



**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yakup ÖNAL

**GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ
KARAYOLU TEMEL TABAKASININ
DAVRANIŞININ TEKRARLI YÜKLER
ALTINDA İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANİYE – 2021

**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARAYOLU
TEMEL TABAKASININ DAVRANIŞININ TEKRARLI
YÜKLER ALTINDA İNCELENMESİ**



Yakup ÖNAL

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE
OCAK-2021**

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Yakup ÖNAL



ÖZET

GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARAYOLU TEMEL TABAKASININ DAVRANIŞININ TEKRARLI YÜKLER ALTINDA İNCELENMESİ

Yakup ÖNAL

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Mustafa ÇALIŞICI

2. Danışman: Prof. Dr. Cafer KAYADELEN

Ocak 2021, 87 sayfa

Bu çalışmada, esnek üstyapıların tasarımında kullanılan temel tabakası üzerinde birtakım deneyler yapılmıştır. Tekrarlı yükler altında geocell ve geogridin temel tabakasındaki potansiyel faydasının incelenmesi için beş deney yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları toplam, kalıcı ve elastik deformasyon, Trafik Fayda Oranı (TBR), Tekerlek İzi Azalma Oranı (RDR) ve elastik deformasyon yüzdesi açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları ışığında, geocell ve geogrid donatılı temel tabakaları donatısız duruma göre daha iyi performans göstermiştir. Buna ek olarak, temel tabakasının kalınlığı arttıkça kalıcı deformasyondaki azalmanın önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. 300 mm temel tabakası kalınlığındaki geogrid ve geocell donatılı temellerin 17 mm kalıcı deformasyondaki TBR değerleri sırasıyla 5.78 ve 8.27 iken 2000 yük döngüsü sonundaki RDR değerleri sırasıyla % 43.36 ve % 48.27'dir. Ayrıca temel tabakasına geocell ve geogridin dahil edilmesiyle elastik deformasyonlar donatısız duruma göre daha da belirgin hale gelmiştir. Ancak geogrid ile güçlendirilmiş temel tabakası geocell ile güçlendirilmiş duruma göre daha elastik davranış sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Geocell, Geogrid, Tekrarlı Yük, Elastik Deformasyon, Kalıcı Deformasyon

ABSTRACT

INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF GEOSYNTHETIC REINFORCED HIGHWAY BASE LAYER UNDER REPEATED LOADS

Yakup ÖNAL

M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mustafa ÇALIŞICI

2. Supervisor: Prof. Dr. Cafer KAYADELEN

January 2021, 87 pages

In this study, a series of experiments have been conducted on the base layer used in the design of flexible pavements. Five experiments were carried out to examine the potential benefit of geocell and geogrid reinforcement in the base course under repeated loads. The results of this study are evaluated in the sense of total, permanent and elastic deformation, Traffic Benefit Ratio (TBR), Rut Depth Reduction (RDR) and percentage of elastic deformation. In the light of the results of this study, geocell and geogrid-reinforced base layers performed well as compared with the unreinforced section. Furthermore, it was observed that as the thickness of the base layer increases, reduction in permanent deformation increases remarkably. While TBR values of 300 mm thick geogrid and geocell-reinforced base layers at 17 mm permanent deformation are 5.78 and 8.27, respectively, RDR values of those are 43.36% and 48.27% at the end of 2000 load cycles, respectively. Furthermore, the inclusion of geocell and geogrid in the base layer, elastic deformations have become more pronounced compared to the unreinforced section. However, the geogrid reinforced base layer exhibited more elastic behaviour than the geocell-reinforced base.

Key Words: Geocell, Geogrid, Repeated Load, Elastic Deformation, Permanent Deformation



Çok kıymetli aileme...

TEŞEKKÜR

Her zaman bana destek olan, yardımlarını esirgemeyen kıymetli aileme, babama, anneme ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütülmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocalarım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Mustafa ÇALIŞICI ve Prof. Dr. Cafer KAYADELEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında yardımlarını eksik etmeyen Dr. Öğretim Üyesi Gökhan ALTAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Yükleme çerçevesinin imalatında emeği geçen Ali AYUR'a ve kontrol sisteminin yapımını gerçekleştiren Öğr. Gör. Sadık KÜÇÜK'e teşekkürlerimi sunarım.

Karayolları Genel Müdürlüğü'nden çalışmada kullanılan temel malzemesinin temin edilmesinde destek olan İnş. Müh. Çağrı ÇİFTÇİ'ye teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında yardımlarını eksik etmeyen Arş. Gör. İbrahim KARATAŞ, Arş. Gör. Mitat ÖZTÜRK ve Taha Ökkeş ÖNAL'a teşekkür ederim.

Ayrıca bölümdeki çalışmalarım süresince beni destekleyen İnşaat Mühendisliği Öğretim Üyesi hocalarıma, öğretim görevlisi ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, deneysel çalışmalarda kullanılan geocell malzemesinin temini için Kartuş Plastik firmasına ve geotekstil malzemesinin temini için Geoplas firmasına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İTHAF SAYFASI	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
4.1 300 mm Tabaka Kalınlığındaki Güçlendirilmemiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi..	40
4.2 300 mm Tabaka Kalınlığındaki Geocell ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi	44
4.3 300 mm Tabaka Kalınlığındaki Geogrid ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi	51
4.4 200 mm Tabaka Kalınlığındaki Geocell ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi	58
4.5 200 mm Tabaka Kalınlığındaki Geogrid ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi	65
4.6 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	72
4.6.1 Toplam Deformasyon ve Kalıcı Deformasyon.....	72
4.6.1.1 Trafik Fayda Oranı (Traffic Benefit Ratio) (TBR)	75
4.6.1.2 Tekerlek İzi Azalma Oranı (Rut Depth Reduction) (RDR).....	77
4.6.2 Elastik Deformasyon	78
4.6.2.1 Elastik Deformasyon Yüzdesi	79
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
5.1 Sonuçlar	82
5.2 Öneriler.....	83
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Taşıma kapasitesi ve oranları [23]	17
Çizelge 3.1. Kum zeminin Özellikleri.....	22
Çizelge 3.2. Temel zemininin özellikleri	25
Çizelge 3.3. Geocell malzemesinin özellikleri.....	32
Çizelge 3.4. Geogrid malzemesinin özellikleri	33
Çizelge 3.5. Geotekstil malzemesinin özellikleri.....	34
Çizelge 3.6. Deney programı	35
Çizelge 4.1. 2000 yük döngüsü sonundaki toplam ve kalıcı deformasyon değeri (mm).....	75
Çizelge 4.2. 17 mm kalıcı deformasyon değerindeki TBR değerleri.....	76
Çizelge 4.3. 2000 yük döngüsü sonundaki RDR değerleri	78
Çizelge 4.4. Elastik deformasyonun %98'e ulaştığı yük döngü sayısı	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Farklı temel malzemelerinin tekrarlı yük altında a)kalıcı deformasyonlarının b) elastik deformasyon yüzdesinin karşılaştırılması [15]	4
Şekil 2.2. a) Kümülatif kalıcı deformasyon b) Trafik fayda oranı (TBR) c) Tekerlek izi azaltma (RDR) [12]	5
Şekil 2.3. a) Optimum geocell yüksekliği b) Geocellin optimum gömülme derinliğinin belirlenmesi [17].....	8
Şekil 2.4. Farklı alt temel tabaka kalınlıklarında geocell yüksekliği ile RPS (Plastik deformasyonda azalma)’nin değişimi a) 0.25 m, b) 0.30 m c) 0.35 m [18].....	10
Şekil 2.5. a) Deney kesitleri, b) Döngülere karşılık gelen tekerlek izi [21].....	14
Şekil 2.6. a) Taşıma kapasitesi – oturma ilişkisi, b) Geogrid türleri, c) geocell ile güçlendirilmiş temel yatağının geometrik parametreleri [22].....	16
Şekil 2.7. Basınç oturma ilişkisi [23]	17
Şekil 2.8. a) Geocell donatılandırmanın şematik görünüşü b) Taşıma kapasitesi – oturma ilişkisi [24]	19
Şekil 2.9. a) Yük- oturma ilişkisi, b) Taban zeminindeki düşey basınç değerleri [25].....	20
Şekil 3.1. Deney kasası	21
Şekil 3.2. Kum zeminin dane çapı dağılım eğrisi [27].....	22
Şekil 3.3. Elek analizi deneyi.....	23
Şekil 3.4. Temel malzemesinin dane çapı dağılım eğrisi.....	23
Şekil 3.5. Modifiye proktor deneyi	24
Şekil 3.6. Kompaksiyon eğrisi	25
Şekil 3.7. CBR deneyi.....	26
Şekil 3.8. CBR eğrisi.....	27
Şekil 3.9. Deney kasasında yüksekliklerin işaretlenmesi.....	27
Şekil 3.10. Kum zeminin yerleştirilmesi ve geotekstilin örtülmesi	28
Şekil 3.11. 300 mm temel tabakasına sahip geocell ile güçlendirilmiş deney	30
Şekil 3.12. Yükleme sistemi.....	31
Şekil 3.13. Uygulanan yükün şekli	31

Şekil 3.14. Geocell malzemesinin ebatları [31]	32
Şekil 3.15. Deneylerde kullanılan geogrid malzemesi.....	33
Şekil 3.16. Deneylerde kullanılan geotekstil malzemesi	34
Şekil 3.17. 300 mm temel kalınlığındaki güçlendirilmemiş deney.....	36
Şekil 3.18. 300 mm temel kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş deney	37
Şekil 3.19. 300 mm temel kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş deney	38
Şekil 3.20. 200 mm temel kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş deney	38
Şekil 3.21. 200 mm temel kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş deney	39
Şekil 4.1. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM)	41
Şekil 4.2. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM).....	42
Şekil 4.3. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM).....	43
Şekil 4.4. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM)	43
Şekil 4.5. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM).....	44
Şekil 4.6. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)	45
Şekil 4.7. Kalıcı deformasyon – Yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3).....	46
Şekil 4.8. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3).....	47
Şekil 4.9. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3).....	47
Şekil 4.10. Toplam deformasyon - yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3).....	48
Şekil 4.11. Kalıcı deformasyon - yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3).....	49
Şekil 4.12. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3).....	49
Şekil 4.13. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3).....	50
Şekil 4.14. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)	51
Şekil 4.15. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)	52
Şekil 4.16. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3).....	53
Şekil 4.17. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)	54
Şekil 4.18. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)	54
Şekil 4.19. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3).....	55
Şekil 4.20. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3).....	56

Şekil 4.21. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)	57
Şekil 4.22. Elastik deformasyon yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)	57
Şekil 4.23. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)	58
Şekil 4.24. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	59
Şekil 4.25. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	60
Şekil 4.26. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	61
Şekil 4.27. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	61
Şekil 4.28. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	62
Şekil 4.29. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	63
Şekil 4.30. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	64
Şekil 4.31. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	64
Şekil 4.32. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)	65
Şekil 4.33. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	66
Şekil 4.34. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	67
Şekil 4.35. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	68
Şekil 4.36. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	68
Şekil 4.37. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	69
Şekil 4.38. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	70
Şekil 4.39. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	71
Şekil 4.40. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	71
Şekil 4.41. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)	72
Şekil 4.42. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi	73
Şekil 4.43. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi	74
Şekil 4.44. Trafik Fayda Oranı (TBR)	76
Şekil 4.45. Tekerlek izi azalma oranı (RDR)	77
Şekil 4.46. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi	79
Şekil 4.47. İlk 200 yük döngüsü için elastik deformasyon yüzdesi	80
Şekil 4.48. İlk 200 yük döngüsü için elastik deformasyon yüzdesi	81

SİMGELER ve KISALTMALAR

CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı	(%)
c	Kohezyon	(kPa)
C _c	Eğrilik katsayısı	
C _u	Üniformluk katsayısı	
CDW	İnşaat yıkıntı atığı	
e _{min}	Minimum boşluk oranı	
e _{maks}	Maksimum boşluk oranı	
GCG2	200 mm tabaka kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş temel	
GCG3	300 mm tabaka kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş temel	
GGG2	200 mm tabaka kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş temel	
GGG3	300 mm tabaka kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş temel	
GM	300 mm tabaka kalınlığındaki güçlendirilmemiş temel	
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	
KR	Kansas Nehir Kumu	
M _R	Esneklik Modülü	(MPa)
NPA	Yeni Polimer Alaşım	
PMT	Plent miks temel	
QW	Taş ocağı atığı	
RDR	Tekerle İzi Azalma Oranı	
TBR	Trafik Fayda Oranı	
u	Gömülme derinliği	(mm)
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi	
w _{opt}	Optimum su muhtevası	
γ _{k,maks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık	(g/cm ³)
γ _{k,min}	Minimum kuru birim hacim ağırlık	(g/cm ³)

1. GİRİŞ

Karayolu üstyapısı farklı tabakaların bir araya gelmesiyle meydana gelmektedir. Buradaki tabakalar proje ömrü boyunca emniyetli bir şekilde hizmet vermelidir. Karayolu üstyapısını esnek üstyapılar ve rijit üstyapılar olmak üzere iki başlık altında incelemek mümkündür. Esnek üstyapılar, ilk maliyetinin rijit üstyapılara nazaran daha az olması sebebiyle ülkemizde daha çok tercih edilmektedir. Karayolu esnek üstyapısı ele alındığında trafiği güvenli olarak taşımasının yanında ekonomik de olmalıdır. Esnek üstyapıların tabakaları incelendiğinde yukarıdan aşağı doğru; kaplama, temel, alt temel ve doğal zemin olarak sıralanır. Alt temel tabakası tesviye yüzeyi üzerine serilir ve bu tabaka genellikle belli bir granülometriye sahip olan incesi az, kum, çakıl, taş kırığı, yüksek fırın cürufu gibi granüler malzemeden oluşur. Temel tabakası ise alt temel ile kaplama tabakası arasında inşa edilen fiziksel özellikleri ve granülometrisi bakımından alt temel tabakasında kullanılan malzemelerden daha iyi olan doğal kum, doğal çakıl veya kırmataş ile az miktarda bağlayıcı ince maddeden oluşan tabakadır. Yol gövdesinde büyük öneme sahip olan temel tabakasının asli görevi kaplamadan gelen trafik yüklerini alt temel tabakası ile birlikte taban zemini üzerine yaymak ve trafikten kaynaklı darbe etkilerini azaltmaktır [1].

Son yıllarda yol yapımının artması ve karayolu ulaşımına olan talebin artmasıyla beraber yollardan geçen trafik yoğunluğu da artmaktadır. Yapılan karayollarının bu yoğunluğu tekerlek izi ve yorulma çatlakları gibi tipik yenilme durumları oluşmaksızın karşılaması gerekmektedir. Bu yenilme durumları düşünüldüğünde karayolu kaplamalarının tasarlanmasında en önemli hususlardan biri tabakaların kalınlığıdır. Yol üstyapısı düşünüldüğünde aşağıdan yukarıya çıkıldıkça tabakaların yapım maliyetleri artmaktadır. Tasarlanan bu tabakaların kalınlığının artışıyla beraber maliyet de önemli ölçüde artmaktadır. Çünkü tabaka kalınlığı arttıkça kullanılan malzeme miktarı da artacaktır. Dolayısıyla maliyet de önemli ölçüde artacaktır. Bu durum dikkate alındığında ekonomi bir diğer önemli husustur.

Bu kapsamda yol üstyapısının taşıma gücünü arttırmak ve maliyetini azaltmak için çeşitli çalışmalar mevcuttur. Yol üstyapısının taşıma kapasitesinin çimento [2, 3], kireç [4] ve bitüm [5] gibi katkı maddeleri ile arttırmak mümkündür. Diğer taraftan, 1970’li

yıllardan beri zemin iyileştirme metotlarından biri olarak kullanılan geosentetikler, kaplamalı ve kaplamasız yolların performanslarının iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Geosentetiklerin yol inşasında temelin taşıma gücünü arttırması, temel kalınlığını azaltması, kaplamanın hizmet ömrünü arttırması, maliyeti düşürmesi ve gerçekleşecek olan bakımının minimize edilmesi gibi faydaları mevcuttur [6]. Geosentetik türlerinden biri olan geocell, üç boyutlu ve bal peteği hücreleri formundadır ve bu hücrelerin birbirine bağlanmasıyla oluşturulur. Geocell diğer geleneksel düzlemsel (geogrid ve geotekstil vb.) geosentetiklerden, üç boyutlu geometriye sahip olmasından ve içerisindeki malzemenin üç eksenli hareketini kısıtlamasından dolayı daha efektiftir [7-9]. Ayrıca geocell, yükleme altında hücre içerisinde malzemelerin yanıl yer değıştirmesini azaltması [10-12], üzerine gelen yükü daha geniş bir alana dağıtması [13] ve içerisindeki malzemenin kohezif özelliğinin artmasına yardımcı olması [14] gibi faydalar sunar.

Literatürde diğer geleneksel düzlemsel geosentetik türlerinden olan geotekstil ve geogrid gibi malzemeler üzerine çok sayıda çalışma ve standartlar mevcuttur. Ancak geosentetik türlerinden biri olan geocelller ile alakalı çalışmalar geogrid ve geotekstile nazaran daha sınırlıdır ve standartların oluşturulması ve geliştirilmesi için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır.

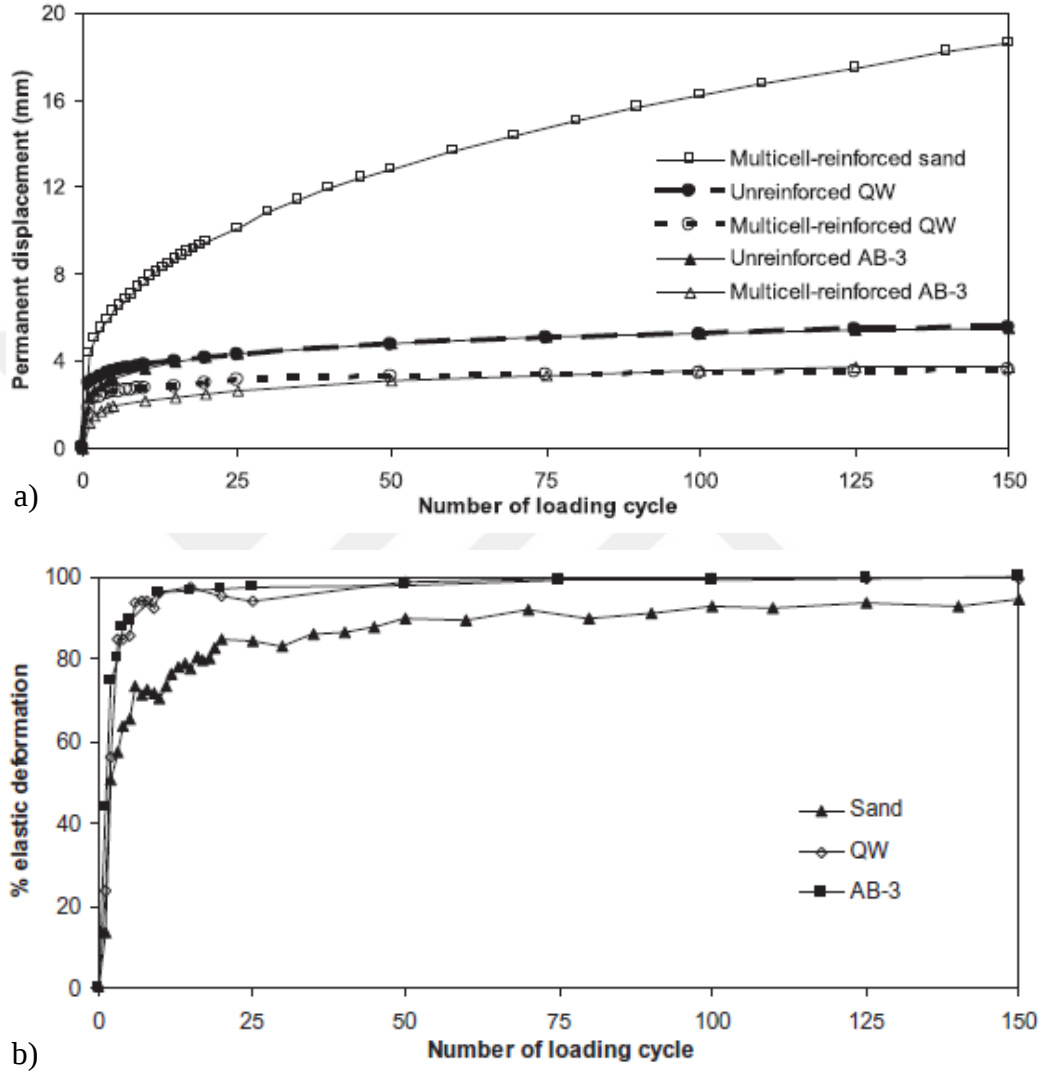
Bu çalışmada kum taban zeminin üzerinde bulunan 200 mm ve 300 mm yüksekliğindeki geocell ve georid ile güçlendirilen karayolu temel tabakasının tekrarlı yükler altındaki davranış deneysel olarak incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Ulaşım ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında karşılaşılan sorunlara gelişen teknoloji ile yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler her geçen gün artmaktadır. Taşıma kapasitesi düşük taban zemini üzerine inşa edilen üstyapılarda trafik nedeniyle gelen yüklerin taban zeminin taşıma kapasitesini aşmaması gerekmektedir. Bu bağlamda, üstyapı tabaka kalınlıklarının artması söz konusudur. Böylece, doğal kaynaklara daha fazla ihtiyaç olmakla beraber maliyet de önemli ölçüde artmaktadır. Bu doğrultuda, son yıllarda zemini iyileştirmek için geosentetikler kullanılmaya başlamıştır. Geotekstil, geogrid ve geocell gibi geosentetik çeşitlerinin üstyapı üzerindeki iyileştirme etkilerinin incelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur. Üstyapı tasarımında geosentetik kullanımı ile alakalı standartların oluşturulması ve var olan standartların geliştirilmesi için daha fazla deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda literatürde bulunan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Pokharel vd. [15] yaptıkları orta ölçekli deneysel çalışmada temel tabakasını incelemişlerdir. Deneylerde üç farklı tip dolgu malzemesi (Kansas nehir kumu (KR), taş ocağı atığı (QW), ve AB-3 agregası (kıрма kireç taşı)) kullanmışlardır. 0.8 m × 0.8 m genişliğinde ve 0.12 m yüksekliğindeki ahşap deney kasasında tekrarlı yükler altındaki davranışı kalıcı deformasyon, trafik fayda oranı (TBR) ve elastik deformasyon açısından incelenmiştir. Deneylerde kullanılan yük protokolü 1 dakika/döngü hızında 15 s minimum yükten maksimum yüke yükseltilecek, 20 s maksimum yük uygulanacak, 15 s maksimum yükten minimum yüke azaltılacak ve 20 s dinlenme olacak şekilde trapez formunda uygulanmıştır. Deneyler elastik deformasyon yüzdesi sabit bir değere yakınsadığında sonlandırılmıştır. Geocelli ve geocellsiz durum kümülatif deformasyon açısından kıyaslandığında QW ve AB-3 temelleri için sırasıyla 1.55 ve 1.40 oranında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 2.1.a.'dan da görülebileceği gibi geocellin varlığı kalıcı deformasyonu geocellsiz duruma göre önemli ölçüde azaltmıştır. 3 mm kalıcı deformasyona denk gelen TBR oranı incelendiğinde QW ve AB-3 için sırasıyla 12 ve 12.5 olduğu bulunmuştur. Bu deneyde 3 mm deformasyona ulaşılan kadar geocell bulunmayan duruma kıyasla geocell kullanılan durumda QW ve AB-3 için sırasıyla 12 ve 12.5 kat daha fazla yükleme anlamına gelmektedir. Elastik deformasyon açısından incelendiğinde ise

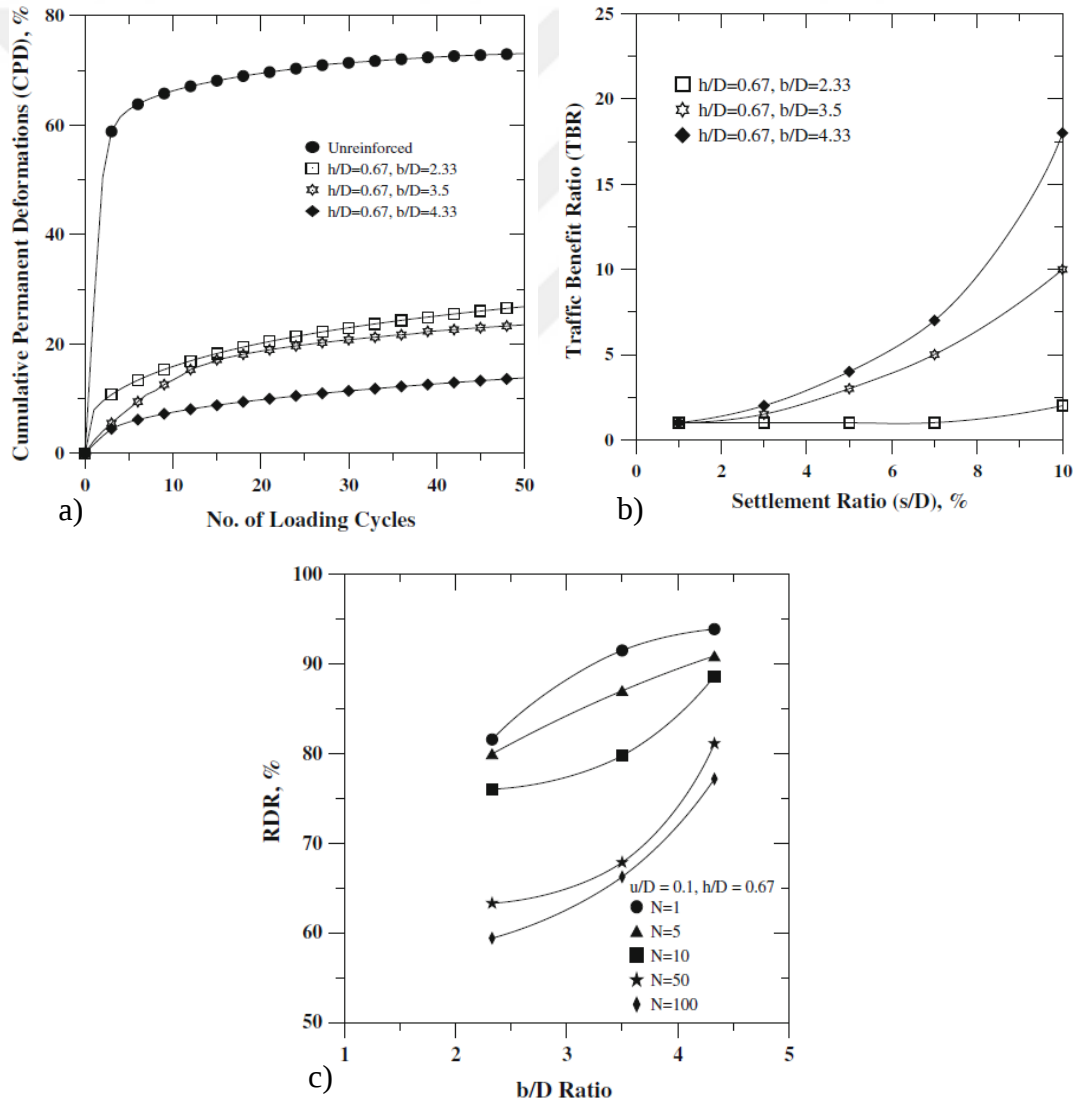
geocell ile güçlendirilen durumda elastik deformasyonlar güçlendirilmeyen duruma kıyasla artmıştır. Şekil 2.1.b.'den de anlaşılacağı gibi QW ve AB-3 temellerinde 10. döngüden sonra elastik deformasyonun toplam deformasyondaki payı %90 gibi bir değere yakınsamaktadır.



Şekil 2.1. Farklı temel malzemelerinin tekrarlı yük altında a)kalıcı deformasyonlarının b) elastik deformasyon yüzdesinin karşılaştırılması [15]

Saride vd. [12] geocell ile güçlendirilmiş kum taban zemini üzerinde büyük ölçekli deneyler yapmışlardır. Çalışmada 1×1×1 m boyutlarındaki çelik kasa kullanmışlardır. Kum taban zemini üzerine eşdeğer dingil yükünü temsil etmesi için 150 mm çapa ve 15 mm kalınlığa sahip çelik plakaya yük uygulayarak tekrarlı yükler altında geocell ile güçlendirilmiş kum taban zemininde geocell yüksekliğinin (75 mm-100 mm-150 mm) ve geocell genişliğinin (350 mm-525 mm-650 mm) etkisini incelemişlerdir.

Performans iyileşmesini; trafik fayda oranı (TBR), kümülatif kalıcı deformasyon (CPD), taban zemini reaksiyon modülü (k_s), esneklik modülü (M_R) ve tekerlek izi azalma oranı (RDR) açısından irdelemişlerdir. Deneylerde geocell yüksekliğini 100 mm’de sabit tutarak geocell genişliğinin etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.2.’den elde ettikleri kümülatif plastik deformasyon, TBR ve RDR sonuçlarına göre optimum geocell genişliğini 650 mm olarak belirlemişlerdir. Geocell yüksekliğinin etkisini ise optimum olarak belirlenen 650 mm geocell genişliğini sabit tutarak 75-100-150 mm geocell yüksekliklerinde deneyler yaparak incelemişlerdir. Buradan elde edilen CPD, TBR ve RDR değerlerine göre optimum geocell yüksekliği 100 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.2. a) Kümülatif kalıcı deformasyon b) Trafik fayda oranı (TBR) c) Tekerlek izi azaltma (RDR) [12]

Pokharel vd. [16] nehir kumu (KR) ve taşocağı atığı (QW) olmak üzere iki farklı tip temel malzemesi ile dört farklı tip tek hücreli geocell kullanarak 150 mm çaplı çelik plaka vasıtasıyla statik yükleme altında geocellin şeklinin etkisi, geocell özelliklerinin etkisi, gömülme derinliğinin etkisi, geocell yüksekliğinin etkisi ve dolgu malzemesinin etkisi gibi faktörleri değerlendirdikleri bir deneysel çalışma yapmışlardır. Deneylerde deney kasasının boyutunun ölçek etkisi olup olmadığını görmek için 605 × 605 mm (Kasa A) ve 800 mm × 800 mm (Kasa B) boyutlarında iki farklı deney kasası üzerinde güçlendirilmemiş ve geocell ile güçlendirilmiş Kansas nehir kumu kullanılan 4 adet deney gerçekleştirmişlerdir ve kayda değer bir farklılığın olmamasından dolayı kalan deneylere Kasa A ile devam ettirmişlerdir. Geocellin şeklinin etkisini inceledikleri deneylerde deneyden önce eliptik şekle sahip geocellin deneyden sonra neredeyse dairesel bir şekil aldığını belirtmişlerdir. Çapı 205 mm olan neredeyse dairesel şekle sahip geocell üzerinde yaptıkları deneyden sonra, geocellin şeklinde önemli bir değişikliğin olmadığını belirtmişlerdir. Deney sonuçlarına göre dairesel olan geocellin eliptik olan geocelle göre daha iyi davranış gösterdiğini söylemişlerdir. Ayrıca geocellerin nihai taşıma kapasitesi ve rijitliğinin elastisite modülleri ile doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Geocellin özelliklerinin etkisini araştırmak için Kansas nehir kumu içine gömülü 4 farklı tip geocell ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş deneyler gerçekleştirmişlerdir. Güçlendirilmemiş deneyi karşılaştırma yapmak için referans olarak almışlardır. Tüm deneylerde geocell ile güçlendirilmiş temel tabakası yaklaşık 5 mm deformasyonda başarısız olmuştur. Geocell ile iyileşmeyi matematiksel olarak ifade etmek için rijitlikteki ve nihai taşıma kapasitesindeki gelişim faktörü üzerinden yorumlar yapmışlardır. Geocell ile güçlendirmenin şekline ve tipine bağlı olarak rijitliği 1.3-2.0 oranında ve nihai taşıma kapasitesini ise 1.5-2.5 oranında iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca NPA (Neoloy polymeric alloy) geocellerin HDPE (High density polyethylene) geocellerden daha iyi gelişim gösterdiğini söylemişlerdir. Sonuç olarak en olumlu davranışın çekme mukavemeti yüksek olan NPA geocellden elde edildiğini ve geocellerin gelişim faktörleriyle elastisite modüllerinin arasında lineer bir ilişki olduğunun altını çizmişlerdir.

