



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Yakup ÖNAL

**ÇİMENTO KAPLANMIŞ GEOTEKSTİL
İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KARAYOLU
TABAN ZEMİNİNİN STATİK VE
TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ
DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK
DEĞERLENDİRİLMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANIYE – 2025

T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

ÇİMENTO KAPLANMIŞ GEOTEKSTİL İLE STABİLİZE
EDİLMİŞ KARAYOLU TABAN ZEMİNİNİN STATİK VE
TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ
DENEYSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Yakup ÖNAL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

OSMANIYE
OCAK-2025

TEZ ONAYI

ÇİMENTO İLE KAPLANMIŞ GEOTEKSTİL İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KARAYOLU TABAN ZEMİNİNİN STATİK VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Yakup ÖNAL tarafından Prof. Dr. Cafer KAYADELEN ve Doç. Dr. Sercan SERİN danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Cafer KAYADELEN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, HKÜ

Üye: Prof. Dr. Nihat MOROVA
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İSUBÜ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şahin Tolga GÜVEL
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Prof. Dr. Tuğrul TALASLIOĞLU
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Eyyup TEL
Enstitü Müdürü, **Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

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 Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Yakup ÖNAL



ÖZET

ÇİMENTO İLE KAPLANMIŞ GEOTEKSTİL İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KARAYOLU TABAN ZEMİNİNİN STATİK VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Yakup ÖNAL

Doktora, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cafer KAYADELEN

2. Danışman: Doç. Dr. Sercan SERİN

Ocak 2025, 125 sayfa

Bu çalışmada, geotekstil (G) ve çimento ile kaplanmış geotekstilin (CCG), karayolu taban zeminlerinin stabilizasyonundaki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, statik ve tekrarlı yükleme deneyleri kullanılarak, donatılı ve donatısız zeminlerin performansları karşılaştırılmıştır. Büyük ölçekli statik yükleme deneylerinde, donatılı zeminlerin taşıma kapasitesinde ve deformasyon kontrolünde belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Özellikle CCG donatısının, deformasyon azaltma ve yük taşıma kapasitesini artırma konularında diğer donatılara göre daha etkili olduğu bulunmuştur. CCG donatılı taban zeminlerinde, deformasyon seviyeleri arttıkça taşıma kapasitesinde önemli artışlar yaşanmış ve S-CCG-5-10 düzenlemesi, tüm taban zeminleri arasında en yüksek taşıma kapasitesini elde etmiştir. Deformasyon performansı açısından da G ve CCG donatılı taban zeminleri, donatısız taban zeminine göre belirgin iyileşmeler göstermiştir. CCG donatılı taban zeminleri, yüksek deformasyon seviyelerinde bile daha düşük deformasyonlar sergileyerek daha stabil yapılar oluşturmuştur. Ayrıca, deformasyon azaltma performansı, *PRS* değerleriyle ölçülmüş ve CCG donatılı taban zeminlerinde çok yüksek iyileştirmeler elde edilmiştir. G donatılı taban zeminlerinde ise, çok katmanlı konfigürasyonlar daha yüksek performans sağlamıştır. Tekrarlı yükleme deneylerinde, elastik deformasyonlar zamanla azalmış ve CCG kullanımı ile elastik deformasyonlar önemli ölçüde düşürülmüştür. CCG donatısının, elastik deformasyonları azaltarak zemin stabilitesini artırdığı, ayrıca esneklik modülünü yükselttiği gözlemlenmiştir. Tekerlek

izi azalma oranı (*RDR*) ve trafik fayda oranı (*TBR*) gibi parametreler de CCG donatısının performansını desteklemiştir. CCG donatılı zeminlerde, kalıcı deformasyonlar daha az artmış ve taban zeminleri daha uzun ömürlü olmuştur. Özellikle R-CCG-5-10 taban zemini, en yüksek TBR değerini elde ederek dayanıklı karayolu yapıları için ideal bir çözüm olarak öne çıkmıştır. Çalışmada ayrıca, "donatı etkinlik faktörü" (u_z) adı verilen yeni bir parametre önerilmiştir. Bu parametre, donatının sayısı, yerleşimi ve taşıma kapasitesine olan etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Statik yükleme deneylerinde, CCG ve G donatılı taban zeminleri için u_z ile taşıma kapasitesi arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulunmuş, tekrarlı yükleme deneylerinde ise u_z ile esneklik modülü (M_R) arasında benzer şekilde yüksek ilişkiler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, CCG donatısının karayolu taban zemini iyileştirmelerinde daha verimli ve uzun ömürlü bir çözüm sunduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tekrarlı yükleme deneyi, Statik yükleme deneyi, Geotekstil, Çimento ile kaplanmış geotekstil, Kalıcı Deformasyon



ABSTRACT

EXPERIMENTAL EVALUATION OF BEHAVIOR OF HIGHWAY SUBGRADE STABILIZED WITH CEMENT COATED GEOTEXTILE UNDER STATIC AND REPEATED LOADS

Yakup ÖNAL

PhD, Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Cafer KAYADELEN

2. Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sercan SERİN

January 2025, 125 pages

In this study, the effects of geotextile (G) and cement-coated geotextile (CCG) on the stabilization of road subgrade soils were investigated. Static and cyclic loading tests were conducted to compare the performance of reinforced and unreinforced soils. The results from large-scale static loading tests showed significant improvements in the load-bearing capacity and deformation control of the reinforced soils. Particularly, the CCG reinforcement was found to be more effective than other reinforcements in reducing deformation and increasing load-bearing capacity. For CCG-reinforced subgrades, substantial increases in load-bearing capacity were observed as the deformation levels increased, with the S-CCG-5-10 configuration achieving the highest load-bearing capacity among all subgrade types. In terms of deformation performance, both G and CCG-reinforced subgrades demonstrated notable improvements over the unreinforced subgrades. CCG-reinforced subgrades formed more stable structures by exhibiting lower deformations, even at high deformation levels. Additionally, the deformation reduction performance, measured by the PRS values, showed significant improvements for CCG-reinforced subgrades. Multi-layered configurations of G-reinforced subgrades also exhibited higher performance. In cyclic loading tests, elastic deformations gradually decreased, with CCG significantly reducing elastic deformations. The use of CCG reinforcement improved soil stability and increased the resilient modulus (M_R). Parameters such as the Rut Depth Reduction (RDR) and Traffic Benefit Ratio (TBR) further supported the

performance of CCG reinforcement. CCG-reinforced subgrades showed less permanent deformation and longer service life. Specifically, the R-CCG-5-10 subgrade achieved the highest *TBR*, making it an ideal solution for durable road structures. The study also introduced a new parameter, the Reinforcement Efficiency Factor (u_z), to evaluate the impact of reinforcement number, placement, and load-bearing capacity. Strong linear relationships were found between u_z and load-bearing capacity for both CCG and G-reinforced subgrades in static loading tests, while similar high correlations between u_z and the modulus M_R were observed in cyclic loading tests. In conclusion, CCG reinforcement has been proven to provide a more efficient and long-lasting solution for road subgrade improvement.

Key Words: Cyclic Loading Test, Static Loading Test, Geotextile, Cement-Coated Geotextile, Permanent Deformation



Çok kıymetli aileme...
ve Doktora eğitimim sürecinde kaybettiğimiz sevgili babam Mehmet ÖNAL'a...

TEŞEKKÜR

Doktora tez konumun belirlenmesi ve çalışmamın yürütülmesi sürecinde değerli bilgi ve tecrübeleriyle rehberlik eden, katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Cafer KAYADELEN ve Doç. Dr. Sercan SERİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam kapsamında desteklerini ve yönlendirmelerini her zaman yanımda hissettiğim Doç. Dr. Gökhan ALTAY'a teşekkür ederim.

Tekrarlı yükleme sisteminin imalatında büyük özveriyle çalışan Ali AYUR'a ve sistemin kontrol mekanizmasını oluşturan Öğr. Gör. Sadık KÜÇÜK'e emekleri için teşekkürlerimi iletmek isterim.

Deneylein gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mitat ÖZTÜRK ve Yaşar MEKE'ye ayrıca teşekkür ederim.

Bölümdeki çalışmalarım süresince desteklerini hissettiğim İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarda kullanılan geotekstil malzemelerinin temini konusunda destek olan Geoplas firmasına teşekkür ederim.

Bu doktora tez çalışması TÜBİTAK 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı tarafından desteklenmiştir.

Son olarak, her zaman yanımda olan, sevgileri ve destekleriyle bu süreci kolaylaştıran kıymetli aileme gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	i
TEZ BİLDİRİMİ	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
İTHAF SAYFASI	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. MALZEME VE YÖNTEM	11
3.1 Taban Zemini	11
3.2 Geotekstil	15
3.3 Çimento ile Kaplanmış Geotekstil	16
3.4 Statik Yükleme ve Tekrarlı Yükleme Deneyleri	22
3.5 Deneysel Program	33
4. DENEY SONUÇLARI	36
4.1 Statik Yükleme Deney Sonuçları	36
4.1.1 1 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-UR)	37
4.1.2 2 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-G-5)	39
4.1.3 3 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-G-10)	41
4.1.4 4 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-G-5-10)	42
4.1.5 5 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-CCG-5)	44
4.1.6 6 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-CCG-10)	45
4.1.7 7 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-CCG-5-10)	47
4.1.8 Tüm Deneylerin Karşılaştırılması	49
4.1.8.1 Taşıma Kapasitesi İyileştirme Faktörü (I_F)	52
4.1.8.2 Deformasyon Değerinde Yüzdesele Azalma (PRS)	55
4.2 Tekrarlı Yükleme Deney Sonuçları	58

