)$$

$$s_p = (-16.91) + (0.15419)(q)(\text{kPa}) + (1.078)(N_c) + (-0.01764)(g/m^2) \quad (4.23)$$

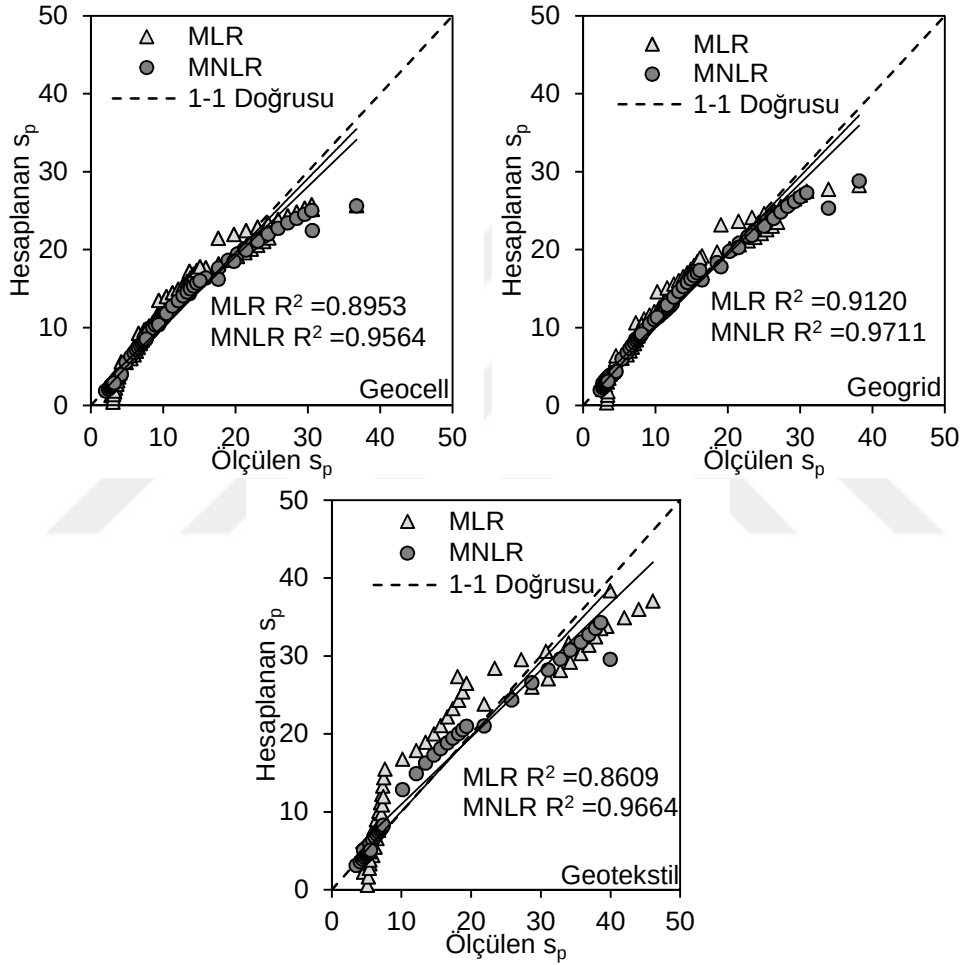
Geocell, geogrid ve geotekstil ile güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durumlar için yapılan MNLR analizi sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda sunulmuştur.

$$s_p = 0.0005 (q)(\text{kPa})^{(1.5557)} (N_c)^{(0.1887)} \left(\frac{h_c}{D}\right)^{(-0.49)} \quad (4.24)$$

$$s_p = 0.001215 (q)(\text{kPa})^{(1.5717)} (N_c)^{(0.1854)} (N)^{(-0.5081)} \quad (4.25)$$

$$s_p = 0.002123 (q)^{(2.0529)} (N_c)^{(0.2128)} (g/m^2)^{(-0.4469)} \quad (4.26)$$

Tekrarlı yüklemeli deneylerde geosentetik güçlendirmeli durumlar için, deneyler sırasında ölçüm aletlerinin sağladığı veriler kullanılarak elde edilen s_p değerleri ile, MLR ve MNLR analizleri sonunda elde edilen eşitlikler kullanılarak hesap edilen s_p değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.134'te sunulmuştur.



Şekil 4.134. s_p Değerlerinin Karşılaştırılması (Geosentetik Güçlendirmeli Durum)

Ortalama mutlak hata, geocell güçlendirmeli durumda MLR ve MNLR analizi için sırası ile 2.34 ve 1.40 çıkarken, geogrid güçlendirmeli durumda MLR ve MNLR analizi için sırası ile 2.29 ve 1.25 ve geotekstil güçlendirmeli durumda

ise MLR ve MNLR analizi için sırası ile 4.32 ve 1.85 çıkmıştır. Tekrarlı yüklemeli deneylerde geosentetik güçlendirmeli durumlarda durumda MNLR analizinde MLR analizine göre daha yüksek kolerasyon katsayısı ve daha düşük ortalama mutlak hata elde edilmiştir.

4.5.2. M5T Metot

Bu model ilk defa Quinlan (1992) tarafından öne sürülen bir çeşit ikili karar ağacıdır. Bu model diğer karar ağaçlarından farklı olarak sayısal verilerle de çalışma fırsatı verebilmektedir. M5 modeli daha çok kümelere ayırma ve regresyon analizi için kullanılmaktadır (Kaya ve ark., 2017). Model uç düğümlerinde lineer regresyon fonksiyonlarından oluşturulmaktadır. Bu yöntemde öncelikle alt kümelere veri ayrılır ve karar ağacı oluşturulur. Bu karar ağacı üstte bir kök düğümü, karar düğümleri ve kök düğümü ile karar düğümleri arasındaki bağıntılardan oluşmaktadır. Veriler, kümelerin standart sapma değerlerine ve her bir düğümdeki değerlerin kontrol edilmesinden sonra standart sapmadaki azalma miktarına göre alt kümelere ayrılırlar (Kişi, 2015). Standart sapmadaki azalma miktarı aşağıdaki denklemle elde edilebilir (Pal ve Deswal, 2009).

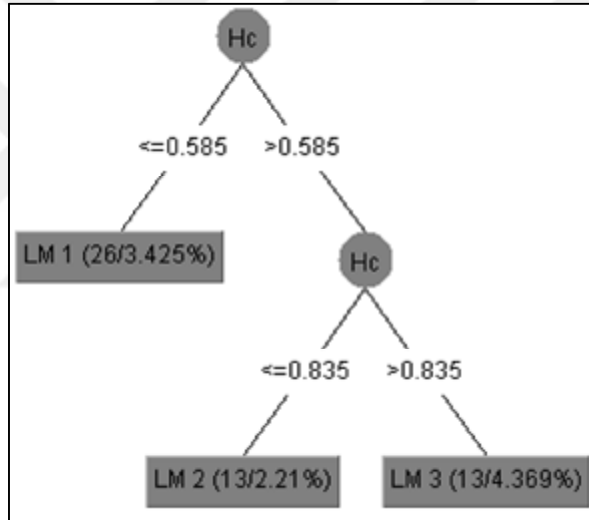
$$SDR = sd(T) - \sum \frac{|Ti|}{|T|} sd(Ti) \quad (4.27)$$

Denklemdaki T bir örnek kümesi, Ti ise örneklerin potansiyel alt kümesidir. Ayrıca buradaki sd terimi ise standart sapmayı ifade etmektedir (Frank ve ark., 1998; Rahimikhoob ve ark., 2013; Kaya ve ark., 2017).

Verilerin kümelere ayrılması sonucunda oluşan alt düğümler her zaman üst düğümlerinden daha basit ve az standart sapmaya sahip olmaktadır. Ayırma işlemi genellikle büyük bir ağaç oluşturur bu da zayıf bir genellemeye sebep olabilmektedir. Bu nedenle ağacın uç düğümleri doğrusal regresyon fonksiyonuna sahip olabilmesi için budanmaktadır (Quinlan, 1992; Kaya ve ark., 2017).

Bu çalışmada deney sonuçları üzerinde, M5T metot ile analiz yapılarak değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren en ideal denklemler belirlenmiştir. Analizlerde Waikato Üniversitesi tarafından geliştirilen “Weka 3.8” paket programı kullanılmıştır.

Statik yüklemeli deneylerden inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için (52 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı Şekil 4.135’te gösterilmiştir. Karar ağacındaki H_c , H_{CDW}/D ’yi ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda gösterilmiştir. Analiz sonucunda $R^2=0.9910$ ve ortalama mutlak hata 0.15 çıkmıştır.



Şekil 4.135. CDW Dolgulu Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yükleme)

LM 1;

$$BCR = (0.6808) + (-0.0258)\left(\frac{S}{D}\right)(\%) + 3.8852\left(\frac{H_{CDW}}{D}\right) \quad (4.28)$$

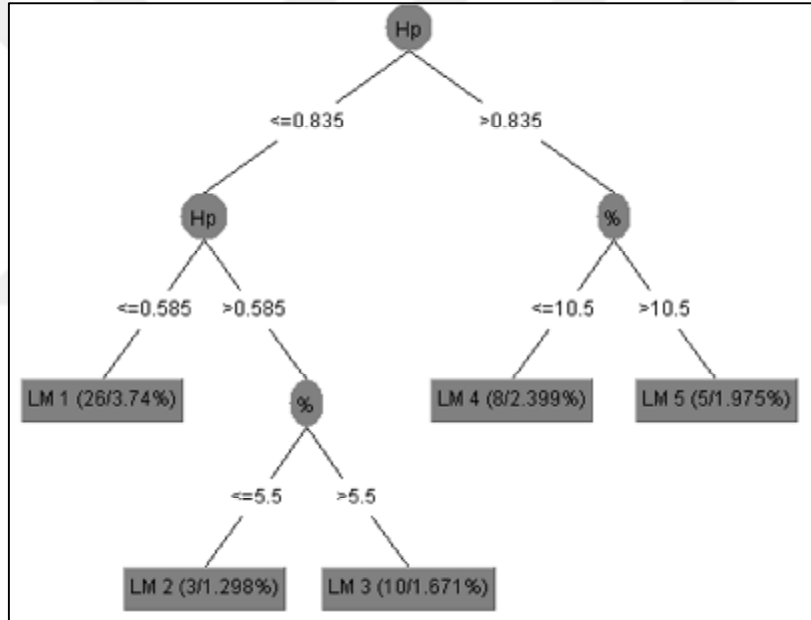
LM 2;

$$BCR = (0.8296) + (-0.0996)\left(\frac{S}{D}\right)(\%) + 5.5456\left(\frac{H_{CDW}}{D}\right) \quad (4.29)$$

LM 3;

$$BCR = (1.8616) + (-0.1199)\left(\frac{S}{D}\right)(\%) + 5.5456\left(\frac{H_{CDW}}{D}\right) \quad (4.30)$$

Statik yüklemeli deneylerden doğal agrega dolgulu durum için (52 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı Şekil 4.136'da gösterilmiştir. Karar ağacındaki H_p , H_{PMT}/D 'yi, % de s/D (%)'yi ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda gösterilmiştir. Analiz sonucunda $R^2 = 0.9892$ ve ortalama mutlak hata 0.20 çıkmıştır.



Şekil 4.136. PMT Dolgulu Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yükleme)

LM 1;

$$BCR = (0.5862) + (-0.0265)\left(\frac{S}{D}\right)(\%) + 5.4441\left(\frac{H_{PMT}}{D}\right) \quad (4.31)$$

LM 2;

$$BCR = (1.7507) + (-0.0530)\left(\frac{s}{D}\right)(\%) + 4.5946\left(\frac{H_{PMT}}{D}\right) \quad (4.32)$$

LM 3;

$$BCR = (1.7445) + (-0.0559)\left(\frac{s}{D}\right)(\%) + 4.5946\left(\frac{H_{PMT}}{D}\right) \quad (4.33)$$

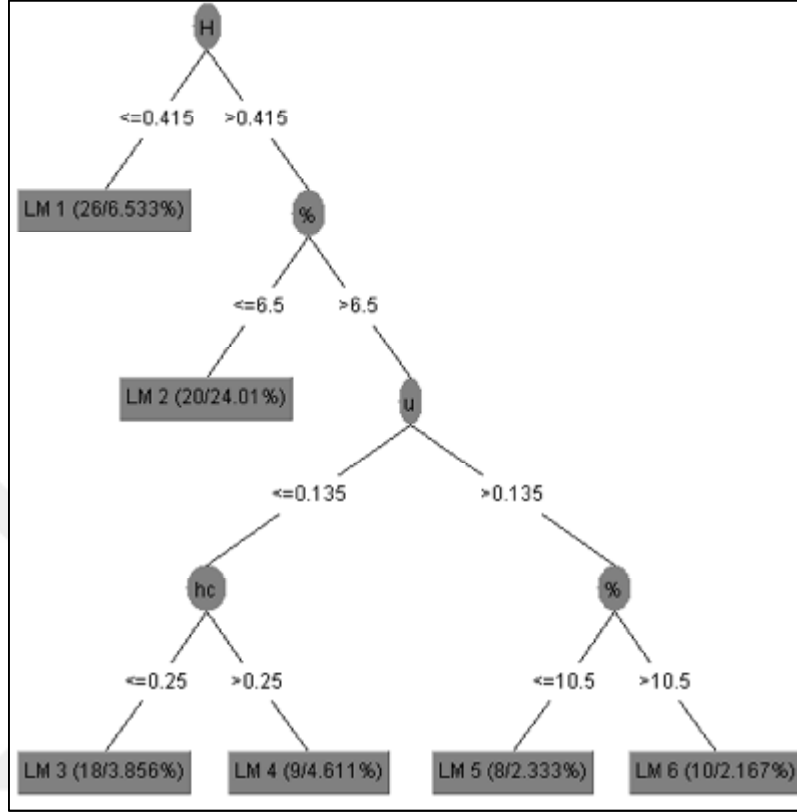
LM 4;

$$BCR = (4.2644) + (-0.1224)\left(\frac{s}{D}\right)(\%) + 4.7132\left(\frac{H_{PMT}}{D}\right) \quad (4.34)$$

LM 5;

$$BCR = (4.2472) + (-0.1264)\left(\frac{s}{D}\right)(\%) + 4.7132\left(\frac{H_{PMT}}{D}\right) \quad (4.35)$$

Statik yüklemeli deneylerden geocell güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için (91 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı Şekil 4.137’de gösterilmiştir. Karar ağacındaki H, H/D’yi, %, s/D (%)’yi, u, u/D’yi, hc de h_c/D’yi ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda gösterilmiştir. Analiz sonucunda R²= 0.9731 ve ortalama mutlak hata 0.06 çıkmıştır.