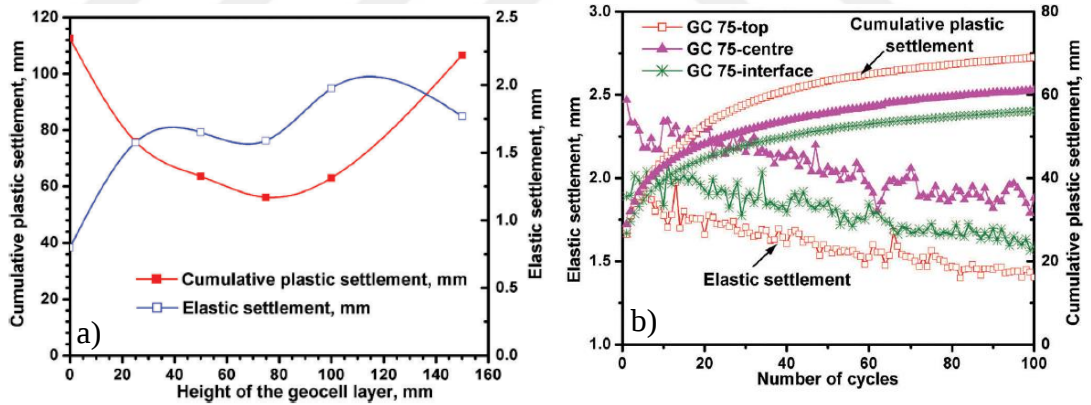
Gömülme derinliğinin etkisini araştırmak istediklerinde ise tek hücreli geocellerin üzerinde dışı kum ile çevrenilmiş (confined) ve çevrenilmemiş (unconfined) olmak üzere farklı geocell türleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Kum ile çevrenilmemiş

deneylerde başarısızlığın kaynak boyunca olduğunu ve rijitliğin çevrelenenlere göre daha az olduğunu belirtmişlerdir. Kum ile çevrelenmiş olan deneylerde ise geocell hücrelerinin bozulmamış olduğunu belirtmişlerdir. Geocell yüksekliğinin etkisini incelemek için 120 mm ve 170 mm temel yüksekliğine sahip güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş olmak üzere 4 deney gerçekleştirmişlerdir. 100 mm ve iki adet 75 mm (150mm) yüksekliğe sahip geocellerin kullanıldığı deneylerde tabaka kalınlığı yüksek olan temellerin daha iyi performans göstermesi gerekirken tam tersi bir durumla karşılaştıklarını belirtip bu durumun sert tabandan dolayı gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Zayıf taban zemini kullanılması durumunda beklenen performansın gerçekleşeceğini vurgulamışlardır. Kansas nehir kumu (KR) ve taşocağı atığı (QW) kullanarak dolgu malzemesinin etkisini araştırdıklarında ise daha zayıf olan KR kullanılması durumunda geocellin sağladığı katkının daha belirgin olduğunu söylemişlerdir. Geocellin katkılarında biri olan granüler malzemelere kohezyon sağlayıp yanal sınırlama etkisi kazandırmak olduğu için temel tabakasında var olan kohezyonun geocellin sağladığı faydayı minimize ettiğini belirtmişlerdir. QW kullanılması durumundaki kayda değer bir iyileşmenin meydana gelmemesini bununla ilişkilendirmişlerdir. Tek hücreli ve çok hücreli durumu karşılaştırmak için ise Kasa B'yi ve dolgu malzemesi olarak KR kullanarak tek hücre ve 9 hücre durumunu irdemişlerdir. Bu deneyin sonucunda ise tek hücre durumuna göre çoklu hücre durumunda daha iyi performans elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Nair ve Latha [17] $750 \times 750 \times 620$ mm boyutlarında kare kesitli çelik deney kasasında 400 mm yüksekliğinde taban zemini tabakası ve 200 mm yüksekliğinde granüler alt temel tabakası üzerinde çapı 150 mm ve kalınlığı 10 mm olan dairesel çelik plaka vasıtasıyla maksimum basınç 300 kPa ve minimum basınç 5 kPa olacak şekilde tekrarlı yükler altında 11 model deney gerçekleştirmişlerdir. Tüm deneylerde iki tabaka arasına malzeme geçişini engellemek amacıyla geotekstil kullanılmışlardır. Deneylerden biri güçlendirme yapılmadan, ikisi zayıf ve güçlü geogrid kullanılarak, bir tanesi iki eksenli geogrid kullanılarak oluşturulan geocell ile, beş tanesi farklı yüksekliklerde (25-75-100-150 mm) hazır olarak üretilen geoceller ile ve diğer ikisi 75 mm yüksekliğindeki geoceller ile geocellin konumunun etkisini araştırmak için alt temel tabakasının orta ve üst kısmına yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Zayıf geogrid ile oluşturulan geocell, güçlü geogrid ve zayıf geogrid kullanılarak yapılan deneyleri

kendi aralarında değerlendirdiklerinde, güçlendirilmeyen kısma göre plastik deformasyon açısından daha iyi, elastik deformasyon açısından ise güçlendirilen kısımların daha elastik davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. Şekil 2.3.a.'dan anlaşılabileceği gibi geocell malzemesinin yüksekliğini incelediklerinde ise en iyi performansı yüksekliği 75 mm olan geocell ile yapılan deneyden elde ettiklerini belirtmişlerdir. Geocell yüksekliğinin daha fazla artırıldığında gömülme derinliği azalacağından performansın düştüğünü belirtmişlerdir.

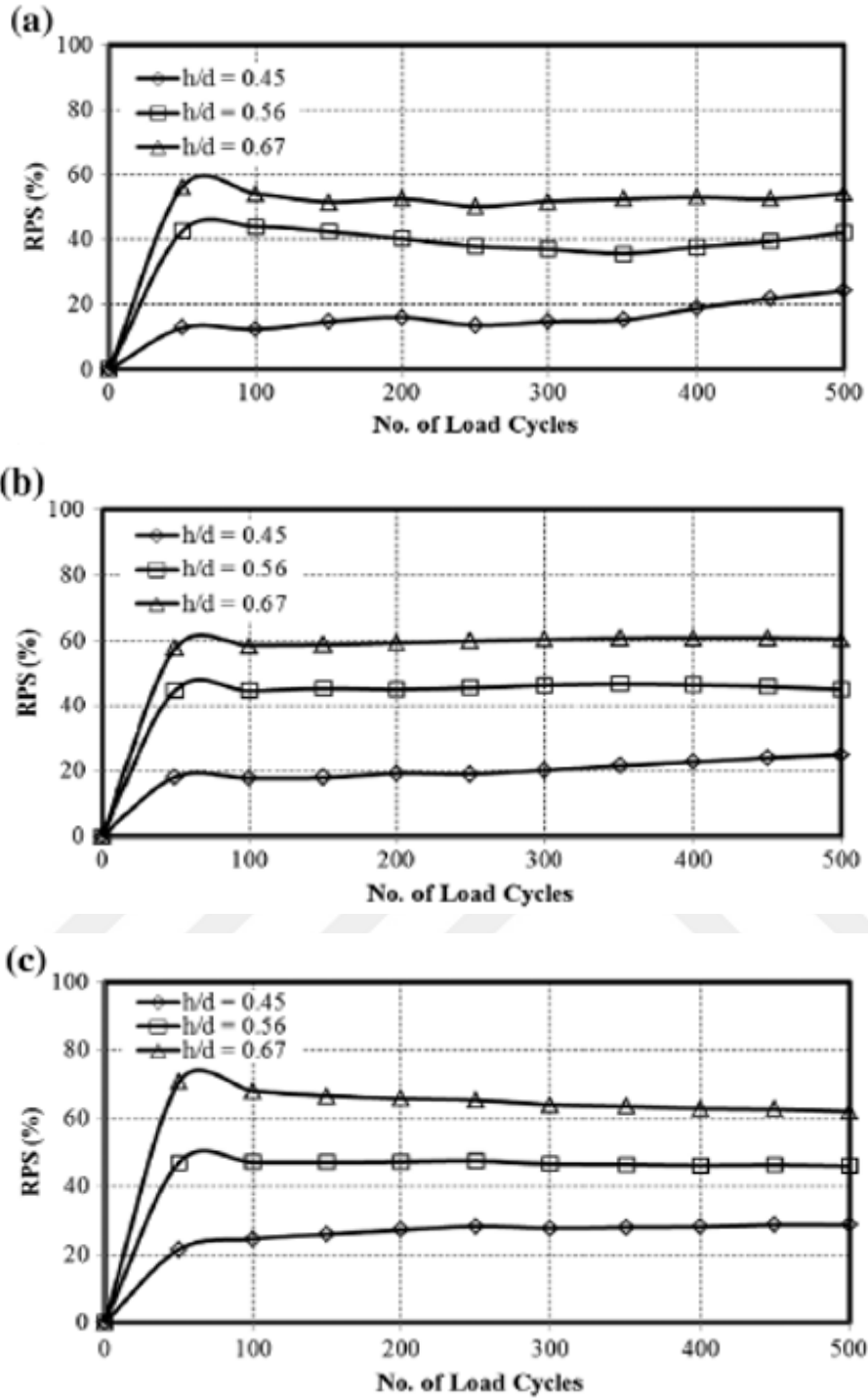
Alt temel tabakasında geocellin konumunun etkisini inceledikleri deneylerde yüksekliği 75 mm olan geocell kullanılmıştır. Geocellin konumu ara yüzeyde, alt temel tabakasının merkezinde ve yüzeyden 25 mm aşağıda olacak şekilde 3 farklı konumun etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.3.b.'de kümülatif plastik deformasyonlar açısından incelediklerinde en düşük plastik deformasyonu geocelli ara yüzeye yerleştirdikleri deneyden elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ayrıca geocellin alt temel tabakasının ortasında ve yukarı konumda kullanıldığı deney sonuçlarında plastik deformasyonların daha fazla çıkmasının sebebini ise gömülme derinliğinin azalmasıyla açıklamışlardır.



Şekil 2.3. a) Optimum geocell yüksekliği b) Geocellin optimum gömülme derinliğinin belirlenmesi [17]

Mamatha ve Dinesh [18] 2×2×2 m boyutlarında çelik kasanın içini 1 m yüksekliğinde iyi derecelenmiş kum ile doldurmuşlar ve üzerine 1×1 m kare kesitli çelik çerçeve yardımıyla 0.3 m yüksekliğinde taban zemini tabakasını black cotton soil ile doldurmuşlardır. Tip 2 alt temel malzemesini ise taban zemini üzerine değişken yüksekliklerde (0.25-0.30-0.35 m) ve alt temel tabakasının üzerine ise 5 cm yüksekliğinde yüzey tabakası serilmiştir. Geocell ile güçlendirilen deneylerde geocell,

taban zemini ile alt temel tabakasının ara yüzeyine yerleştirilmiştir. Alt temel tabakasının kalınlığının değiştiği bu deneylerde üç farklı yükseklikte geocell kullanılmıştır (100-125-150 mm). Tekerlek basıncını temsil etmek için tekrarlı yükün maksimum basıncının 760 kPa olduğu haversine yükleme tipi 500 yük döngüsü olacak şekilde kullanılmıştır. Deney sonucunda güçlendirilmemiş duruma kıyasla geocell kullanılan durumlarda geocellin etkisinin toplam deformasyon ve plastik deformasyon açısından kayda değer derecede olduğundan bahsetmişlerdir. Ayrıca toplam deformasyon ve plastik deformasyonların alt temel tabaka kalınlığının ve geocell yüksekliğinin arttığı durumlarda azaldığını belirtmişlerdir. Geocellin etkisini sayısal olarak belirtmek için plastik deformasyonda azalma oranını (RPS) kullanmışlardır. Şekil 2.4.'ten görülebileceği gibi 50. döngüde bu oranın 100 mm'lik geocell için %13-21, 125 mm'lik geocell için %39-47 ve 150 mm'lik geocell için ise %51-71 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kaplama yüzeyinin dalgalanmasının geocellin varlığı ile azaldığını ve 150 mm'lik geocell kullanıldığında ve alt temel tabakası kalınlığının 0.35 m olduğunda en aza indiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.4. Farklı alt temel tabaka kalınlıklarında geocell yüksekliği ile RPS (Plastik deformasyonda azalma)'nin değişimi a) 0.25 m, b) 0.30 m c) 0.35 m [18]

George vd. [19] $1.83 \times 1.83 \times 1.52$ m boyutlarındaki çelik kasada 300 mm yüksekliğindeki kil taban zemini üzerine 100 mm ve 150 mm olmak üzere iki farklı yükseklikteki geocellin kullanılmasıyla dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) malzemesinin temel malzemesi olarak kullanılmasını incelemek üzere 6 model deney

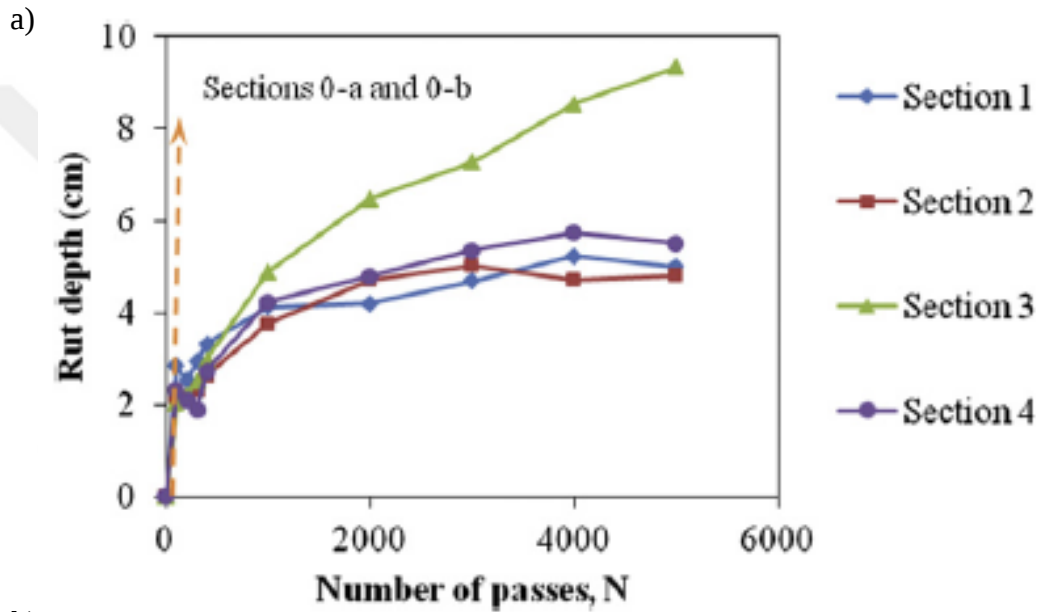
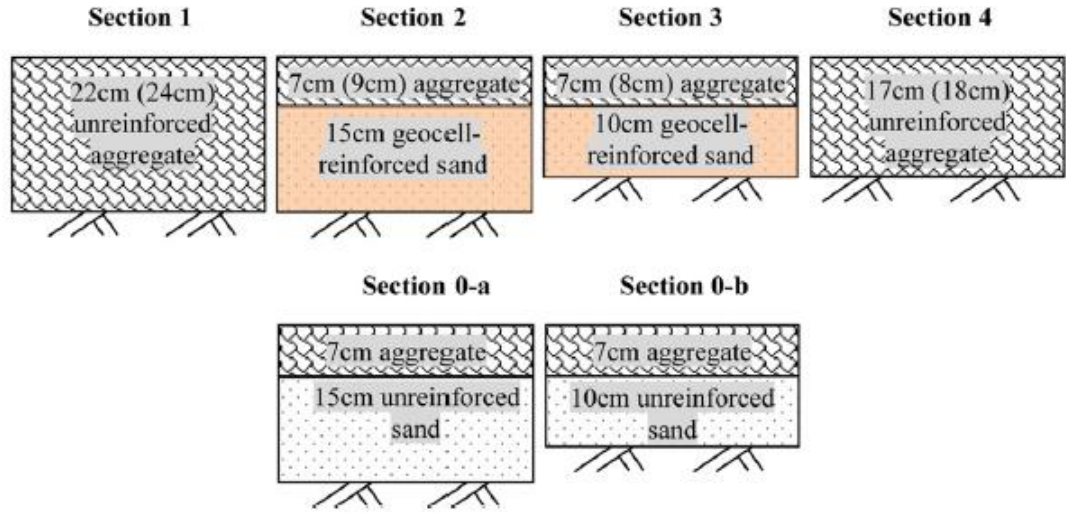
gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde killi malzemenin RAP malzeme arasına karışıp performansı düşürmemesi için iki tabaka arasına geotekstil yerleştirmişlerdir. Beş saniye periyotlu haversine tipindeki yükleme protokolünü gerçekleştirmeleri için kullandıkları dairesel çelik plakanın çapının 152.4 mm ve kalınlığı 12.7 mm olduğunu belirtmişlerdir. Deneylerde, elastik deformasyonun başlangıç değerine göre giderek azaldığını ve 500 döngüden sonra sabit bir değere yakınsadığını vurgulamışlardır. 150 mm yükseklikteki geocell kullanılan deneyde geocell kullanılmayan duruma kıyasla elastik deformasyonun 2.5 kat daha az olduğunu belirtmişlerdir. Plastik deformasyonun döngü sayısının artmasıyla arttığını ve 500 döngüden sonra nispeten sabit bir değere yakınsadığını belirtmişlerdir. Geocell ile güçlendirmenin güçlendirilmemiş duruma göre kalıcı deformasyon açısından %70-80 oranında iyileşmenin olduğunu belirtmişlerdir. Esneklik modülünün ise geocell ile güçlendirilen kısımlarda 750. döngüye kadar arttığını sonra 100 mm yüksekliğe sahip geocell için 325 MPa ve 150 mm yüksekliğe sahip geocell için ise 450 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Trafik fayda oranı (TBR) ve tekerlek izi azalma oranı (RDR) değerlerini yorumladıklarında ise TBR değerinin 150 mm yüksekliğindeki geocell için 100 mm yüksekliğindeki geocelle göre %60 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir ve RDR değerinin döngü sayısı ile birlikte arttığını ve 100 mm yüksekliğindeki geocell için %70, 150 mm yüksekliğindeki geocell için ise %76 gibi sabit bir değere yakınsadığını belirtmişlerdir.

Thakur vd. [20] yaptıkları çalışmalarında, yüksekliği 0.15 m, 0.23 m, 0.30 m olan geocell ile güçlendirilmiş ve 0.30 m yüksekliğindeki güçlendirilmemiş geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) malzemesi kullanılan temel tabakası üzerinde tekrarlı yükler altında 4 adet deney yapmışlardır. Deneylerde taban zemini olarak 1 m yüksekliğinde CBR değeri %2 olan %25 kaolin ve %75 oranında kötü derecelendirilmiş Kansas nehir kumu (KR) karışımı kullanmışlardır. Deneyleri 2.2×2.0 m dikdörtgen kesitli ve 2.0 m yüksekliğindeki deney kasasında gerçekleştirmişlerdir. Tüm deneylerde iki tabaka arasına ayırıcı özellik göstermesi için geotekstil yerleştirmişlerdir. 0.15 m ve 0.23 m temel kalınlığına sahip deneylerde sırasıyla geotekstilin üzerine 100 mm ve 150 mm yüksekliğindeki geoceller yerleştirilmiş ve üzerleri sırasıyla 50 mm ve 80 mm yüksekliğinde RAP malzeme ile doldurulmuştur. 0.30 m temel kalınlığına sahip deneyde ise 100 mm yüksekliğindeki

geocell iki tabaka halinde hazırlanmıştır (100 mm geocell+30 mm RAP dolgu+100 mm geocell+70 mm RAP dolgu). Standart tekerlek basıncını (550kPa) temsil etmesi için uygulanan yük protokolü maksimum yük 40 kN ve frekansı 0.77 Hz olacak şekilde 300 mm çapında ve 30 mm kalınlığındaki çelik plakaya uygulanmıştır. Deney sonuçlarını kaplamasız yollar için başarısızlık kriteri olarak benimsenen 75 mm kalıcı deformasyon sınırında değerlendirdiklerinde 0.30 m güçlendirilmemiş, 0.15 m, 0.23 m ve 0.30 m geocell ile güçlendirilmiş kesimler için ulaşılan tekrar sayısının sırasıyla 5, 32, 18 ve 97 olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sonucunda güçlendirilmemiş deneyin tekrar sayılarına kıyasla 0.15 m, 0.23 m ve 0.30 m kalınlığa sahip temellerin tekrar sayıları sırasıyla 6.4, 3.6 ve 19.4 kat daha fazla olduğunu vurgulamışlardır. 0.23 m kalınlığa sahip temelin 0.15 m kalınlığa sahip olandan daha fazla kalıcı deformasyon yapmasını ise düşük sıkıştırma oranından kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Elastik deformasyon açısından değerlendirdiklerinde ise güçlendirilmemiş temelin geocell ile güçlendirilen temellere göre daha düşük elastik davranış gösterdiğini ve daha çok plastik deformasyona uğradığını vurgulamışlardır. Geocell ile güçlendirilen temelerde elastik deformasyon miktarının ilk birkaç tekrardan sonra sabit bir değere yakınsadığını belirtmişlerdir. Elastik deformasyon yüzdesinin sırasıyla 0.15 m-0.23 m-0.30 m geocell ile güçlendirilmiş ve 0.30 m güçlendirilmeyen temeller için %90.6-%89.2-%94.5-%13.3 olduğunu belirtmişlerdir. Taban zemini ve temel tabakasının ara yüzeyine yerleştirilen basınç ölçerler sayesinde merkezde ölçülen maksimum basınçlar 0.30 m aynı yükseklikteki geocell ile güçlendirilen ve güçlendirilmeyen kısımlar için sırasıyla 144 kPa ve 197 kPa görülmüş ve geocellin düşey basıncın azalmasıdaki etkisi vurgulanmıştır. Gerilme dağılımı açısından bakıldığında değerlendirdiklerinde ise ilk birkaç tekrarda açının temel malzemesinin bozulmasıyla azaldığını, güçlendirilmeyen kısım başarısızlığa uğrayana kadar açının sürekli olarak azaldığını ve geocell ile güçlendirilen kısımlarda ise geocellin etkisiyle sabit bir değere yakınsadığı ve/veya arttığını vurgulamışlardır.

Yang vd. [21] geocell ile güçlendirilmiş karayolu temelinin davranışını incelemek için hızlandırılmış kaplama deneyi (APT) yapmışlardır. Deneylerin ikisi geocell ile güçlendirilmiş diğer ikisi ise güçlendirilmemiş temeller üzerinde yapılmıştır. Deney için kullanılan beton çukurun uzunluğu 6.1 m, genişliği 4.9 m ve derinliği 1.8 m'dir. Temel tabakasının altındaki taban zemini için kullanılan malzeme kildir. Temel

tabakasının nasıl olacağını Şekil 2.5.a.'da gösterildiği gibi güçlendirilmemiş kısımlar daha önce 15 cm ve 10 cm nehir kumu üzerine 7 cm AB-3 agregası konulacak şekilde planlanmışlardır. Ancak deneylerde aşırı deformasyona ulaşılmca deney başarısız olmuştur. Böylece güçlendirilmemiş kısımlar 24 cm ve 18 cm yüksekliğinde AB-3 agregasından, geocell ile güçlendirilen kısımlar ise 15 cm ve 10 cm Kansas nehir kumu üzerine sırasıyla 9 cm ve 8 cm AB-3 agregasından oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan tekerlek basıncı 552 kPa'dır. Deneyleri 5000 tekrarda gerçekleştirmişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçları tekerlek izi derinlikleri açısından incelediklerinde 1, 2 ve 4 numaralı kesitlerin tekerlek izi derinliklerinin bir noktadan sonra belli bir değere yakınsadığını ancak 3 numaralı kesitte ise bu değerin giderek arttığı vurgulanmıştır. 2 numaralı kesit nehir kumu ve AB-3 agregasından oluşurken, aynı yüksekliğe sahip 1 numaralı kesit tamamen nehir kumundan daha iyi özellikleri sahip olan AB-3 agregasından oluşmaktadır. Bu durumda bile Şekil 2.5.b.'den görüldüğü gibi 2 numaralı kesitin daha az tekerlek izi derinliğine sahip olduğu vurgulanmıştır. Kesit 3'teki aşırı deformasyon nedeniyle kesit 2 ve kesit 3'te deneyler yapıldıktan sonra başarısızlık durumunu araştırmak için deneyler tamamlandıktan sonra kazma işlemi yapmışlardır. Kesit 3'te geocellerin birleşim noktalarında ayrılma gözlemlendiğini vurgulamışlardır. Deneylerden sonra bu iki kesitteki geocellin üstünde ve taban zeminin üstünde kaydettikleri ölçümler sonucunda 2 numaralı kesitte düşey deformasyonların küçük olduğunu ve düşey basıncın büyük bir kısmının temel tabakasında meydana geldiğini belirtmişlerdir. 3 numaralı kesitte ise temel tabakasındaki agregaların kum ile karışıp taban zemini üzerinde aşırı bir deformasyonun gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Bu gözlem sonucunda da geocell ile güçlendirilen kumlu temellerin yeterli performansı için geocell yapısının bozulmalara karşı önlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

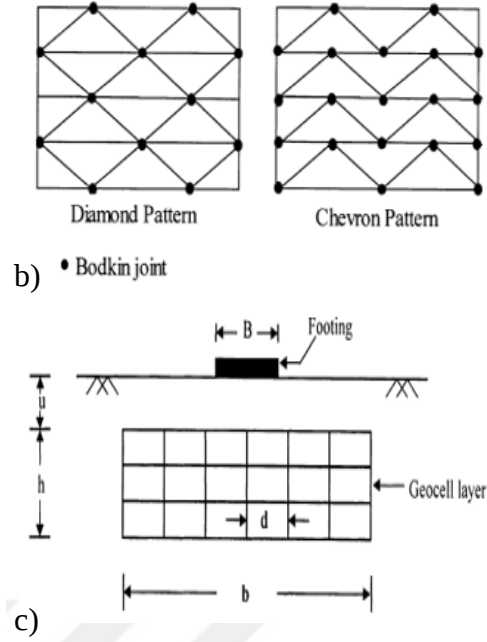
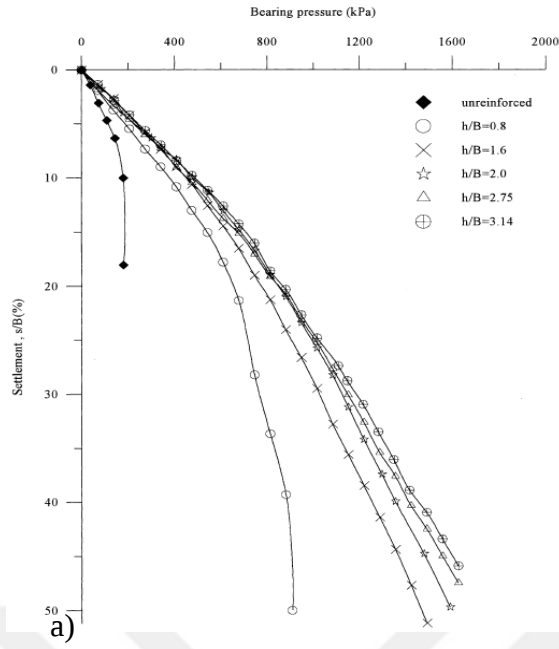


b)

Şekil 2.5. a) Deney kesitleri, b) Döngülere karşılık gelen tekerlek izi [21]

Dash vd. [22] uzunluğu 1200 mm, genişliği 332 mm ve yüksekliği 700 mm olan çelik kasada kötü derecelendirilmiş nehir kumu üzerinde uzunluğu 330 mm, genişliği 100 mm ve kalınlığı 25 mm olan sürekli temelin monotonik olarak yüklenmesiyle chevron ve diomand tipi geogridlerden oluşturdukları geocelller ile güçlendirdikleri zeminin etkisini 8 deney serisi yaparak incelemişlerdir. Bu deney serilerinde incelenen durumlar; güçlendirilmemiş zemin üzerine farklı sıklıkların etkisi (%30-40-50-60-70), geocellin tipi, geocell hücre alanı, geocell yüksekliği, geocell genişliği, geocellin yerleşim yeri, farklı geocell malzemesi ve geocell ile güçlendirilmiş kısımda sıklığın etkisidir.