4.2.1	8 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-UR).....	58
4.2.2	9 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-G-5).....	62
4.2.3	10 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-G-10).....	66
4.2.4	11 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-G-5-10).....	70
4.2.5	12 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-CCG-5).....	74
4.2.6	13 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-CCG-10).....	78
4.2.7	14 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-CCG-5-10)	82
4.2.8	Tüm Deneylerin Karşılaştırılması	86
4.2.8.1	Toplam Deformasyon ve Kalıcı Deformasyon	86
4.2.8.2	Elastik Deformasyon.....	90
4.2.8.3	Esneklik Modülü (M_R)	92
4.2.8.4	Elastik Deformasyon Yüzdesi.....	95
4.2.8.5	Tekerlek İzi Azalma Oranı (RDR)	97
4.2.8.6	Trafik Fayda Oranı (TBR)	99
4.3	Donatı Etkinlik Faktörü (u_z)	100
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
5.1	Büyük Ölçekli Statik Yükleme Deney Sonuçları	105
5.1.1	Donatının Taban Zemini Davranışına Etkisi.....	105
5.1.2	Deformasyon Seviyelerine Göre Yük Taşıma Kapasitesi (q_u).....	106
5.1.3	Deformasyon Azaltma Performansı.....	107
5.1.4	Donatı Türü ve Konfigürasyonun Etkisi	107
5.1.5	Mekanizma ve Uygulamalar	108
5.2	Büyük Ölçekli Tekrarlı Yükleme Deney Sonuçları.....	109
5.2.1	Deformasyon Davranışı	109
5.2.2	Esneklik Modülü (M_R)	110
5.2.3	Elastik deformasyon Yüzdesi.....	110
5.2.4	Tekerlek İzi Azalma Oranı (RDR)	111
5.2.5	Trafik Fayda Oranı (TBR)	111
5.3	Donatı Etkinlik Faktörü (u_z)	111
	KAYNAKLAR	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Taban zeminine ait özellikler.....	13
Çizelge 3.2. Geotekstil malzemesine ait özellikler	15
Çizelge 3.3. Statik yükleme ve Tekrarlı yükleme deney programı.....	34
Çizelge 4.1. S-UR deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri	38
Çizelge 4.2. S-G-5 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri	40
Çizelge 4.3. S-G-10 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri	41
Çizelge 4.4. S-G-5-10 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri	43
Çizelge 4.5. S-CCG-5 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri	45
Çizelge 4.6. S-CCG-10 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri	47
Çizelge 4.7. S-CCG-5-10 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri	49
Çizelge 4.8. Statik yükleme deneylerinden farklı d/D (%) oranları için elde edilen q_u (kPa) değerleri.....	51
Çizelge 4.9. Donatı türü ve deformasyon değerine bağlı olarak I_F değerinin değişimi.....	54
Çizelge 4.10. Donatı türü ve deformasyon değerine bağlı olarak PRS değerinin değişimi.....	57
Çizelge 4.11. R-UR deney sonuçları.....	62
Çizelge 4.12. R-G-5 deney sonuçları	66
Çizelge 4.13. R-G-10 deney sonuçları	70
Çizelge 4.14. R-G-5-10 deney sonuçları.....	74
Çizelge 4.15. R-CCG-5 deney sonuçları.....	78
Çizelge 4.16. R-CCG-10 deney sonuçları.....	82
Çizelge 4.17. R-CCG-5-10 deney sonuçları	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş zeminin tekerlek izi durumları [54]	8
Şekil 3.1. Kum zemine ait görsel	12
Şekil 3.2. Taban zeminine ait dane çapı dağılım eğrisi.....	13
Şekil 3.3. %70 sıklık değerindeki kum taban zeminin CBR eğrisi.....	14
Şekil 3.4. Geotekstile ait bir görsel	16
Şekil 3.5. Geotekstilin SEM görüntüsü.....	16
Şekil 3.6. Çimento hamurunun hazırlanması	18
Şekil 3.7. Çimento ile kaplanmış geotekstil hazırlanma aşamaları.....	20
Şekil 3.8. Çimento ile kaplanmış geotekstil numunelerin SEM analizi görüntüleri.....	22
Şekil 3.9. Deneilerin gerçekleştirildiği deney kasası [16].....	23
Şekil 3.10. Elektronik terazi.....	24
Şekil 3.11. Sıkıştırma işleminde kullanılan hilti	25
Şekil 3.12. Statik yükleme deney düzeneği	27
Şekil 3.13. Tekrarlı yükleme deney düzeneği.....	27
Şekil 3.14. Haversine tipi tekrarlı yükleme şekli [16,66,67]	29
Şekil 3.15. Yük kontrol paneli	30
Şekil 3.16. Veri kaydetme ünitesi ve bilgisayar.....	31
Şekil 3.17. Deformasyon türlerinin hesaplanması [12,66,67].....	32
Şekil 3.18. Deney isimlerinin kısaltmalarının açıklaması.....	35
Şekil 3.19. Deneilerin şematik çizimi	35
Şekil 4.1. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-UR)	38
Şekil 4.2. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-G-5).....	39
Şekil 4.3. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-G-10).....	41
Şekil 4.4. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-G-5-10)	43
Şekil 4.5. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-CCG-5)	45
Şekil 4.6. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-CCG-10)	47
Şekil 4.7. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-CCG-5-10).....	49
Şekil 4.8. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi	50

Şekil 4.9. <i>PRS</i> ve I_F değerlerinin hesaplanmasında kullanılan parametrelerin açıklaması [74,75].....	52
Şekil 4.10. Donatı türü ve düşey deformasyon değerine bağlı olarak I_F değerinin değişimi.....	53
Şekil 4.11. Donatı türü ve S-UR taban zemininin düşey deformasyon değerine bağlı olarak <i>PRS</i> değerinin değişimi	56
Şekil 4.12. <i>PRS</i> değerlerinin donatı etkinlik faktörü ile değişimi.....	58
Şekil 4.13. 8 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	59
Şekil 4.14. 8 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi.....	60
Şekil 4.15. 8 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	60
Şekil 4.16. 8 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi	61
Şekil 4.17. 8 numaralı deney için esneklik modülü-yük döngü sayısı ilişkisi	62
Şekil 4.18. 9 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	63
Şekil 4.19. 9 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi.....	64
Şekil 4.20. 9 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	64
Şekil 4.21. 9 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi	65
Şekil 4.22. 9 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi	66
Şekil 4.23. 10 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	67
Şekil 4.24. 10 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	68
Şekil 4.25. 10 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	68
Şekil 4.26. 10 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi	69
Şekil 4.27. 10 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi	70
Şekil 4.28. 11 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	71

Şekil 4.29. 11 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	72
Şekil 4.30. 11 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	72
Şekil 4.31. 11 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi	73
Şekil 4.32. 11 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi	74
Şekil 4.33. 12 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	75
Şekil 4.34. 12 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	76
Şekil 4.35. 12 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	76
Şekil 4.36. 12 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi	77
Şekil 4.37. 12 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi	78
Şekil 4.38. 13 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	79
Şekil 4.39. 13 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	80
Şekil 4.40. 13 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	80
Şekil 4.41. 13 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi	81
Şekil 4.42. 13 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi	82
Şekil 4.43. 14 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	83
Şekil 4.44. 14 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	84

Şekil 4.45. 14 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	84
Şekil 4.46. 14 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi	85
Şekil 4.47. 14 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi	86
Şekil 4.48. Tüm deneylerin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	87
Şekil 4.49. Tüm deneylerin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi	88
Şekil 4.50. Tüm deneyler için elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi.....	91
Şekil 4.51. Tüm deneyler için esneklik modülü - yük döngü sayısı ilişkisi	93
Şekil 4.52. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi	96
Şekil 4.53. Tekerlek izi azaltma oranı (RDR) - yük döngü sayısı ilişkisi.....	98
Şekil 4.54. Trafik Fayda Oranı (<i>TBR</i>)-yük döngü sayısı ilişkisi.....	100
Şekil 4.55. u_z parametresinin hesaplanma yöntemi.....	101
Şekil 4.56. $0.05D$, $0.10D$ ve $0.15D$ deformasyon değerleri için q_u ile u_z arasındaki ilişki	103
Şekil 4.57. 5000 yük döngüsü sonundaki M_R ile u_z arasındaki ilişki.....	104

SİMGELER ve KISALTMALAR

AB-3	Kırma Kireç Taşı	
B	Temel genişliği	(mm)
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı	(%)
c	Kohezyon	(kPa)
C_c	Eğrilik katsayısı	
C_u	Üniformluk katsayısı	
CCG	Çimento kaplanmış geotekstil	
d	Deformasyon	(mm)
D_{10}	Zeminin %10'luk kısmının geçtiği elek çapı	(mm)
D_{30}	Zeminin %30'luk kısmının geçtiği elek çapı	(mm)
D_{60}	Zeminin %60'luk kısmının geçtiği elek çapı	(mm)
D	Yükleme plakası çapı	(mm)
D_r	Sıkılık	(%)
e_{min}	Minimum boşluk oranı	
e_{maks}	Maksimum boşluk oranı	
G	Geotekstil	
I_F	Taşıma kapasitesi iyileştirme faktörü	
LVDT	Deplasman ölçer	
M_R	Esneklik Modülü	(MPa)
NPA	Yeni Polimer Alaşım	
PP	Polypropylene geogrid	
QW	Taş ocağı atığı	
q	Düşey gerilme	(kPa)
q_u	Nihai taşıma kapasitesi	(kPa)
PRS	Deformasyon değerinde yüzdesel azalma	(%)
RAP	Geri dönüştürülmüş asfalt kaplaması	
RDR	Tekerle izi azalma oranı	
SEM	Tarama elektron mikroskobu	
SP	Kötü derecelenmiş kum	
TBR	Trafik Fayda Oranı	
u	Gömülme derinliği	(mm)

u_z	Donatı etkinlik faktörü	(cm)
$\gamma_{k,max}$	Maksimum kuru birim hacim ağırlık	(kN/m ³)
$\gamma_{k,min}$	Minimum kuru birim hacim ağırlık	(kN/m ³)
γ_s	Dane birim hacim ağırlık	
ϕ	İçsel sürtünme açısı	(°)



1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, özellikle zemin iyileştirme ve güçlendirme konularında çeşitli mühendislik problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu problemlerin ortadan kaldırılması veya minimize edilmesi için günümüzde geosentetikler sıklıkla tercih edilmektedir. Geosentetikler, inşaat mühendisliğinde önemli uygulama alanlarına sahip malzemelerdir. Bunlar, taşıma gücü zayıf zeminlerin iyileştirilmesi, yumuşak zeminler üzerine yapılacak temellerin inşasında daha sağlam ve kararlı bir zemin sağlanması, karayolu taban zemini ve temel tabakasının güçlendirilmesi, şev stabilitesinin artırılması, gömülü boruların korunması, demiryolu temellerinin güçlendirilmesi, dolgu inşası, erozyon kontrolü ve dayanma yapılarının inşasında kullanılmaktadır [1–36]. Geosentetiklerin tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında maliyet etkinliği, kullanım kolaylığı, performansı artırmaları ve kolay ulaşılabilir olmaları yer almaktadır.

Gelişen teknoloji, artan nüfus ve ticaret ağı ile orantılı olarak karayolu ulaşımına duyulan ihtiyaç da hızla artmaktadır. Trafik hacmindeki bu artış nedeniyle, karayollarında yorulma çatlakları ve tekerlek izi oluşumu gibi tipik kusurların meydana gelmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Yol bozulmaları, bakım maliyetlerinde artışa ve yolların servis ömründe azalmaya yol açmaktadır. Bu nedenle, bu tür problemlere yönelik ekonomik çözümler aranmakta ve geosentetikler bu alanda çözüm sunan önemli malzemelerden biridir. Geosentetikler, 50 yılı aşkın süredir zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olarak kullanılmaktadır ve 1970'li yıllardan itibaren geogrid ve geotekstil gibi düzlemsel geosentetik malzemeler, kaplamalı ve kaplamasız yolların performansını iyileştirmede önemli bir rol oynamaktadır [9,37,38].

Karayolu inşaatında, yolun üzerine yapılacak olan taban zemininin mühendislik özellikleri oldukça önemlidir. Eğer taban zemini zayıfsa, üzerine inşa edilecek olan yol üstyapısının ilerleyen süreçlerde bozulması kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle, geosentetik türlerinden biri olan geotekstiller, karayolu taban zeminini iyileştirme amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Geotekstiller, aynı zamanda taban zemini ile yol üstyapısı arasında bir ayırma elemanı olarak görev yaparak, zemin ve üstyapı arasındaki etkileşimi düzenler [3,39–41].