Şekil 4.137. Geocell Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yükleme)

LM 1;

$$\begin{aligned}
 \text{BCR} = & 2.793 + (-0.0364) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (1.6286) \left(\frac{H}{D} \right) + (-1.8956) \left(\frac{u}{D} \right) \\
 & + (1.1814) \left(\frac{h_c}{D} \right) + (-0.3383) \left(\frac{d}{D} \right)
 \end{aligned} \quad (4.36)$$

LM 2;

$$\begin{aligned}
 \text{BCR} = & 4.068 + (-0.0297) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (0.8347) \left(\frac{H}{D} \right) + (-1.5342) \left(\frac{u}{D} \right) \\
 & + (1.7377) \left(\frac{h_c}{D} \right) + (-1.0065) \left(\frac{d}{D} \right)
 \end{aligned} \quad (4.37)$$

LM 3;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 3.7309 + (-0.0505) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) + (0.8347) \left(\frac{H}{D} \right) + (-1.0176) \left(\frac{u}{D} \right) \\ & + (2.9624) \left(\frac{h_c}{D} \right) + (-0.9166) \left(\frac{d}{D} \right) \end{aligned} \quad (4.38)$$

LM 4;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 3.6125 + (-0.0429) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) + (0.8347) \left(\frac{H}{D} \right) + (-1.0176) \left(\frac{u}{D} \right) \\ & + (3.2379) \left(\frac{h_c}{D} \right) + (-0.7785) \left(\frac{d}{D} \right) \end{aligned} \quad (4.39)$$

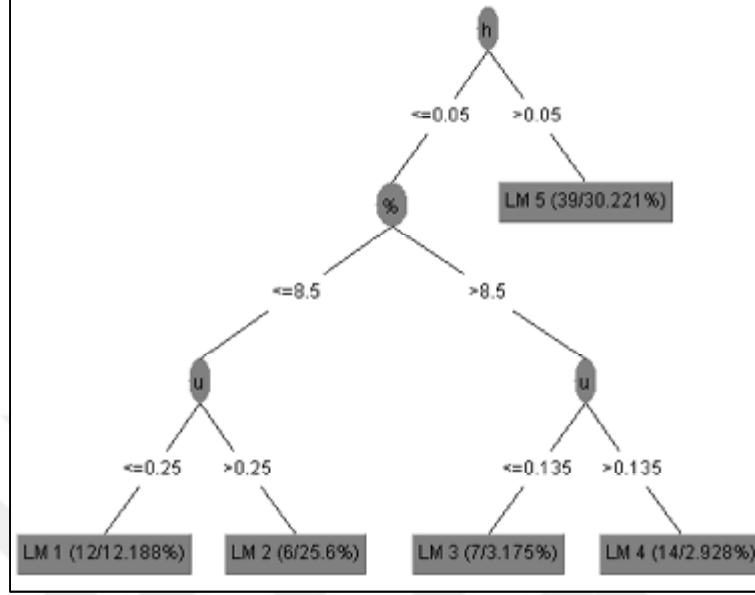
LM 5;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 3.7106 + (-0.0600) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) + (0.8347) \left(\frac{H}{D} \right) + (-1.5143) \left(\frac{u}{D} \right) \\ & + (2.4903) \left(\frac{h_c}{D} \right) + (-0.5997) \left(\frac{d}{D} \right) \end{aligned} \quad (4.40)$$

LM 6;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 3.6828 + (-0.0570) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) + (0.8347) \left(\frac{H}{D} \right) + (-1.5378) \left(\frac{u}{D} \right) \\ & + (2.4903) \left(\frac{h_c}{D} \right) + (-0.5997) \left(\frac{d}{D} \right) \end{aligned} \quad (4.41)$$

Statik yüklemeli deneylerden geogrid güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için (78 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı Şekil 4.138’de gösterilmiştir. Karar ağacındaki h, h/D’yi, %, s/D (%)’yi, u, u/D’yi, ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda gösterilmiştir. Analiz sonucunda $R^2 = 0.8396$ ve ortalama mutlak hata 0.11 çıkmıştır.



Şekil 4.138. Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yükleme)

LM 1;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 4.0542 + (-0.0770) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) \\ & + (0.9463) \left(\frac{u}{D} \right) + (0.5401) \left(\frac{h}{D} \right) \end{aligned} \quad (4.42)$$

LM 2;

$$\text{BCR} = 4.0825 + (-0.0632) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) + (0.5401) \left(\frac{h}{D} \right) \quad (4.43)$$

LM 3;

$$\text{BCR} = 4.0575 + (-0.0666) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) + (0.5401) \left(\frac{h}{D} \right) \quad (4.44)$$

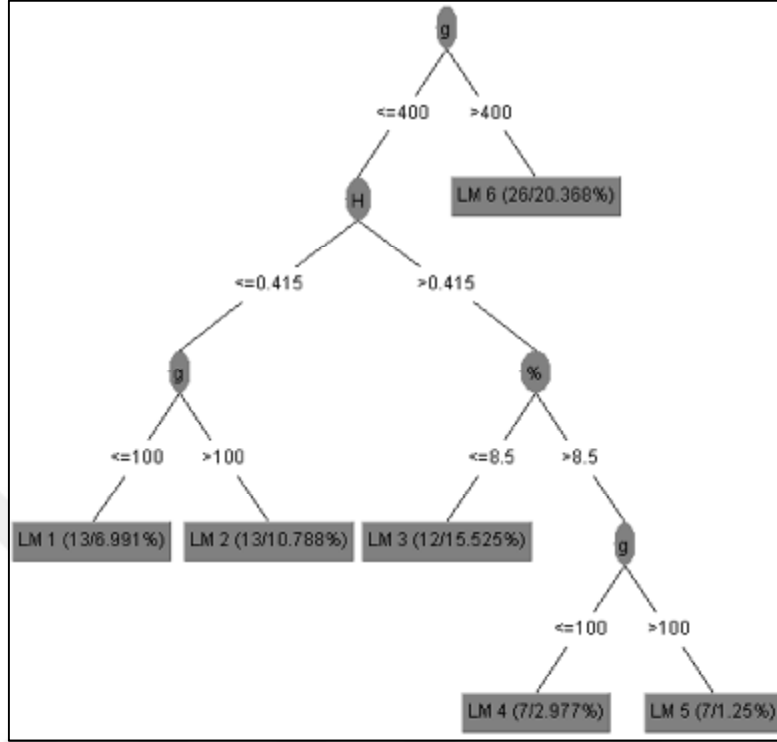
LM 4;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 4.161 + (-0.0652) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) \\ & + (-0.2924) \left(\frac{u}{D} \right) + (0.5401) \left(\frac{h}{D} \right) \end{aligned} \quad (4.45)$$

LM 5;

$$\text{BCR} = 4.0069 + (-0.0441) \left(\frac{s}{D} \right) (\%) + (1.3918) \left(\frac{h}{D} \right) \quad (4.46)$$

Statik yüklemeli deneylerden geotekstil güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için (78 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı Şekil 4.139'da gösterilmiştir. Karar ağacındaki H, H/D'yi, %, s/D (%)'yi, g, geotekstil özelliğini (g/m²) ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda gösterilmiştir. Analiz sonucunda R²= 0.9592 ve ortalama mutlak hata 0.06 çıkmıştır.



Şekil 4.139. Geotekstil Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Statik Yükleme)

LM 1;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 1.7078 + (-0.0348) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (1.0318) \left(\frac{H}{D} \right) \\ & + (0.0007)(g/m^2) \end{aligned} \quad (4.47)$$

LM 2;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 1.6496 + (-0.0246) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (1.0318) \left(\frac{H}{D} \right) \\ & + (0.0007)(g/m^2) \end{aligned} \quad (4.48)$$

LM 3;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 1.9030 + (-0.0342) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (1.0318) \left(\frac{H}{D} \right) \\ & + (0.0007)(g/m^2) \end{aligned} \quad (4.49)$$

LM 4;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 1.9068 + (-0.0400) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (1.0318) \left(\frac{H}{D} \right) \\ & + (0.0009)(g/m^2) \end{aligned} \quad (4.50)$$

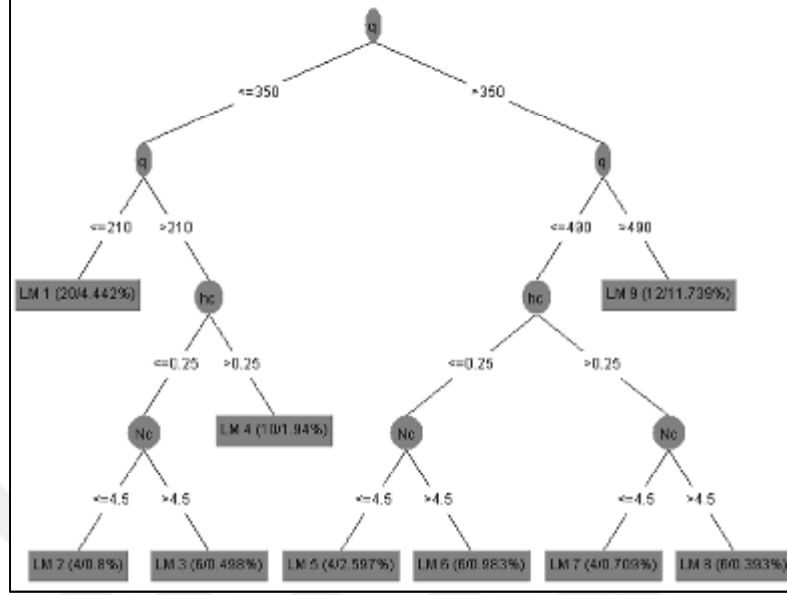
LM 5;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 1.8998 + (-0.0375) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (1.0318) \left(\frac{H}{D} \right) \\ & + (0.0009)(g/m^2) \end{aligned} \quad (4.51)$$

LM 6;

$$\begin{aligned} \text{BCR} = & 2.0313 + (-0.0570) \left(\frac{S}{D} \right) (\%) + (2.0511) \left(\frac{H}{D} \right) \\ & + (0.0005)(g/m^2) \end{aligned} \quad (4.52)$$

Tekrarlı yüklemeli deneylerden geocell güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için (72 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı Şekil 4.140'ta gösterilmiştir. Karar ağacındaki q, uygulanan gerilmeyi (kPa), Nc, tekrarlı yükleme sayısını, , hc de h_c/D 'yi ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda gösterilmiştir. Analiz sonucunda $R^2 = 0.9825$ ve ortalama mutlak hata 0.81 çıkmıştır.



Şekil 4.140. Geocell Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Tekrarlı Yükleme)

LM 1;

$$s_p = (1.0256) + (0.0254)(q)(\text{kPa}) + (0.2028)(N_c) + (-11.6503)\left(\frac{h_c}{D}\right) \quad (4.53)$$

LM 2;

$$s_p = (2.5515) + (0.0254)(q)(\text{kPa}) + (0.3592)(N_c) + (-12.9579)\left(\frac{h_c}{D}\right) \quad (4.54)$$

LM 3;

$$s_p = (2.6220) + (0.0254)(q)(\text{kPa}) + (0.3437)(N_c) + (-12.9579)\left(\frac{h_c}{D}\right) \quad (4.55)$$

LM 4;

$$s_p = (2.281) + (0.0254)(q)(\text{kPa}) \\ + (0.3342)(N_c) + (-12.9579) \left(\frac{h_c}{D} \right) \quad (4.56)$$

LM 5;

$$s_p = (1.9216) + (0.0461)(q)(\text{kPa}) \\ + (0.8441)(N_c) + (-34.2378) \left(\frac{h_c}{D} \right) \quad (4.57)$$

LM 6;

$$s_p = (2.0773) + (0.0461)(q)(\text{kPa}) \\ + (0.8106)(N_c) + (-34.2378) \left(\frac{h_c}{D} \right) \quad (4.58)$$

LM 7;

$$s_p = (1.268) + (0.0461)(q)(\text{kPa}) \\ + (0.7465)(N_c) + (-34.2378) \left(\frac{h_c}{D} \right) \quad (4.59)$$

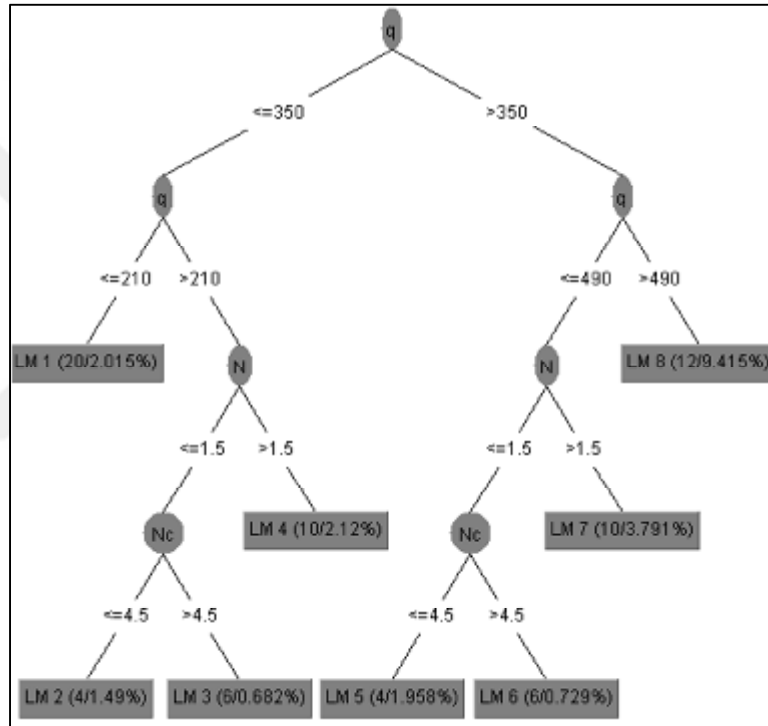
LM 8;

$$s_p = (1.3437) + (0.0461)(q)(\text{kPa}) \\ + (0.7307)(N_c) + (-34.2378) \left(\frac{h_c}{D} \right) \quad (4.60)$$

LM 9;

$$s_p = (7.3296) + (0.0544)(q)(\text{kPa}) \\ + (0.9547)(N_c) + (-55.7815) \left(\frac{h_c}{D} \right) \quad (4.61)$$

Tekrarlı yüklemeli deneylerden geogrid güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için (72 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı Şekil 4.141’de gösterilmiştir. Karar ağacındaki q , uygulanan gerilmeyi (kPa), N_c , tekrarlı yükleme sayısını, N de donatı sayısını ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen denklemler sırası ile aşağıda gösterilmiştir. Analiz sonucunda $R^2 = 0.9854$ ve ortalama mutlak hata 0.82 çıkmıştır.