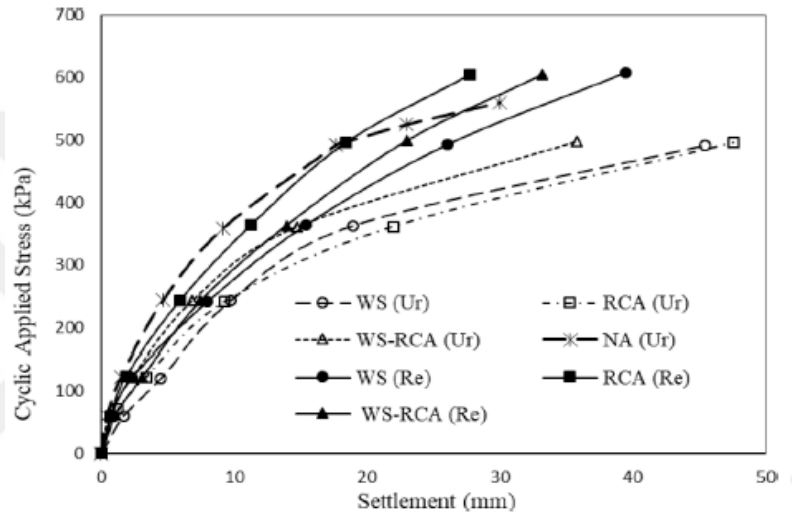
Geocellin yüksekliğinin etkisini incelerken güçlendirilmemiş bölümle kıyaslama yaptıkları zaman en kötü performansı veren $h/B=0.8$ oranında bile nihai basıncın Şekil 2.6.a.'da görüldüğü gibi yaklaşık 5 kat olduğunu vurgulamışlardır. Belirli bir oturma değeri için güçlendirilmiş temeldeki basıncın güçlendirilmemiş temeldeki basınca oranı olarak tanımladıkları taşıma kapasitesi gelişim faktörü (I_f) açısından BX geogridin Chevron ve Diamond türlerinden oluşturdukları geocellin etkisini değerlendirdiklerinde, temel genişliğinin %10'una karşılık gelen oturmalara kadar I_f hemen hemen aynı olmakla beraber bu değerden sonra ise Chevron tipi geocellerde bu faktörün daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu farkın ise Chevron tipinin birim alandaki birleşim noktasının daha fazla olmasına yorumlamışlardır. Geocellin hücre alanının etkisini incelediklerinde, hücre alanı küçüldükçe I_f değerinin arttığını ve temelin merkezinden temel genişliğinin 2.5 katı mesafede ölçtükleri yüzey deformasyon sonuçlarının aynı şekilde hücre alanı küçüldükçe yüzey deformasyonunun azaldığını gözlemlemişlerdir. Geocell yüksekliğinin etkisini incelediklerinde, geocell yüksekliği arttıkça I_f değerinin arttığını ancak h/B oranının 2.0'dan fazla değerleri için basınç-oturma davranışının önemli bir değişim kaydetmediğini belirtmişlerdir. Geocell genişliğinin etkisini incelediklerinde, b/B oranı 4.0'a kadar arttığında performansın arttığını ve bundan sonraki artışlarda performans iyileşmesinin önemsiz olduğunu vurgulamışlardır. Geocell malzemesinin konumunun etkisini incelediklerinde, u/B oranı 0.1 olduğunda en iyi performansı gözlemlemişlerdir. Bu oranın artışıyla birlikte performansın azaldığını vurgulayıp en iyi performansı elde etmek için u/B oranının yaklaşık 0.1 olması gerektiğini vurgulamışlardır. Geocelli oluşturmak için kullanılan geogridin türünün etkisini (BX, NP-1, NP-2) incelediklerinde, BX ve NP-2 0.2B deformasyona kadar aynı performansı sergilediğini bu değerden sonra BX tipindeki geogridin performansının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Sıklığın etkisini incelediklerinde ise daha sıkı zemin kullanılması durumunda performansın daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Geocellin optimum yükseklik-çap oranını belirlemek istediklerinde ise bu oran 1.67'ye kadar artırıldığında en iyi performansı elde ettiklerini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.6. a) Taşıma kapasitesi – otuma ilişkisi, b) Geogrid türleri, c) geocell ile güçlendirilmiş temel yatağının geometrik parametreleri [22]

Mehrjardi vd. [23] uzunluğu 1200 mm genişliği 700 mm ve yüksekliği 700 mm olan deney kasasında 150 mm çaplı dairesel çelik plaka vasıtasıyla 100 mm yüksekliğe sahip atık zeminden (WS) oluşan taban zemini ve 300 mm yüksekliğe sahip 4 farklı zeminden (Atık zemin(WS) - Geri dönüştürülmüş beton agrega(RCA)-Doğal agrega(NA) - %50 WS + %50 RCA) oluşan alt temel tabakası üzerinde farklı trafik yüklerini temsil etmesi amacıyla 120-240-360-480 kPa olarak her bölümde 10 tekrar olacak şekilde dört farklı bölümde tekrarlı yükleme gerçekleştirmişlerdir. İnşaat yıkıntı atığının (CDW) karayolu alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırdıkları bu çalışmalarında geocell ile güçlendirilmiş deneylerde geocell malzemesinin açılmış halinin genişliği 600 mm, uzunluğu 1000 mm ve yüzeyden gömülme derinliği ise 30 mm olarak belirlenmiştir. Güçlendirilmemiş olarak RCA ve WS zeminleri üzerinde gerçekleştirdikleri deneylerde yükleme bölümü olarak üçüncü bölüme (360 kPa) kadar başarılı olmuş olup dördüncü bölümde başarısızlık elde etmişlerdir. Geocell ile güçlendirilmiş deneylerde ise plaka çapının 0.4 katı (37.5mm) olarak belirledikleri deformasyon sınırı değerine ulaşmadan dört yükleme bölümünün tüm deneylerde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Daha kötü durumlarda zeminlerin verdiği tepkiyi görmek için ise 600 kPa basınç altında yükleme yapmışlardır. Şekil 2.7.'den görüldüğü gibi geocell ile güçlendirilmiş WS güçlendirilmemiş NA'ya yakın davranış göstermiş ve güçlendirilmiş WS-RCA ve RCA'nın daha iyi performans

gösterdiğini vurgulamışlardır. Bu performans iyileşmesini matematiksel olarak belirlemek için inşaat yıkıntı atığı malzemelerinin geocell ile güçlendirilmiş durumunun döngüsel taşıma kapasitesinin doğal agreganın güçlendirilmemiş durumunun döngüsel taşıma kapasitesine oranı (DRR) ve güçlendirilmiş bölümdeki taşıma kapasitesinin güçlendirilmemiş bölüme oranı (BCR) olarak tanımladıkları oranlar Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi inşaat yıkıntı atığının geocell ile güçlendirilmesi durumunda güçlendirilmemiş doğal agreganın bulunduğu kesime göre yakın ve/veya daha iyi performans elde edildiği vurgulanmıştır.



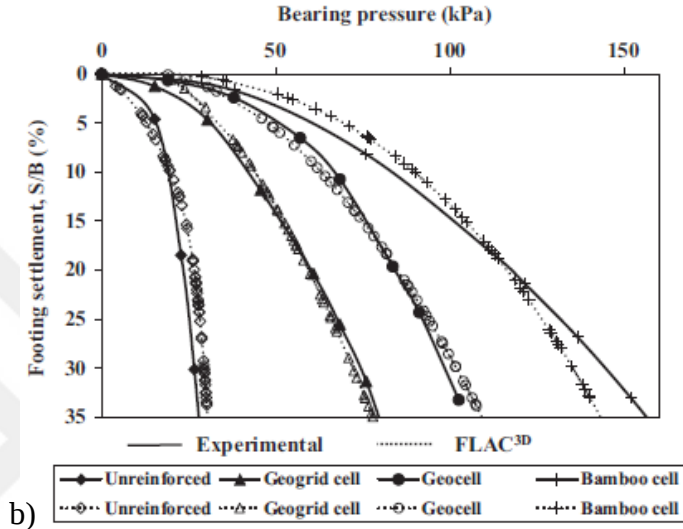
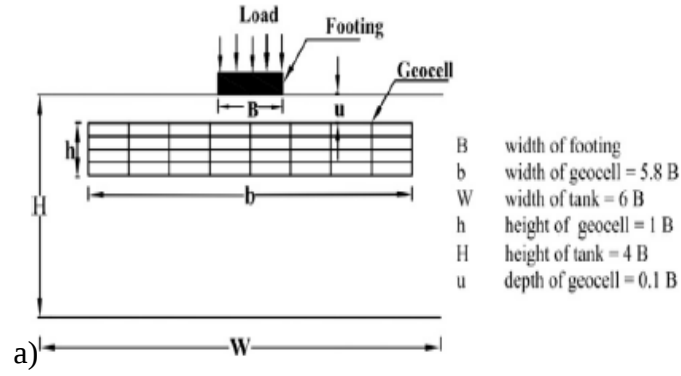
Şekil 2.7. Basınç oturma ilişkisi [23]

Çizelge 2.1. Taşıma kapasitesi ve oranları [23]

	WS (Ur)	RCA (Ur)	WS-RCA (Ur)	NA	WS (Re)	RCA (Re)	WS-RCA (Re)
q_{ult} (kPa)	320	283	295	390	356	443	398
δ_{ult} (mm)	15	12.5	9.7	11	13	13.5	12.5
DRR	0.82	0.73	0.76	1	0.91	1.14	1.02
BCR	-	-	-	-	1.11	1.57	1.35
K_s (kPa/m)	32,400	56,560	72,400	78,400	62,880	76,822	80,800

Hedge ve Sitharam [24] yumuşak kil yatağı üzerinde hücrelerinin içine ise kötü derecelenmiş kum malzemesi kullanarak NPA geocell, geogrid ve bambudan yapılmış geocell ile plaka yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyde 900 mm kare kesitli ve 600 mm yükseklikli çelik kasa ve kalınlığı 20 mm olan 150 mm kare kesitli yükleme plakası kullanmışlardır. Yapılan deneylerde kullanılan geocellin yüksekliği, gömülme derinliği, genişliği, deney kasasının genişliği ve yüksekliği gibi boyutlar

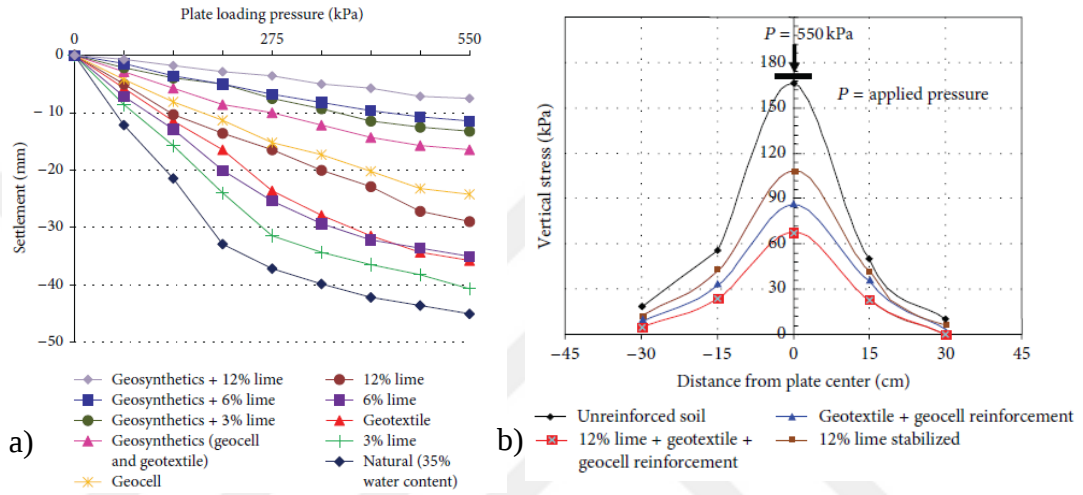
plaka genişliği cinsinden Şekil 2.8.a.'da gösterilmiştir. Şekil 2.8.b.'de görüldüğü gibi geocellsiz deney sonucunda nihai taşıma kapasitesinin 30 kPa olduğunu gözlemlemişlerdir ve geocell ile güçlendirilen deneylerde ise yüksek oturma değerlerinde bile keskin bir başarısızlığın meydana gelmediğini vurgulamışlardır. Diğerlerine kıyasla bambu ile yapılan geocellin kullanıldığı deneyde performansın daha iyi olduğundan bahsetmişlerdir ve bunun nedeninin ise bambu geocellerin daha yüksek rijitliğe, çekme mukavemetine ve yüzey pürüzlülüğüne sahip olmasından kaynaklanabileceğini söylemişlerdir. Bu performans iyileşmesini sayısal olarak değerlendirmek için güçlendirilmiş deneylerdeki herhangi bir oturma değerindeki taşıma kapasitesinin aynı oturma değerine karşılık gelen güçlendirilmemiş durumdaki taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanan taşıma kapasitesi gelişim faktörünü (I_f) kullanmışlardır. Plaka genişliğinin %30'u kadar oturmaya karşılık gelen I_f değeri bambu geoceller için 5.5 olarak bulunmuş ve bu da güçlendirilmemiş duruma göre yük taşıma kapasitesinin 5.5 katında olduğunu belirtmektedir. Geocell'in varlığından dolayı oturmalarındaki azalmayı belirten oturmadaki en yüksek azalma yüzdesinin ($PRS = \%93$) ve yapılan deneylerden elde edilen değerlerle yaptıkları hesaplamalar sonucu elde ettikleri en yüksek yatak modülünün (18095 kN/m^3) bambudan yapılan geocellerin kullanıldığı deneylerden elde edildiğini vurgulamışlardır. Ayrıca nümerik modellemelerden elde ettikleri sonuçlara göre geocell kullanılan durumlarda düşey gerilmelerin güçlendirilmemiş duruma göre daha geniş alana yayıldığını vurgulamışlardır. Deneysel verilerini iyi bir uyumla doğruladıkları nümerik çalışmalarında geocellin çekme mukavemetinin ve yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemek için parametrik çalışma yapmışlardır. Çekme mukavemeti elastisite modülü ile doğru orantılı olduğu için elastisite modülünün değişik değerlerinde taşıma kapasitesini değerlendirmişlerdir. Taşıma kapasitesinin elastisite modülünün artışıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Aynı şekilde yüzey pürüzlülüğünün etkisini ara yüzey sürtünme açısının değişik değerlerini kullanarak taşıma kapasitesini değerlendirmişlerdir ve sürtünme açısının artışıyla beraber taşıma kapasitesindeki artışı gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.8. a) Geocell donatılandırmanın şematik görünüşü b) Taşıma kapasitesi – oturma ilişkisi [24]

Pancar ve Akpınar [25] $1.2 \times 1.2 \times 1.2$ m boyutundaki deney kasasında yol temel tabakası ve taban zemininin geocell, geotekstil ve kireç stabilizasyonunun çeşitli varyasyonlarını kullanarak 10 adet plaka yükleme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde 550 kPa tekerlek basıncını 300 mm çapında ve 30 mm kalınlığındaki dairesel çelik plaka vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde taban zemini olarak 750 mm yüksekliğinde yüksek plastisiteli kil ve temel tabakası için ise 230 mm yüksekliğinde kötü derecelenmiş kum kullanılmışlardır. Bu deneylerden elde edilen yükleme-oturma ilişkisi Şekil 2.9.'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre elde yükleme-oturma ilişkisi açısından en iyi performansın geosentetik + %12 kireç stabilizasyonundan elde edildiğini ve bu durumda oturma güçlendirilmemiş duruma kıyasla altı kat daha az olduğunu vurgulamışlardır. Plaka genişliğinin %12'si olarak belirledikleri yenilme kriterini sadece doğal haldeki, %3 kireç ve %6 kireç stabilizasyonu ve geotekstil ile güçlendirilen kısımların geçemediğini belirtmişlerdir.

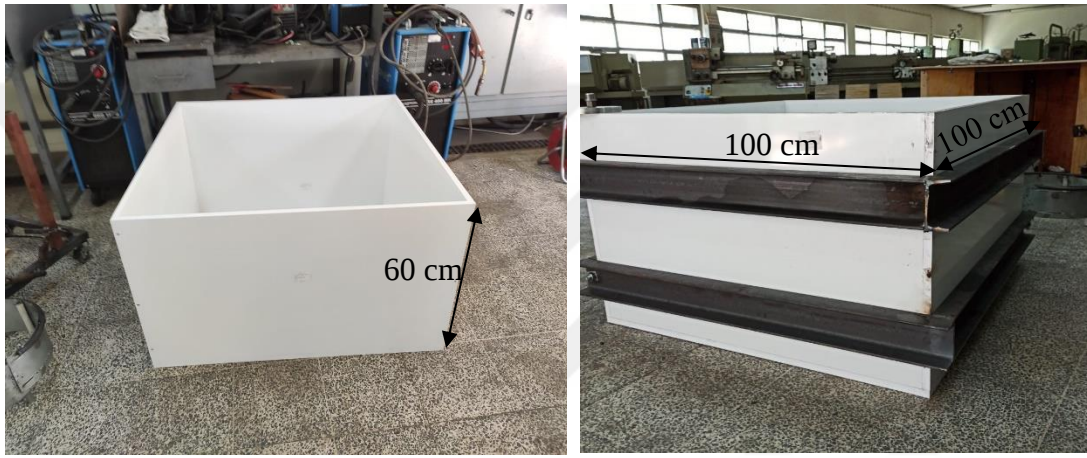
Türkiye’deki Karayolları Teknik Şartnamesi’nin minimum yatak modülü 55000 kN/m³ değerinin sadece geosentetik + %12 kireç stabilizasyonu durumunda sağlandığını belirtmişlerdir. Taban zemini üzerinde ölçülen düşey basınçların sonucunda geosentetik ile güçlendirmenin %12 kireç stabilizasyonuna kıyasla daha efektif olduğunu ve %12 çimento stabilizasyonu + geosentetikle güçlendirme durumunun güçlendirilmemiş duruma kıyasla 2.5 kat daha efektif olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 2.9. a) Yük- oturma ilişkisi, b) Taban zeminindeki düşey basınç değerleri [25]

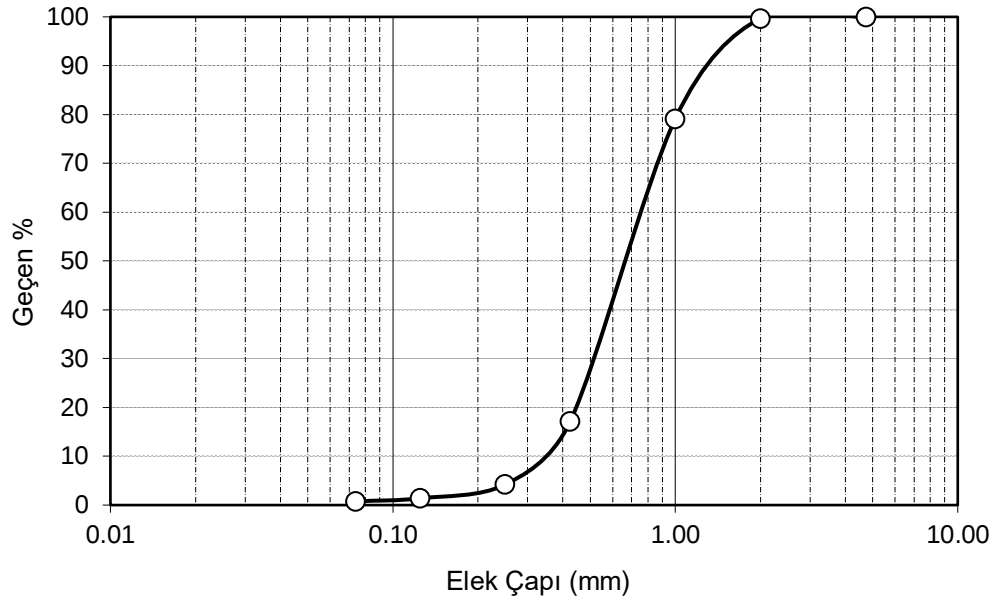
3. MALZEME VE YÖNTEM

Geocell ve geogrid ile karayolu temel tabakasının güçlendirilmesi durumunun deneysel olarak incelenebilmesi için kullanılan deney kasası Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan kasanın boyutları 100×100×60 cm'dir. Deney kasası içerisine karayolu taban zeminini temsil etmesi amacıyla 0.1 m³ kum zemin ve onun üzerine 0.2 m³ ve 0.3 m³ hacminde Plent Miks Temel (PMT) malzemesi yerleştirileceğinden deney kasasının herhangi bir yerinde deformasyon oluşumunu önlemek için kasayı çevreleyen çelik kuşaklar atılmıştır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Deney kasası

Deneylerde taban zemin malzemesi için kullanılan kum Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Laboratuvarında bulunan ve önceki çalışmalarda da faydalanılan kum zemin tercih edilmiştir. Kum zeminin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. TS 1500'e [26] göre kum zemin kötü derecelenmiş kum (SP) olarak belirlenmiş ve kum zemine ait özellikler Çizelge 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Kum zeminin dane çapı dağılım eğrisi [27]

Çizelge 3.1. Kum zeminin Özellikleri

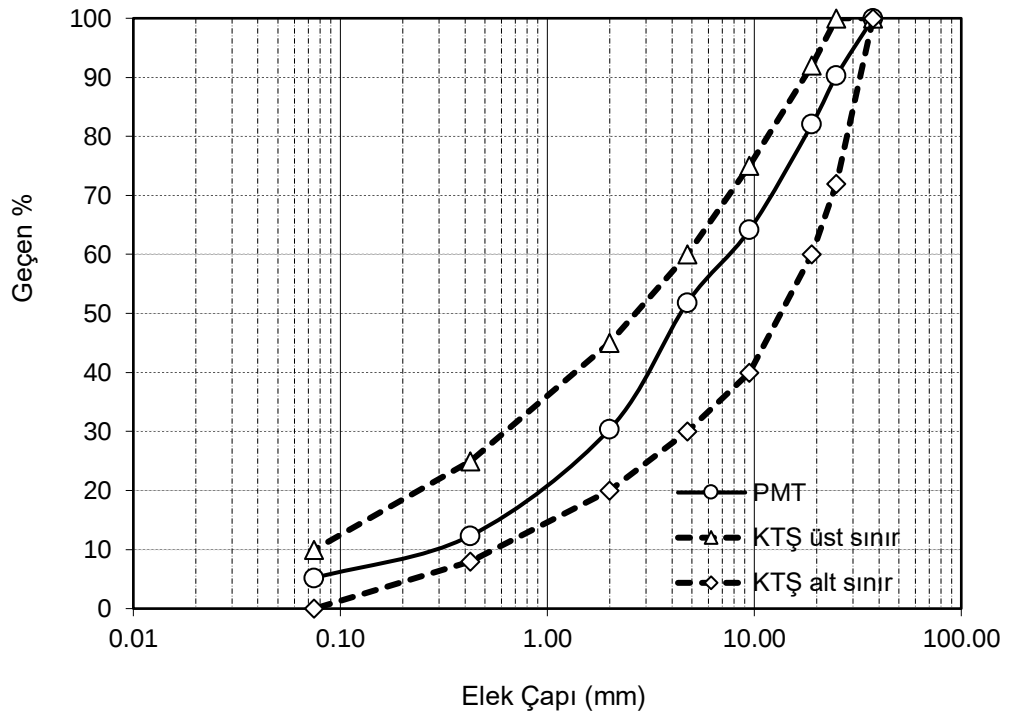
Özellik	Değer
D ₁₀ (mm)	0.38
D ₃₀ (mm)	0.50
D ₆₀ (mm)	0.70
Üniformluk katsayısı, C _u	1.84
Eğrilik katsayısı, C _c	0.94
Dane birim hacim ağırlık ()	2.74
Maksimum kuru birim ağırlık (kN/m ³)	16.57
Minimum kuru birim ağırlık (kN/m ³)	15
İçsel sürtünme açısı (derece)	42
Kohezyon, c (kPa)	0.00
e _{min}	0.62
e _{maks}	0.79
Sıkılık (%)	80

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Osmaniye Şantiyesinden temin edilen PMT malzemesi üzerinde elek analizi (Şekil 3.3.) deneyi yapılmıştır. PMT malzemesinin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Temel zemini TS 1500'e [26] göre sınıflandırılmış ve GW (düzgün dane dağılımlı çakıl) olarak tespit edilmiştir. Elde edilen dane çapı dağılım eğrisinin Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) [28]

belirtilen PMT TİP-1 malzemesi için belirlenen alt ve üst sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3. Elek analizi deneyi

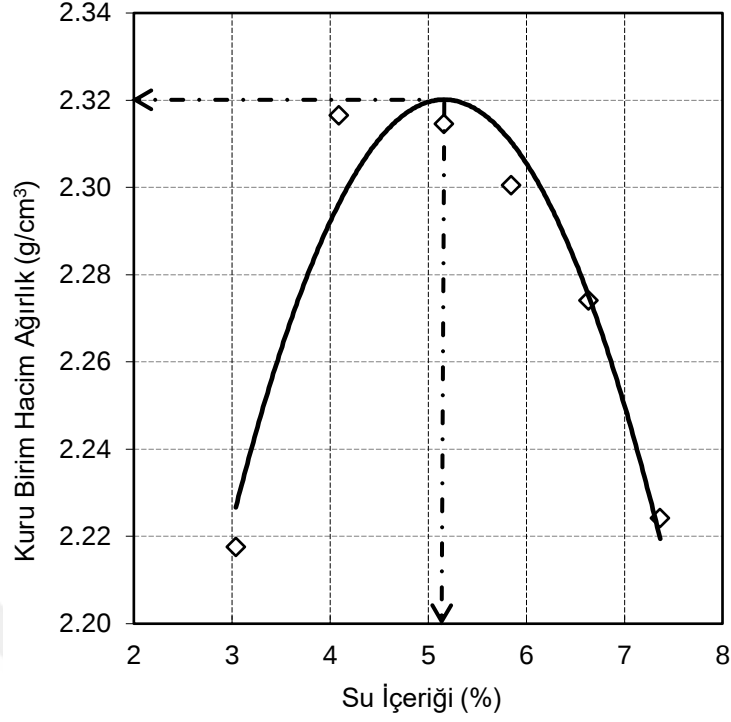


Şekil 3.4. Temel malzemesinin dane çapı dağılım eğrisi

TS 1900-1'e [29] göre temel malzemesi üzerinde modifiye proktor deneyi yapılmıştır (Şekil 3.5.). Deney sonucunda kuru birim hacim ağırlık ile su muhtevası arasında elde edilen ilişki Şekil 3.6.'da gösterilmiştir. Deney sonucunda elde edilen bulgulara göre temel malzemesinin en iyi sıkışmayı elde ettiği optimum su muhtevası (w_{opt}) olan 0.05 değerine tekabül eden maksimum kuru birim hacim ağırlığın ($\gamma_{k,maks}$) 2.32 g/cm^3 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Modifiye proktor deneyi



Şekil 3.6. Kompaksiyon eğrisi

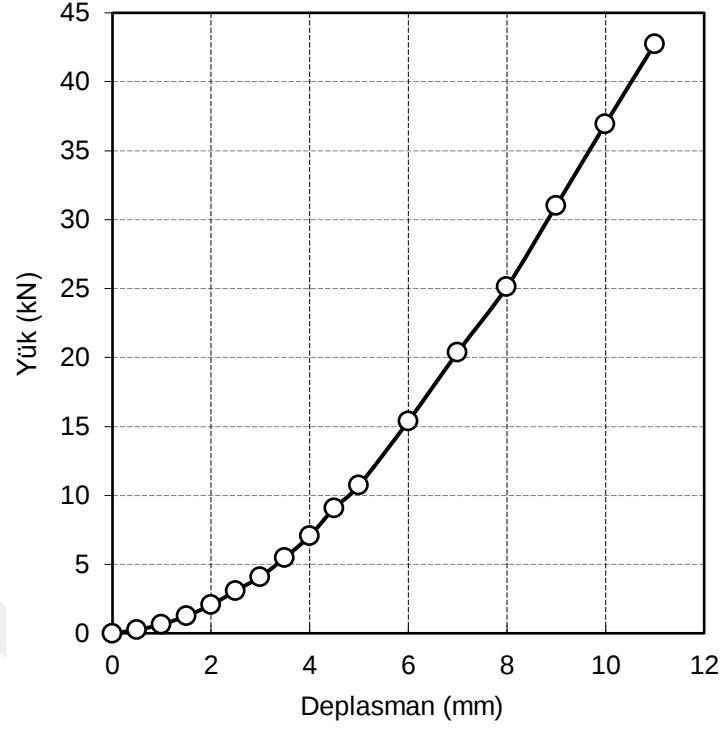
Ayrıca TS 1900-2'ye [30] göre temel malzemesi üzerinde CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) deneyi yapılmıştır (Şekil 3.7.). CBR deney sonuçları Şekil 3.8.'de gösterilmiştir ve 5 mm penetrasyondaki CBR değeri %52.73'tür. Temel zemininin özellikleri Çizelge 3.2.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. Temel zemininin özellikleri

Özellik	Değer
CBR (%)	52.73
Los angeles aşınma kaybı (%)	22.80
MgSO ₄ kaybı (%)	2.71
Su emme (%)	0.40
Metilen mavisi (%)	0.50
D ₁₀ (mm)	0.30
D ₃₀ (mm)	2.00
D ₅₀ (mm)	4.70
D ₆₀ (mm)	7.80
C _u	26.00
C _c	1.71
w _{opt} (%)	5.17
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (g/cm³)	2.32

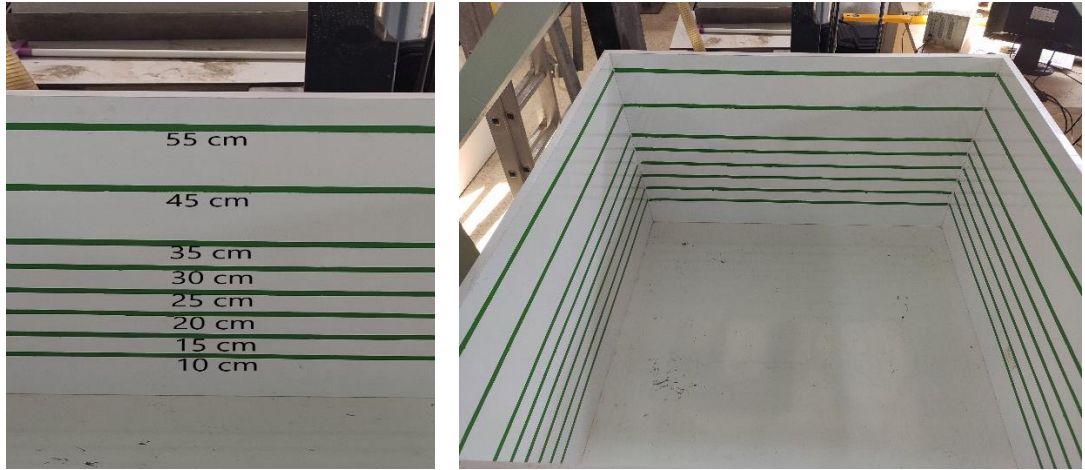


Şekil 3.7. CBR deneyi



Şekil 3.8. CBR eğrisi

Deney kasasına taban zemini ve temel malzemesini yerleştirip sıkıştırırken yüksekliği belirlemek amacıyla deney kasasının içine sudan etkilenmeyen bant şeritler yapıştırılmıştır (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Deney kasasında yüksekliklerin işaretlenmesi

Deneylerde taban zemini olarak kötü derecelenmiş kum kullanılmıştır ve taban zemini yüksekliği 145 mm olacak şekilde tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Taban zemininde kullanılan kumun sıkılığı %80 olarak belirlenmiştir ve tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Deney kasasının içine (14.5×100×100 cm olan hacme) %80 sıkılık için gereken ağırlıktaki kum boşaltılmıştır ve arzu edilen sıkılık ucuna 15 cm çapında bir dairesel çelik plaka bağlanan hilti yardımıyla 145 mm yüksekliğe kadar sıkıştırılması suretiyle elde edilmiştir. Kum zeminin üzerine gelecek olan temel zeminin birbiriyle karışmasını önlemek amacıyla 100×100 cm ebatlarında ve 0.5 cm kalınlığa sahip geotekstil tüm deneylerde kullanılmıştır (Şekil 3.10.).