Literatürde, geotekstilin çimento harcı ile kaplanması zemin iyileştirme üzerinde önemli etkiler yarattığına dair bazı çalışmalar bulunmaktadır [42–45]. Bu tür çalışmalar, çimento harcı ile kaplanmış geotekstilin adhezyon, sürtünme kuvveti, çekme kapasitesi, pull-out ve ara yüzey kesme davranışları gibi mühendislik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Ayrıca, çimento ile kaplanmış geotekstilin eğilme dayanımında ve taşıma kapasitesinde de artış gözlemlenmiştir. Bu iyileşmeler, çimento harcı ile kaplanmış geotekstilin karayolu taban zeminlerinde kullanılmasının avantajlı olabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında, çimento harcı ile kaplanmış geotekstilin karayolu taban zeminlerinde güçlendirme elemanı olarak kullanılabilirliği, statik ve tekrarlı yükler altında deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan deneylerde, herhangi bir işleme tabi tutulmamış geotekstil ile çimento ile kaplanmış geotekstilin zemin davranışındaki iyileştirme etkileri karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, elastik deformasyon yüzdesi, esneklik modülü (M_R), trafik fayda oranı (TBR), tekerlek izi azalma oranı (RDR) ve taşıma kapasitesi (q_u) gibi parametreler açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, geosentetik malzemelerin etkinliğini daha iyi anlamak için donatı etkinlik faktörü (u_z) önerilmiştir. Bu parametrelerin her biri, karayolu yapılarının dayanıklılığını ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir ve çimento ile kaplanmış geotekstilin bu parametreler üzerindeki etkisi bu tezde kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kaplamalı ve kaplamasız yollarda her geçen yıl trafik yükünün artması, yollarda bozulmaların, onarım ve bakım maliyetlerinin artmasına sebep olmaktadır. Bu sorunların gün geçtikçe artması çözüm bulma çabalarını da artırmıştır. Literatürde birçok araştırmacı tarafından bu sorunları en aza indirebilmek için temel tabakası ve zayıf zemin tabakası geosentetiklerle güçlendirilme çalışmaları yapılmıştır. Aşağıda literatürde yer alan bazı çalışmalar özetlenmiştir:

Pokharel vd. [46] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada tek bir geocell hücresi kullanarak güçlendirilmiş temel tabakasının statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemiştir. Statik yükleme deneylerinin sonuçlarına göre, geocell'in rijitliğinin %50 oranında arttığı, maksimum yük kapasitesinin ise %100 oranında yükseldiği tespit edilmiştir. Tekrarlı yükleme deneylerinde ise geocell ile güçlendirilen temelde elastik deformasyon yüzdesinin, yük döngü sayısı arttıkça artarak %95 seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Palmeira ve Antunes [39], zayıf taban zeminleri üzerine inşa edilen kaplamasız yolların geosentetiklerle güçlendirilmesi durumunu büyük ölçekli tekrarlı ve monotonik yükleme deneyleri ile incelemiştir. Çalışmada, taban zemini ve dolgu tabakası arasındaki güçlendirme elemanları olarak geotekstil ve geogrid kullanılmıştır. Tekrarlı yükleme, her seferinde 25 mm'lik tekerlek izi derinliğine ulaşacak şekilde üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Geosentetik donatı kullanımı sayesinde, belirli bir tekerlek izi derinliğine ulaşmak için gerekli olan yük döngü sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, geosentetikler arasında geogridin, geotekstilden daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Trafik fayda oranı (*TBR*) değerleri ise donatı tipi ve yükleme aşamasına göre 2.3 ile 9.2 arasında değişmiş ve her yükleme aşamasında geogridin kullanıldığı deneylerde en yüksek *TBR* değerleri elde edilmiştir. Geogrid donatısının, dolgu tabakasının yanal hareketini sınırlama konusunda geotekstile kıyasla daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca, geosentetiklerin kullanımı ile taban zeminine aktarılan düşey gerilmelerin azaldığı ve yük dağılım açıları üzerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Güçlendirme yapılmayan deneylerde yük dağılım açısı 25° iken, geotekstil ve geogrid kullanılan deneylerde bu açı sırasıyla 43° ve 48° olarak ölçülmüştür.

Tafreshi ve Dawson [47] üç boyutlu ve düzlemsel geotekstiller ile güçlendirilen kum yataklarının statik ve tekrarlı yüklemenin bir kombinasyonunun kullanıldığı yüklenme koşulları altında şerit temellerdeki davranışını model laboratuvar deneyleriyle incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, düzlemsel ve üç boyutlu geotekstil ile güçlendirilen kum yataklarındaki maksimum temel oturmalarının, güçlendirilmemiş duruma kıyasla önemli ölçüde azaldığı ve düzlemsel ile üç boyutlu geotekstil kullanımının sağladığı faydaların benzer düzeyde olduğu belirlenmiştir. Aynı kütlede kullanılan geotekstil için yapılan değerlendirmelerde ise, üç boyutlu geotekstilin güçlendirmeye olan katkısının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Pokharel vd. [48] yol temellerinin güçlendirilmesinde NPA geocell'in etkilerini araştırmak amacıyla tam ölçekli trafik testleri gerçekleştirmişlerdir. Testlerde taban zemini olarak zayıf kil malzemesi, temel malzemesi olarak ise kırma kireç taşı (AB-3), taş ocağı atığı (QW) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesi (RAP) kullanılmıştır. Karşılaştırma amacıyla yapılan güçlendirilmemiş testlerde temel malzemesi olarak 30 cm kalınlığında AB-3 agregası kullanılmıştır. NPA geocell ile güçlendirilen deneylerde ise her üç temel malzemesi kullanılarak 17 cm kalınlığında temeller inşa edilmiştir. Sonuçlar, 17 cm kalınlığında NPA geocell ile güçlendirilen temel tabakasının performansının, güçlendirilmemiş temele göre daha iyi olmasına da, daha iyi sıkıştırılmamış olduğu halde daha yüksek performans sergilediğini göstermiştir. Güçlendirilmiş temellerde en iyi performans sırasıyla RAP, AB-3 ve QW malzemelerinin kullanıldığı testlerde elde edilmiştir. Güçlendirilmemiş temele kıyasla, NPA geocell kullanımı sayesinde gerilme dağılımı açısından, AB-3, RAP ve QW temel malzemeleri için sırasıyla 13.4°, 11.6° ve 6.5° oranında arttığı ifade edilmiştir.

Han vd. [49] son yıllarda enerji tasarrufu sağlaması ve çevre dostu bir malzeme olması nedeniyle RAP kullanımının sıcak karışım asfaltlarda ve yol inşasında temel tabakası olarak giderek arttığını belirtmişlerdir. Ancak, RAP malzemesinin tekrar eden trafik yüklerinin altında ciddi deformasyonlara yol açabileceği gözlemlenmiştir. Bu olumsuz etkiyi azaltmak amacıyla, NPA geocell kullanımıyla güçlendirilmiş zayıf taban zemini üzerine inşa edilen RAP temel tabakası üzerinde tam ölçekli hızlandırılmış kaplama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, NPA geocell kullanımı sayesinde gerilme dağılımı açısından artış gözlemlenmiş ve tekerlek izi derinliğinde ise önemli ölçüde azalma meydana geldiği ifade edilmiştir.

Qian vd. [50] zayıf taban zemini üzerine inşa edilen karayolu temellerinin güçlendirilmesinde üç eksenli geogridin etkinliğini araştırmak amacıyla 2x2.2x2 m boyutlarındaki deney kasasında tekrarlı yükler altında deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, üç eksenli geogridin, yüzeydeki kalıcı deformasyonları ve taban zemini ile temel arasındaki arayüze gelen düşey gerilmeleri azalttığı tespit edilmiştir. Arayüzeyde ölçülen düşey gerilmelerden yapılan geri hesaplamalar sonucunda, yük döngü sayısının artmasıyla birlikte, gerilme dağılım açısının ve temel-taban zemini modül oranının azaldığı belirtilmiştir.

Thakur vd.[40] CBR değeri %2 olan kum-kaolin karışımı zayıf taban zemini üzerine inşa edilen, NPA geocell ile güçlendirilmiş RAP malzemesinden oluşan karayolu temel tabakasının davranışını incelemek amacıyla tekrarlı yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, 0.15 m, 0.23 m ve 0.3 m olmak üzere üç farklı temel tabakası kalınlığı kullanılmış, güçlendirilmemiş deney ise 0.30 m kalınlığındaki temel üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar, geocell kullanımı sayesinde temel tabakası kalınlığından bağımsız olarak kalıcı deformasyonların belirgin şekilde azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, 0.15 m, 0.23 m ve 0.30 m kalınlığındaki güçlendirilmiş temellerin 75 mm kalıcı deformasyon değerine ulaşmak için gerekli yük döngü sayısının, güçlendirilmemiş temelinkine oranlarının sırasıyla 6.4, 3.6 ve 19.4 olduğunu belirtmişlerdir.

Saride vd. [11] yaptıkları deneysel çalışmada, kum taban zemininin geocell kullanılarak güçlendirilmesinin etkilerini büyük ölçekli tekrarlı yükleme deneyleriyle incelemişlerdir. Deneylerde, geocell yüksekliği, geocell genişliği ve yüklemenin konumunun taban zemini davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Geocell kullanımının sağladığı faydalar, tekerlek izi azaltma oranı (*RDR*), trafik fayda oranı (*TBR*), toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon gibi parametreler açısından değerlendirilmiştir. Geocell ile güçlendirilen deneylerde, güçlendirilmemiş duruma kıyasla bu parametreler açısından belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca, geocell'in genişliğinin ve yüksekliğinin artırılmasıyla taban zemini davranışının daha da iyileştiği tespit edilmiştir.

Tafreshi vd. [13] öğütölmüş tekerlek kauçuğu ve geocell kullanarak zemin güçlendirmesinin etkilerini tekrarlı yükleme deneyleriyle incelemişlerdir. Deneylerde,

geocell, zeminin farklı derinliklerine yerleştirilen dört farklı katmanda kullanılarak katman sayısının etkisi de araştırılmıştır. Geocell'in optimum gömülme derinliği, yükleme plakası çapının 0.2 katı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ilk geocell tabakasının optimum gömülme derinliği ile geocell katmanları arasındaki optimum mesafenin de yükleme plakası çapının 0.2 katı olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, geocell ve kauçuk tabaka sayısının artmasıyla yüzey deformasyonlarının azaldığı vurgulanmıştır.

Sun vd. [51] geogrid kullanımının temel ve taban zemininde oluşan elastik deformasyonlar ve radyal gerilmeler üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, farklı temel tabakası kalınlıklarında ve değişen yükler altında tekrarlı yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, geogrid kullanımıyla temel tabakasındaki ve taban zeminindeki kalıcı deformasyonların azaldığını ve temel tabakası ile taban zemini boyunca oluşan radyal gerilme dağılımının değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, geogrid ile güçlendirmenin, güçlendirilmemiş duruma kıyasla zemine daha fazla esneklik sağladığını ifade etmişlerdir.

Khalaj vd. [52] karayolu temellerinin çok tabakalı geocell ile güçlendirilmesinin etkilerini incelemek amacıyla tekrarlı plaka yükleme deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre, ilk geocell tabakasının optimum gömülme derinliğinin ve geocell tabakaları arasındaki optimum mesafenin, plaka çapının yaklaşık olarak %20'si kadar olduğunu saptamışlardır. Ayrıca, geocell kullanımının elastik davranışı artırdığı ve kalıcı ile toplam deformasyonları azalttığı vurgulanmıştır. Dört tabaka geocell kullanımı durumunda ise toplam ve kalıcı deformasyonların sırasıyla %53 ve %63 oranında azaldığı, elastik deformasyonun ise %145 oranında arttığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, geocell kullanımı sayesinde yükün daha geniş bir alana yayılmasının sağlandığı ve buna bağlı olarak düşey gerilmelerin azaldığı ifade edilmiştir.

Wu vd. [53] farklı açıklıklara ve rijitliklere sahip geogridlerin güçlendirme etkisini, temel malzemesi ve nehir kumu üzerinde tekerlek yükleme testi yaparak incelemişlerdir. Ayrıca, tekerlek yükleme testlerinin sonuçlarını tekrarlı plaka yükleme deneyleri ile karşılaştırmışlar ve bu testlerin birbirleriyle uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Hem tekerlek yükleme testleri hem de tekrarlı plaka yükleme

deneyleri sonucunda, geogrid ile güçlendirilen deneylerde tekerlek izi direncinde önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Suku vd. [41] geocell ile güçlendirilmiş karayolu temellerinin davranışını incelemek amacıyla tekrarlı yükler altında deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde, temel tabakası kalınlığının deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için dört farklı temel tabakası kalınlığı (150, 200, 250, 300 mm) ele almışlardır. Karşılaştırma amacıyla yapılan güçlendirilmemiş deney ise 300 mm kalınlığındaki temel tabakası ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, geocell ile güçlendirilen temelerde, güçlendirilmemiş duruma kıyasla deformasyonların azaldığını ve tabaka kalınlığı arttıkça deformasyonların daha da azaldığını göstermiştir. Ayrıca, yürüttükleri sayısal çalışma ile elde ettikleri deneysel sonuçları doğrulamışlardır.