Şekil 4.141. Geogrid Güçlendirmeli Durum İçin Karar Ağacı (Tekrarlı Yükleme)

LM 1;

$$s_p = (0.8059) + (0.0284)(q)(\text{kPa}) + (0.2832)(N_c) + (-2.2085)(N) \quad (4.62)$$

LM 2;

$$\begin{aligned} s_p &= (3.3039) + (0.0284)(q)(\text{kPa}) \\ &+ (0.4212)(N_c) + (-2.7147)(N) \end{aligned} \quad (4.63)$$

LM 3;

$$\begin{aligned} s_p &= (3.4003) + (0.0284)(q)(\text{kPa}) \\ &+ (0.4017)(N_c) + (-2.7147)(N) \end{aligned} \quad (4.64)$$

LM 4;

$$\begin{aligned} s_p &= (3.0167) + (0.0284)(q)(\text{kPa}) \\ &+ (0.3677)(N_c) + (-2.7147)(N) \end{aligned} \quad (4.65)$$

LM 5;

$$\begin{aligned} s_p &= (4.4406) + (0.0476)(q)(\text{kPa}) \\ &+ (0.8098)(N_c) + (-6.4449)(N) \end{aligned} \quad (4.66)$$

LM 6;

$$\begin{aligned} s_p &= (4.5982) + (0.0476)(q)(\text{kPa}) \\ &+ (0.7765)(N_c) + (-6.4449)(N) \end{aligned} \quad (4.67)$$

LM 7;

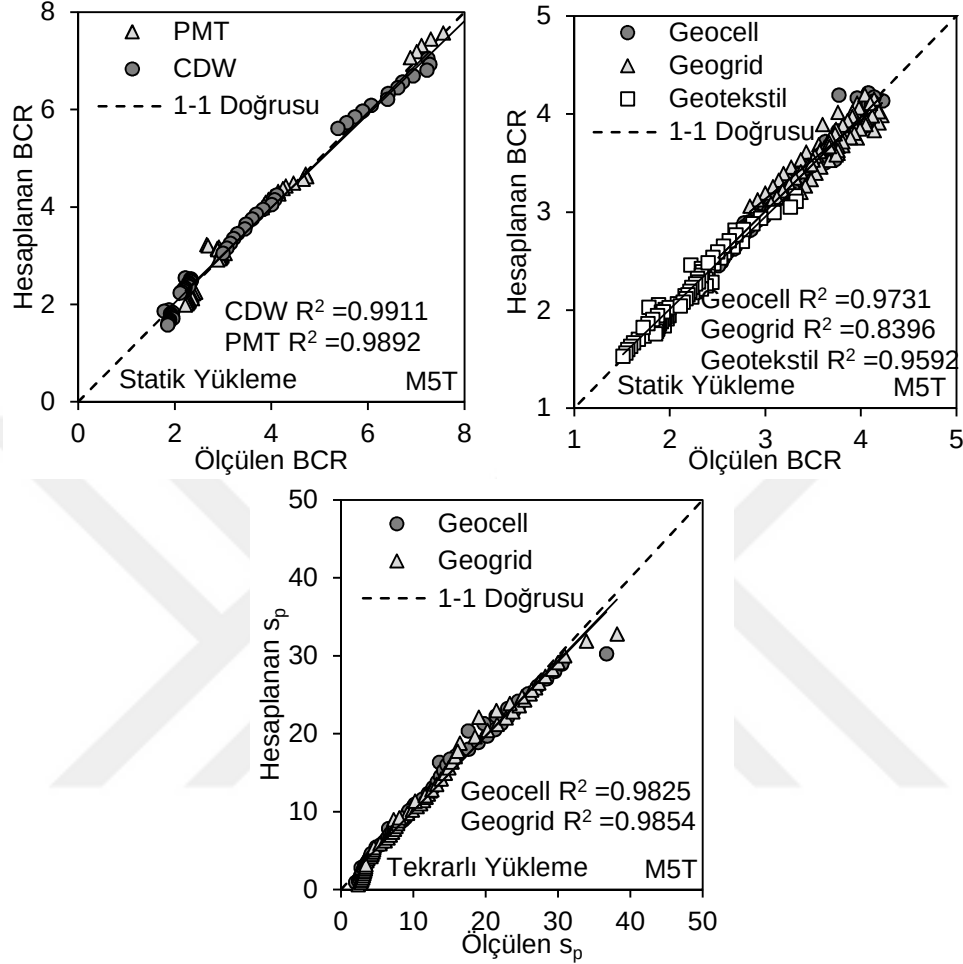
$$\begin{aligned} s_p &= (3.5421) + (0.0476)(q)(\text{kPa}) \\ &+ (0.7133)(N_c) + (-6.4449)(N) \end{aligned} \quad (4.68)$$

LM 8;

$$\begin{aligned} s_p &= (9.5037) + (0.0559)(q)(\text{kPa}) \\ &+ (0.878)(N_c) + (-9.7916)(N) \end{aligned} \quad (4.69)$$

Tekrarlı yüklemeli deneylerden geotekstil güçlendirmeli inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durum için (61 veri) yapılan M5T analizi sonucunda oluşan karar ağacı oluşmamış ve analiz sonucunda beklenildiği gibi aynı veriler üzerinde “Minitab 17” programı ile yapılan çoklu lineer regrasyon analizinden elde edilen denklemin aynısı bulunmuştur. Bu sebeple M5T analizi sonucunda elde edilen R^2 ve ortalama mutlak hata değerleri de çoklu lineer regrasyon analizi sonucu ile aynı çıkmıştır.

Geosentetik güçlendirmeli ve güçlendirmesiz statik yüklemeli deneylerden elde edilen BCR değerlerine karşılık, M5T analizleri sonunda elde edilen eşitlikler kullanılarak hesap edilen BCR değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.142’de sunulmuştur. Ayrıca şekilde geosentetik güçlendirmeli tekrarlı yüklemeli deneylerden elde edilen s_p değerlerine karşılık, M5T analizleri sonunda elde edilen eşitlikler kullanılarak hesap edilen s_p değerleri arasındaki ilişki de gösterilmektedir.



Şekil 4.142. Ölçülen ve M5T Metodu ile Hesaplanan Değerlerin Karşılaştırılması

4.5.3. İstatistiksel Analizlerin Karşılaştırılması

Deney sonuçları üzerinde yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen sonuçlar toplu olarak Çizelge 4.15'te gösterilmiştir. Analizler sonrasında tekrarlı yüklemeli deneylerden geotekstil güçlendirmeli durum dışında bütün durumlarda M5T analizinde daha yüksek kolerasyon katsayısı ve daha düşük ortalama mutlak hata elde edilmiştir. Tekrarlı yüklemeli deney durumları bakımından MLR ve MNLR analizleri kıyaslandığında, MNLR analizi ile MLR analizine göre daha yüksek kolerasyon katsayısı ve daha düşük ortalama mutlak

hata elde edilmiştir. Statik yüklemeli deney durumları bakımından MLR ve MNLR analizleri kıyaslandığında, güçlendirmesiz deney durumlarında MNLR analizi ile MLR analizine göre daha yüksek kolerasyon katsayısı ve daha düşük ortalama mutlak hata elde edilmişken güçlendirmeli durumlarda birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.15. İstatistiksel Analizlerin Karşılaştırılması

Yükleme Durumu	Deneyler	İstatistiksel Analizler					
		MLR		MNLR		M5T	
		R^2	MAE	R^2	MAE	R^2	MAE
Statik Yüklemeli Deneyler	CDW Dolgu	0.9411	0.38	0.9566	0.36	0.9910	0.15
	PMT Dolgu	0.9366	0.51	0.9501	0.47	0.9892	0.20
	CDW Dolgu (Geocell ile Güçlendirilmiş)	0.9256	0.10	0.9102	0.10	0.9731	0.06
	CDW Dolgu (Geogrid ile Güçlendirilmiş)	0.7477	0.13	-	-	0.8396	0.11
	CDW Dolgu (Geotekstil ile Güçlendirilmiş)	0.9158	0.09	0.9054	0.09	0.9592	0.06
Tekrarlı Yüklemeli Deneyler	CDW Dolgu (Geocell ile Güçlendirilmiş)	0.8953	2.34	0.9564	1.40	0.9825	0.81
	CDW Dolgu (Geogrid ile Güçlendirilmiş)	0.9120	2.29	0.9711	1.25	0.9854	0.82
	CDW Dolgu (Geotekstil ile Güçlendirilmiş)	0.8609	4.31	0.9664	1.85	0.8609	4.31
MAE: Ortalama Mutlak Hata							

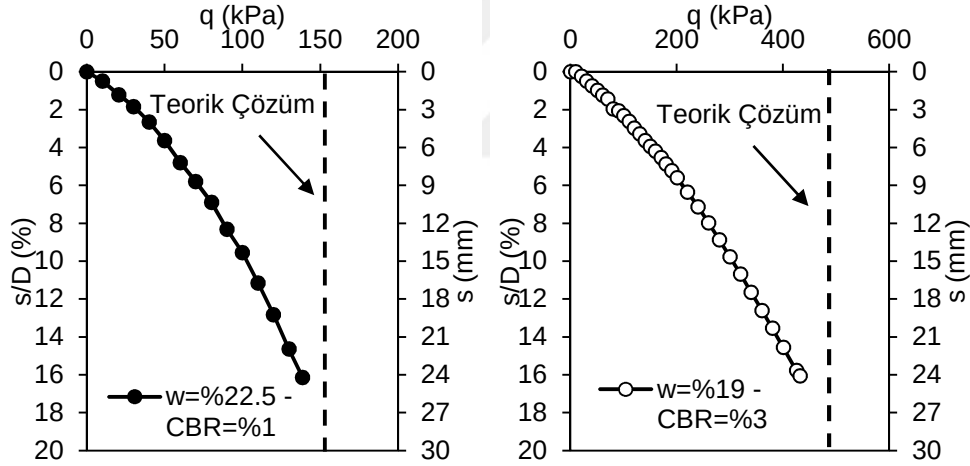
4.6. Analitik Çözümler ve Literatür Karşılaştırması

İki farklı su içeriğine sahip (ω =%19 olan ZZ1 ve ω =%22.5 olan ZZ2) tabii zemin üzerinde yapılan deneylerden Terzaghi (1943)'nin taşıma gücü teorisine göre (Eşitlik 2.2) nihai taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Temelin şekline bağlı olarak değişen şekil katsayıları K_1 ve K_2 ve ϕ 'ye bağlı değişen N_c , N_q , N_γ taşıma gücü katsayıları Vesic (1973)'e göre belirlenmiştir. Hesapta

kullanılan parametreler ve taşıma gücü değerleri Çizelge 4.16’da gösterilmiştir. Ayrıca hesap edilen taşıma gücü değerlerinin deneyler sonrasında elde edilen gerilme (q) deplasman (s) veya deplasman oranı (s/D) eğrisi üzerindeki gösterim Şekil 4.143’te sunulmuştur. Teorik çözüm ile hesap edilen taşıma gücü değerlerinin, deneylerde temel çapının yaklaşık %16-17 deplasman (s/D) yapması sonucunda elde edilen basınç (q) değerlerine denek gelebileceği görülmüştür.

Çizelge 4.16. Tabii Zemin İçin Analitik Çözüm

Deneyler		Parametreler			Katsayılar					Taşıma Gücü
No	ω	c_u	ϕ	γ_n	K1	K2	Nc	Nq	N γ	q
-	%	kPa	°	kN/m ³	-	-	-	-	-	kPa
ZZ1	19	80	0	2.02	1.19	0.6	5.14	1	0	491.2
ZZ2	22.5	25	0	1.90	1.19	0.6	5.14	1	0	153.5



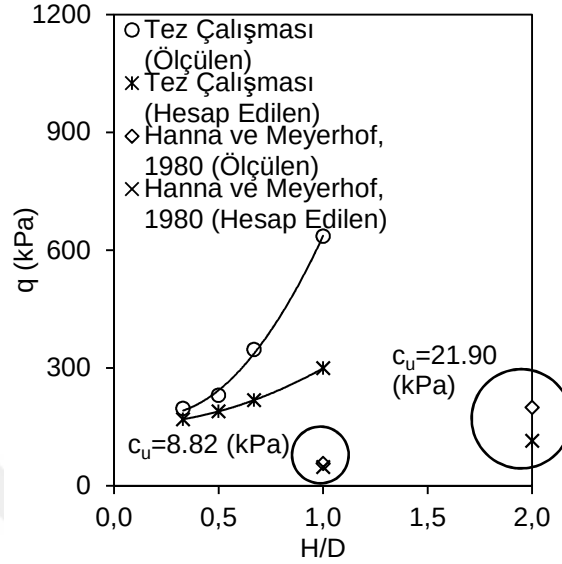
Şekil 4.143. Tabii Zemin İçin Teorik Çözüm ile Deney Sonuçları Karşılaştırması

Meyerhof (1973)’un zayıf zemin üzerinde ince güçlü zeminin olduğu tabakalı durumu için önerdiği taşıma kapasitesi hesabına göre (Eşitlik 2.7), zayıf zemin üzerine farklı kalınlıklardaki ($H/D=0.33, 0.50, 0.67$ ve 1.00) inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu deneyler için nihai taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. İnşaat ve yıkıntı atığı agregalar üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneylerinin yapıldığı