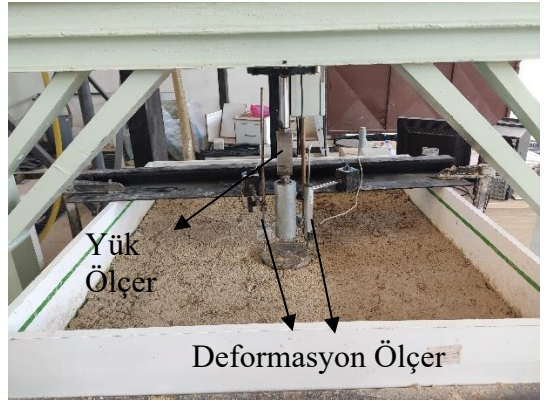
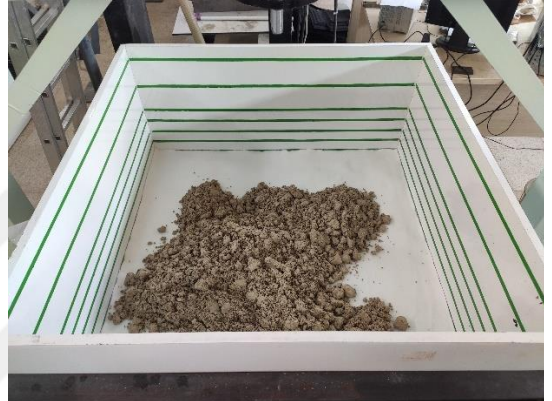
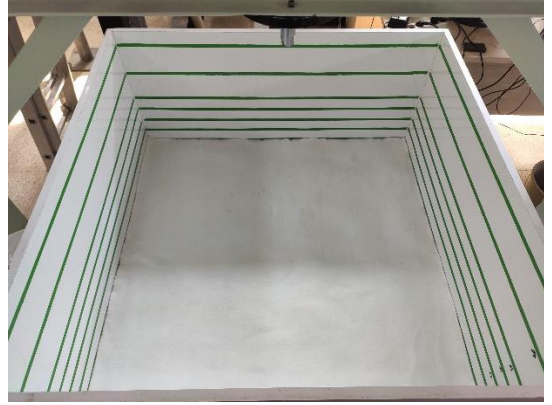
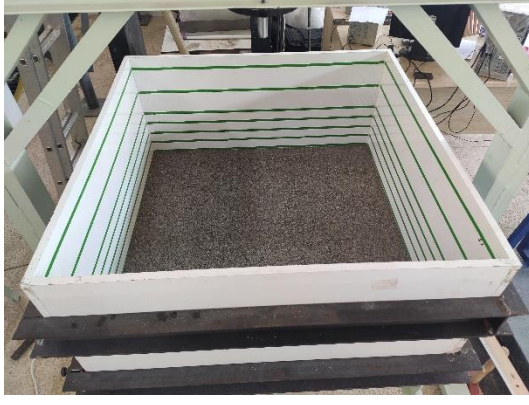


Şekil 3.10. Kum zeminin yerleştirilmesi ve geotekstilin örtülmesi

Şekil 3.11.'de 300 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneyin yapılışı ile ilgili görseller mevcuttur. Öncelikle, taban zemini tabakası %80 sıkılıkta hazırlanmıştır ve üzerine geotekstil örtülmüştür (Şekil 3.10.). Şekil 3.11.'de deneyin adımlarından görüldüğü gibi öncelikle kuru haldeki temel zemini deneye hazır hale getirilmiştir. Daha sonra temel zeminin optimum su muhtevasına ulaşabilmesi için temel zemini üzerine %5.17 oranındaki su ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılması sağlanmıştır ve karıştırılan zemin deney kasasına boşaltılmıştır. Her seferinde 100 mm yüksekliğe tekabül edecek ağırlıktaki zemin için sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Sıkıştırılan zeminin üzerine hücre ebatları 210×245 mm olan ve her iki doğrultuda 4 adet hücreden oluşan geocell malzemesi aplat edilmiştir ve aynı şekilde hazırlanan temel zemini deney kasasına boşaltılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Son tabaka sıkıştırıldıktan sonra yüzeyin düzgünlüğü su terazisi ile kontrol edilmiştir. Düzgün yüzeyin tam ortasına 150 mm çapındaki yükleme plakası yerleştirilmiş ve bu

plakanın da yüzeyinin düzgünlüğü su terazisi yardımıyla kontrol edilmiştir. Düşey deformasyonları ölçebilmek için yükleme plakasının her iki tarafına deformasyon ölçerler (LVDT) konumlandırılmıştır ve deney sonucunda elde edilen düşey deformasyonların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Her deney için aynı prosedürler tekrarlanmıştır.

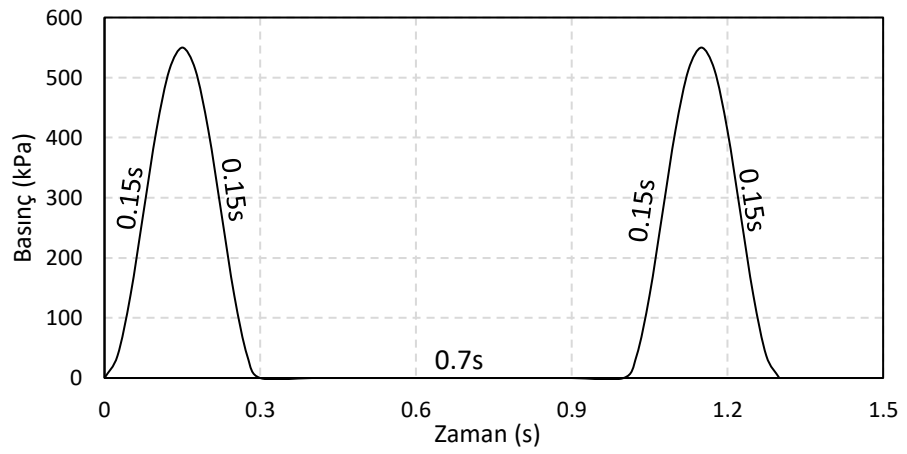
Şekil 3.12.'de yükleme sisteminin görselleri mevcuttur. Deneylerde kullanılacak yük döngüsünün periyodu, temas süresi ve döngü sayısı kontrol paneli vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Deneylerde yükleme plakasına trafik yüklerini temsil etmesi amacıyla Şekil 3.13.'te görülen 1 Hz frekansa sahip 550 kPa'lık basınç piston vasıtasıyla verilmiştir. Yükleme kaynaklı zeminde oluşan kalıcı ve elastik deformasyonlar ve yük değerleri, deformasyon ölçerler ve yük ölçer ile tespit edilip veri kaydetme ünitesi (data logger) yardımıyla elde edilmektedir.



Şekil 3.11. 300 mm temel tabakasına sahip geocell ile güçlendirilmiş deney

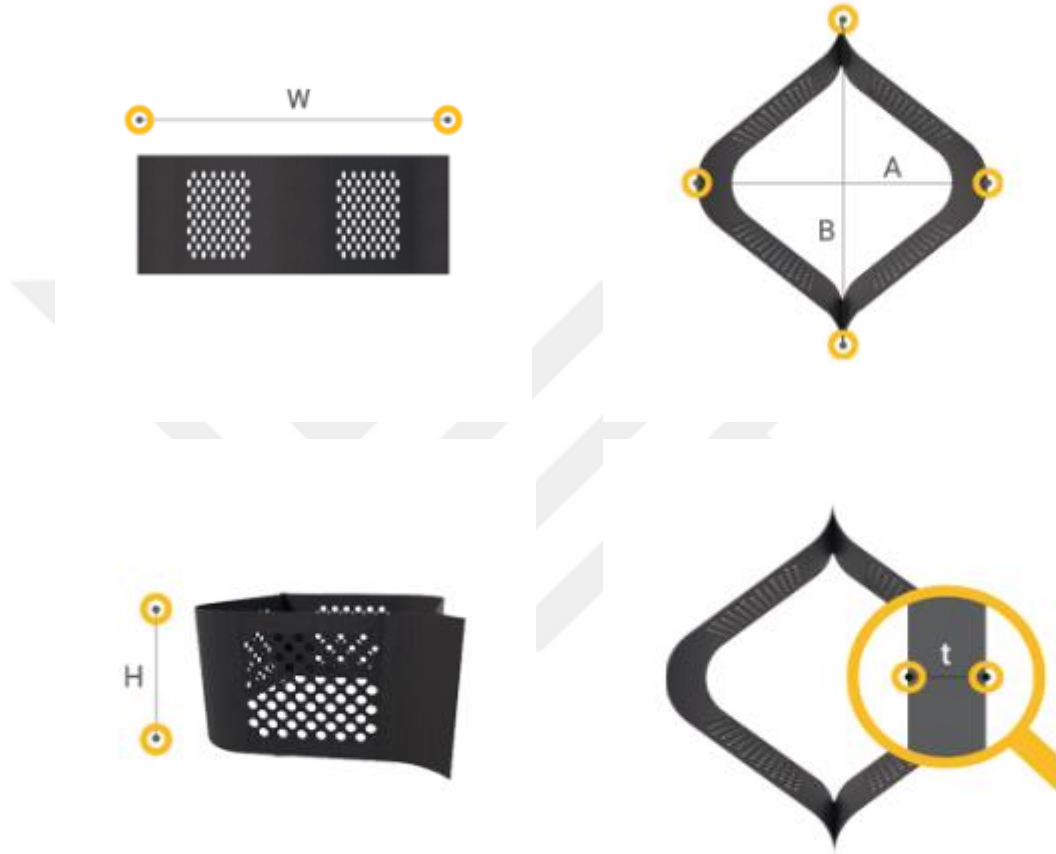


Şekil 3.12. Yükleme sistemi



Şekil 3.13. Uygulanan yükün şekli

Çizelge 3.3.'te deneylerde kullanılan geocell malzemesinin özellikleri verilmiştir. 100 mm hücre yüksekliğine sahip olan bu geocell malzemesinin kaynak açıklığı 330 mm'dir. Nominal hücre uzunluğu ve genişliği sırasıyla 210 mm ve 245 mm olan bu geocell malzemesinin şerit kalınlığı ise 2 mm'dir (Şekil 3.14.).

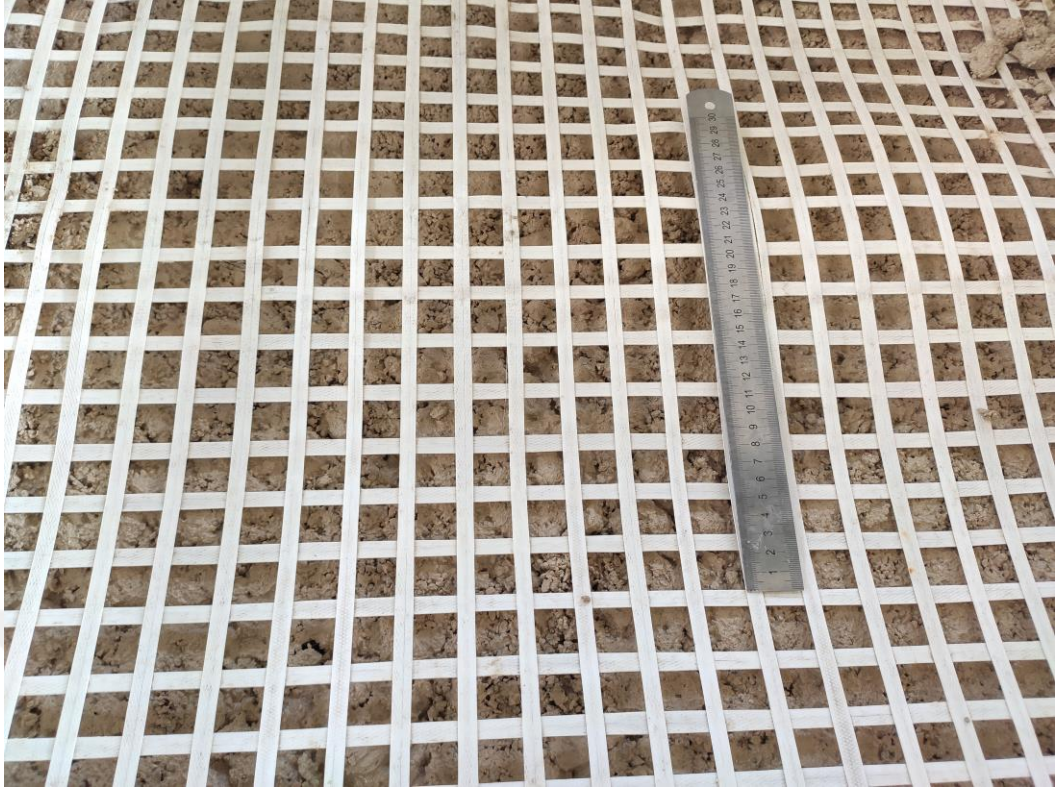


Şekil 3.14. Geocell malzemesinin ebatları [31]

Çizelge 3.3. Geocell malzemesinin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Kaynak açıklığı (W)	mm	330
Hücre ebatları (A×B)	mm	210×245
Hücre yüksekliği	mm	100
Şerit kalınlığı	mm	2
Malzeme yoğunluğu	g/cm ³	0.95

Deneylerde kullanılan iki eksenli geogrid Şekil 3.15.'te gösterilmiştir. Açıklığı 20×20 mm olan geogrid malzemesine ait özellikler Çizelge 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Deneylerde kullanılan geogrid malzemesi

Çizelge 3.4. Geogrid malzemesinin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Malzeme	-	Polipropilen (PP), beyaz
Maksimum çekme dayanımı, id/idd*	kN/m	≥ 60 / ≥ 60
%2 uzamada çekme dayanımı, id/idd*	kN/m	22 / 22
%5 uzamada çekme dayanımı, id/idd*	kN/m	48 / 48
Açıklık, id/idd*	mm $\times$ mm	20 $\times$ 20

*id = imalat doğrultusu, idd = imalat doğrultusuna dik

Deneylerde taban zemini ve temel tabakası arasında kullanılan geotekstil malzemesi Şekil 3.16’da gösterilmiştir. Geotekstil malzemesine ait özellikler Çizelge 3.5.’te verilmiştir.



Şekil 3.16. Deneylerde kullanılan geotekstil malzemesi

Çizelge 3.5. Geotekstil malzemesinin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Malzeme	-	Polipropilen (PP), beyaz
Birim ağırlık	g/cm ²	1000
Kalınlık	mm	5
Çekme dayanımı, id/idd*	kN/m	47/49
Kopmadaki uzaması	%	50
Statik delinme dayanımı	N	8000
Dinamik delinme dayanımı	mm	0.25
Sıvı geçirgenliği	m/s	0.01
Gözenek açıklığı	mm	0.06
UV dayanımı	%	70

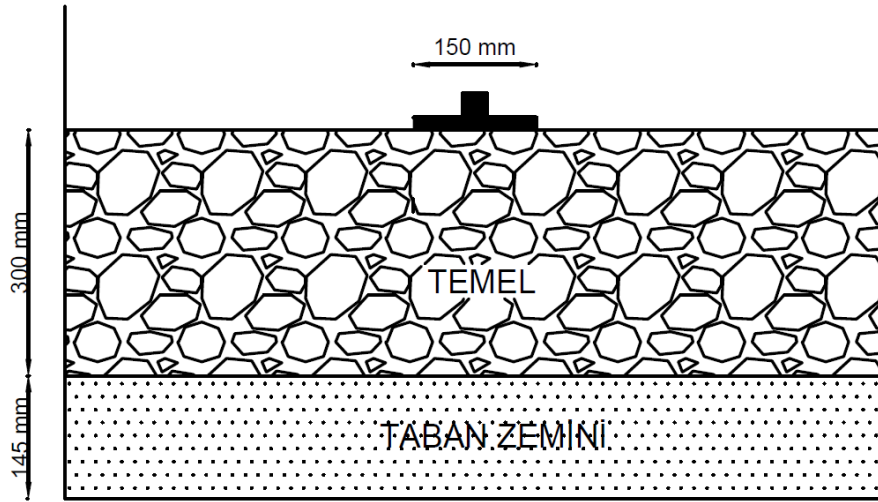
Deneye hazır hale getirilen temel tabakası üzerinde daha önce bahsedildiği gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan 5 model deneyin programı Çizelge 3.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Deney programı

Deney No	Deney Türü	Taban zemini yüksekliği (mm)	Temel yüksekliği (mm)	Gömülme derinliği (u) (mm)
1	Güçlendirilmemiş (GM)	145	300	
2	Geocell ile güçlendirilmiş (GCG3)	145	300	20
3	Geogrid ile güçlendirilmiş (GGG3)	145	300	50
4	Geocell ile güçlendirilmiş (GCG2)	145	200	20
5	Geogrid ile güçlendirilmiş (GGG2)	145	200	50

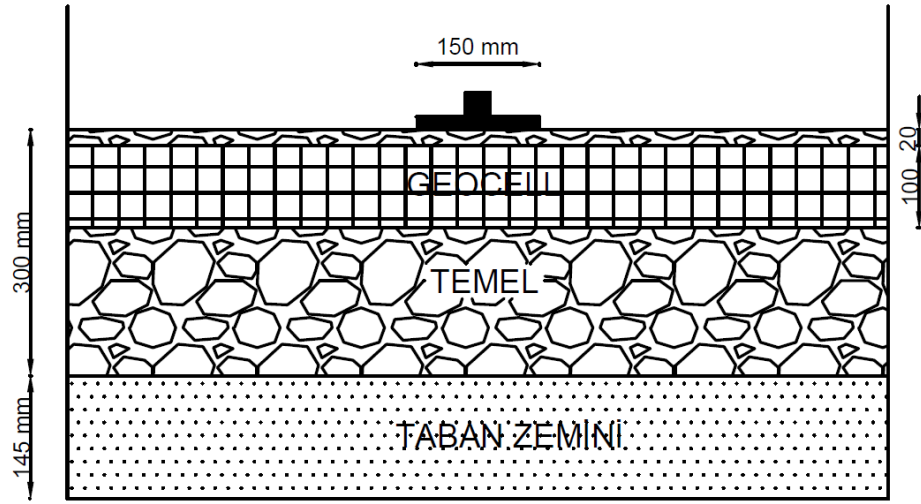
Deneyler daha önce bahsedildiği gibi 145 mm yüksekliğinde %80 sıklıkla hazırlanan 240.7 kg taban zemini üzerine temel malzemesinin birbirine karışmasını önlemek amacıyla 5 mm kalınlığında geotekstil yerleştirilmiş ve tüm deneylerde kullanılmıştır. Karayolu temel tabakasında geocell ve geogridin sağladığı güçlendirmenin ve temel tabakasının kalınlığının etkisinin incelendiği bu çalışmada 5 adet model deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin şematik gösterimi Şekil 3.16.-3.20.'de mevcuttur. 300 mm ve 200 mm temel yüksekliğine sahip deneylerde temel tabakasının ağırlığı sırasıyla 696 kg ve 464 kg'dır.

Şekil 3.17.'deki 300 mm temel kalınlığındaki güçlendirilmemiş deney yapılırken temel tabakasına gelecek malzemenin her 100 mm yükseklik için deney kasasına 232 kg temel malzemesi konulmuş ve her 100 mm'de bir olmak üzere sıkıştırma işlemi üç tabakada gerçekleştirilmiştir.



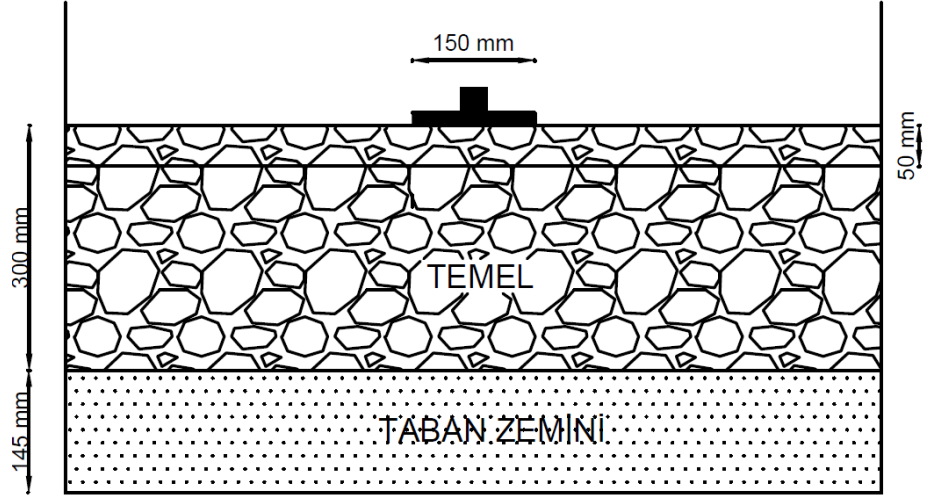
Şekil 3.17. 300 mm temel kalınlığındaki güçlendirilmemiş deney

Şekil 3.18.'deki 300 mm temel kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş deney yapılırken ilk önce 100 mm tabaka kalınlığı için gerekli olan 232 kg temel malzemesi deney kasasına boşaltılmış ve sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Dash vd. [22] yaptıkları çalışmada geocell kullanımından maksimum faydayı elde etmek için geocellin yükleme plakası çapının yaklaşık 0.1 katı derinliğe yerleştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla geocellin gömülme derinliği (u) 20 mm olarak belirlenmiştir. Geocell ile güçlendirilmiş tüm deneylerde geocell malzemesinin temel tabakası yüzeyinden gömülme derinliği (u) 20 mm olduğu için sonraki tabaka 80 mm yüksekliğe tekabül eden 185.6 kg temel malzemesi deney kasasına boşaltılmış ve sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırılan tabaka üzerine 100 mm yüksekliğindeki geocell aplatik edilmiştir ve üzerine 120 mm yüksekliğe tekabül eden 278.4 kg temel malzemesi deney kasasına boşaltılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.



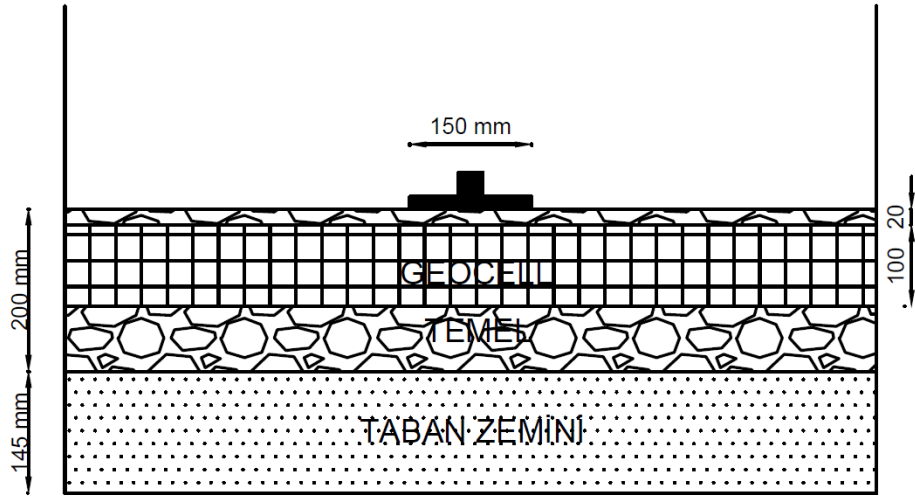
Şekil 3.18. 300 mm temel kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş deney

Şekil 3.19.'daki 300 mm temel kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş deneyde ise 100 mm yüksekliğe sahip ilk iki tabaka için 232 kg temel malzemesi aynı şekilde hazırlanmıştır. Ancak bu deneyde geogridin temel tabakası yüzeyinden gömülme derinliği 50 mm olduğu için sonraki tabaka 50 mm yüksekliğe tekabül eden 116 kg temel malzemesi deney kasasına boşaltılmış ve sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırılan son tabaka üzerine geogrid applike edilmiş ve üzerine aynı şekilde 50 mm yüksekliğindeki temel tabakası hazırlanmıştır. Suku vd. [32] yaptıkları çalışmada geogridin temel tabakasını güçlendirmede yaptığı katkıyı maksimum değere çıkarmak için geogridin gömülme derinliğinin temel tabakası yüzeyinden temel tabakası kalınlığının 1/6'sı kadar olması gerektiğini ve geogridin artan yük döngülerinde zarar görmemesi için ise minimum 50 mm gömülme derinliğine yerleştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu amaçla bu çalışmada geogridin gömülme derinliği 50 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca Mehrjardi ve Khazaei [33] yaptıkları çalışmada geogridden maksimum faydayı sağlamak için optimum geogrid açıklığının ortalama dane boyutunun yaklaşık 4.2 katı olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla çalışmada kullanılan geogrid açıklığı 20 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.19. 300 mm temel kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş deney

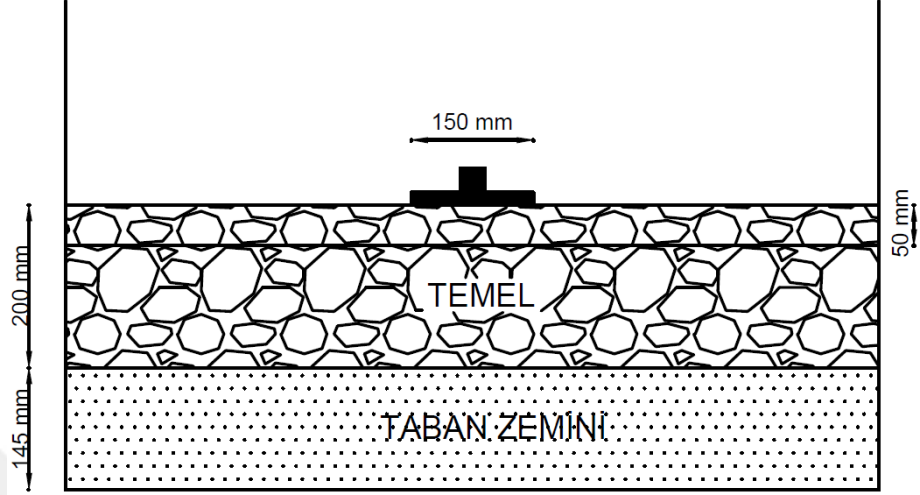
Şekil 3.20.'deki 200 mm temel kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş deneyde ise 80 mm yüksekliğe tekabül eden 185.6 kg temel malzemesi deney kasesına aynı şekilde yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan tabaka üzerine 100 mm yüksekliğindeki geocell malzemesi aplike edilmiştir. Daha sonra 120 mm yüksekliğe tekabül eden 278.4 kg temel malzemesi deney kasesına boşaltılıp sıkıştırılarak deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.20. 200 mm temel kalınlığındaki geocell ile güçlendirilmiş deney

Son olarak Şekil 3.21.'deki 200 mm temel kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş deneyde ise ilk olarak 100 mm yüksekliğe tekabül eden 232 kg temel malzemesi aynı şekilde hazırlanmıştır ve üzerine 50 mm yüksekliğe tekabül eden 116 kg temel

malzemesi hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan tabakanın üzerine geogrid applike edildikten sonra 50 mm yüksekliğe tekabül eden 116 kg temel malzemesi deney kasasına yerleştirilip deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.21. 200 mm temel kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş deney

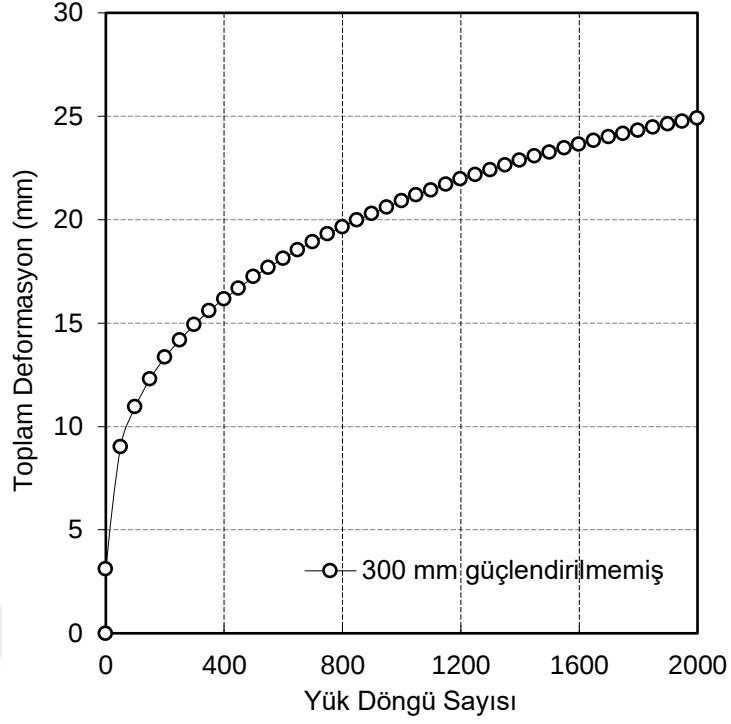
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında 145 mm taban zemini üzerinde 200 mm ve 300 mm tabaka kalınlığına sahip temel tabakasının geogrid ve geocell ile güçlendirilmesi durumu tekrarlı yükler altında toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, TBR (Traffic Benefit Ratio – Trafik Fayda Oranı), elastik deformasyon yüzdesi ve RDR (Rut Depth Reduction – Tekerlek İzi Azalma Oranı) açısından incelenmiştir.