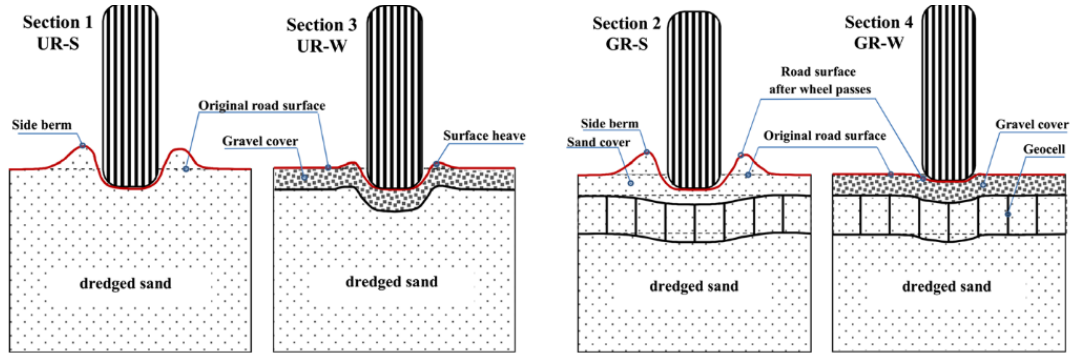
Nair ve Latha [7] zayıf taban zemini üzerine inşa edilmiş temel tabakasının geogrid ve geocell ile güçlendirilmesini araştırmak amacıyla tekrarlı plaka yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, iki farklı tür geogrid ve altı farklı yükseklikteki geocell kullanılmıştır. Araştırmalarında, geocell'in temel tabakasındaki konumunun ve geocell yüksekliğinin güçlendirme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, geocell yüksekliğinin artırılmasının belirli bir değere kadar faydalı olduğunu, ancak bu değerden sonra daha fazla iyileştirme sağlamadığını ortaya koymuştur.

Suku vd. [12] zayıf taban zemini üzerine inşa edilen temel tabakasının geogrid ile güçlendirilmesinin etkilerini tekrarlı plaka yükleme deneyleri ile araştırmışlardır. Deneylerde, deformasyon davranışı üzerindeki etkileri incelemek amacıyla 150, 200, 250 ve 300 mm olmak üzere farklı temel tabakası kalınlıkları kullanılmıştır. Ayrıca, geogridin optimum gömülme derinliğini belirlemek için üç farklı gömülme derinliğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, geogridin en iyi performansının 50 mm gömülme derinliğinde elde edildiğini ortaya koymuştur. Deney sonuçlarına göre, 150 mm temel kalınlığındaki geogrid ile güçlendirilmiş temelin, 300 mm kalınlığındaki güçlendirilmemiş temele göre daha az deformasyona uğradığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, geogridin deformasyon performansını arttırırken aynı zamanda temel malzemesinden tasarruf sağladığını vurgulamışlardır.

Pokharel vd. [8] yaptıkları çalışmada üç farklı dolgu malzemesi (kıırma kireç taşı, taş ocağı atığı ve nehir kumu) kullanarak tek ve çok hücreli geocellerin güçlendirme

üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla tekrarlı plaka yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarından, geocell ile güçlendirmenin kalıcı deformasyonları azalttığı ve elastik deformasyon yüzdesini arttırdığı vurgulanmıştır. Ayrıca, çok hücreli geocell'in, tek hücreli geocelle kıyasla daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Geocell ile güçlendirilen deneylerde elde edilen başlangıç modüllerinin, güçlendirilmemiş deneylere kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Aghda vd. [54] ekonomik ve çevresel problemlere neden olan denizlerdeki dip tarama atığının karayolu dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ancak, bu malzemenin mühendislik uygulamaları için yeterli mukavemete sahip olmaması nedeniyle, geocell ile birlikte kullanımını tekrarlı yükleme deneyleri ve gerçek araç geçişleri ile denemişlerdir. Şekil 2.1.'de gösterildiği üzere, güçlendirilmemiş deneylerde yalnızca dip tarama kumu ve dip tarama kumu üzerine agrega örtü kullanılarak iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Güçlendirilmiş deneylerde ise aynı kesimde geocell kullanılmıştır. Geocell ile güçlendirilmiş ve agrega örtü kullanılan deneyde, aracın 40 kez geçişi sonucunda yük taşıma kapasitesi 2.3 kat artmış, *TBR* değeri 21 kat artmış ve tekerlek izi derinliği 15 mm'den 4.5 mm'ye düşmüştür. Sadece geocell ile güçlendirilen durumda ise yük taşıma kapasitesi 1.75 kat artmış ve *TBR* değeri 2.3 kat artmıştır.



Şekil 2.1. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş zeminin tekerlek izi durumları [54]

Rayabharapu ve Saride [55] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada %30 sıklıktaki zayıf kum taban zeminde %75 sıklıktaki kum temellerin geocell ile güçlendirilmesi durumunu tekrarlı plaka yükleme deneyleri yaparak incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, geocell kullanımıyla birlikte plaka çapının %5'ine karşılık

gelen oturma değerinde *TBR* değerinin 15'e ulaştığı ve kalıcı deformasyonun %35 oranında azaldığı vurgulanmıştır.

Mamatha ve Dinesh [5] yaptıkları çalışmada farklı yoksekliklere sahip geocell'ler ile alt temel tabakasının güçlendirilmesi sonucunda ortaya çıkan davranışı araştırmak amacıyla tekrarlı plaka yikleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde ayrıca farklı alt temel tabakası kalınlıkları kullanılarak tabaka kalınlığının etkileri de incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, geocell ile güçlendirme işlemiyle yüzey profillerindeki kabarmaların azaldığı bildirilmiştir. Geocell kullanımının, kaplama ömrünü değişen geocell yokseklikleri için 1.6 ile 3.5 kat arasında artırdığı ve kalıcı deformasyonları %13 ile %71 arasında azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca, en iyi performansın 150 mm yokseklığe sahip geocell ve 350 mm kalınlığındaki alt temel tabakası kullanıldığında elde edildiği ifade edilmiştir.

George vd. [56] yaptıkları çalışmada geocell ile güçlendirilmiş RAP malzemesinden oluşan temellerin esneklik modülündeki değişimi tekrarlı plaka yikleme deneyleri ile araştırmışlardır. Çalışmada, iki farklı yokseklikteki geocell (100 mm ve 150 mm) kullanılmıştır. 100 mm yokseklığe sahip geocell'in kullanıldığı deneyde, esneklik modülünün güçlendirilmemiş deneye göre 3 kat arttığı gözlemlenmiş ve geocell yokseklıği arttıa esneklik modülünün de arttığı sonucuna varılmıştır.

Mehrijardi vd. [57] yürüttükleri çalışmada, inşaat ve yıkıntı atıklarının karayolu inşaatında, özellikle alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliğini mekanik ve fiziksel özelliklerini inceleyerek araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, bu atık malzemenin geocell ile güçlendirilmesinin taşıma kapasitesindeki iyileşme üzerindeki etkileri tekrarlı plaka yikleme deneyleriyle değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, inşaat ve yıkıntı atığının alt temel malzemesi olarak kullanılabilmesi için gerekli olan fiziksel ve mekanik özelliklerin çoğunu sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, inşaat ve yıkıntı atığının döngüsel taşıma kapasitesinin, standart malzemelerden yaklaşık %20-40 oranında daha düşük olduğu, ancak geocell ile güçlendirilmesiyle bu özelliğin önemli ölçüde iyileştiği ifade edilmiştir. Çalışmanın sonunda, inşaat ve yıkıntı atığının karayolu alt temel malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

George vd. [3] yürüttükleri çalışmada, düşük kayma mukavemeti ve yüksek deformasyon davranışı sergileyen RAP (geri dönüştürülmüş asfalt kaplama)

malzemesinin, geocell ile güçlendirilerek yol temellerinde kullanılabilirliğini tekrarlı plaka yükleme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, geocell kullanımıyla RAP temellerinin esneklik modülünün 2.5-3.3 kat arttığı ve kalıcı deformasyonların %70-80 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, geocell donatısının yorulma ve tekerlek izi ömürlerini sırasıyla 8 ve 30 kat artırdığı belirtilmiştir. Bu sonuçlar, geocell'in RAP malzemesinin performansını önemli ölçüde iyileştirerek, yol temellerindeki dayanıklılığını artırdığına işaret etmektedir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, karayolu taban zemininin statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada taban zemini olarak, mühendislik özellikleri açısından güçlendirilmesi gereken kötü derecelendirilmiş kum zemin tercih edilmiştir. Bu zeminin güçlendirilmesi amacıyla geotekstil (G) ve çimento ile kaplanmış geotekstil (CCG) kullanılmıştır.

Araştırma kapsamında, öncelikle 7 adet statik yükleme deneyi, ardından 7 adet tekrarlı yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Statik yükleme deneyleri, zemin donatısız halde ve farklı donatı türleri kullanılarak yapılmış; yük-deformasyon davranışı, nihai taşıma kapasitesi ve diğer parametreler açısından değerlendirilmiştir. Tekrarlı yükleme deneyleri ise zemin stabilitesinin uzun süreli yükleme senaryoları altındaki performansını incelemeyi amaçlamış; toplam, elastik ve kalıcı deformasyon davranışlarının yanı sıra esneklik modülü (M_R) gibi parametreler üzerinden analiz edilmiştir.

Bu bölümde, deneysel çalışmanın detayları kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır. Taban zemininin mühendislik özellikleri, kullanılan geotekstil malzemesinin temel nitelikleri ve çimento ile kaplanmış geotekstilin (CCG) nasıl hazırlandığı ayrıntılı olarak sunulmuştur. Ayrıca, deneylerin uygulanmasında kullanılan düzeneklerin tasarımı, kullanılan araç ve gereçler, deneylerin adım adım nasıl yapıldığı ve her bir deney grubu için oluşturulan program detaylandırılmıştır.

Statik ve tekrarlı yükleme deneylerinin metodolojisi; numune hazırlama, yükleme prosedürleri ve ölçüm teknikleri gibi tüm süreçleri kapsayacak şekilde anlatılmıştır. Bu kapsamda deneysel çalışmalar, araştırmanın hedeflerini gerçekleştirmek için titizlikle planlanmış ve uygulanmıştır.

3.1 Taban Zemini

Laboratuvar deneylerinde, taban zeminini temsil etmesi amacıyla, daha önce Altay'ın [58] gerçekleştirdiği doktora tez çalışması kapsamında temin edilen kum zemin kullanılmıştır. Bu kum zemin, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında halihazırda mevcut olup, daha önceki çalışmalarda zemin davranışlarının incelenmesinde de kullanılmıştır. Altay'ın [58] doktora tezinde, kum

zemin malzemesinin tedarik edilme süreci, özellikleri ve elde edilme yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu çalışma, özellikle zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir kaynak teşkil etmektedir.

Deneyleerde kullanılan kum zemin, TS 1500 [59] standardına göre "SP" sınıfında, yani kötü derecelenmiş kum olarak belirlenmiştir. Bu tür kumlar, özellikle yapıların temel zeminleri ve zemin etüdü çalışmalarında genellikle zayıf taşıma kapasitesine sahip olurlar ve bu özellikleriyle güçlendirme ve iyileştirme çalışmaları için uygun test ortamları oluştururlar. Kullanılan kum zemin, yol altyapısı ve zemin mühendisliği uygulamalarındaki zemin güçlendirme tekniklerinin etkinliğini değerlendirmek adına özellikle seçilmiştir.