çalışmalar incelendiğinde agreganın içsel sürtünme açısının 42° ile 65° arasında değiştiği görülmüştür (Sivakumar ve ark., 2004; Santos ve ark., 2008; Arulrajah ve ark., 2013b; Arulrajah ve ark., 2014c). Uç değerlerdeki çalışmalar dikkate alınmadan sonuçların yaklaşık olarak 45° ile 50° arasında değişeceği düşünülmektedir. Bu sebeple içsel sürtünme açısı 50° alınarak nihai taşıma gücü hesaplanmıştır. Zayıf zeminin drenajsız kayma mukavemeti yaklaşık olarak 25 kPa (c_u) değerine sahip olduğu daha önce ifade edilmiştir. Zayıf zeminin üzerindeki güçlü zeminin içsel sürtünme açısı $\phi^0=50$ olarak alınır, zemin tabakalarının nihai taşıma güçlerinin oranı $q_2/q_1=0.20$ (Meyerhof, 1973), zımbalama kesme parametresi Şekil 2.9'e göre $\delta/\phi_1=0.6$ ve zımbalama kesme katsayısı Şekil 2.9'a göre $K_s=18$ olarak elde edilmektedir (Hanna ve Meyerhof, 1980). Zayıf zeminin üzerindeki güçlü zeminin içsel sürtünme açısı $\phi^0=45$ olarak alınır, zemin tabakalarının nihai taşıma güçlerinin oranı $q_2/q_1=0.55$ (Meyerhof, 1973), zımbalama kesme parametresi $\delta/\phi_1=0.8$ ve zımbalama kesme katsayısı $K_s=20$ olarak elde edilmektedir (Hanna ve Meyerhof, 1980). Hesaplanan ve deneyler sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri Çizelge 4.17'de ve dolgu kalınlığına bağlı olarak taşıma gücü değerleri ($\phi_1=50^\circ$ için) değişimi Şekil 4.144'te gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.144'te Hanna ve Meyerhof'un (1980) yumuşak zemin üzerine kum dolgulu bir zemin için yaptığı deney ve hesaplama sonucu da gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. CDW Dolgulu Zemin İçin Analitik Çözüm

No	H/D	Ölçülen Taşıma Gücü Değeri ($s/D=\%10$)	Hesap Edilen Taşıma Gücü Değeri ($\phi^0=45$)	Hesap Edilen Taşıma Gücü Değeri ($\phi^0=50$)
		q (kPa)	q (kPa)	q (kPa)
CDW1	0.33	196.76	168.63	169.73
CDW2	0.50	230.20	187.55	190.02
CDW3	0.67	347.17	214.03	218.43
CDW4	1.00	645.11	289.70	299.59



Şekil 4.144. CDW Dolgulu Zemin İçin Teorik Çözüm ile Deney Sonuçları Karşılaştırması

Meyerhof (1973)'ün zayıf zemin üzerinde ince güçlü zeminin olduğu tabakalı durumu için önerdiği taşıma kapasitesi hesabına göre yapılan taşıma gücü değeri ince kalınlıklı dolguda ($H/D=0.33$ ve 0.50) deneysel sonuçlara yakın değerler almıştır. Ancak dolgu kalınlığı arttıkça deneysel sonuçların teorik sonuçlara göre daha hızlı artması ile teorik sonuçlardan uzaklaştığı görülmüştür. Hanna ve Meyerhof'un (1980) çalışmasında dolgu tabakası kalınlığı ve zayıf zeminin drenajsız kayma mukavemetinin artması ile deneysel ve teorik sonuçların birbirinden uzaklaştığı yakın bir davranış elde etmiştir.

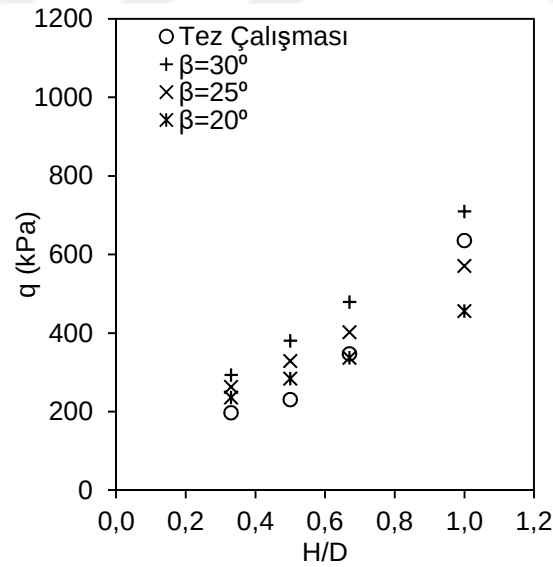
Yükü yayma modeli zayıf zemin üzerine granüler dolgu yerleştirildiğinde nihai taşıma kapasitesinin tahmin edilmesinde yaygın bir biçimde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde granüler dolgunun yükü yaymaya çalıştığı ve temelin yenilmesinin yayılan yüke göre zayıf zeminin taşıma kapasitesini geçmesi ile oluşacağı varsayılmıştır (Love ve ark., 1987; Jewell 1996; Giraud ve Han 2004a; Giraud ve Han 2004b; Lyons ve Fannin 2006; Han ve ark., 2011; Demir ve ark., 2013). Çalışma kapsamında zayıf zemin üzerine farklı kalınlıklardaki ($H/D=0.33$,

0.50, 0.67 ve 1.00) inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu deneyler için yükü yayma modeli kullanılarak yük dağıtma açısı (β) hesap edilmiştir.

Eşitlik 2.11'deki nihai taşıma gücü denkleminde R' yerine de Eşitlik 2.12'deki ifade yazılarak aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir (Love ve ark., 1987; Lyons ve Fannin 2006; Han ve ark., 2011). Eşitlikteki H dolgu kalınlığını, R dairesel yükleme alanının yarıçapını, N_c kil zemin için taşıma kapasitesi faktörü ile şekil faktörünün (K_1) ile çarpılmış halini ve β yük dağıtma açısını ifade etmektedir.

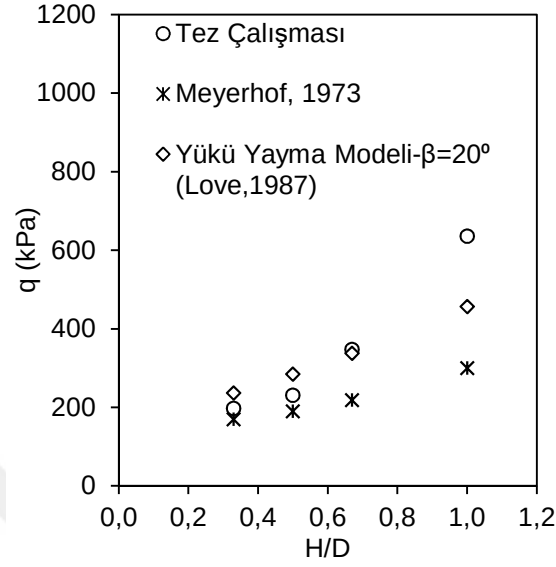
$$BCR = N_c c_u \left(\frac{R + H \tan \beta}{R} \right)^2 \quad (4.70)$$

Eşitlik 4.70'e göre farklı kalınlıklardaki dolgular için farklı yük dağıtma açılarına (β) göre elde edilen taşıma gücü değerleri, farklı kalınlıklardaki ($H/D=0.33, 0.50, 0.67$ ve 1.00) inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu deneyler sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri ($s/D=\%10$ için) ile Şekil 4.145'te kıyaslanmıştır.



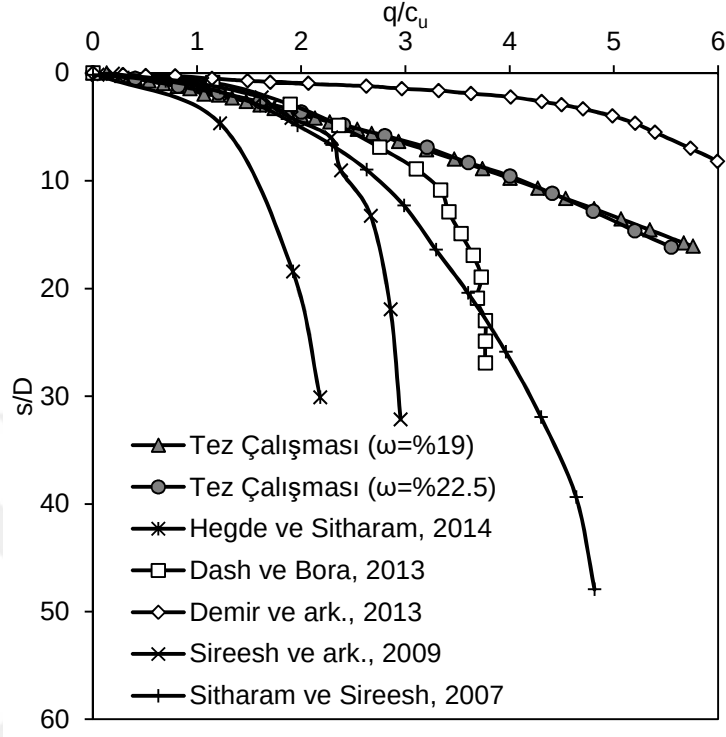
Şekil 4.145. Hesaplanan Yük Dağıtma Açıları (β) ile Deney Sonuçlarının Kıyaslanması

Özellikle ince kalınlıklı inşaat ve yıkıntı atığı dolgulu durumlarda ($H/D=0.33, 0.50$ ve 0.67) elde edilen sonuçlar, dağıtma açısı (β) 20° olarak yükü yayma modeli ile hesap edilen sonuçlara oldukça yakındır. Daha önceki yapılan farklı çalışmalarda, yük dağıtma açısının (β) granüler dolgu kalınlığı ile değiştiği kalınlığın artması ile arttığı ve genelde değerinin 20° ile 40° arasında olduğu bildirilmiştir (Lyons ve Fannin 2006; Demir ve ark., 2013). Yükü yayma modeline göre elde edilen sonuçlarda da, Meyerhof (1973)'un önerdiği yöntemde elde edilen sonuçlara benzer bir şekilde, dolgu kalınlığı arttıkça deneysel sonuçların teorik sonuçlara göre daha hızlı artması ile teorik sonuçlardan uzaklaştığı görülmüştür. Her iki farklı yöntemde de, dolgu tabakası kalınlığı arttıkça taşıma gücündeki artış doğrusala yakın seyretmektedir. Tez çalışmasındaki dolgu tabakası kalınlığının nispeten düşük olduğu deneylerde elde edilen taşıma gücü değerleri, dolgu kalınlığının artması ile her iki yöntemde elde edilen sonuçlara benzer bir şekilde doğrusala yakın artmaktadır. Ancak dolgu tabakası kalınlığının nispeten yüksek olduğu deneylerde elde edilen taşıma gücü değerleri, dolgu kalınlığının artması ile her iki yöntemde elde edilen sonuçlardan biraz farklı olarak (daha fazla) parabol yakını bir şekilde artmıştır. Özellikle yüksek dolgu kalınlıklarında görülen bu doğrusal olamayan artışın ölçek (boyut) etkisinin yönlendirmesiyle temel altındaki gerileme bölgesinin dolgunun içinde kalması ve zayıf zemine iletilen gerilmelerin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak tabaka kalınlığı ile taşıma kapasitesi oranı artışın doğrusal olduğu, düşük dolgu kalınlıklarının bu etkiden nispeten uzak olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 4.146'de teorik çözümler ile elde edilen sonuçlar, inşaat yıkıntı atığı dolgulu deneylerde elde edilen sonuçlar birlikte gösterilmiştir. Deney sonuçlarının özellikle ince kalınlıklı dolgularda analitik çözümlere yakın değerler aldığı görülmüştür.



Şekil 4.145. Analitik Çözümler ile Deney Sonuçlarının Kıyaslanması

Zayıf zemin üzerinde yapılan statik yüklemeli plaka yükleme deneyleri literatürde yapılan benzer deneylerle kıyaslanmıştır. Şekil 4.146'da gerilmenin zayıf zeminin kohezyon değerine, deplasmanlarında plaka çapına bölünmesi ile boyutsuzlaştırılarak gösterilmiştir. Tez kapsamında iki farklı su içeriğine sahip zemin üzerinde yapılan statik yüklemeli deneylerin boyutsuzlaştırılması sonrasında birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmaların çok uzağında olmadığı fark edilmiştir.



Şekil 4.146. Zayıf Zemin Plaka Yükleme Deneylerinin Literatür ile Kıyaslaması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde elde edildiği taş ocaklarının çevreye verdiği zararlar, madencilikle ilgili ağırlaşan çevresel yönetmeliklerle elde edilmesinin zorlaşması ve maliyetinin artması gibi dez avantajlara sahip olan ama inşaat sektörü ile orantılı olarak ihtiyacın sürekli arttığı doğal agregaların yerine alternatif uygun bir malzeme arayışına girilmiştir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, inşaat ve yıkıntı atıklarının bertaraf edilmesi için gerekli depolama alanları, bu depolama alanlarının çevreye vereceği zararlar, harcanacak enerji için gerekli maddi kaynaklar ve doğal kaynakların sürdürülebilirliğinin gibi sebeplerden dolayı bu atıkların mümkün olduğunca geri dönüştürülerek tekrar kullanılmasını istenmektedir. Ülkemizde Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği'nde bu atıkların geri kazanılmasının önemini vurgulamıştır. Ayrıca 2012 yılında yayımlanan Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanun ile riskli olduğu düşünülen yaklaşık 6-7 milyon yapının yıkılması planı ile de çok büyük miktarlarda inşaat ve yıkıntı atığı üretilme potansiyeli doğmuştur.

Literatürdeki inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülerek tekrar kullanılması ile ilgili birçok çalışmada, bu atıkların çeşitli zemin dolgularında doğal agregaların yerine bir alternatif olabileceği kabul edilmiştir. Ayrıca ülkemizdeki Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği' de bu atıkların çeşitli zemin dolgularında kullanılabileceğini belirtmiştir. Ancak konu ile doğrudan ilgili literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu, bu atıklar üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deneyleri ile malzemenin fiziksel, geoteknik ve/veya çevresel özelliklerinin belirlenmesi üzerinedir. Bu çalışmalarda genellikle elde edilen fiziksel, geoteknik ve/veya çevresel özelliklerin yol temel/alt temel dolguları gibi dolgularda kullanmak için uygun olup olmadığı yorumlanmıştır.