4.1 300 mm Tabaka Kalınlığındaki Güçlendirilmemiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi

İlk olarak 145 mm yüksekliğindeki kum taban zemini üzerinde optimum su muhtevasında hazırlanan 300 mm temel tabakası yüksekliğindeki deney gerçekleştirilmiştir. Yükleme plakasının üzerindeki iki adet deformasyon ölçerden alınan düşey deformasyonların ortalamasının değerlendirildiği bu deney 550 kPa'lık basınç altında 2000 yük döngüsü için gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük döngü sayılarına karşılık gelen toplam deformasyon değerleri Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

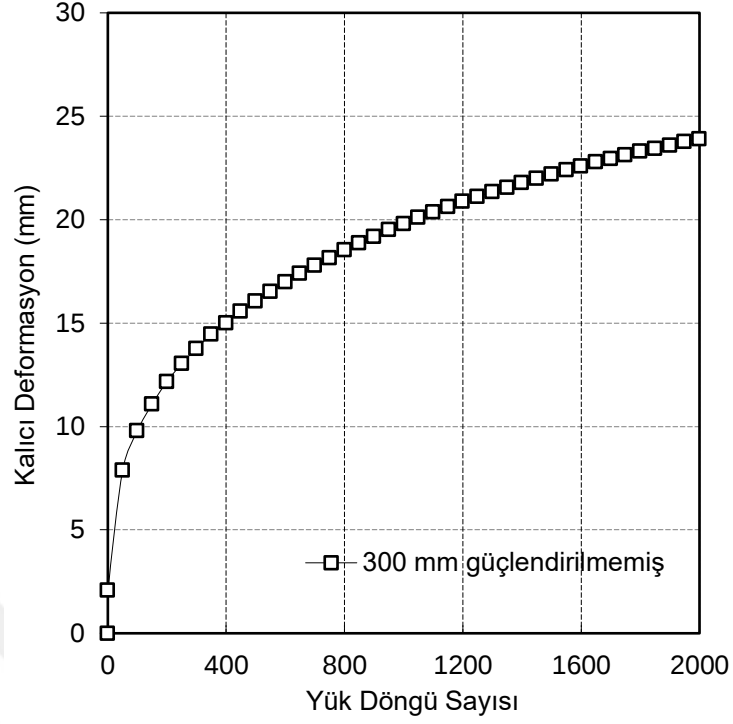
Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi yük döngü sayısı arttıkça toplam deformasyon değerleri artmaktadır. Bu artış ilk döngüler için daha fazla olmakla beraber döngü sayısı arttıkça azalmaktadır. Deney sonunda 2000 yük döngüsü için toplam deformasyon değerinin 24.92 mm'ye ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.1. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM)

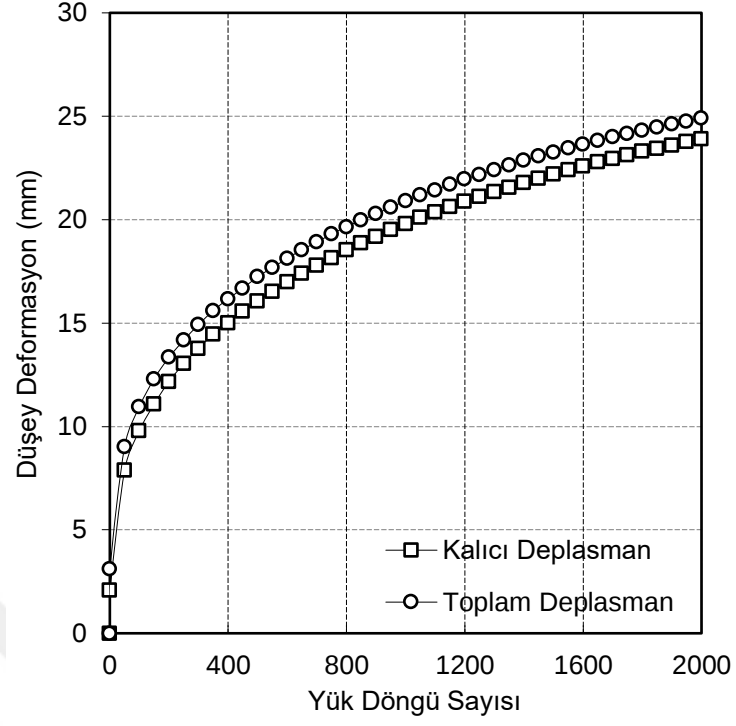
Deneyde yükleme plakasındaki yük boşaltıldıktan sonra plaka elastik deformasyon kadar geri gelmektedir. Her yük döngüsü sonunda elastik deformasyon oluştuğundan sonra geriye kalan deformasyon miktarı kalıcı deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Deney sonucunda yük döngü sayılarına karşılık gelen kalıcı deformasyon değerleri Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

Şekil 4.2.'de tıpkı toplam deformasyonda olduğu gibi yük döngü sayısı arttıkça kalıcı deformasyon değerleri de artmaktadır. Buradaki artış miktarı ilk döngülerde daha fazla olup sonraki döngüler için azalmaktadır. 2000 yük döngüsü gerçekleştirildikten sonra elde edilen kalıcı deformasyon değerinin 23.905 mm'ye ulaştığı görülmektedir.

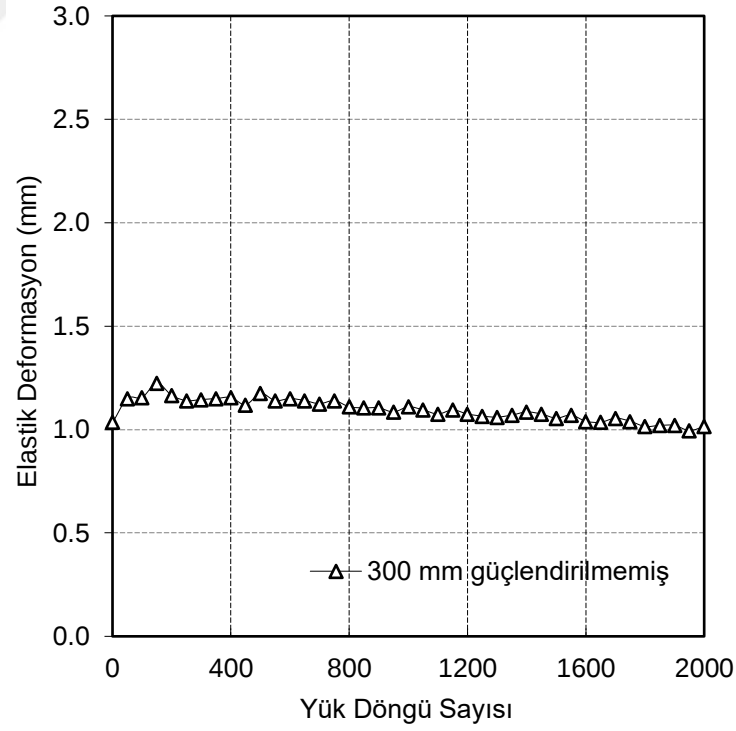


Şekil 4.2. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM)

Toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerleri Şekil 4.3.'te birlikte gösterilmiştir. Her yük döngüsü için toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki fark o yük döngüsüne ait elastik deformasyon değerini vermektedir. Bu deney için elastik deformasyon değerleri Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Buradan elastik deformasyon değerinin ilk yük döngüsü için 1.035 mm olduğu görülmektedir. Yük döngü sayısının artmasıyla beraber 1.225 mm'ye kadar arttığı ve daha sonra azalarak 2000 yük döngüsü sonunda 1.015 mm değerine ulaştığı görülmektedir.

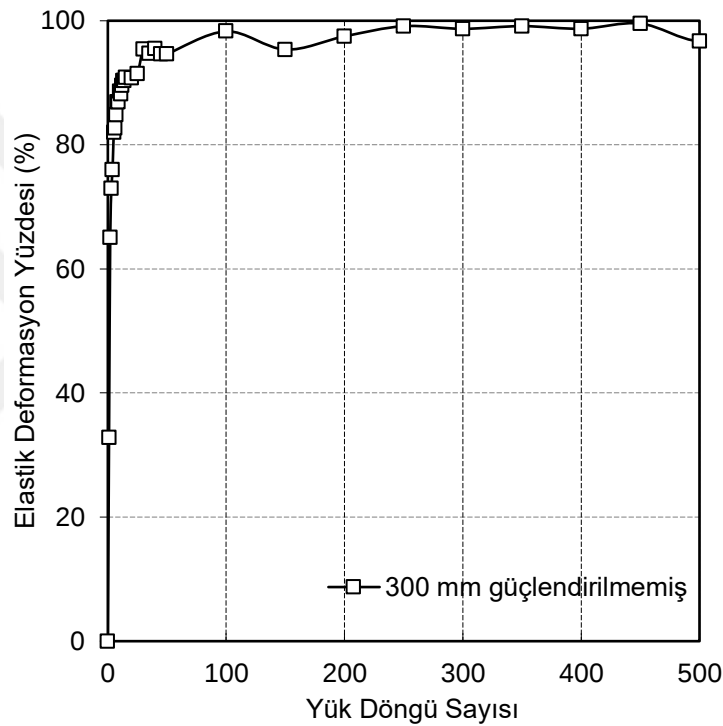


Şekil 4.3. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM)



Şekil 4.4. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM)

Şekil 4.5.'te ilk 500 yük döngüsü için toplam deformasyondaki elastik deformasyonun payını gösteren elastik deformasyon yüzdeleri gösterilmiştir. Elastik deformasyon yüzdesi belirli bir yük döngüsündeki elastik deformasyonun o yük döngüsüne ait toplam deformasyona (kalıcı ve elastik deformasyonun toplamı) bölünmesiyle elde edilmiştir. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyon daha baskın olduğu için yaklaşık olarak ilk 10 yük döngüsü civarına kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlıca artarak dengeli bir hale gelmiştir. 10. yük döngüsü sonunda elastik deformasyon yüzdesinin %88 olduğu görülmektedir.

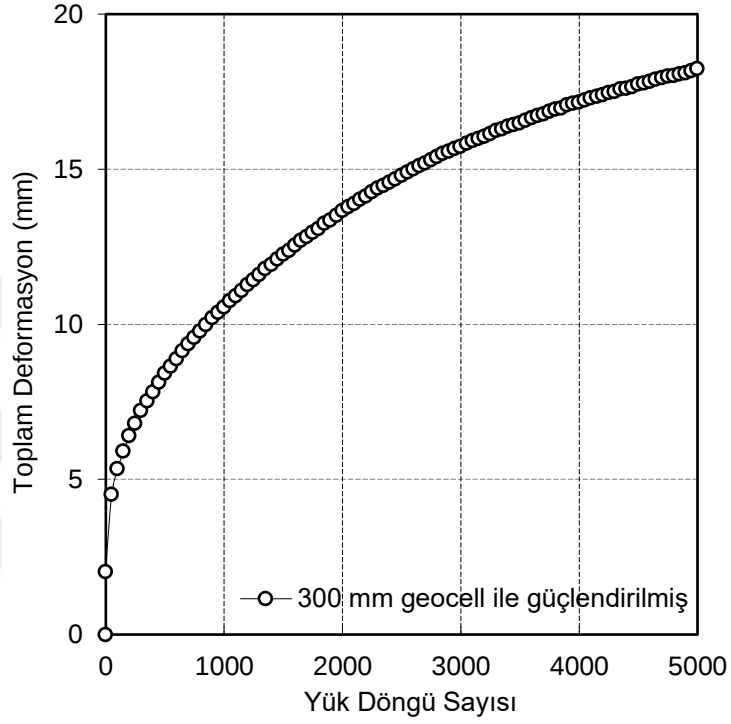


Şekil 4.5. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (300 mm GM)

4.2 300 mm Tabaka Kalınlığındaki Geocell ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi

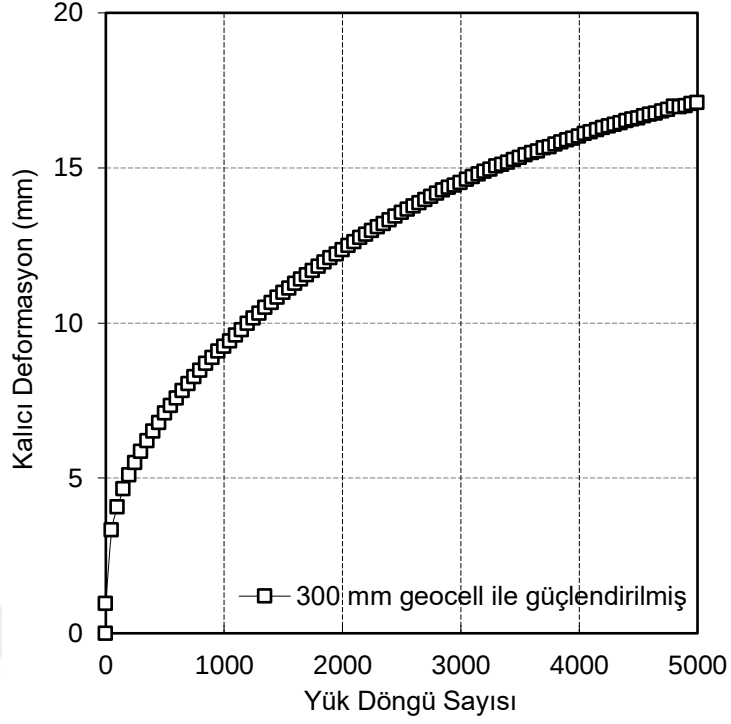
300 mm temel tabakası yüksekliğinde geocell malzemesinin zemin üzerinde oluşturacağı etkinin incelendiği deney 550 kPa basınç altında 5000 yük döngüsü için gerçekleştirilmiştir. Yük artışının deformasyonlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deney bittikten sonra plaka vasıtasıyla temel tabakasına aktarılan basınç 825 kPa değerine çıkarılarak 1000 yük döngüsü için deneye devam edilmiştir.

İlk 5000 yük d6ngüsü için toplam deformasyonları g6steren grafik Şekil 4.6.'da g6sterilmiştir. Diğer deneyde olduğu gibi ilk y6k d6ng6leri için toplam deformasyon değerleri hızla artmaktadır. Daha sonraki y6k d6ng6leri için bu artış miktarı azalmakta olup 5000 y6k d6ng6s6 sonunda toplam deformasyon değerinin 18.235 mm'ye ulaştığı g6r6lmektedir.



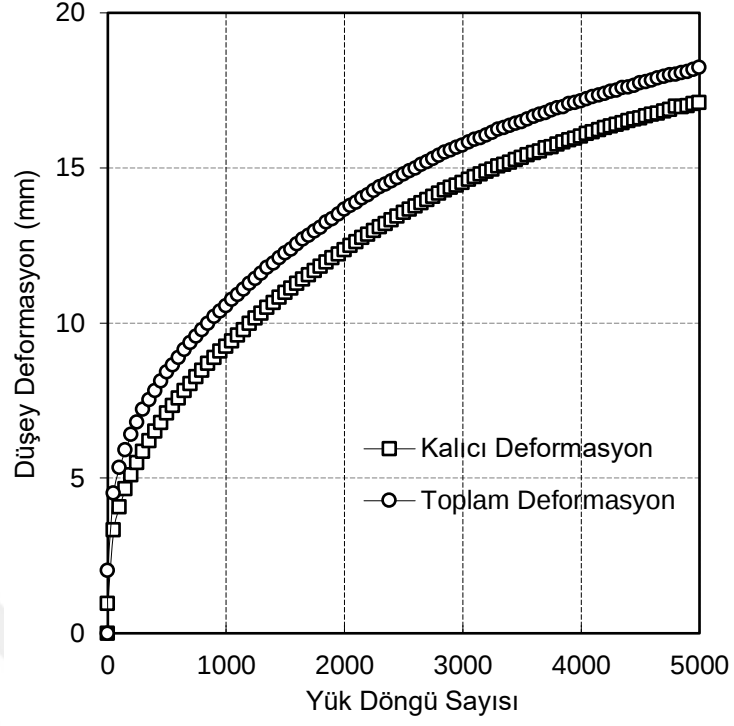
Şekil 4.6. Toplam deformasyon – y6k d6ng6 sayısı ilişkisi (GCG3)

Şekil 4.7.'de elastik deformasyonların oluşmasıyla meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri g6sterilmiştir. Burada da toplam deformasyonda olduğu gibi ilk y6k d6ng6lerinde hızlı bir artış varken sonraki y6k d6ng6lerinde bu artış azalmaktadır. Nihayetinde 5000 y6k d6ng6s6 sonunda kalıcı deformasyon değeri 17.115 mm değerine ulaşmaktadır.

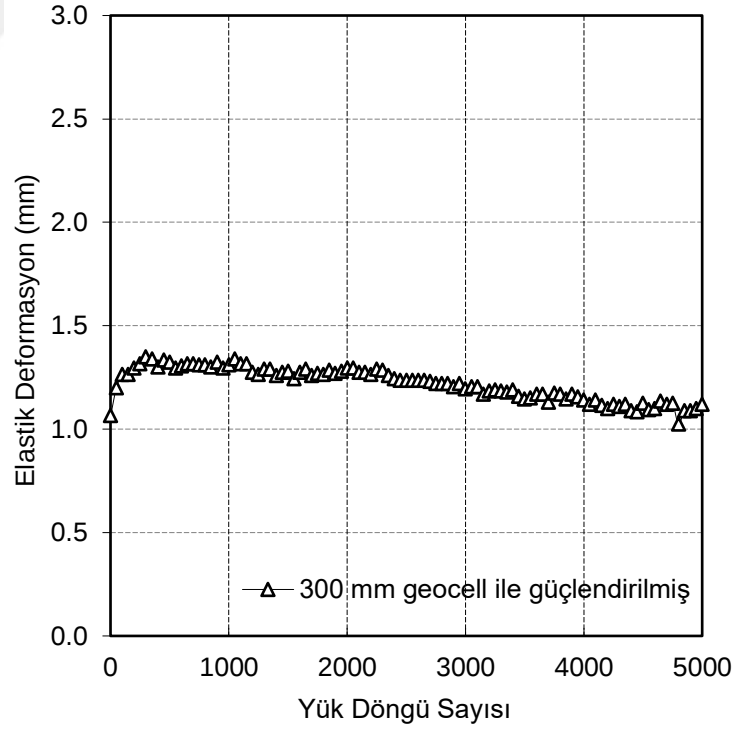


Şekil 4.7. Kalıcı deformasyon – Yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)

Şekil 4.8.'de toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon birlikte gösterilmiştir. Her yük döngüsü için ikisi arasındaki fark ile bulunan elastik deformasyon değerleri 5000 yük döngüsü için Şekil 4.9.'da gösterilmiştir. Elastik deformasyon ilk yük döngü için 1.065 mm olarak başlamış ve artarak 300. yük döngüsü sonunda 1.35 mm değerinde ulaşmıştır. Daha sonra azalarak 5000. yük döngüsü sonunda 1.12 mm değerine ulaşmıştır.



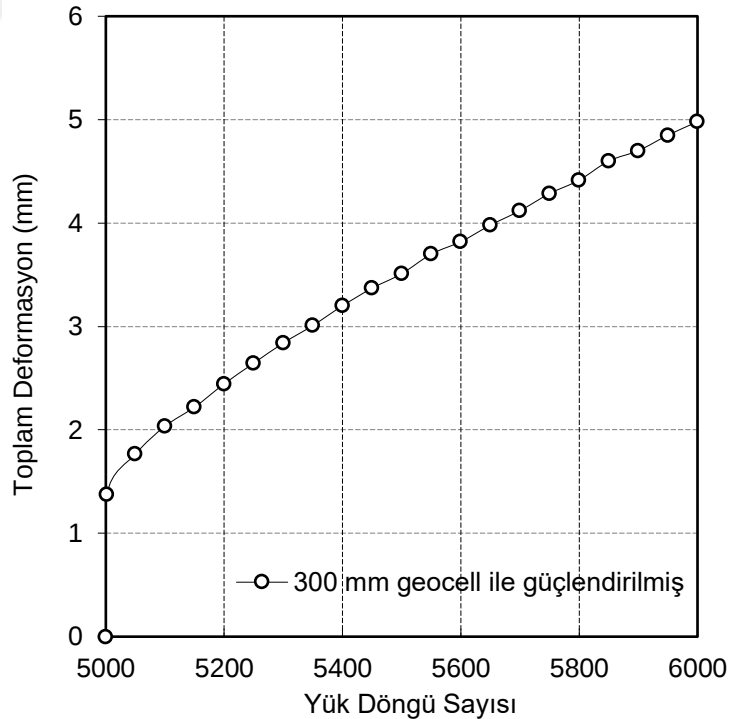
Şekil 4.8. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)



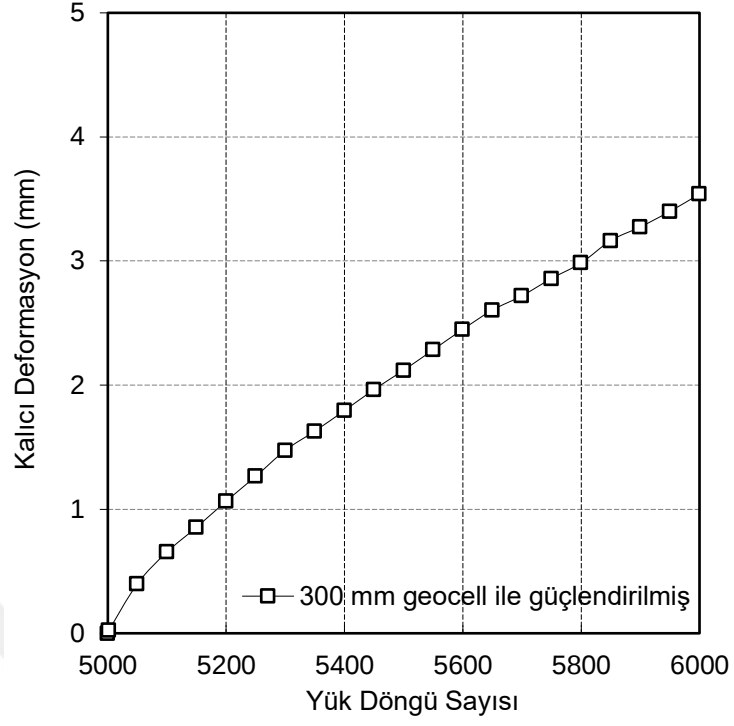
Şekil 4.9. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)

5000 yük d6ngüsünden sonra zemine aktarılan basıncın 825 kPa değeri ne artırılarak 1000 yük d6ngüsü için gerçekleştirilen deneye ait toplam deformasyonları g6steren grafik şekil 4.10.'da g6sterilmiştir. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen 1000 yük d6ngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 4.98 mm değeri ne ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında 1000 yük d6ngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 10.555 mm idi. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen toplam deformasyon değeri ndeki bu azalış zeminin ilk 5000 yük d6ngüsü için yapılan deney sonucunda sıkılaşmasına bağlanabilir.

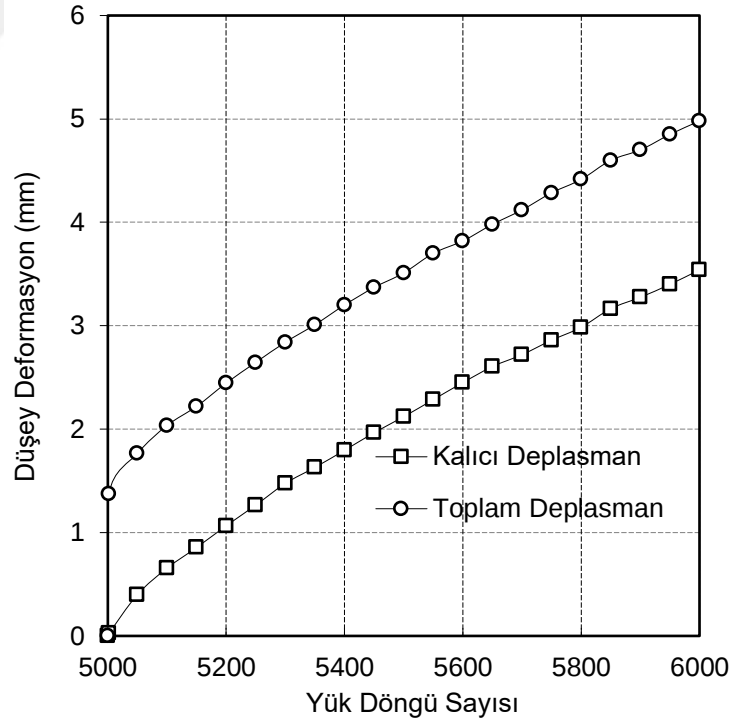
825 kPa basınç altında kalıcı deformasyon değeri şekil 4.11.'de g6sterilmiştir. Kalıcı deformasyon değeri 1000 yük d6ngüsü sonunda 3.54 mm değeri ne ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında yapılan deneyde 1000 yük d6ngüsü sonunda kalıcı deformasyon değeri 9.245 mm idi. Tıpkı toplam deformasyondaki gibi kalıcı deformasyondaki bu azalış ilk 5000 yük d6ngüsü sonucunda zeminin sıkılaşmasından dolaydır.



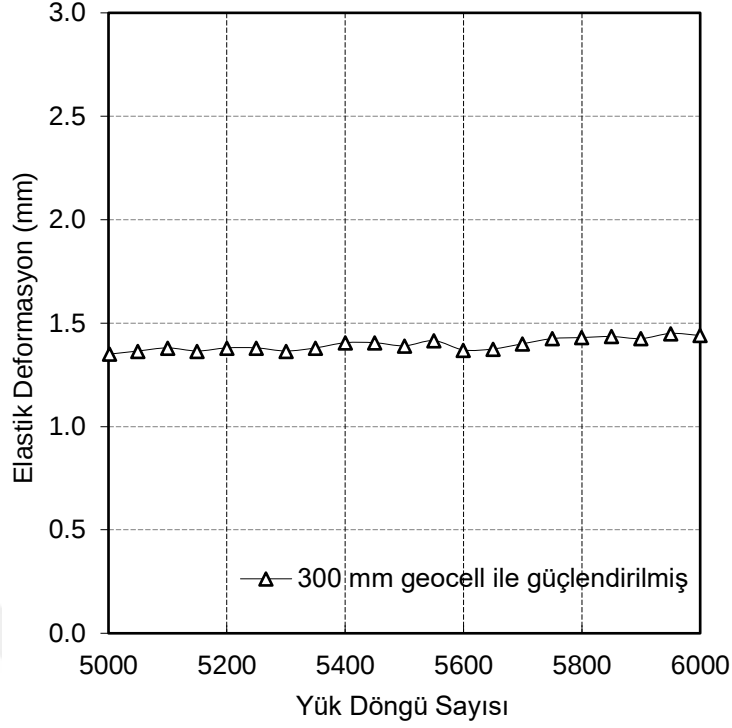
şekil 4.10. Toplam deformasyon - yük d6ngü sayısı ilişkisi (GCG3)



Şekil 4.11. Kalıcı deformasyon - yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)



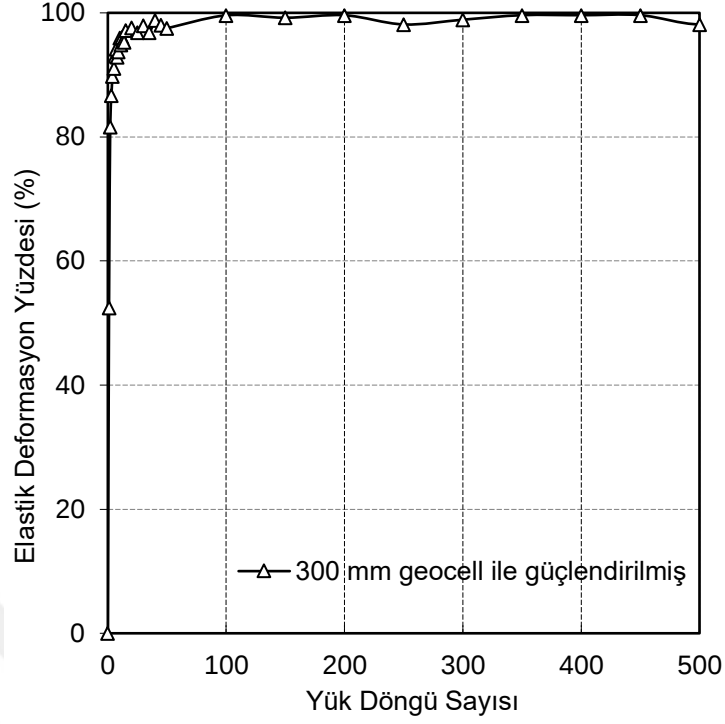
Şekil 4.12. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)



Şekil 4.13. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)

Şekil 4.12.’de toplam ve kalıcı deformasyonlar birlikte gösterilmiştir. Bu iki deformasyon değerinin birbirinden çıkarılmasıyla elde edilen elastik deformasyon değerleri ise Şekil 4.13.’te gösterilmiştir. İlk yük döngüsünde elastik deformasyon değerinin 1.35 mm olduğu görülmektedir ve bu değer artarak 6000 yük döngüsü sonunda 1.44 mm’ye ulaşmaktadır.

Şekil 4.14.’te ilk 500 yük döngüsü için toplam deformasyondaki elastik deformasyonun payını gösteren elastik deformasyon yüzdeleri gösterilmiştir. Şekil 4.14.’te görüldüğü gibi ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyon daha baskın olduğu için yaklaşık olarak ilk 10 yük döngüsü civarına kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlıca artarak dengeli bir hale gelmiştir. 10. yük döngüsü sonunda elastik deformasyon yüzdesinin %96 olduğu görülmektedir.