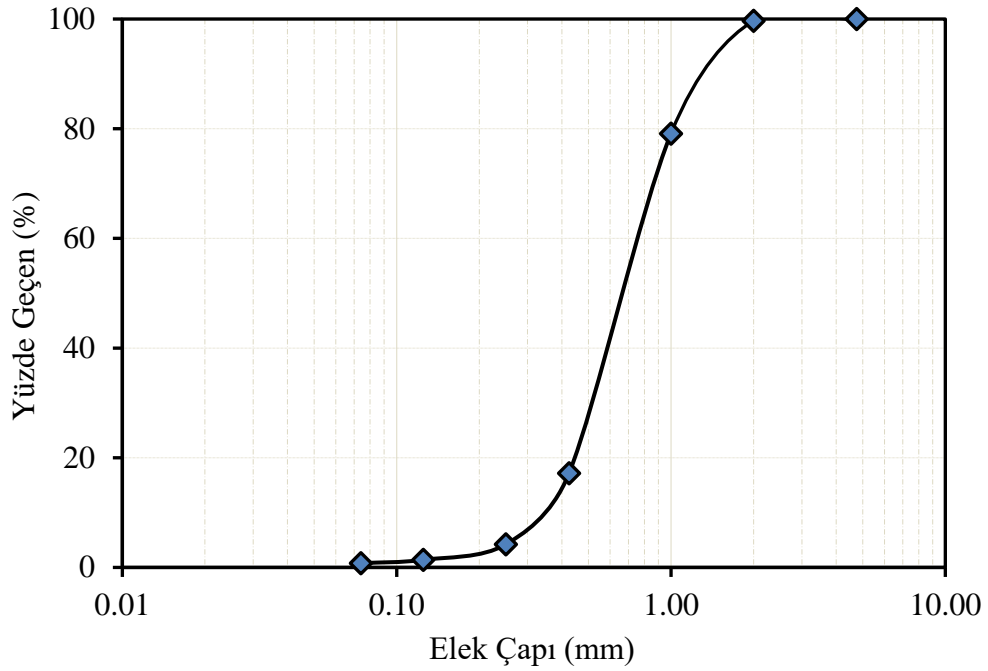
Çalışmada taban zemini olarak kullanılan kum zemin malzemesinin görseli, Şekil 3.1.'de sunulmuştur. Bu görsel, kullanılan kum zemin malzemesinin genel yapısını, dokusunu ve fiziksel görünümünü yansıtmaktadır. Ayrıca, kum zemin malzemesinin zemin özellikleri ve dane çapı dağılımı hakkında daha ayrıntılı bilgiye sahip olmak için Çizelge 3.1.'de zemin özellikleri, Şekil 3.2.'te ise dane çapı dağılım eğrisi sunulmuştur. Bu dağılım eğrisi, kum zemin malzemesinin dane boyutlarını ve bu boyutların nasıl bir dağılım gösterdiğini göstererek, zemin malzemesinin genel yapısal özelliklerini daha iyi anlamamıza olanak tanımaktadır.



Şekil 3.1. Kum zemine ait görsel

Çizelge 3.1. Taban zeminine ait özellikler

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, γ_s	2.74
Maksimum kuru birim ağırlık, $\gamma_{k,maks}$ (kN/m ³)	16.57
Minimum kuru birim ağırlık, $\gamma_{k,min}$ (kN/m ³)	15
Minimum boşluk oranı, e_{min}	0.62
Maksimum boşluk oranı, e_{maks}	0.79
Kohezyon, c (kPa)	0.00
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	42
Sıklık (D_r) (%)	70

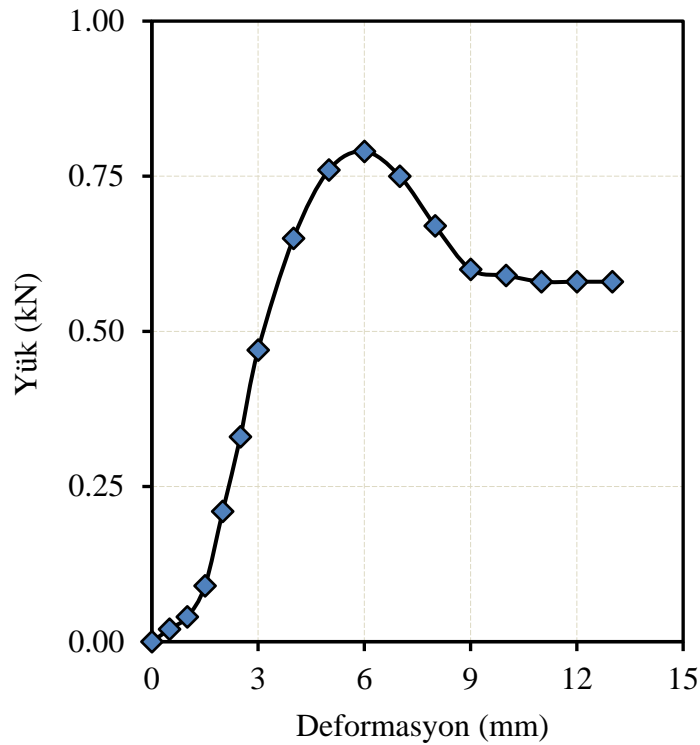


Şekil 3.2. Taban zeminine ait dane çapı dağılım eğrisi

Literatürde, yol altyapısının davranışını inceleyen çalışmalarda, özellikle taban zeminlerinin zayıf olduğu zemin türleri üzerinde durulmuştur. Bu tür zeminlerin tercih edilmesinin ana nedeni, zayıf taban zeminlerinin yol yapımında karşılaşılan bazı problemlere ve bu problemlere yönelik çözüm geliştirilmesine odaklanmaktır. Bu bağlamda, taban zeminlerinin CBR değerinin düşük olması, yani zayıf taban zeminlerinin kullanılması genellikle arzu edilen bir durumdur. CBR, zeminlerin taşıma kapasitesini ölçen bir parametre olarak, yol yapımında kullanılan zemin malzemelerinin dayanıklılığını ve performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yapılan önceki çalışmalara bakıldığında, taban zeminlerinin CBR değerlerinin %2 ile %10 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Örneğin, bazı çalışmalarda zeminlerin CBR değerinin %2 civarında olduğu tespit edilmiştir [40,50,51], diğerlerinde ise bu değer %3 [60–62] veya %7-10 arasında değişmiştir [12,46,63]. Bu farklı CBR değerleri, zeminin taşıma kapasitesini ve dolayısıyla altyapı projelerinde kullanılabilirliğini doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmada ise taban zemini olarak kullanılan kum zemininin CBR değeri belirlenmiştir. Kullanılan kum zemininin sıklık oranı %70 olarak belirlenmiş olup, bu zeminin CBR testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan CBR deneyi, zemin malzemesinin taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını ölçmek amacıyla TS 1900-2 [64] standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney sonucunda, %70 sıklıktaki kum zemin için elde edilen CBR değeri 3.94 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, kum zemin malzemesinin taşıma kapasitesinin ve yol alt yapısındaki performansının belirlenmesine yardımcı olmuştur. Deney sonucunda elde edilen verilerin grafiksel sunumu ise Şekil 3.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. %70 sıklık değerindeki kum taban zeminin CBR eğrisi

3.2 Geotekstil

Deneyleerde taban zemin güçlendirme işlemlerinde kullanılan örgüsüz geotekstil malzemesinin özellikleri, malzemenin fiziksel ve mekanik niteliklerini kapsamlı bir şekilde sunmak amacıyla Çizelge 3.2.'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu çizelgede, geotekstilin yoğunluk, gramaj, çekme dayanımı, geçirgenlik gibi temel özelliklerine dair veriler yer almaktadır. Geotekstil malzemesinin genel görünümüne dair daha ayrıntılı bir görsel bilgi ise Şekil 3.4.'te sunulmuştur. Şekil 3.4., geotekstilin yapı ve dokusunu daha net bir şekilde gözler önüne sererken, malzemenin özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, geotekstilin mikroskobik yapısının daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi için SEM (Tarama Elektron Mikroskobu) analizi gerçekleştirilmiştir. SEM analizi, geotekstilin lif yapısını, yüzey özelliklerini ve malzemenin mikro yapısındaki detayları daha derinlemesine incelememize olanak tanımaktadır. Bu analiz sonucunda elde edilen mikroskobik görüntüler, geotekstilin liflerinin düzenini, yoğunluğunu ve genel yapısını görsel olarak sunmaktadır. SEM görüntüsüne dair sonuçlar, Şekil 3.5.'da verilmiş olup, bu görsel malzemenin mikroskobik düzeydeki yapısını daha iyi kavrayabilmemiz için faydalı bir kaynak teşkil etmektedir.

Çizelge 3.2. Geotekstil malzemesine ait özellikler

Özellik	Birim	Değer
Malzeme	-	Polipropilen (PP), beyaz
Birim ağırlık	g/m ²	400
Kalınlık	mm	2.5
Çekme dayanımı, id/idd*	kN/m	21/23
Kopmadaki uzaması	%	50
Statik delinme dayanımı	N	4000
Dinamik delinme dayanımı	mm	8
Sıvı geçirgenliği	m/s	0.04
Gözenek açıklığı	mm	0.11
UV dayanımı	%	70



Şekil 3.4. Geotekstile ait bir görsel



Şekil 3.5. Geotekstilin SEM görüntüsü

3.3 Çimento ile Kaplanmış Geotekstil

Deneylerde güçlendirme elemanı olarak kullanılan çimento ile kaplanmış geotekstil, Şekil 3.4.'te gösterilen geotekstil kullanılarak elde edilmiştir. Geotekstilin çimento hamuru ile kaplanması için üretilen çimento hamuru, TS EN 196-1 [65] standardına

uygun olarak, 0.5 su/çimento oranına göre hazırlanmıştır. Bu bağlamda, ilk olarak 0,5 su/çimento oranına uygun bir miktar su derin bir kaba konulmuştur. Çimentonun su ile karışmaya başlamasıyla birlikte topaklanma meydana gelmemesi için özel bir dikkat gösterilmiştir. Bu nedenle, karıştırıcı aparatı bağlı bir matkap, su içinde çalışır durumdayken CEM I 42,5 R Portland çimentosu, suyun üzerine kontrollü bir şekilde azar azar ilave edilmiştir. Bu adımda, çimentonun suya eşit şekilde karışması sağlanmakta olup, homojen bir karışım elde edilmesi için topaklanma önlenmiştir. Eğer çimento hızlı bir şekilde suya eklenmiş olsaydı, topaklanma meydana gelir ve karışım düzgün bir şekilde gerçekleşmezdi. Çimento hamurunun hazırlanma işlemiyle ilgili görseller, Şekil 3.6.'de sunulmuştur.