Bu tez çalışması yukarda bahsedilen onlarca sebep doğrultusunda gerçekleştirilmiş olup, çalışmada inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesi

sonrasında bu atıkların statik veya tekrarlı (yol temel/alt temeli vb.) yüklere maruz dolgularda doğal agregalar yerine kullanılabilmesi durumu araştırılmıştır. Birçok farklı malzemeyi heterojen bir şekilde içerebilen, temin edildiği nispeten az mühendislik hizmeti almış binaların beton kalitesindeki düşüklük ve değişkenlik göz önüne alındığında, dış etkilerin (statik veya tekrarlı yükler) inşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilecek dolgularda, kaliteli doğal malzemeden inşa edilmiş dolgulara göre biraz daha fazla deformasyon oluşabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple inşaat ve yıkıntı atığı malzemeleri kaliteli doğal agrega malzemelerin performansına getirebilmek için geosentetiklerle güçlendirmek ve bu atıkların geosentetiklerle birlikte göstereceği davranışı incelemekte bu çalışmanın bir amacıdır. Çalışmada geocell donatının yüksekliği ve dolgu içerisindeki yerinin etkisi, geogrid donatının sayısı ve dolgu içerisindeki yerinin etkisi ile geotekstil donatının yoğunluğunun etkisi gibi parametreler de araştırılmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda depreme dayanıksız olduğu belirlenen çok katlı bir binanın kontrollü yıkılmasından sonra çıkan inşaat ve yıkıntı atığı alınmış ve çeşitli işlemlerle geri dönüştürülmüştür. Geri dönüştürülen atık malzeme üzerinde geleneksel laboratuvar deneyleri (elek analizi, birim hacim ağırlık, su emme, yassılık indeksi, Los Angeles, modifiye kompaksiyon ve CBR) yapılarak, malzemenin fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi için temin edilen ve uygun gradasyona ayarlanan doğal agrega karışımı malzeme üzerinde de benzer laboratuvar deneyleri yapılmıştır. İnşaat ve yıkıntı atıklarından inşa edilecek dolgunun performansı araştırılırken güvenli tarafta kalınarak dolgunun elverişsiz koşullara sahip zayıf zemin üzerindeki davranışı incelenmek istenmiştir. Bu nedenle zayıf zemin üzerine geosentetiklerle güçlendirmeli ve güçlendirmesiz inşaat ve yıkıntı atığı dolgu inşa edilmiş sonrasında üzerinde statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Benzer deney şartlarında doğal agrega dolgu üzerinde de statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden çoklu doğrusal regresyon (MLR), çoklu doğrusal olmayan regresyon (MNLR) ve

M5T (karar ağacı) gibi istatistiksel analizler yapılarak değişkenlilerin birbirleri ile ilişkileri belirlenmiştir. Statik yüklemeli deney sonuçlarından elde edilen taşıma gücü değerleri, iki farklı analitik yöntem kullanılarak elde edilen taşıma gücü değerleri ile kıyaslanmıştır.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki başlıklar altında ve maddeler halinde özetlenmiştir.

5.1. Geleneksel Laboratuvar Deneyleri

- Ø Çalışma kapsamında geri dönüştürülen inşaat ve yıkıntı atığı malzemeye yapılan analiz sonucunda içinde yaklaşık olarak %36.33 beton, %10.53 tuğla, fayans veya seramik, %52.65 agrega, %0.11 cam ve %0.38’de diğer bazı malzemeleri barındırdığı belirlenmiştir. Elde edilen oranların, özellikle inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerin (donatı ve metal yabancı maddelerin ayıklanması sonucu) direk kullanıldığı (tuğla, cam, ahşap alçı vb. atıklara dokunmadan) benzer çalışmalarda elde edilen oranlara oldukça yakın olduğu görülmüştür.
- Ø Çalışma kapsamında geri dönüştürülen inşaat ve yıkıntı atığı malzeme üzerinde yapılan geleneksel laboratuvar deneyleri sonucunda, optimum su içeriği (ω_{opt}), maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}), yassılık indeksi, dane birim hacim ağırlığı, su emme ve Los Angeles aşınma yüzdeleri, literatürdeki çalışmalarda kullanılan atık agregaların değerlerine benzemektedir.
- Ø İnşaat ve yıkıntı atığı malzemenin optimum su içeriğindeki CBR değeri yaklaşık % 100 (% 99.98) çıkmıştır. Literatürde, benzer atık malzemeler üzerinde yapılan CBR deney sonuçları % 22-% 160 gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Fiziksel özelliklerinin birbirlerine yakın olmasına rağmen CBR değerlerinin bu kadar değişken olmasında, atığın temin edildiği binanın yapı kalitesinin çok etkili olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple

inşaat ve yıkıntı atığı malzemeler dolgularda doğal agregalar yerine kullanılmadan önce üzerinde bir dizi laboratuvar deneyi yapılması CBR veya benzeri yükleme deneylerinin yapılması önerilmektedir.

- Ø İnşaat ve yıkıntı atığı malzeme ve kaliteli doğal agrega malzeme üzerinde yapılan laboratuvar geleneksel deneyleri kıyaslandığında, yassılık indeksi ve dane birim hacim ağırlıkları birbirlerine yakın çıkmıştır. Ancak inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin doğal agrega malzemeye göre aşınma yüzdesi %44 daha fazla, maksimum kuru birim hacim ağırlığı %15 daha az, optimum su içeriği %62 daha fazla çıkmıştır. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin su emme değeri doğal agrega malzemenin kaba daneler için 11 katı, ince daneler için 17 katı çıkmıştır.
- Ø İki malzeme arasında fiziksel özellik bakımından en önemli fark su emme ve aşınmada yüzdesinde görülmüştür. Özellikle su emmedeki aşırı farkın inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin kompaksiyon özelliklerini de etkileyerek, malzemenin optimum su içeriğini yükselttiği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını düşürdüğü düşünülmektedir.
- Ø İnşaat ve yıkıntı atığı malzemenin optimum su içeriğinin doğal agrega malzemedan yüksek olması, inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerden inşa edilecek dolgularda optimum su içeriğine ulaşmak için doğal malzemelere göre daha fazla su ihtiyacının olacağını göstermektedir. Bu durum dolgu inşaatında göz önünde bulundurulmalıdır. Benzer önerilere (Cerni ve ark., 2012) literatürdeki bazı çalışmalarda da rastlanmıştır.
- Ø Optimum su içeriğinde yapılan CBR deneyleri sonucunda, inşaat ve yıkıntı atığı malzemenin doğal agrega malzemeye göre CBR değeri %20 daha az çıkmıştır.

5.2. Statik Plaka Yükleme Deneyleri

- Ø Tabii zemin (ince daneli) üzerinde yapılan statik plaka yükleme deneyi sonucunda, taşıma gücü %19 su içeriğinde 305.33 kPa çıkarken %22.5 su içeriğinde 103.01 kPa çıkmıştır. İki farklı su içeriği için CBR değerlerinde de benzer bir fark görülmüştür (%19 su içeriğinde CBR=3, %22.5 su içeriğinde CBR=1). Temel anlamda zeminin taşıma gücündeki bu farkın %19 su içeriğine sahip zeminin, plastik limitin (%21) altında kalması ve %22.5 su içeriğindeki zeminin plastik limitin (%21) üstünde kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tez çalışmasında, hem güvenli tarafta kalmak için hem de güçlendirmenin performansının daha iyi anlaşılabilmesi için en elverişsiz koşullar düşünülerek, güçlendirmeli ve güçlendirmesiz granüler dolgular %22.5 su içeriğindeki ince daneli tabii zemin üzerine yerleştirilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir.
- Ø Dolgu kalınlığı aynı olan PMT ve CDW dolgulu deneyler kıyaslandığında, PMT dolgulu durumun CDW dolgulu duruma göre göre biraz daha fazla yük aldığı görülmüştür. Örneğin, H/D=0.5 dolgu kalınlığı için PMT dolgulu durumda CDW dolgulu duruma göre s/D=%5, %10 ve %15'deki BCR değerleri sırası ile %24, %32 ve %36 daha fazla çıkmıştır. Bu durumda CDW malzemenin PMT malzemesinin performansını yakalaması için bir iyileştirme yapılması gerektiği açıktır. İyileştirme için, granüler malzemelerle çok iyi uyum sağlaması, inşaatı için kalifiye eleman gerektirmediği gibi hızlı inşaatı da izin vermesi, çevresel etkilere dayanıklı olması, yüksek çekme kapasitesine sahip olması ve benzeri sebeplerle granüler dolgularda sıkça kullanılan geosentetik güçlendirmelerin uygun olabileceği düşünülmüştür.
- Ø Dolgu kalınlığı aynı olan PMT ve CDW dolgulu deneylerin gerilme-deplasman eğrileri kıyaslandığında, iki dolgulu durumun başlangıçta benzer davranış gösterdiği (s/D yaklaşık %5 ile %10'a kadar) ancak artan

deplasman oranlarında PMT dolgulu durumun CDW dolgulu duruma göre daha fazla yük alması ile aralarındaki farkın arttığı görülmüştür. Artan deplasman oranlarındaki benzer durum BCR oranlarına da yansımıştır. İki dolgu malzemesinin gerilme deplasman davranışı düşük yüklerde daha yakinken yüksek yüklerde daha uzaktır. Bu durum CDW malzemeden dolgu inşa edilecek yerlerin tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır.

- Ø Geocell ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, bütün geocell ile güçlendirilen CDW dolgulu durumların aynı dolgu kalınlığına sahip güçlendirmesiz CDW dolgulu duruma göre daha fazla yük aldığı görülmüştür. Geocell güçlendirme ile BCR oranındaki artış, donatının yerine, yüksekliğine ve hücre açıklığına göre değişmekle birlikte, $H/D=0.5$ ve $s/D=\%10$ için $\%30$ ile $\%84$ arasındadır.
- Ø Geocell ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, hücre açıklığı $d/D=1.25$ olan güçlendirmeli durum hariç bütün geocell ile güçlendirilen CDW dolgulu durumların aynı dolgu kalınlığına sahip PMT dolgulu duruma göre daha fazla yük aldığı görülmüştür. Geocell güçlendirmeli durumlarda PMT dolgulu duruma göre, $H/D=0.5$ ve $s/D=\%10$ için BCR oranı donatının yerine, yüksekliğine ve hücre açıklığına göre değişmekle birlikte $\%3$ ile $\%39$ arasında daha fazla çıkmıştır. CDW dolgu geocell donatı ile güçlendirildiğinde (hücre açıklığı $d/D=1.25$ olan güçlendirmeli durum hariç), PMT dolgunun performansını yakaladığı ve hatta bazı durumlarda geçtiği için, geocell donatı iyileştirme açısından iyi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Ancak geocell donatının hücre alanının, uygulanacak yükün alanından küçük olarak seçilmesi ($d < D$) tavsiye edilmektedir.
- Ø Geocell ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, en iyi performans geocell donatını gömülme derinliği $u/D=0.10$, yüksekliği $h_c/D=0.33$ ve hücre açıklığı $d/D=0.62$ olduğunda elde edilmiştir. Bu durumda BCR oranı, güçlendirmesiz CDW ve PMT dolgulu durumlara göre sırası ile $\%84$

ve %39 fazla çıkmıştır. Donatının gömülme derinliği arttıkça, yüksekliği düştükçe ve hücre açıklığı arttıkça BCR değeri azalmıştır. Ayrıca geocell donatısını gömülme derinliği $u/D=0.10$, yüksekliği $h_c/D=0.17$ ve hücre açıklığı $d/D=0.62$ olduğu durumda da BCR oranı, güçlendirmesiz CDW ve PMT dolgulu durumlara göre sırası ile %55 ve %17 fazla çıkmıştır. Tasarım aşamasında donatının fayda maliyet oranı dikkate alınarak bu iki düzenden birinin seçilmesi önerilmektedir.

- Ø Geogrid ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, bütün geogrid ile güçlendirilen CDW dolgulu durumların aynı dolgu kalınlığına sahip güçlendirmesiz CDW dolgulu duruma göre daha fazla yük aldığı görülmüştür. Geogrid güçlendirme ile BCR oranındaki artış, donatının yerine, sayısına ve donatılar arası mesafeye göre değişmekle birlikte, $H/D=0.5$ ve $s/D=\%10$ için %43 ile %76 arasındadır.
- Ø Geogrid ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, bütün geogrid ile güçlendirilen CDW dolgulu durumların aynı dolgu kalınlığına sahip PMT dolgulu duruma göre daha fazla yük aldığı görülmüştür. Geogrid güçlendirmeli durumlarda PMT dolgulu duruma göre, $H/D=0.5$ ve $s/D=\%10$ için BCR oranı donatının yerine, sayısına ve donatılar arası mesafeye göre değişmekle birlikte %8 ile %33 arasında daha fazla çıkmıştır. CDW dolgu geogrid donatı ile güçlendirildiğinde, PMT dolgunun performansını yakaladığı ve hatta bazı durumlarda geçtiği için, geogrid donatı iyileştirme açısından iyi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.
- Ø Geogrid ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, en iyi performans iki sıra geogrid donatı durumunda ve ilk donatının gömülme derinliği $u/D=0.17$ ile donatılar arası mesafe $h/D=0.17$ olduğunda elde edilmiştir. Bu durumda BCR oranı, güçlendirmesiz CDW ve PMT dolgulu durumlara göre sırası ile %76 ve %33 fazla çıkmıştır. Ayrıca geogrid donatısını gömülme derinliği $u/D=0.17$ olduğu tek sıra geogrid güçlendirmeli durumda da BCR oranı,

güçlendirmesiz CDW ve PMT dolgulu durumlara göre sırası ile %61 ve %21 fazla çıkmıştır. Tasarım aşamasında donatının fayda maliyet oranı dikkate alınarak bu iki düzenden birinin seçilmesi önerilmektedir.