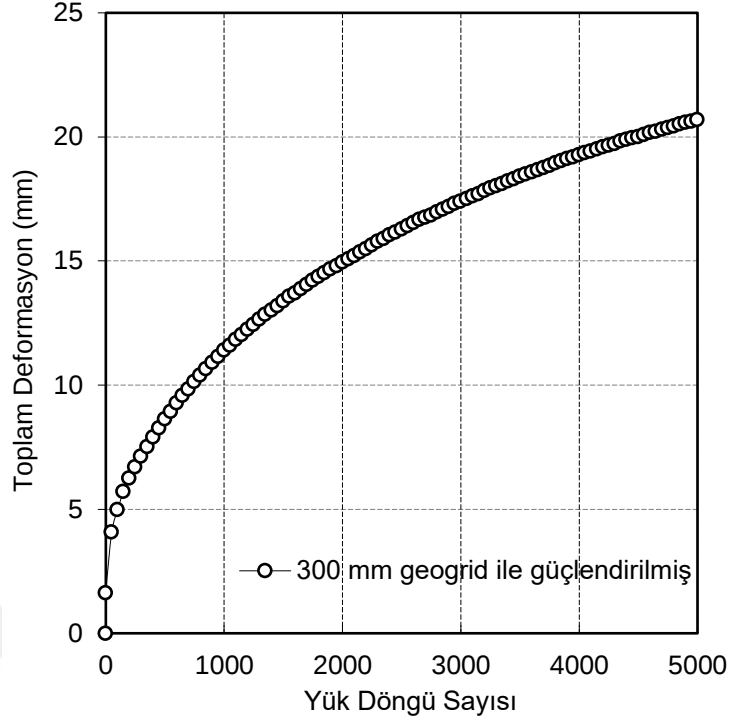


Şekil 4.14. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG3)

4.3 300 mm Tabaka Kalınlığındaki Geogrid ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi

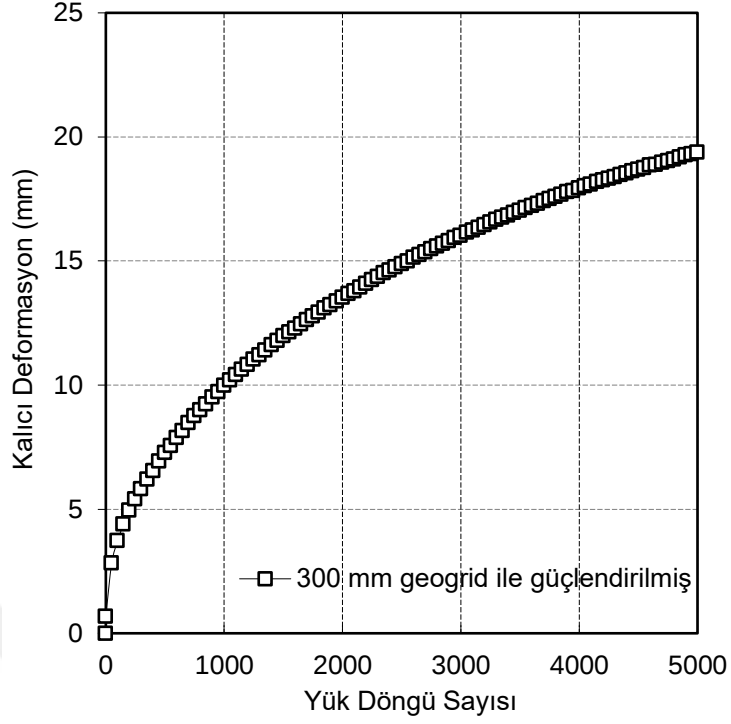
300 mm temel tabakası yüksekliğinde geogrid malzemesinin zemin üzerinde oluşturacağı etkinin incelendiği deney 550 kPa basınç altında 5000 yük döngüsü için gerçekleştirilmiştir. Yük artışının deformasyonlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deney bittikten sonra plaka vasıtasıyla temel tabakasına aktarılan basınç 825 kPa değerine çıkarılarak 2000 yük döngüsü için deneye devam edilmiştir.

İlk 5000 yük döngüsü için toplam deformasyonları gösteren grafik Şekil 4.15.’te gösterilmiştir. Diğer deneylerde olduğu gibi ilk yük döngüleri için toplam deformasyon değerleri hızla artmaktadır. Daha sonraki yük döngüleri için bu artış miktarı azalmakta olup 5000 yük döngüsü sonunda toplam deformasyon değerinin 20.705 mm’ye ulaştığı görülmektedir.



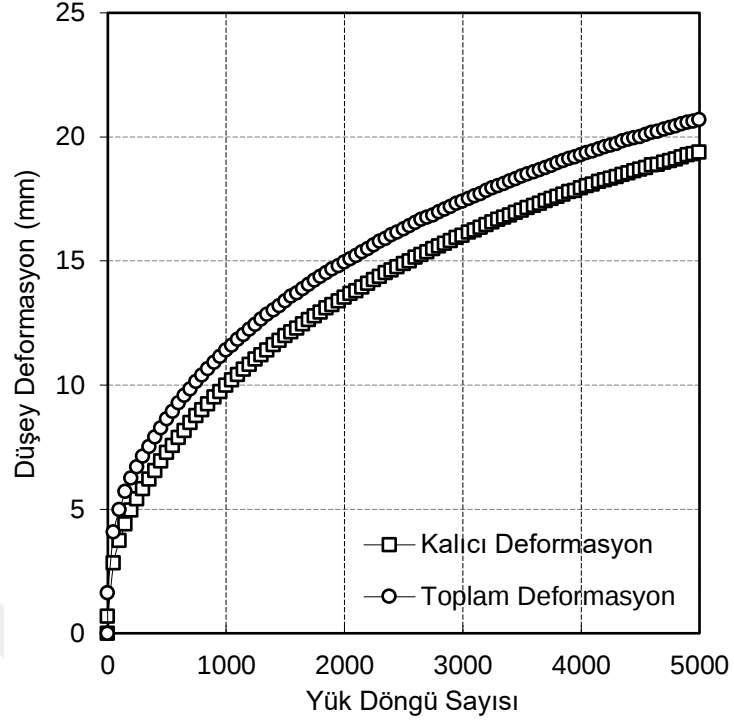
Şekil 4.15. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)

Şekil 4.16.'da deney sonucunda oluşan kalıcı deformasyonlar gösterilmiştir. Aynı diğer deneylerdeki gibi ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyonlar hızla artarken sonraki yük döngülerinde bu artışın hızı azalarak devam etmiştir. 5000 yük döngüsü sonunda kalıcı deformasyon değeri 19.39 mm'ye ulaşmıştır.

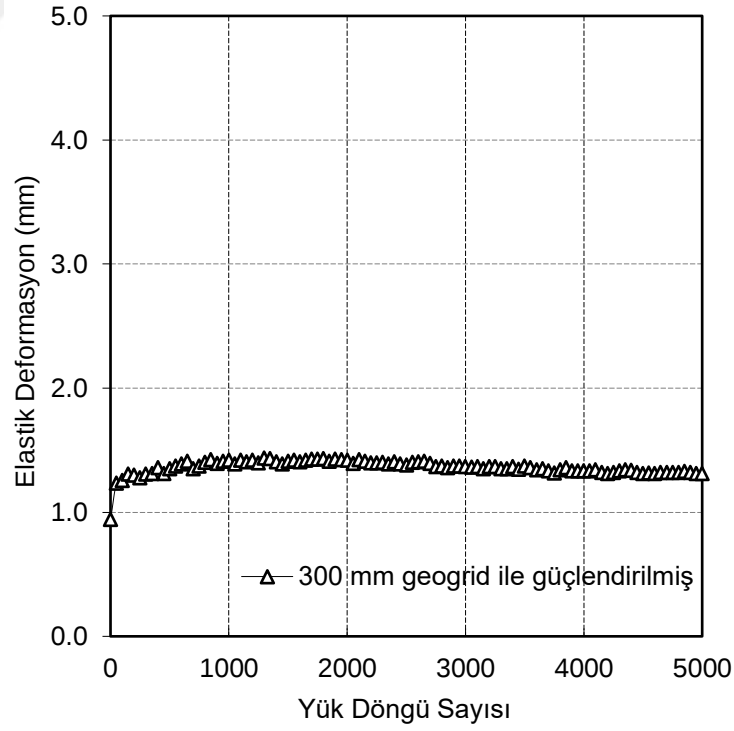


Şekil 4.16. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)

Deneyden elde edilen toplam ve kalıcı deformasyonlar Şekil 4.17.'de birlikte verilmiştir. Her yük döngüsü için bu iki deformasyon değerinin farkının alınmasıyla hesaplanan elastik deformasyon değerleri 5000 yük döngüsü için Şekil 4.18.'de gösterilmiştir. Elastik deformasyon ilk yük döngüsü için 0.945 mm olarak başlamış ve artarak 1300. yük döngüsü sonunda 1.44 mm değerinde ulaşmıştır. Daha sonra azalarak 5000. yük döngüsü sonunda 1.315 mm değerine ulaşmıştır.

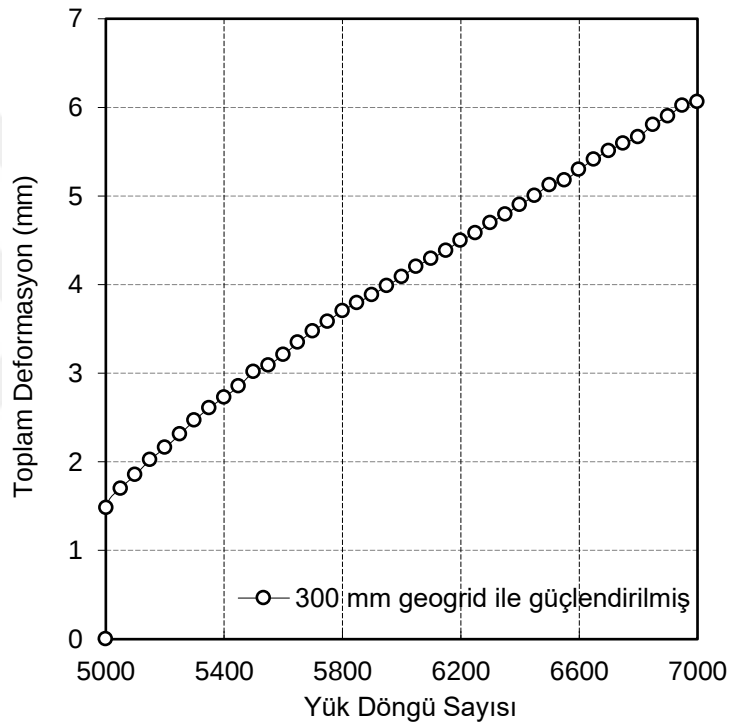


Şekil 4.17. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)



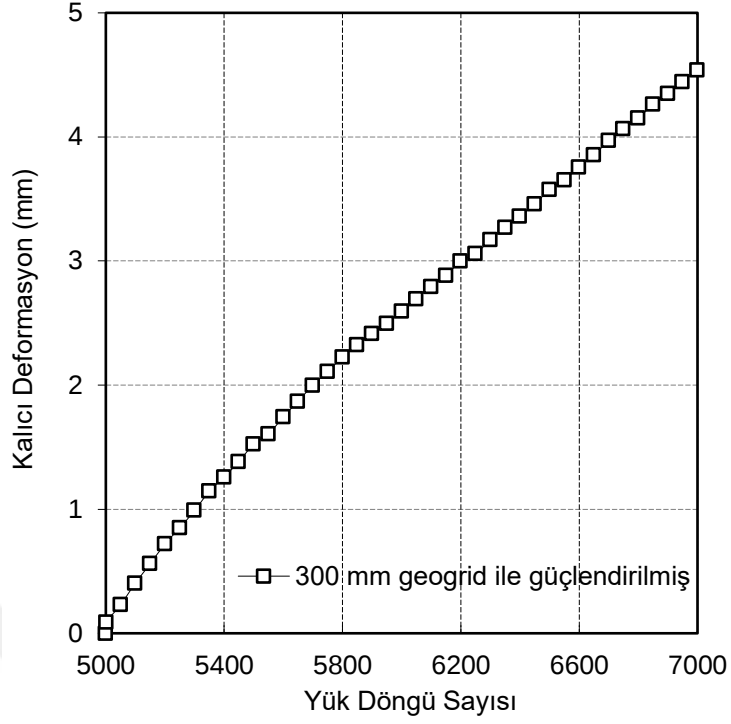
Şekil 4.18. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)

5000 yük d6ngüsünden sonra zemine aktarılan basıncın 825 kPa değerine artırılarak 2000 yük d6ngüsü için gerçekleştirilen deneye ait toplam deformasyonları g6steren grafik şekil 4.19.'da g6sterilmiştir. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen 2000 yük d6ngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 6.065 mm değerine ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında 2000 yük d6ngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 14.96 mm idi. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen toplam deformasyon değerindeki bu azalış zeminin ilk 5000 yük d6ngüsü için yapılan deney sonucunda sıkılaşmasından kaynaklanmaktadır.



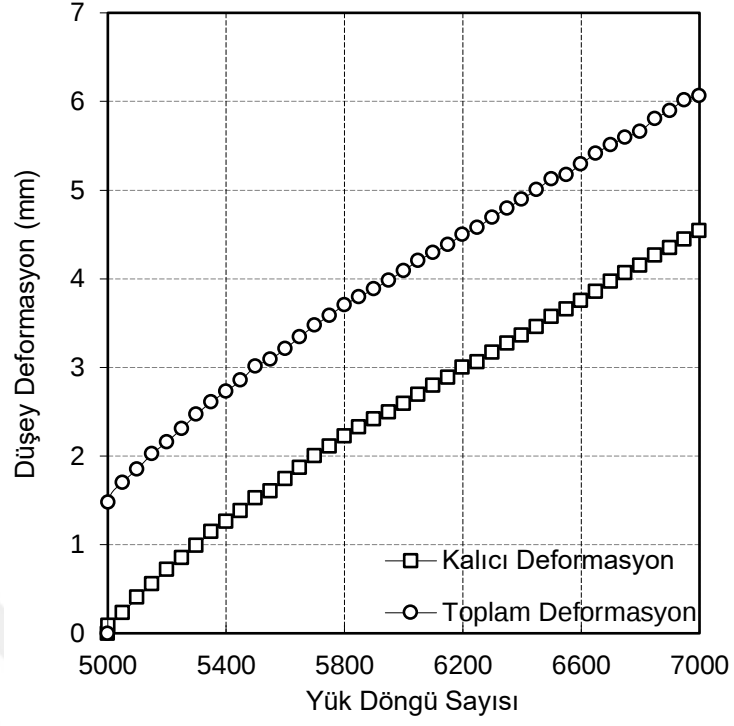
şekil 4.19. Toplam deformasyon – yük d6ngü sayısı ilişkisi (GGG3)

825 kPa basınç altında kalıcı deformasyon değerleri şekil 4.20.'de g6sterilmiştir. Kalıcı deformasyon değeri 2000 yük d6ngüsü sonunda 4.54 mm değerine ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında yapılan deneyde 2000 yük d6ngüsü sonunda kalıcı deformasyon değeri 13.54 mm idi. Tıpkı toplam deformasyondaki gibi kalıcı deformasyondaki bu azalış ilk 5000 yük d6ngüsü sonucunda zeminin sıkılaşmasından dolaydır.

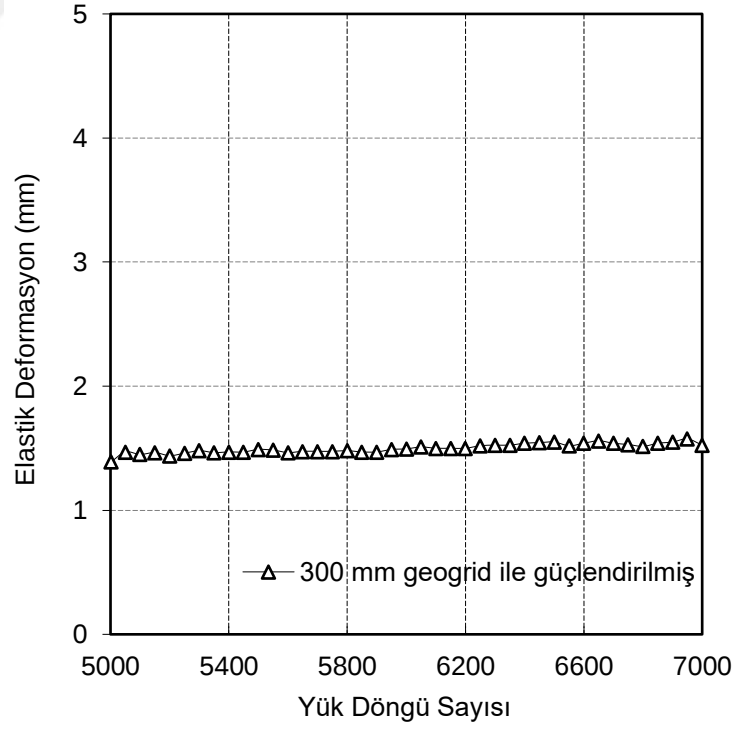


Şekil 4.20. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)

Şekil 4.21.'de toplam ve kalıcı deformasyonlar birlikte gösterilmiştir. Bu iki deformasyon değerinin birbirinden çıkarılmasıyla elde edilen elastik deformasyon değerleri ise Şekil 4.22.'te gösterilmiştir. İlk yük döngüsünde elastik deformasyon değerinin 1.39 mm olduğu görülmektedir ve bu değer artarak 7000. yük döngüsü sonunda 1.525 mm'ye ulaşmaktadır.

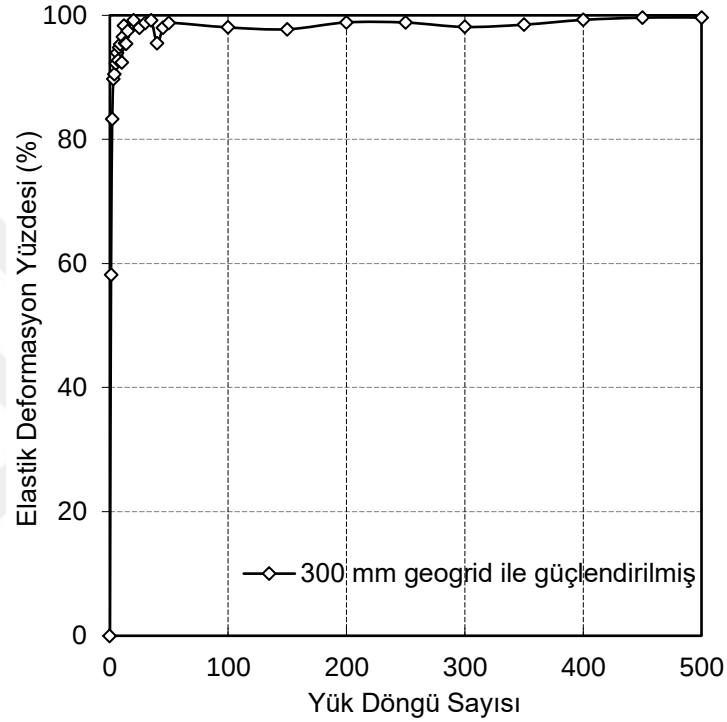


Şekil 4.21. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)



Şekil 4.22. Elastik deformasyon yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)

Şekil 4.23.'te ilk 500 yük döngüsü için toplam deformasyondaki elastik deformasyonun payını gösteren elastik deformasyon yüzdeleri gösterilmiştir. Şekil 4.23.'te görüldüğü gibi ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyon daha baskın olduğu için yaklaşık olarak ilk 10 yük döngüsü civarına kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlıca artarak dengeli bir hale gelmiştir. 10. yük döngüsü sonunda elastik deformasyon yüzdesinin %98 olduğu görülmektedir.

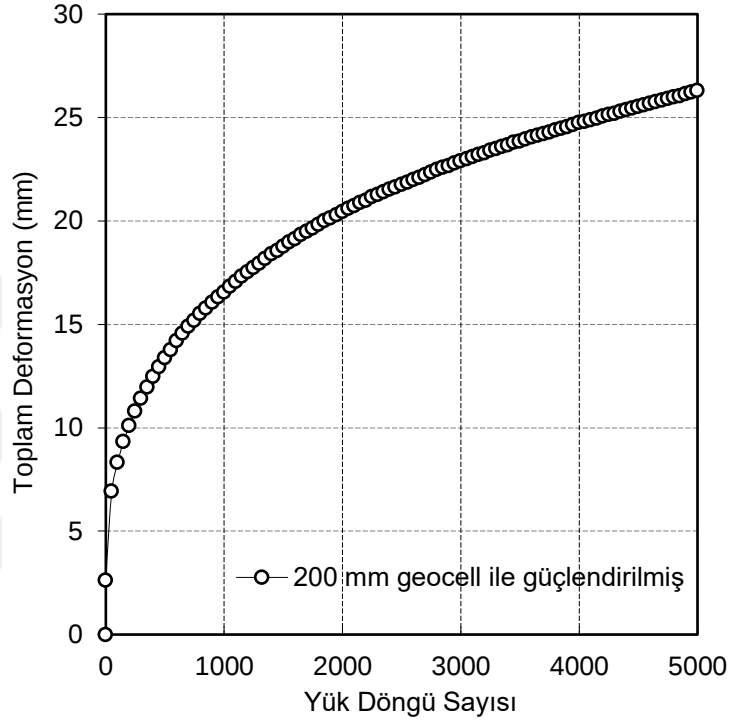


Şekil 4.23. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG3)

4.4 200 mm Tabaka Kalınlığındaki Geocell ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi

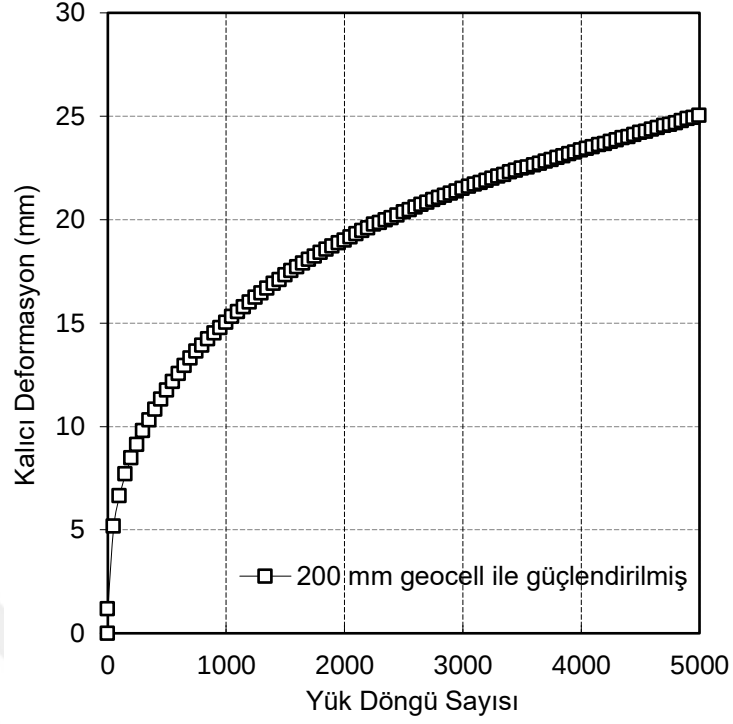
Önceki deneylerde 300 mm olan temel tabakası yüksekliği tabaka kalınlığının etkisini araştırmak için 200 mm'ye azaltılarak geocell malzemesinin zemin üzerinde oluşturacağı etkinin incelendiği deney 550 kPa basınç altında 5000 yük döngüsü için gerçekleştirilmiştir. Yük artışının deformasyonlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deney bittikten sonra plaka vasıtasıyla temel tabakasına aktarılan basınç 825 kPa değerine çıkarılarak 2000 yük döngüsü için deneye devam edilmiştir.

İlk 5000 yük d6ngüsü için toplam deformasyonları g6steren grafik Şekil 4.24.'te g6sterilmiştir. Diğer deneylerde olduğu gibi ilk y6k d6ngülerinde toplam deformasyon değerleri hızlı bir artış g6stermektedir. Daha sonraki y6k d6ng6leri için bu artış miktarı azalarak 5000 y6k d6ng6s6 sonunda toplam deformasyon değeri 26.3 mm'ye ulaşmıştır.



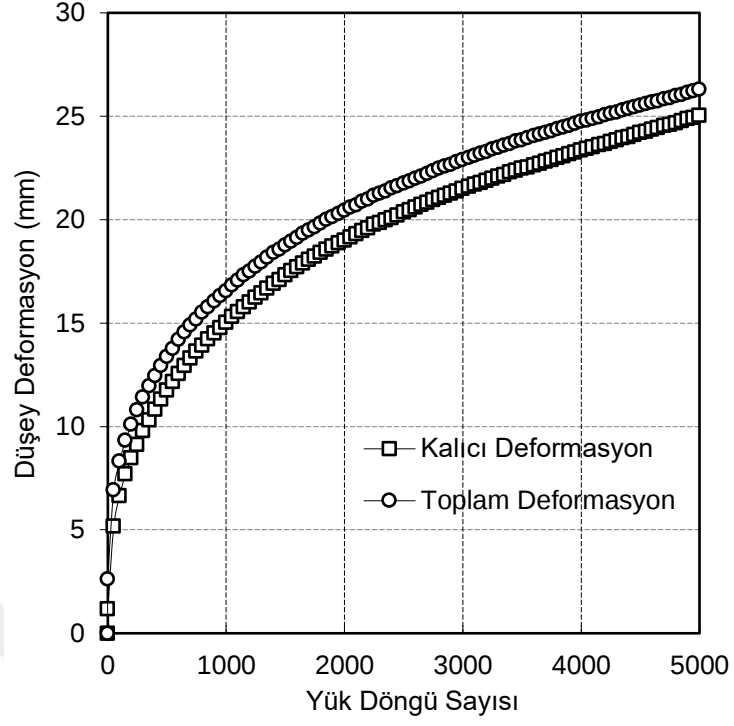
Şekil 4.24. Toplam deformasyon – y6k d6ng6 sayısı ilişkisi (GCG2)

Şekil 4.25.'te deney sonucunda oluşan kalıcı deformasyonlar g6sterilmiştir. Diğer deneylerde de olduğu gibi ilk y6k d6ng6lerinde kalıcı deformasyonların artış hızı y6ksekken sonraki y6k d6ng6lerinde bu artışın hızı azalarak devam etmiştir. 550 kPa'lık basınç değeri altında gerçekleşen deneyin 5000 y6k d6ng6s6 sonunda kalıcı deformasyon değeri 25.035 mm'ye ulaşmıştır.

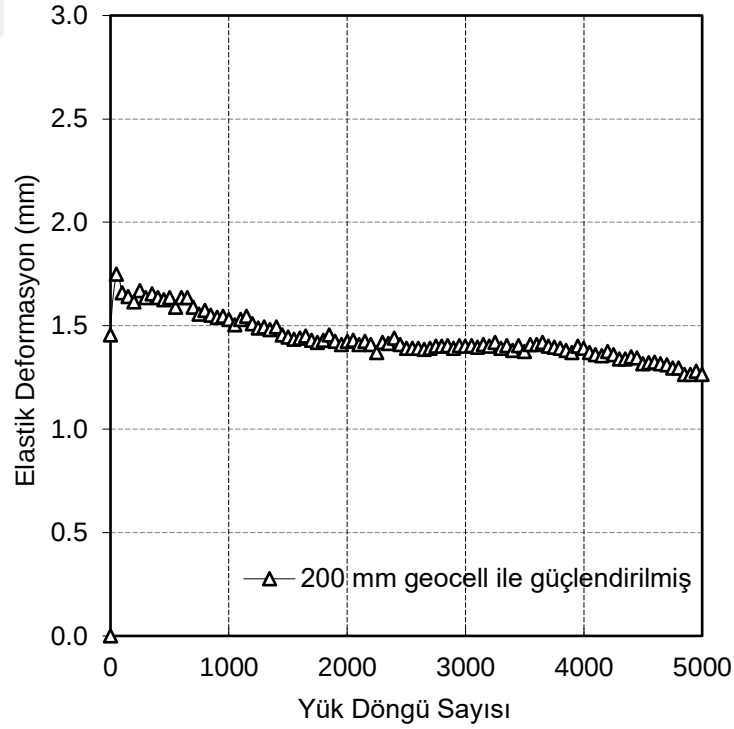


Şekil 4.25. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)

Deneyden elde edilen toplam ve kalıcı deformasyonlar Şekil 4.26.'da birlikte verilmiştir. Her yük döngüsü için bu iki deformasyon değerinin farkının alınmasıyla hesaplanan elastik deformasyon değerleri 5000 yük döngüsü için Şekil 4.27.'de gösterilmiştir. Elastik deformasyon değeri ilk yük döngüsü için 1.455 mm olarak başlamış ve artarak 50 yük döngüsü sonunda 1.75 mm değerinde ulaşmıştır. Daha sonra azalmaya başlayarak 5000 yük döngüsü sonunda 1.265 mm değerine ulaşmıştır.

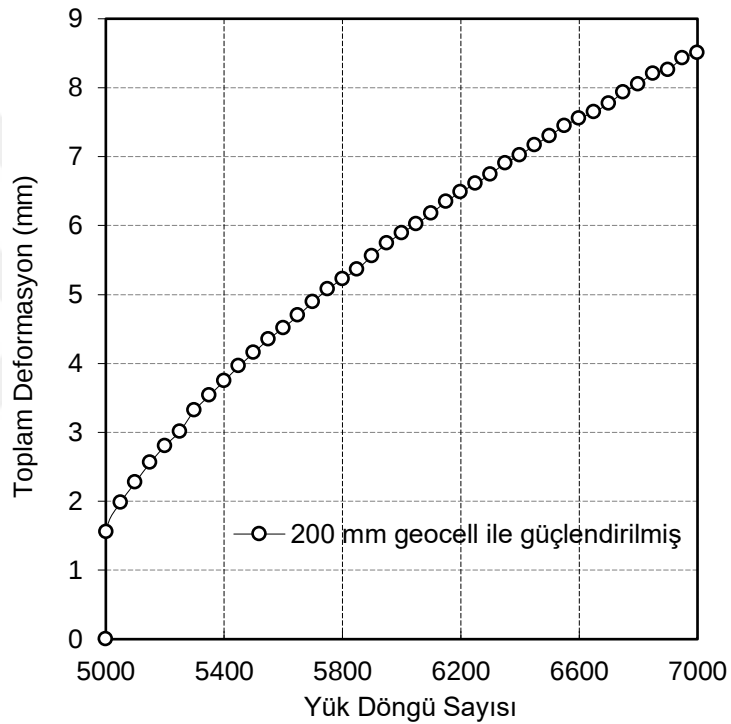


Şekil 4.26. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)



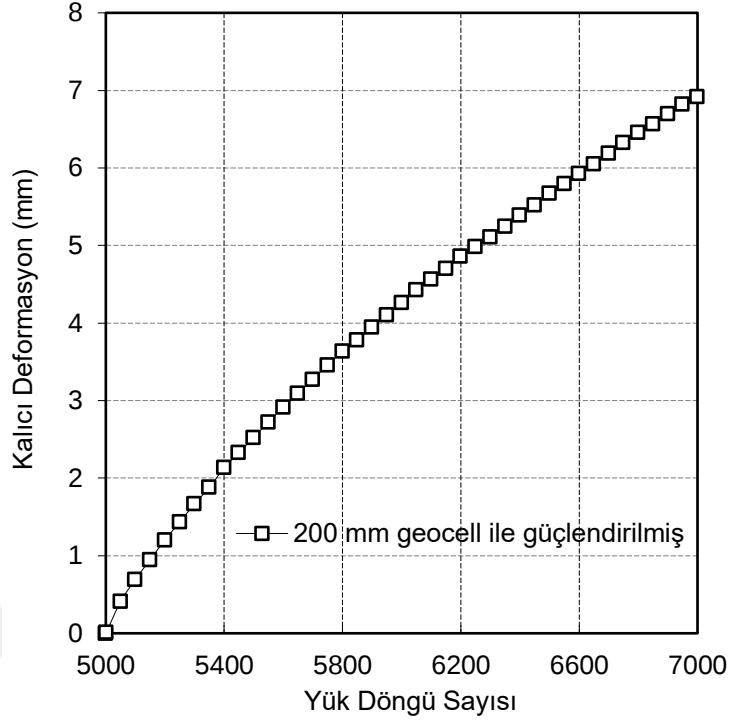
Şekil 4.27. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)

5000 yük döngüsünden sonra zemine aktarılan basıncın 825 kPa değerine çıkarılarak 2000 yük döngüsü için gerçekleştirilen deneye ait toplam deformasyonları veren grafik Şekil 4.28.'de gösterilmiştir. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen 2000 yük döngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 8.51 mm değerine ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında 2000. yük döngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 20.44 mm idi. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen toplam deformasyon değerindeki bu azalış zeminin ilk 5000 yük döngüsü için yapılan deney sonucunda sıkılaşmasından kaynaklanmaktadır.