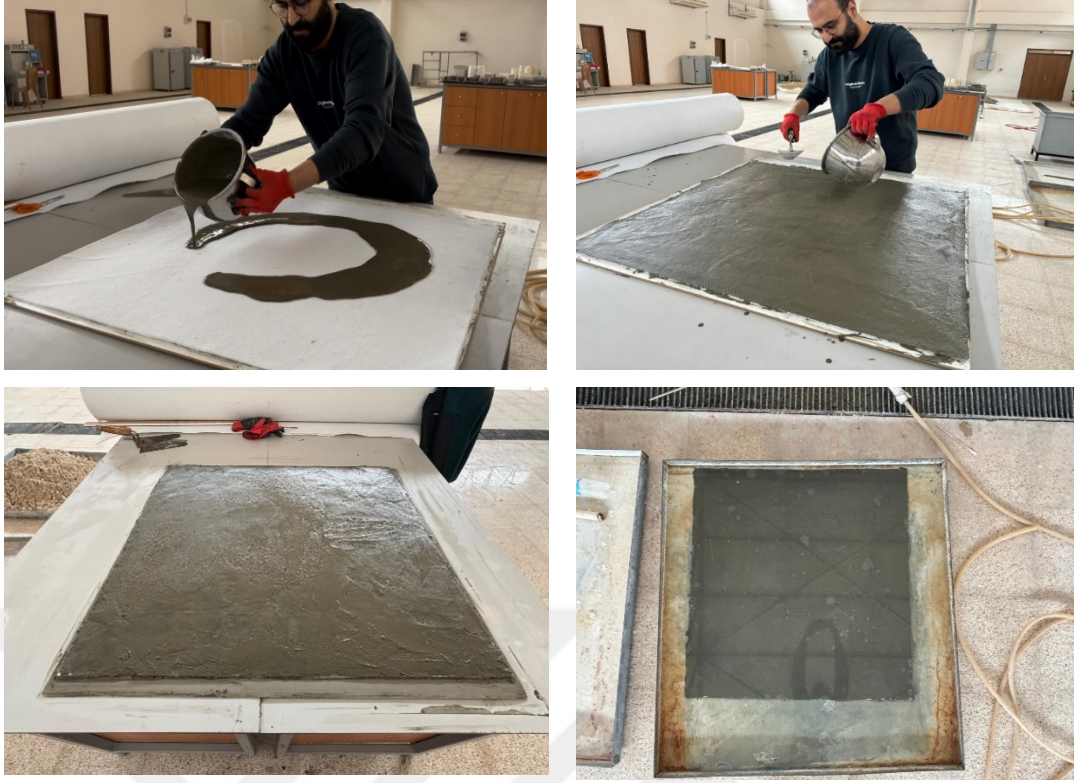
Şekil 3.6. Çimento hamurunun hazırlanması

Çimento hamuru hazırlandıktan sonra, deney kasasına çimento ile işleme tabi tutulmuş geotekstilin yerleştirilmesi için 100 cm × 100 cm boyutlarında olan geotekstil, sığabilmesi amacıyla 95 cm × 95 cm ölçülerinde kesilmiştir. Bu kesilen geotekstil parçası, 1 m × 1 m boyutlarında olan bir ahşap plaka üzerine serilmiştir. Ahşap

plakanın üzerine serilen geotekstil, çimento hamuruyla kaplanmadan önce düzgün bir şekilde yerleştirilmiş ve işlem için hazır hale getirilmiştir. Daha sonra, hazırlanan çimento hamuru, geotekstilin her iki yüzeyine de 0.5 g/cm² miktarında olacak şekilde dökülüp, mala yardımıyla dikkatlice yayılmıştır. Çimento hamurunun eşit şekilde uygulanması ve geotekstilin yüzeyine tam olarak yayılması sağlanmıştır. Çimento hamurunun düzgün bir şekilde dağılması ve yüzeye yapışmasının ardından, geotekstilin ikinci yüzeyine de işlem yapılabilmesi için bir dizi önlem alınmıştır.

Geotekstilin ikinci yüzeyine çimento hamurunun serilmesini sağlamak amacıyla, geotekstilin yüzeyi yapışmayı engellemek için yağlanan bir çelik plaka ile kaplanmıştır. Yağlanan çelik plaka, geotekstilin üzerine dikkatlice yerleştirilmiştir. Bu işlem, geotekstilin ters yüzünün rahatça çevrilebilmesini sağlamak için gereklidir. Ardından, geotekstil ters yüz edilerek, diğer yüzeye de çimento hamuru uygulama işlemine devam edilmiştir. Geotekstil, her iki yüzeyine de çimento hamuru uygulandıktan sonra, bir gün süreyle kuruma işlemine tabi tutulmuştur. Bu kuruma süreci, çimento hamurunun daha sağlam bir yapıya dönüşmesini sağlamaktadır.

Kuruma işlemi tamamlanan çimento ile kaplanmış geotekstil, ertesi gün oda sıcaklığında bulunan bir kür havuzuna yerleştirilmiştir. Bu kür havuzunda, çimento ile kaplanmış geotekstil 28 gün boyunca bekletilmiştir. Kür süresi boyunca çimento, priz olarak sertleşmiş ve mekanik özellikleri iyileşmiştir. 28 gün sonunda, kür havuzundaki işlem tamamlanmış ve çimento ile kaplanmış geotekstil deneysel çalışmalar için kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Bu aşamaların her biri, görsellerle desteklenmiş olup, işlem süreci Şekil 3.7.'de detaylı bir şekilde sunulmuştur.

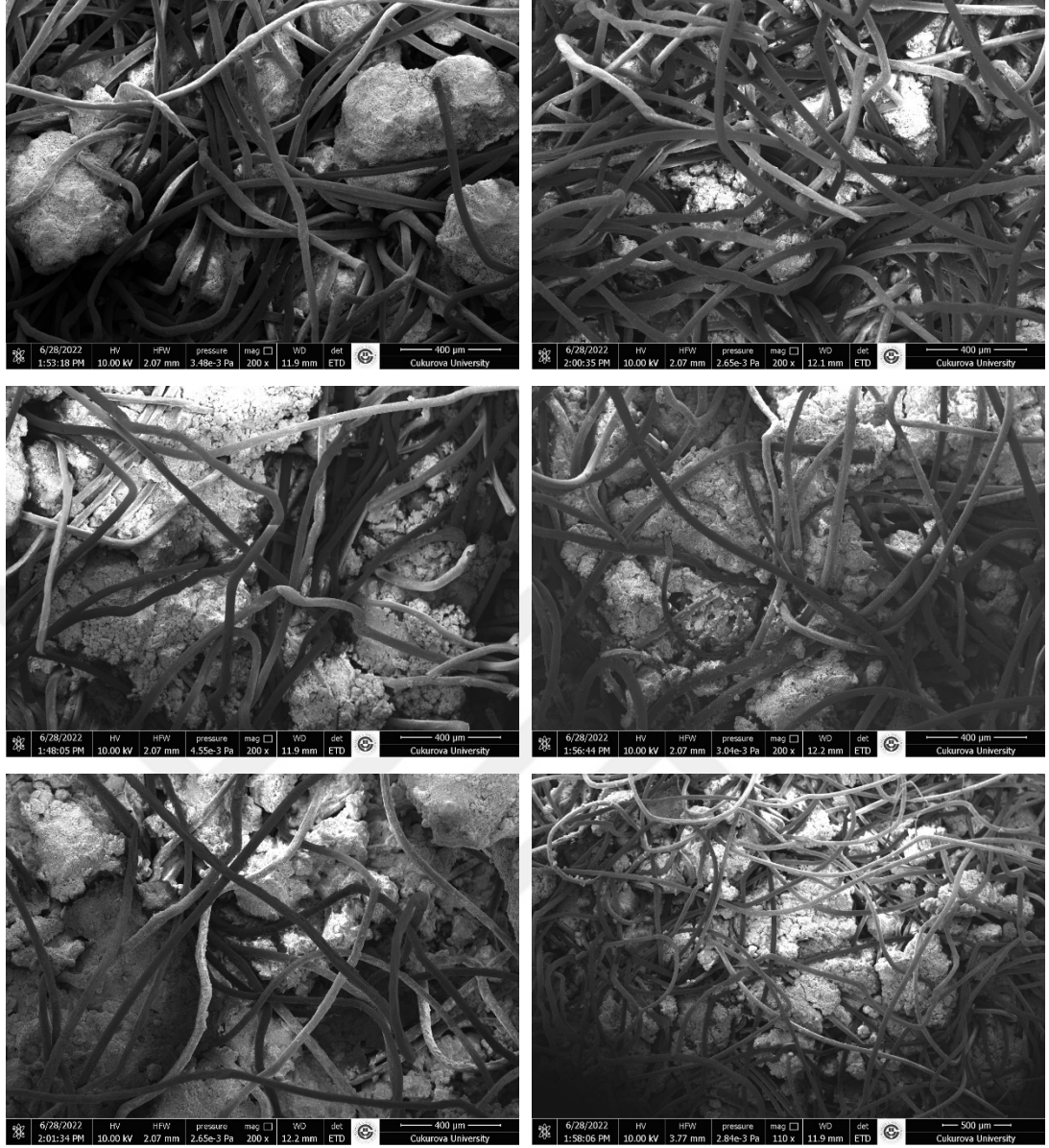


Şekil 3.7. Çimento ile kaplanmış geotekstil hazırlanma aşamaları

Çimento ile kaplanmış geotekstil, kür havuzundan çıkarıldıktan sonra, malzemenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli bölgelerinden kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, geotekstil üzerindeki çimento kaplamasının homojenliğini ve genel kalınlık dağılımını değerlendirmek için dikkatle gerçekleştirilmiştir. Ölçümler farklı noktalarda alınarak, çimento ile kaplanan geotekstilin yüzeyindeki olası kalınlık farklılıklarının tespiti sağlanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda, çimento ile kaplanmış geotekstilin ortalama kalınlığı 5,5 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer, çimentonun geotekstil üzerine uygulama süreci sırasında elde edilen kalınlık artışını ve kaplamanın etkinliğini yansıtmaktadır. Kalınlık ölçümlerinin doğruluğu, çimento kaplamasının homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak adına, özellikle dikkat edilmesi gereken bir faktör olmuştur.

Çimento ile kaplanmış geotekstil numune hazırlanıp 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra SEM analizine tabi tutulmuştur. SEM analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için çimento ile kaplanmış geotekstil numuneleri 4 mm boyuntunda olması gerekmektedir. Bundan dolayı çimento ile kaplanmış geotekstil numunelere kesme işlemi uygulanmıştır. Aslında SEM analizi görüntülerinde

geotekstil lifleri arasındaki sertleşen çimento hamurlarının homojen olarak görünmesi beklenmektedir. Ancak, 28 gün sonunda sertleşen çimento ile kaplanmış geotekstil numunelere uygulanan kesme işlemi sırasında bir miktar örselenme meydana gelmektedir. Bu nedenle SEM analizinden elde edilen görüntülerde çimento ile kaplanmış geotekstil numunelerin içinde sertleşen çimento hamurları parçacıklar halinde görünmektedir. SEM analizi sonucu elde edilen görüntüler Şekil 3.8.'da sunulmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, çimento ile kaplanmış geotekstilin çekme dayanımının herhangi bir işleme tabi tutulmayan geotekstile göre daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [42]. Geotekstilin çimento hamuru ile kaplanması, bu malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştiren bir işlem olarak öne çıkmaktadır. Bu süreçte, çimento hamuru geotekstilin içerisindeki lifler arasındaki boşlukları doldurarak, malzemenin yapısal bütünlüğünü güçlendirdiği düşünülmektedir. Ayrıca, priz almış çimento hamurunun, geotekstilin liflerine ekstra bir çekme dayanımı kazandırarak, hem statik hem de dinamik yükler altında daha yüksek bir performans sergilemesi beklenmektedir. Bu mekanizma, özellikle ulaştırma mühendisliği ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında, geotekstil kullanımını daha dayanıklı ve uzun ömürlü hale getirebilir.