Ø Geogrid ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, donatının çalışmada kullanılan inşaat ve yıkıntı atığı granüler malzeme ile (maksimum dane çapı yaklaşık olarak 20 mm) daha iyi kenetlenebilmesi için üstünde ve altında yaklaşık olarak temel çapının %17'si (yaklaşık 25 mm) kadar kalınlıkta bir tabaka bulunması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca geogrid donatının ilk gömülme derinliği $u/D=17$ 'den düşük olduğu durumda kenetlenmenin az olmasının yanı sıra donatı üzerindeki örtü tabakasının sürüş etkisi de azaldığı için, yükleme sırasında donatının kenarları kalkarak yüzeye çıkmış ve donatı aşırı zarar görmüştür. Geogrid ile güçlendirilmesi planlanan inşaat ve yıkıntı atığı dolguların tasarımında bu faktörlere dikkat edilmesi önerilmektedir.

Ø Ayırma amaçlı geotekstilin (200 g/m^2) etkisi incelendiğinde, geotekstilli ve geotekstilsiz deneylerin gerilme deplasman eğrileri deplasman oranı (s/D) yaklaşık %7-%8'e kadar (yaklaşık 10-12 mm) hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Ayırma amaçlı yerleştirilen geotekstilin deplasman oranı (s/D) yaklaşık %7-%8'e kadar taşıma gücü oranına hemen hemen hiç etkisi olmamıştır. Artan deplasman oranlarında geotekstilli durumun geotekstilsiz duruma göre biraz fazla yük alması ile aralarında az bir fark olduğu görülmüştür. Ayırma amaçlı yerleştirilen geotekstilin yüksek bir deplasman değerlerine kadar taşıma gücü oranına herhangi bir etkisi olmadığı tasarımda göz önünde bulundurulmalıdır.

Ø Geotekstil (600 g/m^2) ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, geotekstil ile güçlendirilen CDW dolgulu durumların aynı dolgu kalınlığına sahip güçlendirmesiz CDW dolgulu duruma göre daha fazla yük aldığı görülmüştür. Geotekstil güçlendirme ile BCR oranındaki artış, $H/D=0.5$ ve $s/D=10$ için %20'dir.

- Ø Geotekstil (600 g/m^2) ile güçlendirmeli deneyler incelendiğinde, geotekstilin üzerindeki dolgu kalınlığı arttıkça geotekstilin güçlendirme etkisinin azaldığı görülmüştür. Dolgu kalınlığı $H/D=0.33$ için, geotekstil ile güçlendirilen CDW dolgulu durum PMT dolgulu duruma göre daha fazla yük almıştır. Ancak dolgu kalınlığı $H/D=0.50$ için, önce geotekstil ile güçlendirilen CDW dolgulu durum PMT dolgulu duruma göre daha fazla yük almasına rağmen (deplasman oranı yaklaşık %8'e kadar) sonrasında artan deplasman oranlarında PMT dolgulu durum geotekstil güçlendirmeli duruma göre daha fazla yük almıştır. Bu sebeple inşaat ve yıkıntı atığı dolgulara geotekstil ile güçlendirmenin, kalınlığı çok az olan dolgulara veya fazla yük gelme potansiyeli olmayan dolgulara bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

5.3. Tekrarlı Plaka Yükleme Deneyleri

- Ø Tekrarlı plaka yükleme deneylerinde, her basınç kademesi için (140 kPa, 280 kPa, 420 kPa ve 560 kPa) ilk yüklemede oluşan yüzey deplasmanı ve o basınç kademesinde yapılan bütün tekrarlı yüklemeler için ayrı ayrı hesap edilen esnek deplasman oranları dolgunu yükleme deplasman davranışını belirlemiştir. Bir yüklemedeki esnek deplasman oranı ne kadar az ise kalıcı deplasman değeri o kadar çok olmaktadır. Tez kapsamında yapılan tekrarlı yüklemeli deneylerde genel olarak düşük basınç kademelerinde esnek deplasman oranları yüksek, kalıcı deplasmanlarsa düşük çıkmıştır. Ancak basınç kademesi arttırıldığında esnek deplasman oranları düşmüş kalıcı deplasman değerleri artmıştır.
- Ø PMT ve CDW dolgulu deneyler kıyaslandığında, 140 kPa ve 280 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemelerde PMT dolgulu durum CDW dolgulu duruma göre sırası ile %22 ve %59 daha az deplasman yapmıştır.

Ayrıca 140 kPa basınç kademesindeki artan tekrarlı yüklerde esnek deplasman oranları birbirine çok yakınken, 280 kPa basınç kademesi için PMT dolgulu durumdaki esnek deplasman oranları CDW dolgulu duruma göre ortalama %9 daha fazla çıkmıştır. Bu sebeple özellikle 280 kPa basınç kademesinde CDW ile PMT dolgu arasında önemli derecede deplasman farkları oluşmuştur. Bu durumda CDW malzemenin hem ilk yüklemelerde hem de esnek davranış açısından PMT malzemesinin performansını yakalaması için bir iyileştirme yapılması gerektiği açıktır.

- Ø CDW dolgu geocell ile güçlendirildiğinde, bütün basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde PMT dolgulu duruma göre daha az deplasman değerleri ve 140 kPa basınç kademesi hariç bütün basınç kademelerinin artan tekrarlı yüklemelerinde daha fazla esnek deplasman oranları elde edilmiştir. Bu sebeple tekrarlı yüklere maruz kalacak inşaat ve yıkıntı atığı dolgularda, geocell donatının iyileştirme açısından iyi bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.
- Ø CDW dolgu yüksekliği $h_c/D=0.17$ olan geocell ile güçlendirildiğinde, 140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemelerde güçlendirmeli durum güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre sırası ile %25, %46 ve %57 daha az deplasman yapmıştır. Ayrıca 140 kPa basınç kademesindeki artan tekrarlı yüklerde esnek deplasman oranları birbirine çok yakınken, 280 kPa ve 420 kPa basınç kademeleri için güçlendirmeli durumdaki esnek deplasman oranları güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre ortalama %6 daha fazla çıkmıştır.
- Ø CDW dolgu yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirildiğinde, 140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemelerde güçlendirmeli durum güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre sırası ile %33, %56 ve %74 daha az deplasman yapmıştır. Ayrıca 140 kPa 280 kPa ve 420 kPa basınç kademeleri için güçlendirmeli durumdaki esnek

deplasman oranları güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre sırası ile ortalama %11 %18 ve %22 daha fazla çıkmıştır.

- Ø CDW dolgu geogrid ile güçlendirildiğinde, bütün basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde PMT dolgulu duruma göre daha az deplasman değerleri ve 140 kPa basınç kademesi hariç bütün basınç kademelerinin artan tekrarlı yüklemelerinde daha fazla esnek deplasman oranları elde edilmiştir. Bu sebeple tekrarlı yüklere maruz kalacak inşaat ve yıkıntı atığı dolgulara, geogrid donatının iyileştirme açısından iyi bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.
- Ø CDW dolgu tek sıra geogrid donatı ile güçlendirildiğinde, 140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemelerde güçlendirmeli durum güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre sırası ile %20, %36 ve %52 daha az deplasman yapmıştır. Ayrıca 140 kPa basınç kademesindeki artan tekrarlı yüklerde esnek deplasman oranları birbirine çok yakınken, 280 kPa ve 420 kPa basınç kademeleri için güçlendirmeli durumdaki esnek deplasman oranları güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre sırası ile ortalama %5 ve %7 daha fazla çıkmıştır.
- Ø CDW dolgu çift sıra geogrid donatı ile güçlendirildiğinde, 140 kPa, 280 kPa ve 420 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemelerde güçlendirmeli durum güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre sırası ile %36, %52 ve %72 daha az deplasman yapmıştır. Ayrıca 140 kPa basınç kademesindeki artan tekrarlı yüklerde esnek deplasman oranları birbirine çok yakınken, 280 kPa ve 420 kPa basınç kademeleri için güçlendirmeli durumdaki esnek deplasman oranları güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre sırası ile ortalama %7 ve %11 daha fazla çıkmıştır.
- Ø Ayırma amaçlı geotekstilin (200 g/m^2) etkisi incelendiğinde, geotekstilsiz CDW dolgulu duruma kıyasla ayırma amaçlı geotekstilin (200 g/m^2) 140 kPa ve 280 kPa basınç kademelerindeki ilk yüklemeler sonucu oluşan deplasmanlara pek bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ayrıca 140 kPa basınç

kademesindeki artan tekrarlı yüklerde esnek deplasman oranları birbirine çok yakın çıkmıştır. Ancak 280 kPa basınç kademesinde ayırma amaçlı geotekstil (200 g/m^2) yerleştirilen durumdaki esnek deplasman oranları geoteksilsiz CDW dolgulu duruma göre ortalama %8 daha fazla çıkmıştır. Bu sebeple ayırma amaçlı geotekstil yerleştirilen durumda, 280 kPa basınç kademesinin artan yüklemelerindeki deplasman değerleri geoteksilsiz CDW dolgulu duruma göre biraz daha az olmuştur.

Ø CDW dolgu geotekstil (600 g/m^2) ile güçlendirildiğinde, 140 kPa basınç kademesindeki ilk yüklemelerde güçlendirmeli durum güçlendirmesiz PMT dolgulu duruma göre %4 daha az deplasman yaparken, ilerleyen basınç kademelerinin ilk yüklemelerinde güçlendirmesiz PMT dolgulu durum geotekstil güçlendirmeli duruma göre daha az deplasman yapmıştır. Ayrıca 140 kPa ve 280 kPa basınç kademelerindeki artan tekrarlı yüklerde esnek deplasman oranları birbirine çok yakın çıkmıştır. CDW dolgu geotekstil ile güçlendirildiğinde güçlendirmesiz PMT dolguya benzer esnek deplasman oranlarına sahip olmasına rağmen ilk yüklemelerdeki deplasman oranları daha düşük olduğu için PMT dolgulu durum geotekstil güçlendirmeli duruma göre daha iyi bir performans göstermiştir. Bu sebeple tekrarlı yüklere maruz inşaat ve yıkıntı atığı dolgulara geotekstil ile güçlendirmenin, düşük basınç değerine sahip tekrarlı yük gelme potansiyeli olan dolgulara bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Ø Tekrarlı yükleme durumunda bütün güçlendirmeli durumlar (geocell, geogrid ve geotekstil) düşünüldüğünde, bütün basınç kademelerinde yüksekliği $h_c/D=0.33$ olan geocell ile güçlendirmeli durumda en düşük kalıcı deplasman değerleri ve en yüksek esnek deplasman oranları elde edilmiştir. Bu sebeple özellikle tekrarlı yükleme maruz inşaat ve yıkıntı atığı malzemeden inşa edilecek dolgular için geocell donatı ile güçlendirme önerilmektedir

5.4. Statik ve Tekrarlı Plaka Yükleme Deneylerinin Birlikte Değerlendirilmesi

- Ø Statik ve tekrarlı plaka yükleme deneyleri sonucunda, inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun performansı doğal agrega dolgunun performansına göre biraz düşük çıkmıştır. Ancak her iki yükleme durumu içinde az bir geosentetik iyileştirme ile (ince bir geocell veya tek sıra geogrid vb.) inşaat ve yıkıntı atığı dolgunun performansının doğal agrega dolgu performansını geçebildiği görülmüştür. Ayrıca güçlendirme amaçlı geotekstil donatı ile, düşük yük düzeylerinde doğal agrega dolgunun performansının yakalanabildiği fark edilmiştir.
- Ø Statik ve tekrarlı yüklemeli deneyler incelendiğinde, statik yüklemdeki %5 (s/D) deplasman oranına karşılık gelen basınç değerinde artan tekrarlı yüklemeler (ilk yüklemeden sonraki aynı basınçta yapılan dokuz yükleme) sonucu oluşan yüzey deplasman değerleri oldukça düşük iken, %10 (s/D) deplasman oranına karşılık basınç değerinde deplasmanların fazla bir şekilde arttığı görülmüştür. Statik yüklemdeki %15 (s/D) deplasman oranından fazla basınç değerinde artan tekrarlı yüklemeler sonucunda ise deplasmanların çok aşırı arttığı (göçme oluştuğu) belirlenmiştir. Bu durumda tekrarlı yüklemelere maruz kalacak inşaat ve yıkıntı atığı dolgulara bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

5.5. İstatistik Analizler

- Ø İstatistiksel analizler sonucunda, statik yüklemeli deneylerden elde edilen taşıma gücü oranları ile farklı değişkenler arasında, tekrarlı yüklemeli deneylerde de elde edilen toplam kalıcı deplasmanlar ile farklı değişkenler arasında güçlü ilişkiler kurulabilmektedir. Tez çalışmasında yapılan üç farklı istatistiksel analiz yöntemi (MLR, MNLR ve M5T) düşünüldüğünde, Statik

yüklemeli geogrid ile güçlendirilmiş deneylerin dışındaki bütün durumlarda R^2 değerleri %85'in üzerinde ve birçok durumda %95'in üzerindedir.

- Ø MLR, MNLR ve M5T istatistik analizleri kıyaslandığında, tekrarlı yüklemeli deneylerden geotekstil güçlendirmeli durum dışında bütün durumlarda M5T (karar ağacı) istatistik analizinde daha yüksek korelasyon katsayısı ve daha düşük ortalama mutlak hata elde edilmiştir. M5T (karar ağacı) istatistik analizi ile diğer istatistiksel analizlere göre, değişkenler arasında daha güçlü ilişkiler elde edilebildiği görülmüştür. Dolayısı ile bu tez çalışmasında M5T istatistik analiz sonucunda elde edilen denklemler önerilmektedir.
- Ø MLR ve MNLR istatistik analizleri kıyaslandığında, tekrarlı yüklemeli deneylerde ve güçlendirmesiz statik yüklemeli deneylerde MNLR analizi ile MLR analizine göre daha yüksek korelasyon katsayısı ve daha düşük ortalama mutlak hata elde edilmiştir. Statik yüklemeli güçlendirmeli durumlarda ise MNLR ve MLR analizlerinin korelasyon katsayısı ve ortalama mutlak hata değerleri benzer çıkmıştır.