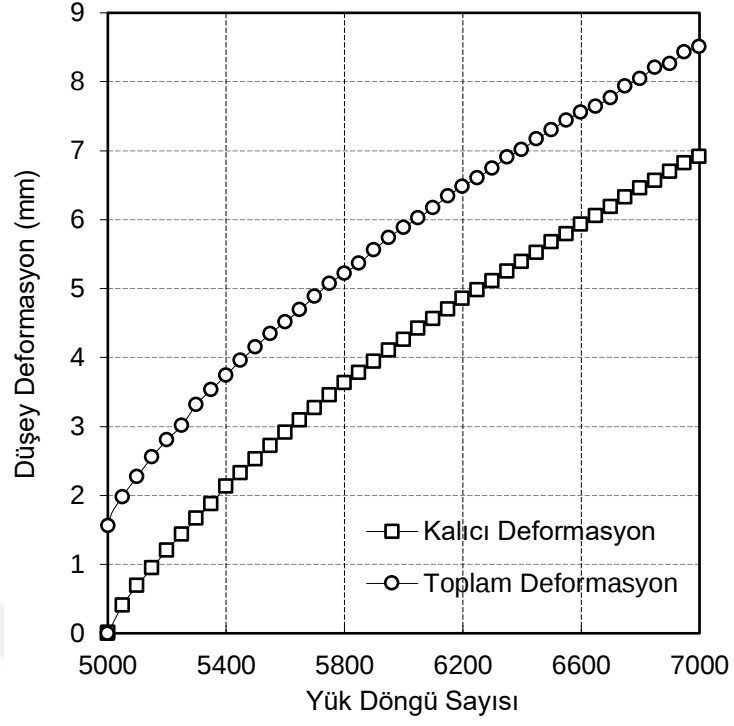
Şekil 4.28. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)

825 kPa basınç altında kalıcı deformasyon değerleri Şekil 4.29.'da gösterilmiştir. Kalıcı deformasyon değeri 2000 yük döngüsü sonunda 6.915 mm değerine ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında yapılan deneyde 2000 yük döngüsü sonunda kalıcı deformasyon değeri 19.015 mm idi. Tıpkı toplam deformasyondaki gibi kalıcı deformasyondaki bu azalış ilk 5000 yük döngüsü sonucunda zeminin sıkılaşmasından dolayıdır.

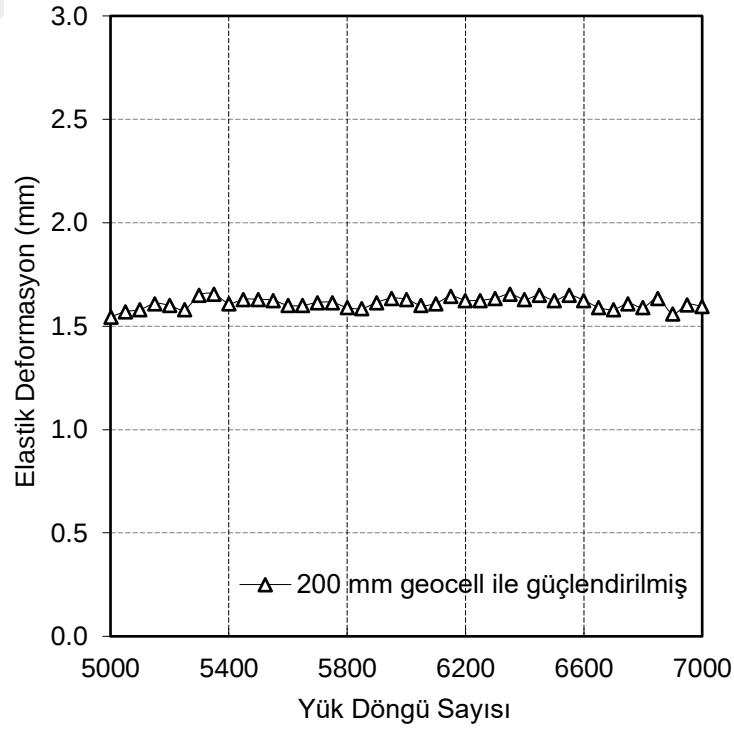


Şekil 4.29. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)

Şekil 4.30.'da toplam ve kalıcı deformasyonlar birlikte gösterilmiştir. Bu iki deformasyon değerinin birbirinden çıkarılmasıyla elde edilen elastik deformasyon değerleri ise Şekil 4.31.'de gösterilmiştir. İlk yük döngüsünde elastik deformasyon değerinin 1.545 mm olduğu görülmektedir ve bu değer artarak 7000 yük döngüsü sonunda 1.595 mm'ye ulaşmaktadır.

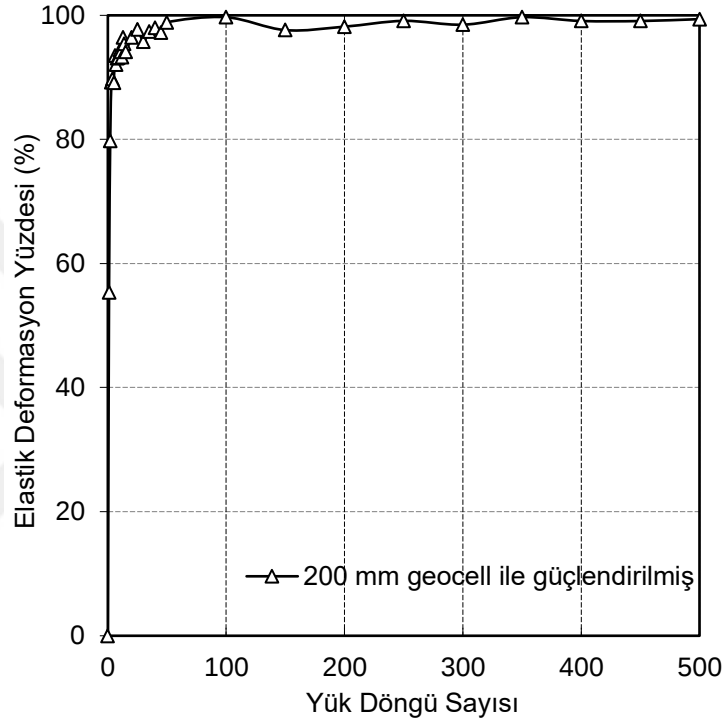


Şekil 4.30. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)



Şekil 4.31. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)

Şekil 4.32.'de ilk 500 yük döngüsü için toplam deformasyondaki elastik deformasyonun payını gösteren elastik deformasyon yüzdeleri gösterilmiştir. Şekil 4.32.'de görüldüğü gibi ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyon daha baskın olduğu için yaklaşık olarak ilk 10 yük döngüsü civarına kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlıca artarak dengeli bir hale gelmiştir. 12. yük döngüsü sonunda elastik deformasyon yüzdesinin %93 olduğu görülmektedir.



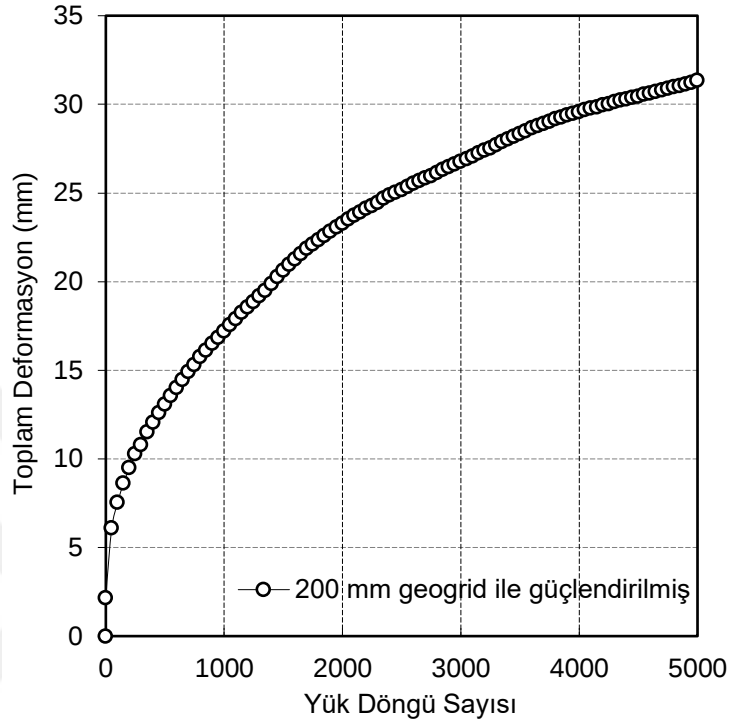
Şekil 4.32. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GCG2)

4.5 200 mm Tabaka Kalınlığındaki Geogrid ile Güçlendirilmiş Temelin Deney Sonuçlarının İncelenmesi

200 mm temel tabakası yüksekliğinde geogrid malzemesinin zemin üzerinde oluşturacağı etkinin incelendiği deney 550 kPa basınç altında 5000 yük döngüsü için gerçekleştirilmiştir. Yük artışının deformasyonlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deney bittikten sonra plaka vasıtasıyla temel tabakasına aktarılan basınç 825 kPa değerine çıkarılarak 2000 yük döngüsü için deneye devam edilmiştir.

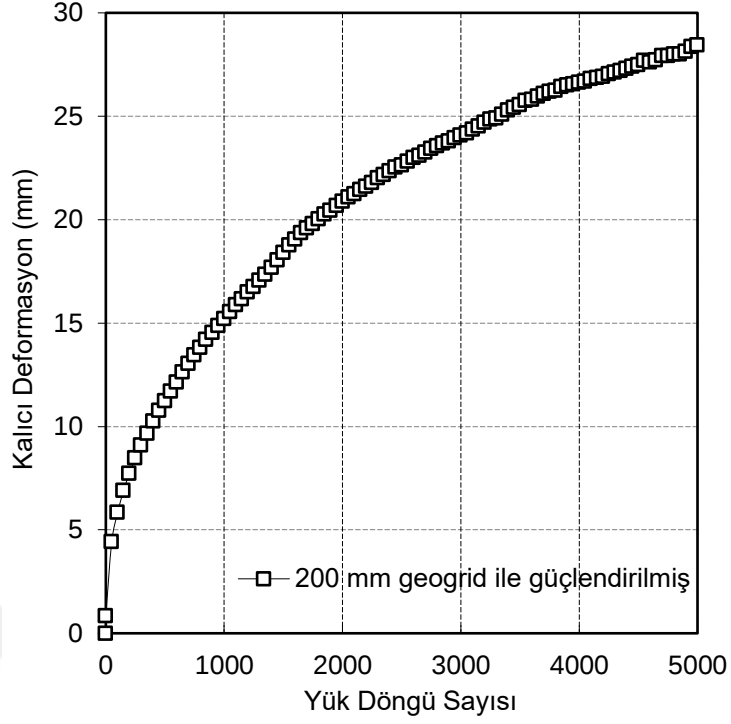
İlk 5000 yük döngüsü için toplam deformasyonları gösteren grafik Şekil 4.33.'te gösterilmiştir. Diğer deneylerde olduğu gibi ilk yük döngüleri için toplam

deformasyon değerleri hızla artmaktadır. Daha sonraki yük döngüleri için bu artış miktarı azalmakta olup 5000 yük döngüsü sonunda toplam deformasyon değerinin 31.35 mm'ye ulaştığı görölmektedir.



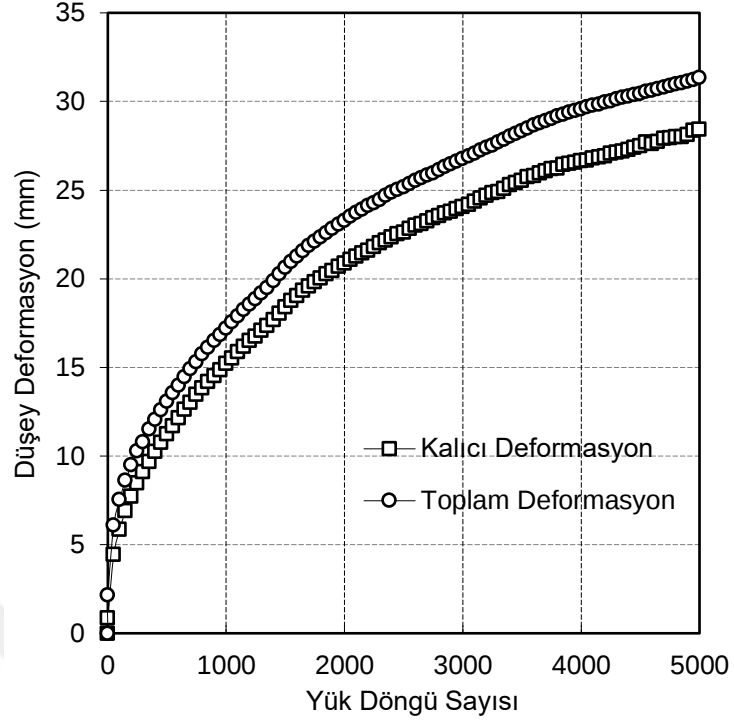
Şekil 4.33. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)

Şekil 4.34.'te deney sonucunda oluşan kalıcı deformasyonlar gösterilmiştir. Diğer deneylerde de olduğu gibi ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyonların artış hızı yüksek iken sonraki yük döngülerinde bu artışın hızı azalarak devam etmiştir. 550 kPa'lık basınç değeri altında gerçekleşen deneyin 5000 yük döngüsü sonunda kalıcı deformasyon değeri 28.435 mm'ye ulaşmıştır.

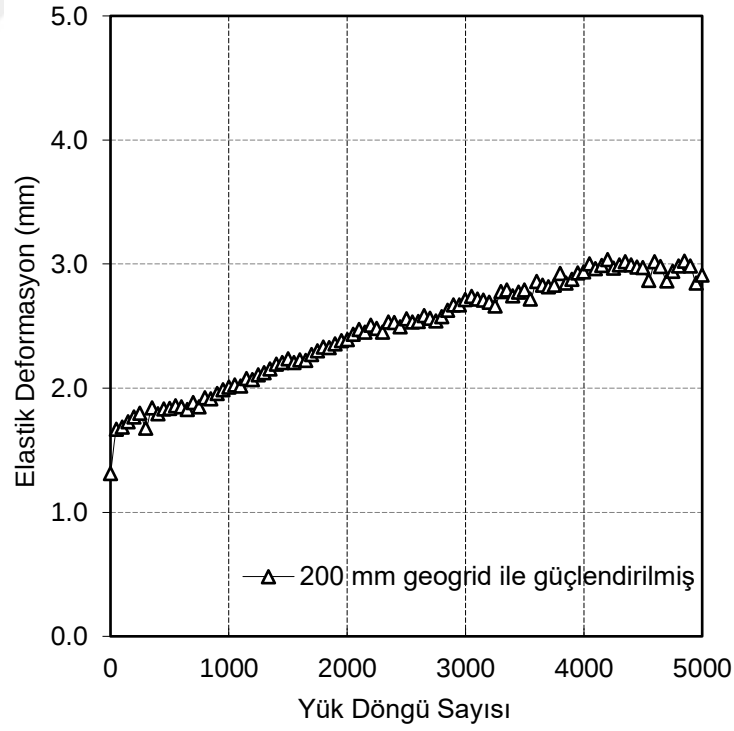


Şekil 4.34. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)

Deneyden elde edilen toplam ve kalıcı deformasyonlar Şekil 4.35.'te birlikte verilmiştir. Her yük döngüsü için bu iki deformasyon değerinin farkının alınmasıyla hesaplanan elastik deformasyon değerleri 5000 yük döngüsü için Şekil 4.36.'da gösterilmiştir. Elastik deformasyon değeri ilk yük döngüsü için 1.315 mm olarak başlamış ve artarak 5000 yük döngüsü sonunda 2.915 mm değerine ulaşmıştır.

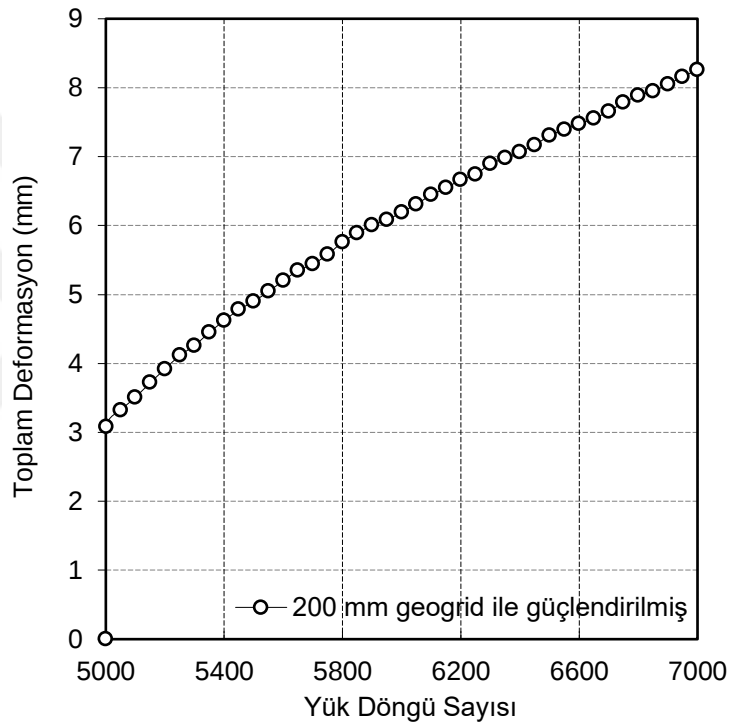


Şekil 4.35. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)



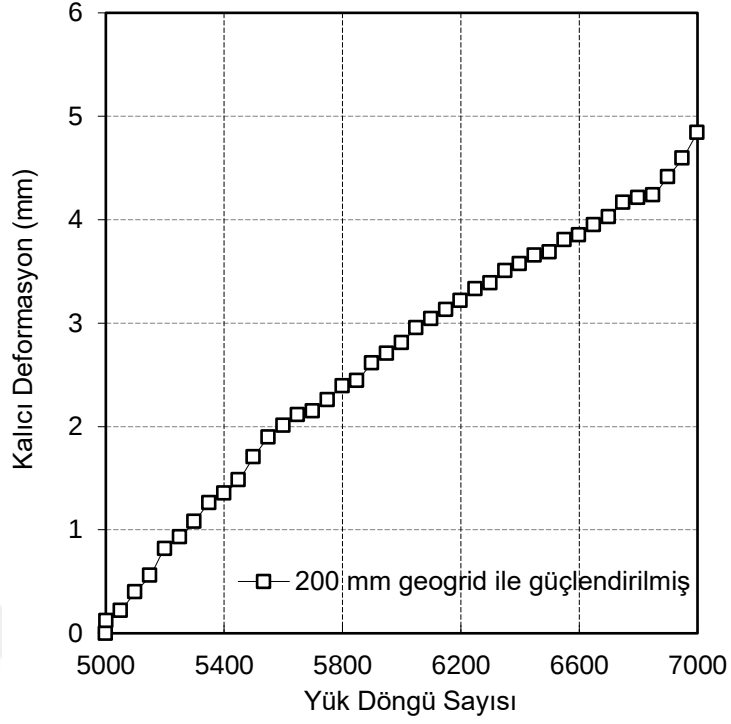
Şekil 4.36. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)

5000 yük döngüsünden sonra zemine aktarılan basıncın 825 kPa değerine çıkarılarak 2000 yük döngüsü için gerçekleştirilen deneye ait toplam deformasyonları gösteren grafik Şekil 4.37.'de gösterilmiştir. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen 2000 yük döngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 8.26 mm değerine ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında 2000. yük döngüsü sonunda toplam deformasyon değeri 23.275 mm idi. Zemine aktarılan basıncın artmasına rağmen toplam deformasyon değerindeki bu azalış zeminin ilk 5000 yük döngüsü için yapılan deney sonucunda sıkılaşmasından kaynaklanmaktadır.



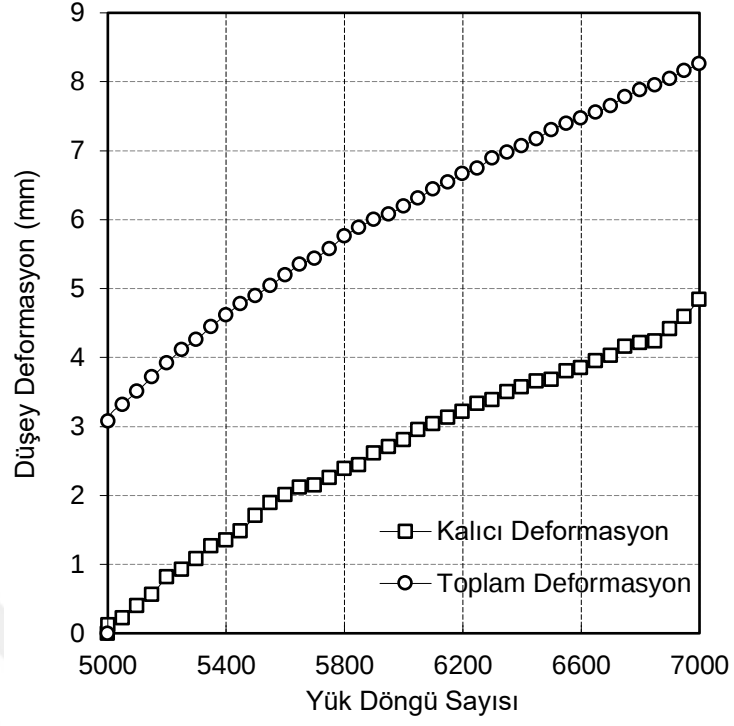
Şekil 4.37. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)

825 kPa basınç altında kalıcı deformasyon değerleri Şekil 4.38.'da gösterilmiştir. Kalıcı deformasyon değeri 2000 yük döngüsü sonunda 4.845 mm değerine ulaşmıştır. 550 kPa basınç altında yapılan deneyde 2000 yük döngüsü sonunda kalıcı deformasyon değeri 20.88 mm idi. Tıpkı toplam deformasyondaki gibi kalıcı deformasyondaki bu azalış ilk 5000 yük döngüsü sonucunda zeminin sıkılaşmasından dolayıdır.

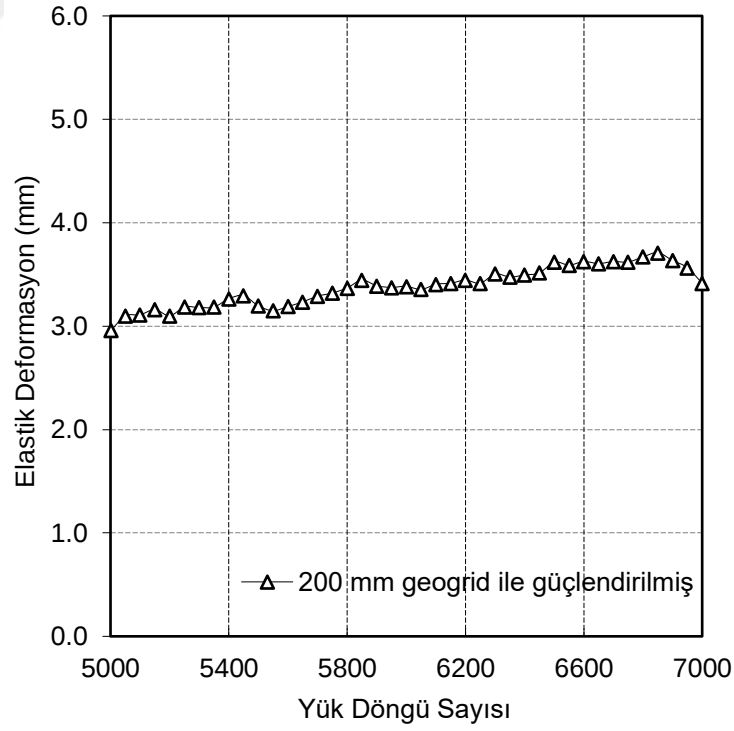


Şekil 4.38. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)

Şekil 4.39.'da toplam ve kalıcı deformasyonlar birlikte gösterilmiştir. Bu iki deformasyon değerinin birbirinden çıkarılmasıyla elde edilen elastik deformasyon değerleri ise Şekil 4.40.'da gösterilmiştir. İlk yük döngüsünde elastik deformasyon değerinin 2.96 mm olduğu görülmektedir ve bu değer artarak 7000 yük döngüsü sonunda 3.415 mm'ye ulaşmaktadır.

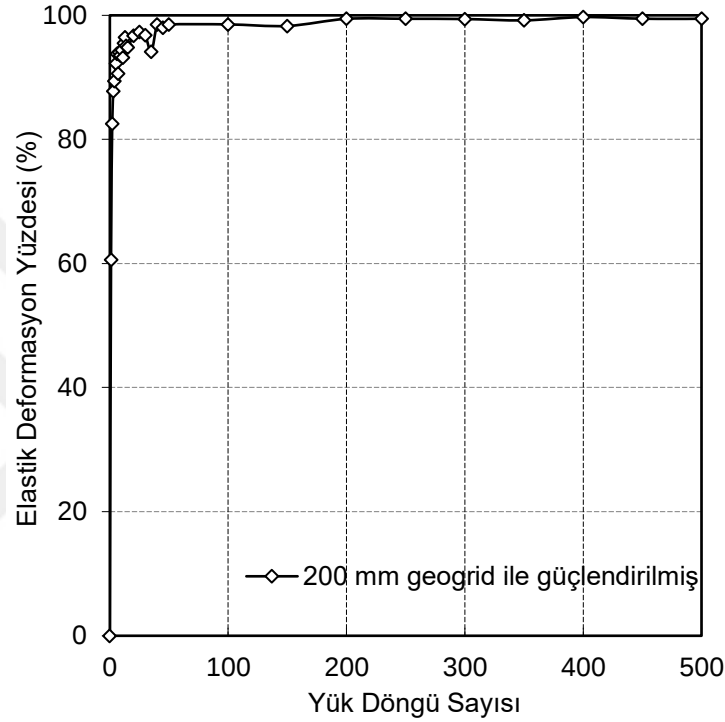


Şekil 4.39. Toplam ve kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)



Şekil 4.40. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)

Şekil 4.41.'de ilk 500 yük döngüsü için toplam deformasyondaki elastik deformasyonun payını gösteren elastik deformasyon yüzdeleri gösterilmiştir. Şekil 4.41.'de görüldüğü gibi ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyon daha baskın olduğu için yaklaşık olarak ilk 10 yük döngüsü civarına kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlıca artarak dengeli bir hale gelmiştir. 12. yük döngüsü sonunda elastik deformasyon yüzdesinin %98 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.41. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi (GGG2)

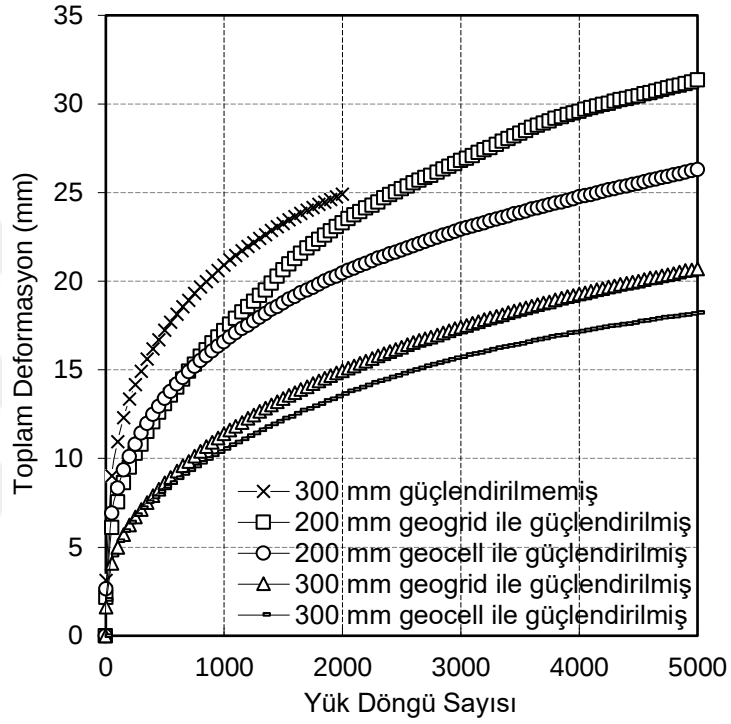
4.6 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde yapılan deneyler sonucunda farklı temel tabakası yüksekliğinin (200 – 300 mm) ve farklı tip geosentetiklerle (geocell ve geogrid) güçlendirmenin etkisi toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, elastik deformasyon yüzdesi, TBR ve RDR açısından incelenmiştir.