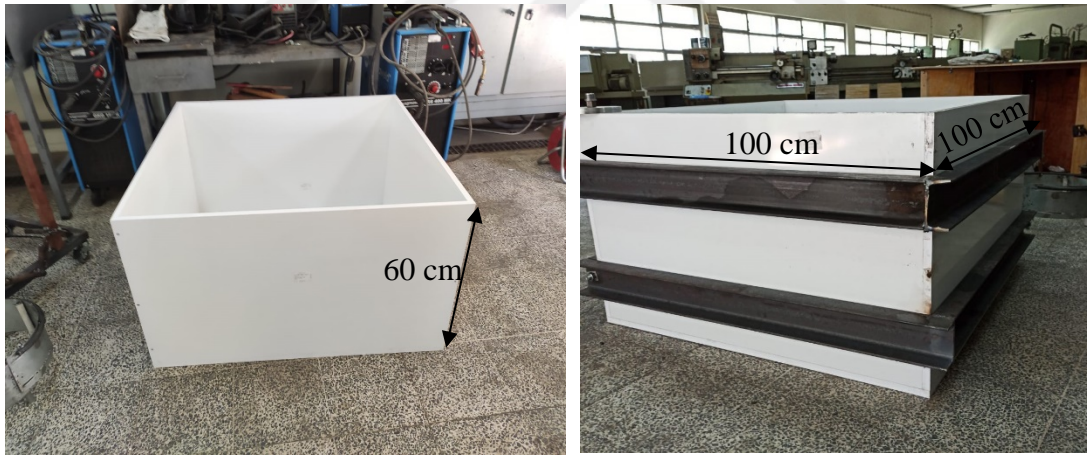
Şekil 3.8. Çimento ile kaplanmış geotekstil numunelerin SEM analizi görüntüleri

3.4 Statik Yükleme ve Tekrarlı Yükleme Deneyleri

Bu çalışma kapsamında geotekstil ve çimento ile kaplanmış geotekstilin karayolu taban zeminin güçlendirilmesindeki performansını değerlendirmek amacıyla statik yükleme ve tekrarlı yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karayolu taban zemininin geotekstil ve çimento ile kaplanmış geotekstil malzemeleri ile güçlendirilmesinin deneysel ortamda gerçekleştirilebilmesi amacıyla, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan daha önce Önal [16] tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan deney kasası tercih edilmiştir. Bu deney kasası, zemin güçlendirme tekniklerinin test edilmesi için uygun

bir ortam sunmakta olup, zemin malzemelerinin fiziksel özelliklerinin doğru bir şekilde incelenmesine olanak sağlamaktadır. Deney kasasına ait görsel, Şekil 3.9.'da detaylı olarak sunulmuştur. Şekil 3.9., kasanın tasarımını, yapısal düzenini ve deneyde nasıl kullanıldığını görsel olarak göstermektedir.

Deneyler sırasında, taban zeminine uygulanan yüklemeler nedeniyle, deney kasasının duvarlarında herhangi bir deplasmanın meydana gelmemesi büyük önem taşımaktadır. Yükleme sırasında meydana gelebilecek deformasyonlar, deney sonuçlarının doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, deney kasasının stabilitesini artırmak ve düzgün bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla, kasanın çevresi üst ve alt taraftan olmak üzere iki adet kuşak ile çevrelenmiştir. Bu kuşaklar, deney kasasının dış duvarlarına ek bir destek sağlayarak, uygulanan yükler sırasında kasanın duvarlarında oluşabilecek olası deplasmanları engellemeyi amaçlamaktadır. Şekil 3.9.'da, deney kasasının etrafını çevreleyen bu kuşakların yerleşimi ve işlevi görsel olarak gösterilmiştir. Bu yapısal düzenleme, deneyin güvenli ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Deneylerin gerçekleştirildiği deney kasası [16]

Deneylerde taban zeminini temsil etmesi amacıyla kullanılan kum zeminin istenilen sıklığa ulaşmasını sağlamak için taban zemini, tabakalar halinde sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma işlemi, zemin malzemesinin taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını doğru bir şekilde test edebilmek için oldukça önemlidir. Deneylerde, taban zemini yüksekliği 500 mm olarak sabit tutulmuş ve bu yüksekliğe ulaşmak için sıkıştırma işlemi 100 mm'lik tabakalar halinde gerçekleştirilmiştir. Yani, toplam 500 mm'lik taban zemin yüksekliği, 100 mm'lik beş ayrı tabakaya bölünerek sıkıştırma işlemi aşamalı olarak

yapılmıştır. Bu yöntem, her tabakanın homojen bir şekilde sıkıştırılmasını sağlayarak, zemin malzemesinin düzgün yerleşmesini ve hedeflenen sıklık değerinin tutarlı bir şekilde elde edilmesini temin etmiştir.

Deney kasasının boyutları ve tabaka yüksekliği göz önüne alındığında, her 100 mm tabaka yüksekliğine karşılık gelen kum miktarı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, %70 sıklık değerindeki kum miktarı, her 100 mm'lik tabaka için 164 kg olarak belirlenmiştir. Bu, her bir tabakanın doğru miktarda kum içermesini sağlayarak, her tabakada istenilen sıklığın ve zemin homojenliğinin elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Gerekli miktarda kum, Şekil 3.10.'da gösterilen elektronik terazi ile dikkatlice tartılmıştır. Elektronik terazi, yüksek hassasiyetle çalışan bir ölçüm aracıdır ve kumun doğru miktarda tartılması, deneylerin güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Kum miktarının doğru bir şekilde tartılması, sıkıştırma işlemi sırasında her tabakanın uygun koşullarda sıkıştırılmasını ve hedeflenen sıklık değerinin tutarlı bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.10. Elektronik terazi

Sıkıştırma işlemi, Şekil 3.11.'de gösterilen, ucunda 15 cm çapa sahip dairesel çelik plaka bulunan bir hilti aparatı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çelik plaka, sıkıştırma sırasında kum tabakalarına uygulanan kuvvetin düzgün bir şekilde dağılmasına yardımcı olmuş ve tabakaların eşit şekilde sıkıştırılmasını sağlamıştır. Hilti, ulaştırma mühendisliği ve geoteknik mühendisliği deneylerinde sıkıştırma gücünü artırmak için yaygın olarak kullanılan bir araçtır ve burada, yüksek sıkıştırma gücü gerektiren bu deneylerde etkin bir şekilde kullanılmıştır. Çelik plakanın 15 cm çapındaki tasarımı, sıkıştırma işlemi sırasında kum tabakalarına etki eden kuvvetin homojen bir şekilde yayılmasını sağlayarak, her bir tabakanın istenilen sıklık seviyesinde sıkıştırılmasına olanak tanımıştır.



Şekil 3.11. Sıkıştırma işleminde kullanılan hilti

Sınır etkilerine karşı önlem olarak, deney kasasının boyutu yükleme plakasının çapından beş kat daha büyük olacak şekilde dikkatlice seçilmiştir, böylece belirlenen değere eşit veya daha büyük olması sağlanmıştır ve ilgili literatürde belirtilen önerilen değeri karşılaması veya aşması garanti altına alınmıştır [7,39,66]. Deneylerde kullanılan yükleme plakasının çapı 200 mm'dir. Deney kasası deneye hazır hale

getirildikten sonra yükleme plakası deney kasesinin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirildikten sonra su terazisi ile yükleme plakasının yüzey düzgünlüğü uygun hale getirilmiştir. Sonrasında yükleme plakasının iki tarafına deplasman ölçerler (LVDT-Linear Variable Differential Transformer) yerleştirilmiştir. Deney sonucunda bu iki deplasman ölçerden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 3.12. ve Şekil 3.13.'te sırasıyla statik yükleme deney düzeneği ve tekrarlı yükleme deney düzeneği sunulmuştur.

Sınır etkilerine karşı önlem olarak, deney kasesinin boyutları dikkatlice seçilmiş ve yükleme plakasının çapının beş katı kadar büyük olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede, yükleme plakasının çevresinde sınır etkilerinin minimize edilmesi sağlanmış ve deneyde elde edilen sonuçların güvenilirliği artırılmıştır. Belirlenen bu boyutlar, ilgili literatürde önerilen standartlara uygun olarak, deney kasesinin çapının yükleme plakasının çapının beş katına eşit veya daha büyük olmasını garanti altına almıştır. Deneylerde kullanılan yükleme plakasının çapı 200 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyut, uygulanan yükün zemine düzgün ve homojen bir şekilde aktarılmasını sağlamak için yeterli büyüklükte seçilmiştir.

Deney kasesi, tüm hazırlık işlemleri tamamlandıktan sonra yükleme plakası, kasanın tam ortasına gelecek şekilde dikkatlice yerleştirilmiştir. Yükleme plakasının düzgün bir şekilde yerleştirilmesi ve hizalanması için su terazisi kullanılmıştır. Su terazisi, yükleme plakasının yüzeyinin yatay düzlemde doğru şekilde konumlandırılmasını sağlayarak, yükleme sırasında oluşabilecek eğikliklerden kaynaklanacak hata risklerini ortadan kaldırmıştır.

Yükleme plakasının düzgün yerleştirilmesinin ardından, taban zeminindeki deformasyonları ölçebilmek için iki adet deformasyon ölçer (LVDT) yükleme plakasının her iki tarafına yerleştirilmiştir. Bu deformasyon ölçerler, yükleme sırasında meydana gelen yer değiştirmeleri hassas bir şekilde kaydederek, zemin ve zemin güçlendirme elemanlarının davranışını doğru bir şekilde izlemeyi mümkün kılmaktadır. Deneyde, her iki deformasyon ölçerden elde edilen veriler birleştirilerek ortalama bir sonuç hesaplanmıştır. Bu ortalama değer, taban zemini ve güçlendirilmiş zemin malzemelerinin genel deformasyon davranışının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

Deney dzenegnn görsel olarak nasıl kurulduğunu ve uygulama sürecini daha iyi anlayabilmek için Şekil 3.12. ve Şekil 3.13.'te sırasıyla statik yükleme deney dzeneg ve tekrarlı yükleme deney dzeneg sunulmuştur. Bu görseller, deneyde kullanılan ekipmanların yerleşimi ve dzenegn genel yapısını daha iyi grselleŐtirmenize yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.12. Statik yükleme deney dzeneg

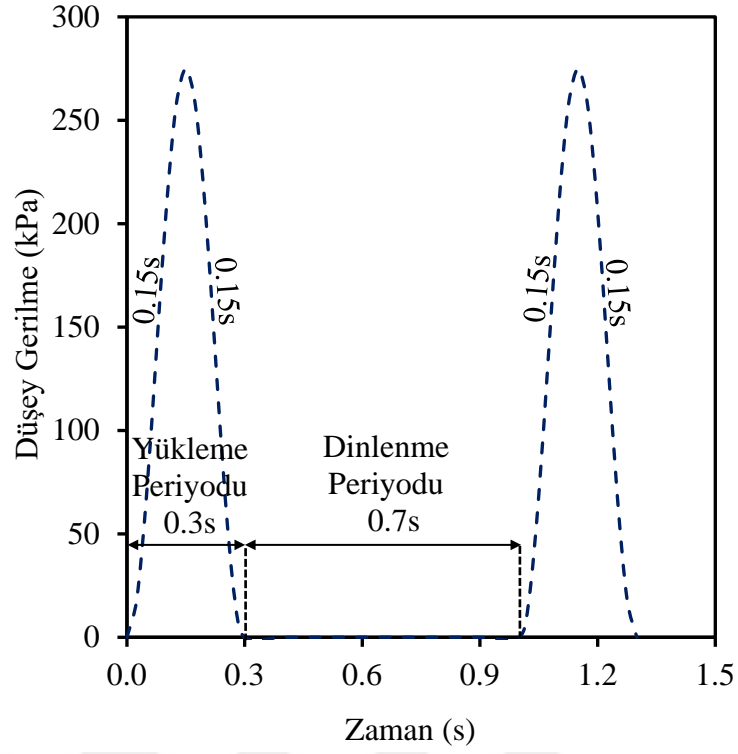


Şekil 3.13. Tekrarlı yükleme deney dzeneg

Bu çalışmada, literatürdeki tekrarlı yükleme deneylerine uyum sağlanarak, tekrarlı yükleme deneylerinde yükleme frekansı olarak 1 Hz değeri seçilmiştir. Literatürde de birçok çalışmada, zemin davranışını simüle etmek amacıyla aynı frekans değeri kullanılmaktadır [39,41,47,66–68]. Bu sıklık, özellikle trafik yüklerinin simülasyonunda yaygın bir uygulamadır ve zemin malzemelerinin dinamik yükler altında nasıl davrandığını doğru bir şekilde incelemek için uygundur. Yükleme frekansının 1 Hz olarak belirlenmesi, yapılan deneylerin diğer literatür çalışmalarına paralel olarak yapılmasını sağlamıştır. Ayrıca, tekrarlı yükleme deneylerinde trafik yüklerini simüle etmek amacıyla, yükleme plakasına 275 kPa değerinde bir gerilme uygulanmıştır. Bu gerilme değeri, literatürdeki pek çok çalışmada benzer şekilde kullanılmış olup, tipik trafik yüklerinin zemin üzerinde yaratacağı etkiyi temsil etmek için literatürde de kabul görmüş bir değerdir [47,54,66]. Bu gerilme değeri, karayollarında uygulanan yüklerin zemin üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde modellemek adına seçilmiştir.