5.6. Analitik Çözümler

- Ø Statik yüklemeli durumda güçlendirmesiz deneyler için yapılan iki farklı analitik çözüm sonucunda, özellikle dolgu kalınlığının nispeten düşük olduğu durumlarda deney sonuçları ile analitik çözümlerin yakınsadığı görülmüştür. Dolgu kalınlığının nispeten yüksek olduğu durumlarda deneylerde elde edilen sonuçların analitik çözümlerden biraz fazla olduğu fark edilmiştir. Dolgu kalınlığının nispeten fazla olduğu durumlarda oluşan bu farkın, ölçek (boyut) etkisinin yönlendirmesiyle temel altındaki gerileme bölgesinin dolgunun içinde kalması ve zayıf zemine iletilen

gerilmelerin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak dolgu kalınlığının az olduğu durumların bu etkilerden nispeten daha uzak olduğu tahmin edilmektedir.

5.7. Kısıtlamalar

Statik yüklemeli deneylerde; yükün verildiği model temelin boyutları, gerçek yapı temellerinin boyutları düşünüldüğünde küçük kalmaktadır. Bu boyut farkının elde edilen deney sonuçları ve tasarım parametrelerini bir miktar etkileyebileceği düşünülmektedir. Tekrarlı yüklemeli deneylerde ise, yükün verildiği model temelin boyutları, özellikle trafik yüklemeleri düşünüldüğünde tek tekerleğin temas alanı boyutlarına yakındır. Ancak çift tekerlekli araçlardaki, tekerleklerin altındaki gerilme bölgesi girişimlerinin ve dönen tekerleğin oluşturduğu gerilme değişimlerinin deney sonuçlarını bir miktar etkiliye bileceği tahmin edilmektedir. Ancak elde edilen deney sonuçlarının inşaat ve yıkıntı atığı dolgular üzerinde yapılacak ileri tam ölçekli araştırmaları teşvik edeceği ve bu araştırmalar için yararlı bir temel oluşturacağı tahmin edilmektedir.

5.8. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışma esas alınarak, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için sunulan öneriler aşağıda yer almaktadır.

- Ø Tez çalışması sonuçları, statik ve tekrarlı yükler altında geosentetiklerle güçlendirilen inşaat ve yıkıntı atığı dolgulardan doğal agrega dolgular kadar performans elde edilebileceğini göstermiştir. Ancak ileri çalışmalarda iki ve üç boyutlu sayısal analizler yapılarak parametrelerin daha detaylı araştırılması gerektiği düşünülmektedir.
- Ø Statik ve tekrarlı yüklemeler altında yapılacak tam ölçekli arazi deneylerinin konuya büyük ölçüde ışık tutabileceği düşünülmektedir.

- Ø Güçlendirmeli ve güçlendirmesiz inşaat yıkıntı atığı dolgular üzerinde uzun süreli stabilite (long term stability) analizleri yapılarak dolgunun davranışının araştırılması gerektiği düşünülmektedir.
- Ø Ülkemizdeki inşaat ve yıkıntı atıkları üzerinde yapılacak sızıntı suyu konsantrasyonu analizleri ile bu atıklardan inşa edilecek dolguların çevreye etkileri araştırılmalıdır.



KAYNAKLAR

- AASHTO, 2006. Standard Specification for Geotextile Specification For Highway Applications (M 288), Washington, DC, USA, 22s.
- Abu-Farsakh M. Y., Chen Q., 2011. Evaluation of Geogrid Base Reinforcement in Flexible Pavement Using Cyclic Plate Load Testing, *International Journal of Pavement Engineering*, 12(3):275–288.
- Acharya, B. 2011. Experimental Study on Geocell-Reinforced Flexible Pavements with Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases under Cyclic Loading. MSc. Thesis, Tribhuvan University, Institute of Engineering, Nepal, 123s.
- Adams M., Collin J., 1997. Large Model Spread Footing Load Tests on Geosynthetic Reinforced Soil Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1):66-72.
- Akinmusuru, J.O. Akinbolade, J.A., 1981. Stability of Loading Footings on Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 107:819-827.
- Al-Qadi, I.L., Loulizi, A., Janajreh, I., Freeman, T.E., 2006. Pavement Response to Dual and New Wide-Base Tires at the Same Tire Pressure. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1806:38-47.
- Arnold, G.K., 2004. Rutting of Granular Pavements. Doctor of Philosophy, University of Nottingham, Nottingham, UK, 440s.
- Arulrajah A., Disfani M. M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N., 2014c. Physical Properties and Shear Strength Responses of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Base/Subbase Applications. *Construction and Building Materials*, 58:245–257.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan, T., Bo, M. W., 2011. Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(10): 1444–1452.

- Arulrajah A., Piratheepan J., Disfani M. M., Bo M. W., 2013a. Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8):1077-1088.
- Arulrajah A., Piratheepan J., Disfani M. M., 2014a. Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2):349-357.
- Arulrajah, A., Rahman, M.A., Piratheepan, J., Bo, M.W., Imteaz, M.A., 2013b. Interface Shear Strength Testing of Geogrid-Reinforced Construction Anddemolition Materials. *Adv. Civil Eng. Mater*, 2(1):189–200.
- Arulrajah, A., Rahman, M.A., Piratheepan, J., Bo, M.W., Imteaz, M.A., 2014b. Evaluation of Interface Shear Strength Properties of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials Using A Modified Large Scale Direct Sheartesting Apparatus. *J. Mater. Civil Eng.*, 26:974–982.
- ASTM, 2009. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (D 422-63). West Conshohocken, USA.
- ASTM, 2007. Standard Specification for Materials for Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses (D 1241-07). West Conshohocken, USA.
- ASTM, 2001. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (C 127 – 01). West Conshohocken, USA.
- ASTM, 2001. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (C 128 – 01). West Conshohocken, USA.
- ASTM, 2003. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (C 131–03). West Conshohocken, USA.

- ASTM, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (D 1557). West Conshohocken, USA.
- ASTM, 1999. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils (D 1883–99). West Conshohocken, USA.
- ASTM, 2009. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (D 698-00). West Conshohocken, USA.
- ASTM, 2009. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer1 (D 854-02). West Conshohocken, USA.
- Ayan V., Limbachiya M.C., Omer J.R., Azadani S.M.N., 2014. Compaction Assessment of Recycled Aggregates for Use in Unbound Subbase Application. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(2):169-174.
- Aydilek A.H., Zhang, Y. 2016. Quantification of System-wide Life Cycle Benefits of Recycled Materials in Highways, National Transportation Center at Maryland, Department of Transportation, Final Report, Maryland, USA.
- Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J.R., Poon, C.S., 2012. Statistical Analysis of Recycled Aggregates Derived from Different Sources for Sub-Base Applications. *Constr. Build. Mater.*, 28:129–138.
- Bennert, T., Papp, W., Maher, A., Gucunski, N., 2000. Utilization of Construction and Demolition Debris under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1714, 33–39.
- Benson, C.H., Edil, T.B., 2009. Quantifying the Benefits of Using Coal Combustion Products in Sustainable Construction. Electric Power Research Institute, Report No. 1020552, Palo Alto, CA, USA.
- Binquet, J., Lee, K.L., 1975a. Bearing Capacity Tests on Reinforced Earth Slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 101(12):1241-1255.
- Binquet, J., Lee, K.L., 1975b. Bearing Capacity Tests on Reinforced Earth Slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 101(12):1257-1276.

- Blankenagel B. J., 2005. Characterization of Recycled Concrete for Use As Pavement Base Material. Master of Science, Brigham Young University, Department of Civil and Environmental Engineering, Provo, Utah, USA, 66s.
- Briaud, J.L., Jeanjean, P., 1994. Load Settlement Curve Method for Spread Footings on Sand. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 2:1774-1804.
- Brown, S.F., 1996. 36th Rankine Lecture: Soil Mechanics in Pavement Engineering. *Géotechnique*, 46(3):383-426.
- Brown, S.F., Pappin, J.W., 1981. Analysis of Pavements with Granular Bases. *Transportation Research Record*, 810:17-23.
- BS EN, 2009. Tests for Geometrical Properties of Aggregates Part 11: Classification Test for the Constituents of Coarse Recycled Aggregate (933-11). London, U.K.
- Cakir, O., 2014. A Study on the Use of Demolition Waste in Concrete Production. Yildiz Technical University, Internal Report, Istanbul, Turkey.
- Chang, D. T., Chang, C. H., Pai, S.W., 2007. Investigation of Bearing Capacity and Dynamic-Elastic Behavior of Mechanical Stabilization of Sandy Subgrade Using Geocells. *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, January 21-25, Washington, D.C., USA.
- Chen, Q., 2007. An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation. PhD Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, USA, 344s.
- Cerni G., Cardone F., Bocci M., 2012. Permanent Deformation Behaviour of Unbound Recycled Mixtures. *Construction and Building Materials*, 37:573-580.
- Das B.M., 2009. *Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement*. CRC Pres LLC, New York, 334s.

- Das, B.M., Shin, E.C. Omar, M.T., 1994. The Bearing Capacity of Surface Strip Foundations on Geogrid Reinforced Sand and Clay–A Comparative Study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 12(1):1-14.
- Dash S.K., Bora M.C., 2013. Improved Performance of Soft Clay Foundations Using Stone Columns and Geocell-Sand Mattress. *Geotextiles and Geomembranes* 41:26-35.
- Dash, S.K., Sireesh, S., Sitharam, T.G., 2003. Model Studies on Circular Footing Supported on Geocell Reinforced Sand Underlain by Soft Clay. *Geotextiles and Geomembranes*, (21):197-219.
- Dawson, A., Kolisoja P., 2006. Managing Rutting in Low Volume Roads. *ROADDEX II, Final Report Part 2.1.*, Rovaniemi, Finland
- De Beer, E.E., 1970. Experimental Determination of the Shape Factors and the Bearing Capacity Factors of Sand. *Geotechnique*, 20(4):387-411.
- Demir, A. 2011. Yumuşak Kil Zemin Üzerinde Güçlendirilmiş Stabilize Dolguya Oturan Yüzeysel Temellerin Analizi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 443s.
- Demir, A., Laman, M., Yıldız, A., Ornek, M., 2013. Large Scale Field Tests on Geogrid-Reinforced Granular Fill Underlain By Clay Soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 38:1-15.
- Demir, A., Tutumluer, E., Laman, M., Yıldız, A., Ok, B., Sarıcı, T., Dost, Y., Hacak, B., Epsileli, S.E., Bağrıaçık, B., 2016. Geosentetiklerle Güçlendirilmiş Esnek Yol Kaplamalarının Tekrarlı Yükler Altındaki Performansının Değerlendirilmesi. T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Disfani, M.M., Arulrajah, A., Haghighi, H., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., 2014. Flexural Beam Fatigue Strength Evaluation Of Crushed Brick As a Supplementary Material in Cement Stabilized Recycled Concrete Aggregates. *Constr. Build.Mater.*, 68:667–676.

- Frank, E., Wang, Y., Inglis, S., Holmes, G., Witten, I. H., 1998. Using Model Trees for Classification. *Machine Learning*, 32(1):63–76.
- Gabr A. R., Cameron D. A., 2012. Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 24(6):754-764.
- Gabr, M.A., Hart, H., 2000. Elastic Modulus of Geogrid Reinforced Sand Using Plate Load Tests. Technical Note, *Geotechnical Testing Journal*.
- Giroud, J.P., Noiray, L., 1981. Geotextile-Reinforced Unpaved Road Design. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(GT9):1233-1254.
- Giroud, J.P., Han, J., 2004a. Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. I. Development of design method, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(8):775-786.
- Giroud, J.P., Han, J., 2004b. Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. II. Calibration and applications, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (8):787-797.
- Gupta, R., 2009. A Study of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavement System. PhD Thesis, The University of Texas at Austin, USA, 281s.
- Han, J., P.E., Sanat, K. P., Xiaoming, Y., Chandra, M., Dov, L., Robert, L., Parsons, P.E., 2011. Performance of Geocell-Reinforced RAP Bases over Weak Subgrade under Full-Scale Moving Wheel Loads, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11):1525-1534.
- Han, J, Yang, X, Leshchinsky, D, Parsons, R L, Rosen, A., 2008. Numerical analysis for Mechanisms of a Geocell-Reinforced Base Under a Vertical Load. In: *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, June 17-20, Shanghai, China, 741-746.
- Hanna, A.M., Meyerhof, G.G. 1980. Design Charts for Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Sand Overlying Soft Clay. *Can. Geotech. J.*, 17:300-303.

- Hegde, A., Sitharam, T.G., 2014. Effect of Infill Materials on the Performance of Geocell Reinforced Soft Clay Beds. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 1-11.
- Hegde, A., Sitharam, T.G., 2016. Behaviour of Geocell Reinforced Soft Clay Bed Subjected to Incremental Cyclic Loading. *Geomechanics and Engineering*, 10(4):405-422.
- Heperkan, H., Kesgin U., 2003. *Mühendisler için Sayısal Yöntemler*, Mart Yayıncılık, İstanbul, 1026s.
- Herrador, R., Pérez, P., Garach, L., Ordóñez, J., 2012. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. *J. Transp. Eng.*, 138(2):182–190.
- Howard, A.K., 1977. Laboratory Classification of Soil, Unified classification system, *Earth Sciences Training Manual 4*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, USA.
- Huang, C.C., Tatsuoka, K., 1990. Bearing Capacity of Reinforced Horizontal Sandy Ground. *Geotextile and Geomembranes*, (9):51-82.
- Hsieh, C., Mao, L., 2005. A Bench-Scale Performance Test For Evaluation of the Geosynthetic Reinforcement Effects on Granular Base Courses. In: *GRI-18 Geosynthetics Research and Development in Progress Geofrontiers*, January 24-26, Austin, TX, USA.
- Jewell, R.A., 1996. *Soil Reinforcement with Geotextiles*, Special Publication 123. Construction Industry Research and Information Association, London, England 332s.
- Jiménez J. R., Ayuso J., Agrela F., López M., Galvín A. P., 2012a. Utilisation of Unbound Recycled Aggregates from Selected CDW in Unpaved Rural Roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58:88–97.
- Jiménez J.R., Ayuso J., Galvín A. P., López M., Agrela F., 2012b. Use of Mixed Recycled Aggregates with a Low Embodied Energy From Non-Selected

- CDW in Unpaved Rural Roads. *Construction and Building Materials*, 34:34-43.
- Kaya, Y. Z., Mamak, M., Üneş, F., Demirci, M., 2017. Evapotranspiration Prediction Using M5T Method and Ritchie Equation for St. Johns, FL, USA, *Environmental Engineering 10th International Conference*, April 27-28, Lithuania.
- Kazmee H., Tutumluer E., 2015. "Evaluation of Aggregate Subgrade Materials Used as Pavement Subgrade/Granular Subbase", *Illinois Center for Transportation, Research Report FHWA-ICT-15-013*, Illinois, USA.
- Keskin, M.S., 2009. Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 368s.
- Kisi, O., 2015. Pan Evaporation Modeling Using Least Square Support Vector Machine, Multivariate Adaptive Regression Splines and M5 Model Tree. *Journal of Hydrology*, 528:312–320.
- Kocaman, M., 2008. Zemin Etütlerinde Geoteknik ve Jeofizik Yöntemlerin Kullanılması ve Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 74s.
- KTŞ, 2013. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Leite, F.C., Motta, R.S., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L., 2011. Laboratory Evaluation of Recycled Construction and Demolition Waste for Pavements. *Constr. Build.Mater.*, 25:2972–2979.
- Lekarp, F., Dawson, A., 1998. Modelling Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. *Construction and Building Materials*, 12(1):9-18.
- Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A., 2000. State of the Art – II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1):76-83.