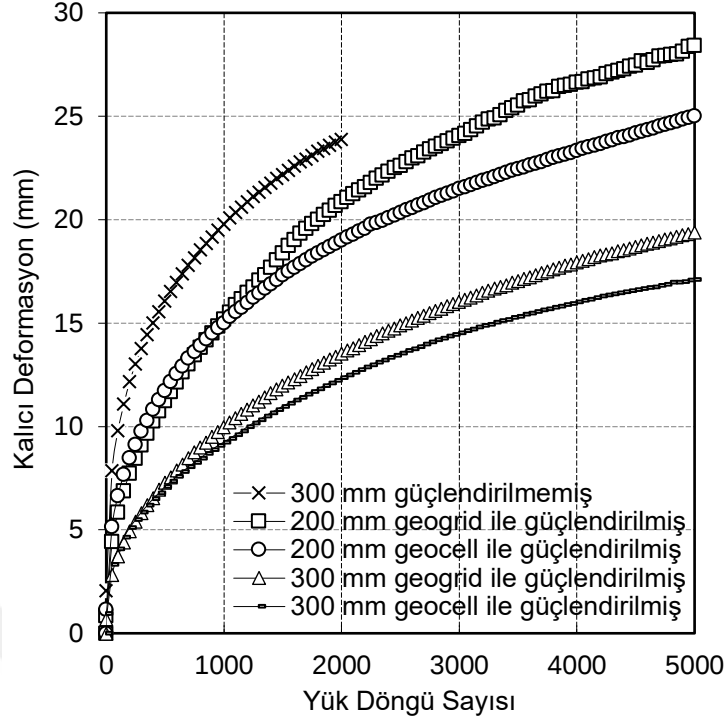
4.6.1 Toplam Deformasyon ve Kalıcı Deformasyon

Tüm deneylerden elde edilen toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerleri grafik halinde sırasıyla Şekil 4.42. ve Şekil 4.43'te gösterilmiştir. Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te görüldüğü gibi yük döngü sayısı arttıkça toplam deformasyon ve kalıcı

deformasyon değerleri de artmaktadır. Tüm deneyler değerlendirildiğinde güçlendirilen temellerin toplam ve kalıcı deformasyon değerlerinin güçlendirilmeyen temele göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca güçlendirilmiş temellere bakıldığında temel tabakası yüksekliği arttıkça toplam ve kalıcı deformasyon değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Buradan temel tabakası kalınlığının toplam deformasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu çıkarılabilir.



Şekil 4.42. Toplam deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.43. Kalıcı deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi

Geocell ve geogrid ile güçlendirilen temellerin sonuçları göz önüne alındığında her iki temel tabakası yüksekliğinde de ilk 1000 yük döngüsüne kadar geocell ve geogridin toplam ve kalıcı deformasyon açısından etkisi hemen hemen aynı iken yük döngü sayısı arttıkça geogrid kullanılan temelde geocell kullanılan temele göre toplam deformasyonlar daha fazla artmaktadır. Yani geocell güçlendirme açısından geogridten daha iyi performans göstermiştir. Temel tabakası yüksekliği azaldığında ise 1000 yük döngüsünden sonra geocellin güçlendirme etkisi ile geogridin güçlendirme etkisi arasındaki fark daha bariz hale gelmiştir.

Güçlendirilmeden gerçekleştirilen deney 2000 yük döngüsü sonunda sonlandırıldığı için karşılaştırma tüm deneyler için 2000 yük döngüsünden elde edilen sonuçlara göre yapılmıştır. 2000 yük döngüsü sonundaki toplam ve kalıcı deformasyon değerleri Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir. Temel tabakası yüksekliği %33 azalmasına rağmen toplam ve kalıcı deformasyon açısından geocell ve geogrid ile güçlendirilmiş temellerden güçlendirilmemiş temele göre daha iyi performans elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. 2000 yük döngüsü sonundaki toplam ve kalıcı deformasyon değeri (mm)

Deney	Kalıcı Deformasyon	Toplam Deformasyon
GM	23.905	24.92
GGG2	20.88	23.275
GCG2	19.015	20.44
GGG3	13.54	14.96
GCG3	12.365	13.66

4.6.1.1 Trafik Fayda Oranı (Traffic Benefit Ratio) (TBR)

Geocell ve geogridin kaplama ömrü açısından sağladığı fayda TBR değerleri hesaplanarak ifade edilmiştir. TBR, güçlendirilmiş temeldeki belirli bir tekerlek izi derinliğine (kalıcı deformasyon) ulaşmak için gerekli yük döngü sayısının güçlendirilmemiş temeldeki aynı tekerlek izi derinliğine ulaşmak için gerekli yük döngü sayısına oranı olarak tanımlanmaktadır (Denklemler 4.1).

$$(TBR)_{n. \text{ kalıcı def.}} = \left(\frac{Yük \ Döngü \ Sayısı_{güçlendirilmiş}}{Yük \ Döngü \ Sayısı_{güçlendirilmemiş}} \right)_{n. \text{ kalıcı def.}} \quad (4.1)$$

300 mm yüksekliğindeki geocell ile güçlendirilmiş temel 5000 yük döngüsü sonunda yaklaşık 17 mm düşey deformasyona ulaştığı için karşılaştırma yapabilmek için TBR değerleri 17 mm'deki değere kadar hesaplanmıştır. Güçlendirilmiş tüm temeller için TBR değerleri Şekil 4.44.'te gösterilmiştir ve 17 mm düşey deformasyon değerindeki TBR değerleri Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

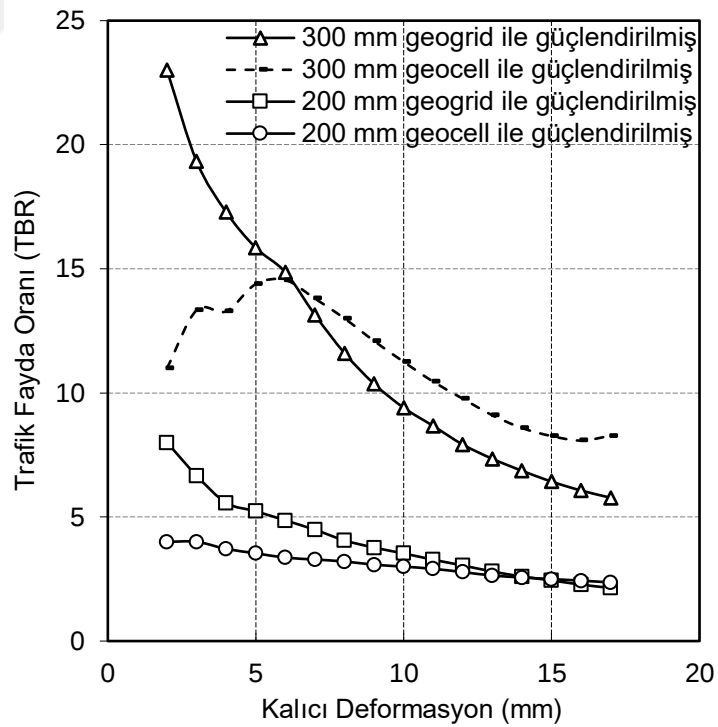
İlk olarak Şekil 4.44'te görüldüğü gibi temel tabakası yüksekliği azaldığında TBR değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak temel tabakası yüksekliği %33 azalmasına rağmen 17 mm kalıcı deformasyon değerine ait TBR değerleri geogrid ve geocell ile güçlendirilme durumunda sırasıyla 2.14 ve 2.36'dır. Buradan temel tabakası yüksekliğinin %33 azalmasına rağmen güçlendirilmemiş temele göre aynı kalıcı deformasyon değerine ulaşmak için yaklaşık 2 katında trafik yükünün tekerrür etmesi gerektiği sonucuna varılabilir. 300 mm yüksekliğindeki geogrid ve geocell ile güçlendirilen temellerde ise 17 mm kalıcı deformasyon değerindeki TBR değerlerinin sırasıyla 5.78 ve 8.27 olduğu görülmektedir. Buradan da temel tabakası yüksekliği değiştirilmeden aynı kalıcı deformasyon değerine ulaşmak için geogrid ve geocell ile

güçlendirilme durumunda sırasıyla 5.78 ve 8.27 katında trafik yükünün tekerrür etmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.2. 17 mm kalıcı deformasyon değerindeki TBR değerleri

Deney	TBR
GCG2	2.14
GCG2	2.36
GCG3	5.78
GCG3	8.27

300 mm ve 200 mm temel tabakası yüksekliği olarak iki durum ayrı ayrı ele alındığında ve 300 mm temel tabakası kalınlığındaki TBR değerlerine bakıldığında 6 mm kalıcı deformasyon değerine kadar geogridin etkisi daha iyi iken buradan sonra geocellin etkisi çarpıcı bir şekilde fark edilmektedir. Aynı durum 200 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneylerde de yaklaşık 14 mm kalıcı deformasyon değerinde gözlemlenmiştir.

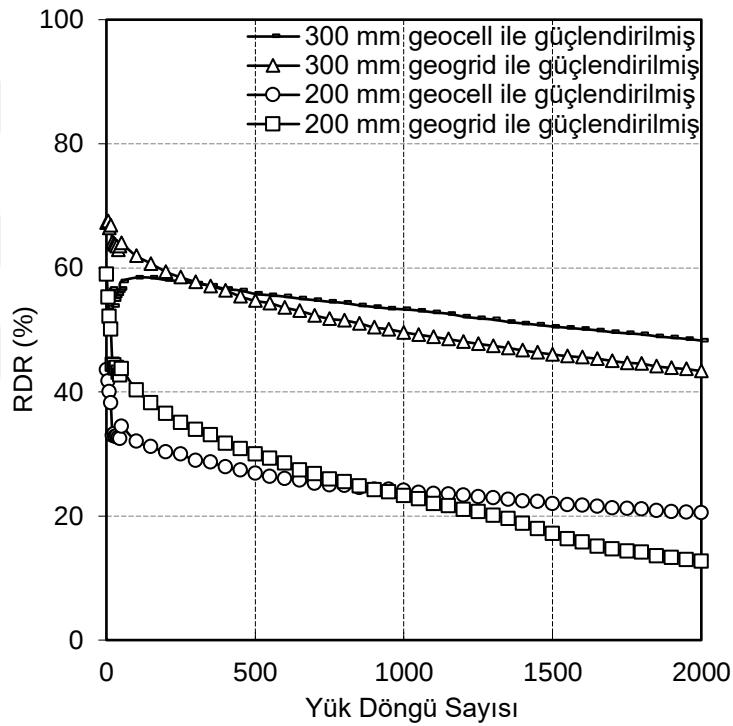


Şekil 4.44. Trafik Fayda Oranı (TBR)

4.6.1.2 Tekerlek İzi Azalma Oranı (Rut Depth Reduction) (RDR)

Geocell ve geogrid ile temel tabakasının güçlendirilmesiyle kalıcı deformasyondaki azalışı yüzdesel olarak belirten RDR oranı her güçlendirme durumu için denklem (4.2)'den 50 yük döngüsünde bir hesaplanmıştır ve Şekil 4.45'te gösterilmiştir. 2000 yük döngüsü sonundaki RDR değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

$$(RDR)_{N=n} = \left(1 - \frac{\text{Kalıcı Deformasyon}_{\text{güçlendirilmiş}}}{\text{Kalıcı Deformasyon}_{\text{güçlendirilmemiş}}_{N=n}} \right) \times 100 \quad (4.2)$$



Şekil 4.45. Tekerlek izi azalma oranı (RDR)

Şekil 4.45 incelendiğinde, temel tabakası yüksekliği azaldığında RDR değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak temel tabakası yüksekliği %33 azalmasına rağmen 2000 yük döngüsü sonunda tekerlek izi derinliğindeki azalmanın geogrid ve geocell ile güçlendirilme durumunda sırasıyla %12.65 ve %20.46 olduğu görülmüştür. Ayrıca temel tabakası yüksekliğinin değiştirilmediği durumda ise tekerlek izi derinliğindeki bu azalışın geogrid ve geocell ile güçlendirme durumunda sırasıyla %43.36 ve %48.27 olduğu görülmüştür. Buradan çıkarılacak bir başka sonuç ise temel tabakası yüksekliği

300 mm olan deneylerde yaklaşık 350 yük döngüsüne kadar geogridin davranışı daha iyi iken bu yük döngüsünden sonra geocellin daha iyi davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Aynı davranış 200 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneyler için de gözlemlenmiştir. Burada ise 900. yük döngüsünden sonra bu davranış gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.3. 2000 yük döngüsü sonundaki RDR değerleri

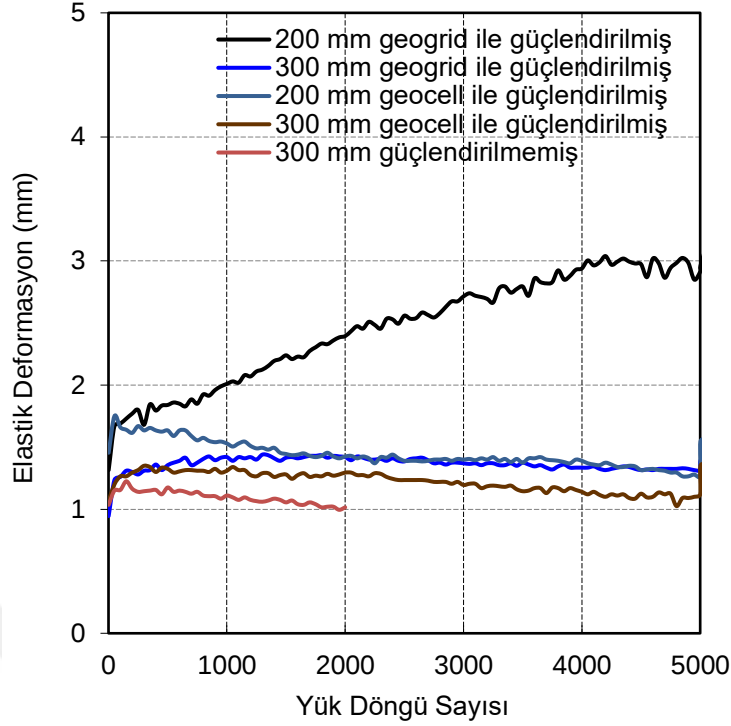
Deney	RDR (%)
GGG2	12.65
GCG2	20.46
GGG3	43.36
GCG3	48.27

4.6.2 Elastik Deformasyon

Tüm deneyler sonucunda her yük döngüsü için toplam deformasyon değerinden kalıcı deformasyon değerinin farkının alınmasıyla hesaplanmıştır (Denklem 4.3).

$$(Elastik Def.)_{N=n} = (Toplam Def. - Kalıcı Def.)_{N=n} \quad (4.3)$$

Elastik deformasyon değerleri 5000 yük döngüsü için Şekil 4.46'da gösterilmiştir. 300 mm yüksekliğindeki temeller incelendiğinde güçlendirilmemiş temele göre geocell ve geogrid ile güçlendirilmiş temelerde geocell ve geogrid malzemesinin varlığıyla daha elastik bir davranış gözlemlenmiştir. Geogrid ile güçlendirilmiş temelde ise geocell ile güçlendirilmiş temele göre daha elastik bir davranış söz konusudur. Temel tabakası yüksekliği 200 mm'ye düşürüldüğünde ise diğer deneylere paralel bir şekilde geogridin geocelle göre daha elastik bir davranış kazandırdığı gözlemlenmiştir. Bu durumda geogridin elastik davranış üzerindeki etkisi geocell kullanılma durumuna göre daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.46. Elastik deformasyon – yük döngü sayısı ilişkisi

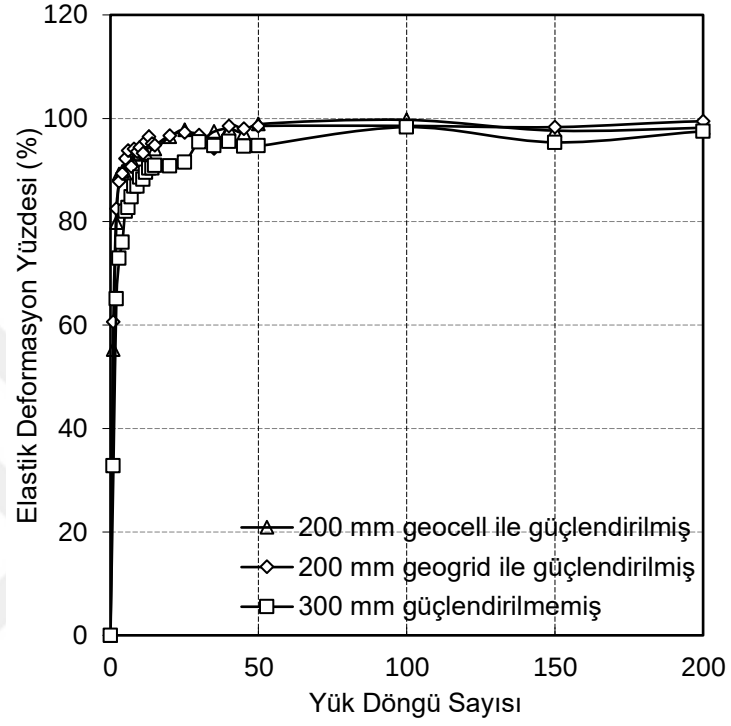
4.6.2.1 Elastik Deformasyon Yüzdesi

Elastik deformasyon yüzdesi her yük döngüsüne ait elastik deformasyonun yine o yük döngüsüne ait toplam deformasyona bölünmesiyle elde edilmektedir (Denklem 4.4).

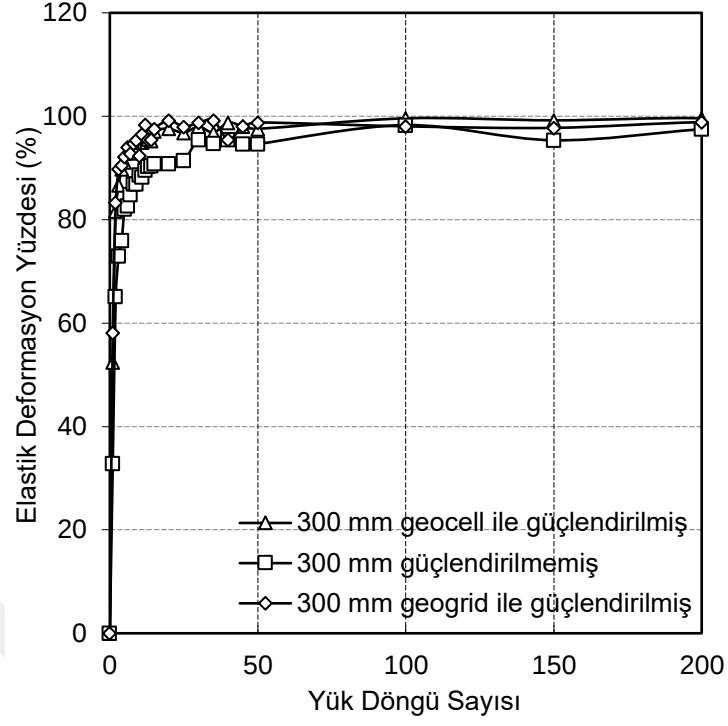
$$(Elastik\ Deformasyon\ Yüzdesi)_{N=n} = \left(\frac{Elastik\ Deformasyon}{Toplam\ Deformasyon} \right)_{N=n} \quad (4.4)$$

Yapılan tüm deneylere ait elastik deformasyon yüzdeleri Şekil 4.47-48’de gösterilmiştir. İlk yük döngülerinde kalıcı deformasyonlar daha baskındır. Ancak elastik deformasyon yüzdeleri hızlıca artış göstererek dengeli bir hale gelmiştir. Deneylerde elastik deformasyon yüzdesinin %98’lik bir kısmına ulaşılan yük döngü sayıları Çizelge 4.4’te gösterilmiştir. 300 mm yüksekliğindeki güçlendirilmemiş temelde 100. yük döngüsünde ulaşılırken aynı temel tabakası yüksekliğinde geocell ve geogrid ile güçlendirilmiş durumda sırasıyla 30 ve 12 yük döngüsü sonunda ulaşılmıştır. Buradan ilk yük döngülerinde geogridin geocelle kıyasla daha elastik davrandığı anlaşılmaktadır. Temel tabakası yüksekliği 200 mm’ye düşürüldüğünde

ise %98'lik elastik deformasyon yüzdesine ulaşmak için gerekli yük döngü sayıları geocell ve geogrid için 40 olduğu görülmüştür. Yani temel tabakası yüksekliği azaldığında geogridin geocelle göre ilk yük döngülerindeki etkinliği belirgin olmamıştır.



Şekil 4.47. İlk 200 yük döngüsü için elastik deformasyon yüzdesi



Şekil 4.48. İlk 200 yük döngüsü için elastik deformasyon yüzdesi

Çizelge 4.4. Elastik deformasyonun %98'e ulaştığı yük döngü sayısı

Deney	Yük Döngü Sayısı
300 mm GM	100
300 mm GGG	12
300 mm GCG	30
200 mm GGG	40
200 mm GCG	40

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, karayolu temel tabakası üzerine tekrarlı yükler altında laboratuvarında 5 adet plaka yükleme deneyi yapılmıştır. 145 mm tabaka kalınlığındaki taban zemini üzerinde değişen yüksekliklerde (200 mm ve 300 mm) temel tabakası oluşturularak 150 mm çapındaki çelik plaka üzerine tekrarlı yüklerin uygulanması suretiyle geocell ve geogrid malzemelerinin toplam deformasyon, kalıcı deformasyon ve elastik deformasyon açısından sağladığı iyileştirmeler incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

5.1 Sonuçlar

Çalışma bulguları ve sonuçları aşağıdaki gibidir:

- 200 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneyde geogridin sağladığı iyileştirmenin etkisiyle temel tabakası yüksekliği daha fazla olmasına rağmen 2000 yük döngüsü sonunda toplam ve kalıcı deformasyon değerinin güçlendirilmemiş deneye göre azaldığı görülmüştür. Bu deney sonucundan elde edilen Trafik Fayda Oranı (TBR) ve Tekerlek İzi Azalma Oranı (RDR)'nın sırasıyla 2.14 ve %12.65 olduğu görülmüştür.
- 200 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneyde geocellin sağladığı iyileştirmenin etkisiyle temel tabakası yüksekliği daha fazla olmasına rağmen 2000 yük döngüsü sonunda toplam ve kalıcı deformasyon değerinin güçlendirilmemiş deneye göre azaldığı görülmüştür. Bu deney sonucundan elde edilen Trafik Fayda Oranı (TBR) ve Tekerlek İzi Azalma Oranı (RDR)'nın sırasıyla 2.36 ve %20.46 olduğu görülmüştür.
- 300 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneyde geogridin sağladığı iyileştirmenin etkisiyle 2000 yük döngüsü sonunda toplam ve kalıcı deformasyon değerinin güçlendirilmemiş deneye göre azaldığı görülmüştür. Bu deney sonucundan elde edilen Trafik Fayda Oranı (TBR) ve Tekerlek İzi Azalma Oranı (RDR)'nın sırasıyla 5.78 ve %43.36 olduğu görülmüştür.
- 300 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneyde geocellin sağladığı iyileştirmenin etkisiyle 2000 yük döngüsü sonunda toplam ve kalıcı deformasyon değerinin güçlendirilmemiş deneye göre azaldığı görülmüştür.

Bu deney sonucundan elde edilen Trafik Fayda Oranı (TBR) ve Tekerlek İzi Azalma Oranı (RDR)'nın sırasıyla 8.27 ve %48.27 olduğu görülmüştür.

- 300 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneylerde geocell ve geogridin etkisiyle elastik deformasyonlar artmıştır ve geogrid kullanılması durumunda elastik deformasyon değerinin geocell kullanılması durumuna göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- 200 mm temel tabakası yüksekliğindeki deneylerde de geogrid kullanılması durumunda geocell kullanılması durumuna göre elastik deformasyon değerinin daha fazla olduğu görülmüştür.
- Geocell ve geogridin güçlendirilmemiş duruma göre ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyonları bariz bir şekilde azaltmasından dolayı elastik deformasyon yüzdeleri güçlendirilmemiş duruma göre daha yüksektir.

5.2 Öneriler

Bu çalışma sonucunda yapılabilecek öneriler aşağıda listelenmiştir:

- Tekrarlı yükler altında geocell ve geogridin sağladığı etki nümerik analizler gerçekleştirilerek doğrulanabilir.
- Temel tabakasının yüzeyinden taban zeminine aktarılan gerilmeler geocell ve geogrid kullanılması durumunda basınç ölçerler kullanılarak irdelenebilir.
- Değişik hücre alanlarındaki geocell kullanılarak bunun iyileştirmeye etkisi incelenebilir.
- Farklı tip geogridler kullanılarak sağlanan iyileştirme geocell malzemesi ile karşılaştırılabilir.
- Tekrarlı yüklemenin tatbik süresi değiştirilerek deneysel çalışma yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yayla, N., Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2004.
- [2] Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., Chen, Q, Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading, *Soils and Foundations*, 55(3), 504-516, 2015.
- [3] Pongsivasathit, S., Horpibulsuk, S., Piyaphipat, S., Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils, *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00301, 2019.
- [4] Ojuri, O.O., Adavi, A.A., Oluwatuyi, O.E., Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction, *Transportation Geotechnics*, 10, 1-12, 2017.
- [5] Çalışıcı, M., The Effect of Bitumen Stabilized Subgrade on Cost of the Flexible Pavement, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(11), 6-8, 2018.
- [6] Giroud, J.P., Han, J., Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I. Development of Design Method, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 775-786, 2004.
- [7] Zhang, L., Zhao, M., Shi, C., Zhao, H., Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(5), 475-482, 2010.
- [8] Tabatabaei Aghda, S.T., Ghanbari, A., Tavakoli Mehrjardi, G., Evaluating the Applicability of Geocell-Reinforced Dredged Sand Using Plate and Wheel Load Testing, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 6, 21-38, 2019.
- [9] Khalaj, O., Moghaddas Tafreshi, S. N., Mask, B., Dawson, A. R., Improvement of pavement foundation response with multi-layers of geocell reinforcement: Cyclic plate load test, *Geomechanics and Engineering*, 9(3), 373-395, 2015.
- [10] Han, J., Yang, X., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Behavior of Geocell-Reinforced Sand Under a Vertical Load, *Transportation Research Record*, 2045(1), 95-101, 2008.
- [11] Leshchinsky, B., Ling, H., Effects of Geocell Confinement on Strength and Deformation Behavior of Gravel, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2), 340-352, 2013.

- [12] Saride, S., Rayabharapu, V.K., Vedpathak, S., Evaluation of Rutting Behaviour of Geocell Reinforced Sand Subgrades Under Repeated Loading, *Indian Geotechnical Journal*, 45(4), 378-388, 2015.
- [13] Sharma, M., Inti, S., Tirado, C., Tandon, V., Evaluating the Benefits of Geocell Reinforcement of the Base Course in Flexible Pavement Structures Using 3-D Finite Element Modeling, *International Conference on Transportation and Development*, 728-739, 2016.
- [14] Ngo, N. T., Rujikiatkamjorn, C., Indraratna, B, DEM modelling of geocell-stabilised sub-ballast under cyclic loading, *International Journal of GEOMATE*, 12(31), 22-29, 2017.
- [15] Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(2), 114-127, 2018.
- [16] Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahmi, I., Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), 570-578, 2010.
- [17] Nair, A.M., Latha, G.M., Repeated load tests on geosynthetic reinforced unpaved road sections, *Geomechanics and Geoengineering*, 11(2), 95-103, 2016.
- [18] Mamatha, K.H., Dinesh, S. V.: Performance evaluation of geocell-reinforced pavements, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(3), 277-286, 2019.
- [19] George, A.M., Banerjee, A., Puppala, A.J., Saladhi, M., Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 1-11, 2019.
- [20] Thakur, J.K., Han, J., Pokharel, S.K., Parsons, R.L., Performance of geocell-reinforced recycled asphalt pavement (RAP) bases over weak subgrade under cyclic plate loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 35, 14-24, 2012.
- [21] Yang, X., Han, J., Pokharel, S.K., Manandhar, C., Parsons, R.L., Leshchinsky, D., Halahmi, I., Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases. *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 95–103, 2012.
- [22] Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K., Bearing capacity of strip

- footings supported on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 19(4), 235–256, 2001.
- [23] Mehrjardi, G.T., Azizi, A., Haji-Azizi, A., Asdollahfardi, G., Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction, 23, 100349, 2020.
- [24] Hegde, A., Sitharam, T.G., Experiment and 3D-numerical studies on soft clay bed reinforced with different types of cellular confinement systems, *Transportation Geotechnics*, 10, 73–84, 2017.
- [25] Pancar, E.B., Akpınar, M.V., Comparison of Effects of Using Geosynthetics and Lime Stabilization to Increase Bearing Capacity of Unpaved Road Subgrade, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-8, 2016.
- [26] TS 1500, İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, Türk Standardları Enstitüsü, 2000.
- [27] Altay, G., Geocell kullanılarak oluşturulan dayanma duvarlarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Osmaniye*, 202, 2019.
- [28] KGM, Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara, 2013.
- [29] TS 1900-1, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Türk Standardları Enstitüsü, 2006.
- [30] TS 1900-2, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Türk Standardları Enstitüsü, 2006.
- [31] “MOVEA Müh. İnş. Dan. Tic. Ltd. Şti., Hücresel Dolgu Sistemi Malzeme Parametreleri” Erişim Adresi: <https://www.krthds.com/krt-geocell-secimi/>, Erişim Tarihi: 08.12.2020.
- [32] Suku, L., Prabhu, S.S., Sivakumar Babu, G.L., Effect of geogrid-reinforcement in granular bases under repeated loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(4), 377–389, 2017.
- [33] Tavakoli Mehrjardi, G., Khazaei, M., Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6), 603–615, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı : Yakup ÖNAL
2. Doğum Tarihi :
3. Ünvanı : Araştırma Görevlisi
4. Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Bitirme Yılı
Lisans	İnşaat Müh.	İstanbul Teknik Üni.	2017
Yüksek Lisans	İnşaat Müh.	Osmaniye Korkut Ata Üni.	2021

5. Akademik Ünvanlar:

Görevi	Bölümü	Kurumu	Yıl
Arş. Gör.	İnşaat Müh.	Osmaniye Korkut Ata Üni.	2019

6. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl

7. Yayınlar:

8. Yazılan uluslar arası kitaplar veya kitaplarda bölümler:

9. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

10. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

11. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Yayımlanmış Bildiriler:

12. Diğer yayınlar:

13. Projeler:

14. Bilimsel Kuruluşlara Üyelikler:

15. Ödüller:



OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 08/01/2021

Tez Başlığı: Geosentetiklerle Güçlendirilmiş Karayolu Temel Tabakasının Davranışının Tekrarlı Yükler Altında İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirlenen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Özet ve Abstract, c) Giriş, d) Ana bölümler ve e) Sonuç, f) Kaynakça kısımlarından oluşan toplam 89.... sayfalık kısmına ilişkin, 08/01/2021 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme tiplerinden biri uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3.... 'tür.

Filtreleme Tip 1 (maksimum %30) ☐

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç,
- 3- Alıntılar dahil,
- 4- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Filtreleme Tip 2 (maksimum %10) ☒

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç,
- 3- Alıntılar hariç,
- 4- 5 Kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Yakup ÖNAL

Öğrenci No:

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı:

Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora

DANIŞMAN ONAYI

RAPORU DÜZENLEYEN