- Love, J.P., Burd, H.J., Milligan, G.W.E., Houlsby, G.T., 1987. Analytical and Model Studies of Reinforcement of a Layer of Granular Fill on a Soft Clay Subgrade. *Canadian Geotechnical Journal* 24(4):611–622.
- Lutenegger, A.J., Adams, M.T., 1998. Bearing Capacity of Footings on Compacted Sand. *Proceedings of the 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Mar 9-12, St. Louis, Missouri, USA, 1216-1224.
- Lyons, C.K., Fannin, J., 2006. A Comparison of Two Design Methods for Unpaved Roads Reinforced with Geogrids. *Canadian Geotechnical Journal* 43:1389-1394.
- Nataatmadja, A., Tan, Y., 2001. Resilient Response of Recycled Concrete Road Aggregates. *J. Transp. Eng.*, 127:450–453.
- Neves, J., Freire, A.C., Roque, A.J., Martins, I., Antunes, M.L., Faria, G., 2013. Utilization of Recycled Materials in Unbound Granular Layers Validated by Experimental Test Sections. In: *Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, June 25-27, Trondheim, Norway.
- Mazlum S. E., 2014. Ekonomik Ömrünü Tamamlamış Asfalt Kaplamaların Kazınarak Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Mehrijardi T., Tafreshi, S.N., Dawson A.R., 2012. Combined Use of Geocell Reinforcement and Rubber Soilmixtures to Improve Performance of Buried Pipes. *Geotextiles and Geomembranes*, 34:116-130.
- Mekkawy, M.M., White, D.J., Jähren, C.T., Suleiman, M.T., 2010. Performance Problems and Stabilization Techniques for Granular Shoulders. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(2):159-169.
- Meyerhof, G.G. 1973. Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay. *Can. Geotech. J.*, 11:223-229.

- Mısır, G., 2008. Granüler Stabilize Dolgu ile İyileştirilen Yumuşak Kil Zeminlere Oturan Temellerin Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 124s.
- Michalowski, R.L., 2004. Limit Loads on Reinforced Foundation Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 130(4):381-390.
- Mitchell, J. K., Kao, T. C., Kavazanjian, E. 1979. Analysis of Grid Cell Reinforced Pavement Bases. Geotechnical Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Report GL-79-8, Vicksburg, MS. USA.
- Molenaar, A., van Niekerk, A., 2002. Effects of Gradation, Composition, and Degree of Compaction on The Mechanical Characteristics of Recycled Unbound Materials. *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 1787:73–82.
- Milligan, G.W.E., Jewell, R.A., Houlsby, G.T., Burd, H.J., 1989. A New Approach to Design of Unpaved Roads. Part I. *Ground Engineering*, 22(3):25–29.
- Ok, B., Demir, A., 2018. Yapım Yıkım Atıklarının Yol Temellerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1):224-236.
- O'Mahony, M.M., Milligan, G.W.E., 1991. Use of Recycled Materials in Subbase Layers. *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 1310:73–80.
- Omar, M.T., Das, B.M., Puri, V.K., Yen, S.C., 1993. Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations on Sand with Geogrid Reinforcement. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(3):545-549.
- Örnek, M. 2009. Yumuşak Kil Zeminlerin Geogridle Güçlendirilmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 318s.
- Pal, M., Deswal, S., 2009. M5 Model Tree Based Modelling of Reference Evapotranspiration. *Hydrological Processes*, 23(10):1437–1443.
- Palmeira, E.M., Antunes, L.G.S., 2010. Large Scale Tests on Geosynthetic Reinforced Unpaved Roads Subjected to Surface Maintenance. *Geotextiles and Geomembranes*, 28:547-558.

- Park, T., 2003. Application of Construction and Building Debris as Base and Subbase Materials in Rigid Pavement. *J. Transp. Eng.*, 129:558–563.
- Pérez P., Agrela F., Herrador R., Ordoñez J., 2013. Application of Cement-Treated Recycled Materials in the Construction of a Section of Road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*, 44:593–599.
- Plaistow, L., Dawson, A.R., 1995. Non-linear Aggregate Behaviour in Flexible Pavements in Unbound Aggregates in Roads. Dept. Civil Eng'ng, Univ. Nottingham, UK.
- Pokharel, S.K., 2010. Experimental Study on Geocell-Reinforced Bases under Static and Dynamic Loading. PhD Thesis, University of Kansas, KS, USA, 316s.
- Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahmi, I. 2010. Investigation of Factors Influencing Behavior of Single Geocell-Reinforced Bases under Static Loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 28:570-578.
- Poon, C.S., Chan, D., 2006. Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushedclay Brick As Unbound Road Sub-Base. *Constr. Build. Mater.*, 20:578–585.
- Quinlan, J. R. 1992. Learning with Continuous Classes. *Machine Learning*, 92: 343–48.
- Rahimikhoob, A., Asadi, M., Mashal, M., 2013. A Comparison between Conventional and M5 Model Tree Methods for Converting Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration for Semi-Arid Region. *Water Resources Management*, 27(14): 4815–4826.
- Rahman MA, Arulrajah A, Piratheepan J, Bo MW, Imteaz MA., 2014. Resilient Modulus and Permanent Deformation Responses of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials. *J Mater Civ Eng.*, 26(3):512-519.
- Rahman MA, Imteaz MA, Arulrajah A, Piratheepan J, Disfani MM., 2015. Recycled Construction and Demolition Materials in Permeable Pavement

- Systems: Geotechnical and Hydraulic Characteristics. *J Cleaner Prod.*, 90:183–94.
- Saeed, A. 2008. Performance-Related Tests of Recycled Aggregates For Use in Unbound Pavement Layers. Transportation Research Board of the National Academies, NCHRP Report No. 598, Vicksburg, MS, USA.
- Sangiorgi C., Lantieri C., Dondi G., 2013. Construction and Demolition Waste Recycling: an Application for Road Construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6):530-537.
- Santos, E.C.G., Vilar, O.M., 2008. Use of Recycled Construction and Demolition Wastes (RCDW) As Backfill of Reinforced Soil Structures. In: *Proceedings of the Fourth European Geosynthetics Conference, EUROGEO 4*, September 7–10, Edinburg, Scotland.
- Santos, E.C.G., Palmeira, E.M., Bathurst, R.J., 2013. Behaviour of a Geogrid Reinforced Wall Built with Recycled Construction and Demolition Waste Backfill on a Collapsible Foundation. *Geotext. Geomembr.* 39:9–19.
- Sawwaf, E.M., Nazir, A.K., 2010. Behavior of Repeatedly Loaded Rectangular Footings Resting on Reinforced Sand. *Alexandria Engineering Journal*, 49:349–356.
- Sharp R., Booker J., 1984. Shakedown of Pavements under Moving Surface Loads, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 1:1-14.
- Sireesh S., Sitharam T.G., Dash S. K. 2009. Bearing Capacity of Circular Footing on Geocell–Sand Mattress Overlying Clay Bed with Void. *Geotextiles and Geomembranes*, 27:89-97.
- Sitharam, T.G., Hegde, A. 2013. Design and Construction of Geocell Foundation to Support the Embankment on Settled Red Mud. *Geotextiles and Geomembranes*, 41:55-63.
- Sitharam T.G., Sireesh S., 2007. Effects of Base Geogrid on Geocell-Reinforced Foundation Beds. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 1(3):207-216.

- Sivakumar, V., McKinley, J. D. Ferguson, D., 2004. Reuse of Construction Waste: Performance under Repeated Loading. *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.*, 157(2):91–96.
- Sivrikaya, O., 2004. Standart Penetrasyon Deneyi ile Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi ve Türkiye’deki Uygulaması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Souci G., 2007. Laboratory Characterization Of Geogrid-Reinforced Unbound Granular Material For Use In Flexible Pavement Structures, Master of Science Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, USA, 95s.
- Subaida, E. A., Chandrakaran S., Sankar N., 2009. Laboratory Performance of Unpaved Roads Reinforced with Woven Coir Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 27:204–210.
- Tafreshi, S.N.M., Dawson, A.R., 2012. A Comparison of Static and Cyclic Loading Responses of Foundations on Geocell-Reinforced Sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 32:55-68.
- Tafreshi, S.N.M., Zarei, S.E., Soltanpour, Y., 2008. Cyclic Loading on Foundation to Evaluate the Coefficient of Elastic Uniform Compression of Sand. *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Taşçı, A., 2010. Piroliz Edilmiş Atık Araç Lastiklerinden Elde Edilen Atık Yağ ve Karbon Siyahı ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 125s.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York, 510s.
- Thakur, J.K., Han J., Parsons R.L., 2013. Creep Behavior of Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement Bases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(10):1533-1542.
- Thakur, J.K., Han J., Pokharel S.K., Parsons R.L., 2012. Performance of Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases over Weak Subgrade under Cyclic Plate Loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 35:14-24.

- Thom, N.H., 2008. Laboratory Testing of Ground Grid Reinforced Pavements. Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, UK.
- Trautmann, C.H., Kulhawy, F.H., 1998. Uplift Load-Displacement Behavior of Spread Foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114(2):168-183.
- Tutumluer, E., Al-Qadi, I.L., Kwon, J., Dessouky, S., 2006. Geogrid Base Reinforced Asphalt Pavements: Analysis Approach and Benefits, Invited Keynote Paper. In *Proceedings of the 2nd National Geosynthetics Conference of the Turkish Chapter of International Geosynthetics Society*, Bogazici University, November 16-17, Istanbul, Turkey,
- TS, 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması (1500), Ankara, Türkiye.
- TS, 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Tane Şekli Tayini-Yassılık Endeksi (9582 EN 933-3). Ankara, Türkiye.
- TS, 1988. İnşaat Mühendisliğinde Temel Zemini Özelliklerinin Yerinde Ölçümü (5744). Ankara, Türkiye.
- Uz, V. E., 2012. Sathi Kaplamalardaki Kalıcı Deformasyona Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta 190s.
- Vesic, A.S., 1973. Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, 99(SM1):45-73.
- Vidal H., 1968. La Terre Arme Annales de L'Intitut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Paris, France.
- Vieira C. S. ve Pereira P.M., 2015a. Damage Induced by Recycled Construction and Demolition Wastes on the Short-Term Tensile Behaviour of Two Geosynthetics. *Transportation Geotechnics*, 4:64-75.

- Vieira C. S. ve Pereira P.M., 2015b. Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Geotechnical Applications: A review. Resources. Conservation and Recycling, 103:192–204.
- Wayne, M.H., Han, J., and Akins, K., 1998. The Design of Geosynthetic Reinforced Foundations. Proceedings of ASCE's 1998 Annual Convention and Exposition, ASCE Geotechnical Special Publication, 76:1-18.
- Werkmeister, S., Dawson, A.R., Wellner, F., 2001. Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and The Shakedown Theory. Journal of Transportation Research Board, 1757:75-81.
- Werkmeister, S., Dawson, A.R., Wellner, F., 2005. Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials. International Journal of Road Materials and Pavement Design, 6:31-51.
- Yang X., 2010. Numerical Analyses of Geocell Reinforced Granular Soils under Static Repeated Loads. Ph.D. Thesis, University of Kansas, Lawrence K.S., USA, 193s.
- Yang, X., Han, J., Parsons, R.L., Leshchinsky, D., 2010. Three-dimensional Numerical Modeling of Single Geocell-Reinforced Sand. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 4(2):233-240.
- Yang, X., Han, J., Pokharel, S.K., Manandhar, C., Parsons, R.L., Leshchinsky, D., Halahmi, I., 2012. Accelerated Pavement Testing of Unpaved Roads with Geocell-Reinforced Sand Bases. Geotextiles and Geomembranes, 95–103.
- Yıldız, A., 2002. Donatılı Zeminler Üzerine Oturan Yüzeysel Temellerin Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yuu, J., Han, J., Rosen, A., Parsons, R.L., Leshchinsky, D. 2008. Technical Review of Geocell-Reinforced Base Courses over Weak Subgrade. Proceedings of the First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, March 2-5, Cancún, Mexico, 1022-1030.

Zhang, L., Zhao, M., Shi, C., Zhao H., 2010. Bearing Capacity of Geocell Reinforcement in Embankment Engineering. Geotextiles and Geomembranes, 28:475-482.

<http://www.cnnturk.com/>

<http://www.hurriyet.com.tr/>

<http://www.ordu.bel.tr/>

<http://www.milliyet.com.tr/>

<https://atikyonetimi.ibb.istanbul/>

<http://en.re-birth.eu/>

<http://www.geogridfabric.com/>

ÖZGEÇMİŞ

10/03/1988 yılında Isparta’da doğdu. İlk, orta okul öğrenimini Trabzon’da, lise öğrenimini Adana’da tamamladı. Lisans eğitimine 2007 başladı ve 2011 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden bölüm birincisi, fakülte üçüncüsü olarak mezun oldu. Yüksek Lisans eğitimine 2012 yılında başladı, 2013 yılında Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve 2014 yılında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi ile Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüleri Ortak Yüksek Lisans Programı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ndan mezun oldu. 2014 yılında Çukurova Üniversitesi ve Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüleri İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. Halen aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya ve doktora eğitimine devam etmektedir.