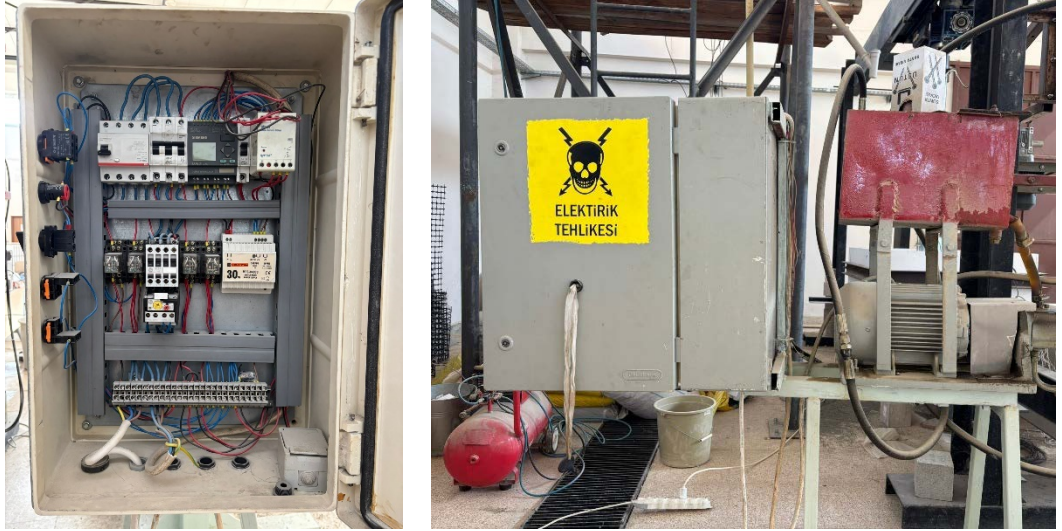
Deneyle, 5000 yük döngüsüne kadar sürdürülmüştür. Literatürde bazı çalışmalar daha fazla yük döngüsü (5000'den fazla) kullanmış olsa da, bununla birlikte 5000 yük döngüsünden daha az yapılan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmada, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan tekrarlı yükleme cihazının kapasitesi göz önüne alındığında, her bir deneyin 5000 yük döngüsü ile gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür. Bu sınırlama, cihazın kapasitesini aşmadan gerekli verilerin toplanabilmesini sağlamaktadır.

Şekil 3.14.'te, bu çalışmada kullanılan trafik yüklerini temsil eden yükleme şekli görsel olarak sunulmuştur. Bu şekil, haversine dalga formu şeklinde bir yükleme profilini ve 1 Hz frekansında uygulanan 275 kPa'lık gerilme değerini göstermektedir. Haversine dalga formu, gerçek dünyada trafikten kaynaklanan yüklerin zamana bağlı değişimini modellemek için yaygın bir yöntemdir. Bu yükleme şekli, tekrarlı yükleme deneylerinde kullanılan tipik yükleme şekline uygun olup, gerçek trafik koşullarına en yakın simülasyonu yapmayı amaçlamaktadır.



Şekil 3.14. Haversine tipi tekrarlı yükleme şekli [16,66,67]

Tekrarlı yükleme deneylerinde, yük değeri, yükleme frekansı ve yük döngü sayısı, Şekil 3.15.'te gösterilen kontrol paneli yardımıyla ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu panel, deney sırasında istenilen yük değerlerinin ve frekansın hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Kontrol paneli, hem yükleme koşullarını izlemek hem de yükleme sisteminin düzgün çalışmasını sağlamak açısından kritik bir role sahiptir. Bu sayede, her bir yükleme parametresi deneyin gereksinimlerine uygun şekilde belirlenmiş ve deney süresince tutarlı bir şekilde uygulanmıştır.



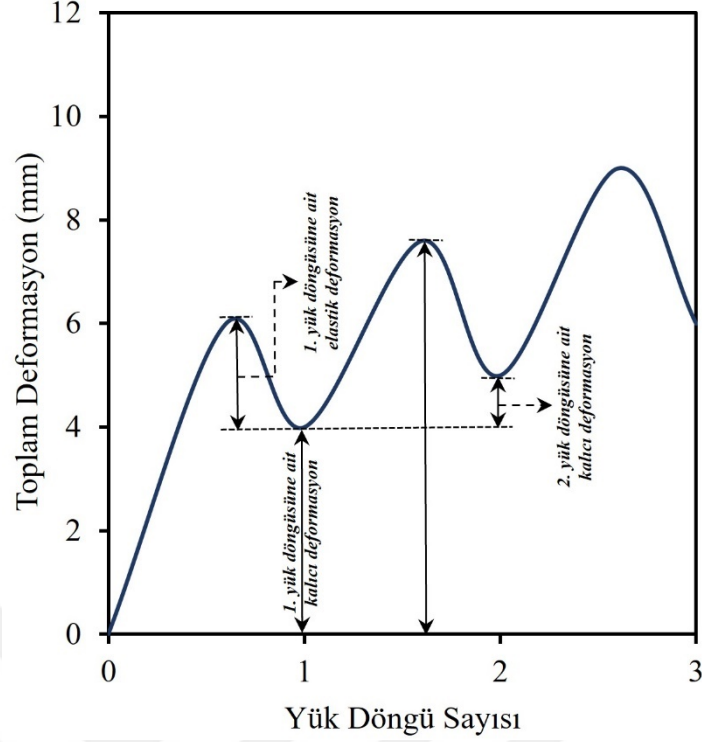
Şekil 3.15. Yük kontrol paneli

Deney sırasında elde edilen yük ve deformasyon verileri, Şekil 3.16.'da gösterilen veri kaydetme ünitesi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Veri kaydetme ünitesi, deneylerin her aşamasında oluşan yük ve yer değiştirme verilerini anlık olarak dijital ortamda toplayarak, verilerin daha sonraki analizler için uygun bir şekilde saklanmasını sağlamaktadır. Bu sistem, deneysel verilerin doğruluğunu artırmak ve verilerin kaybolmamasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, bilgisayar ortamına aktarılan bu veriler, deney sonuçlarının analizi ve yorumlanmasında kullanılmak üzere detaylı bir şekilde işlenmektedir.



Şekil 3.16. Veri kaydetme ünitesi ve bilgisayar

Şekil 3.17., tipik bir yük döngüsü-deformasyon davranışına dayanarak farklı deformasyon türlerinin hesaplanışını görsel olarak temsil etmektedir. Bu şekil, farklı yük döngülerine verilen tepkiler sonucunda meydana gelen toplam, kalıcı ve elastik deformasyon gibi çeşitli deformasyon türlerini ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır.



Şekil 3.17. Deformasyon türlerinin hesaplanması [12,66,67]

Deneyde, yükün yükleme plakasına temas ettiği ilk anda, en yüksek deformasyon değeri ölçülmüş ve bu değer toplam deformasyon olarak kaydedilmiştir. Yükün plaka üzerinden kaldırılmasının ardından taban zemini, belirli bir oranda deformasyon geri çekilmesi sergilemiştir. Bu geri çekilme, elastik deformasyonu ifade etmektedir. Bununla birlikte, taban zemini, başlangıçtaki şeklini tamamen geri kazanamamış ve bu da geri döndürülemez bir deformasyon olarak adlandırılan kalıcı deformasyonun oluşmasına yol açmıştır.

Toplam, kalıcı ve elastik deformasyon değerlerinin belirlenmesi sonrasında, bu veriler temel alınarak çeşitli mühendislik parametreleri hesaplanmıştır. Bunlar arasında, taban zemini davranışının elastik özelliklerini yansıtan elastik deformasyon yüzdesi, taban zemininin tekrarlı yükleme altındaki rijitliğini değerlendiren esneklik modülü (M_R), taban zemininin geosentetik donatıyla güçlendirilmesi sonrasında kalıcı deformasyonlardaki azalmayı gösteren tekerlek izi azalma oranı (RDR) ve taban zemininin geosentetik donatıyla güçlendirilmesi sonrasında servis ömrünü değerlendirmek için kullanılan trafik fayda oranı (TBR) yer almaktadır. Bu

parametreler, farklı donatı senaryolarında taban zeminini davranışının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır.

3.5 Deneysel Program

Bu çalışmada, işlem görmemiş geotekstil ile çimento ile kaplanmış geotekstilin karayolu taban zeminini güçlendirmedeki performansları, statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında, 7 statik yükleme ve 7 tekrarlı yükleme deneyinden oluşan toplam 14 büyük ölçekli laboratuvar deney yapılmıştır. Deneysel programın detayları Çizelge 3.3.'te sunulmaktadır.

Deneysel program, önce statik yükleme deneyleri ile başlanmıştır. İlk olarak, herhangi bir güçlendirme yapılmamış, yani donatısız zemin kullanılarak 1 numaralı deney (S-UR) gerçekleştirilmiştir. Bu deney, güçlendirme uygulamalarının etkilerini gözlemlemek amacıyla referans deney olarak yapılmıştır. Ardından, işlem görmemiş geotekstil kullanılarak yapılan ikinci deneyde (S-G-5), geotekstil taban zeminine 50 mm derinlikte yerleştirilmiştir. Bu deneyin amacı, işlem görmemiş geotekstilin zemin güçlendirme üzerindeki etkisini incelemektir. Üçüncü deneyde ise (S-G-10), işlem görmemiş geotekstil, taban zeminine 100 mm derinlikte yerleştirilmiştir. Bu konfigürasyon, donatı derinliğinin zemin güçlendirmedeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü deneyde ise (S-G-5-10), işlem görmemiş geotekstil, taban zeminine hem 50 mm hem de 100 mm derinlikte yerleştirilerek iki farklı derinlikteki geotekstil donatısının aynı anda kullanılması sağlanmıştır. Buradaki amaç, iki farklı derinlikte yerleştirilen geotekstil elemanlarının birlikte kullanımının güçlendirme üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Beşinci deneyde (S-CCG-5), çimento ile işlem görmüş geotekstil, taban zeminine 50 mm derinlikte yerleştirilmiştir. Bu deney, çimento ile güçlendirilmiş geotekstilin zemin üzerindeki performansını incelemeyi amaçlamaktadır. Altıncı deneyde ise (S-CCG-10), çimento ile işlem görmüş geotekstil, taban zeminine 100 mm derinlikte yerleştirilmiştir. Bu deneyde, çimento ile güçlendirilmiş geotekstilin derinlik etkisi değerlendirilmiştir.

Yedinci deneyde ise (S-CCG-5-10), çimento ile işlem görmüş geotekstil, taban zeminine hem 50 mm hem de 100 mm derinlikte yerleştirilmiştir. Bu durumda, her iki

derinlikte çimento kaplanmış geotekstil donatısının aynı anda kullanılması sağlanmış ve bu durumun güçlendirme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu deneylerde, özellikle 2, 3, 5 ve 6 numaralı deneylerde, iki farklı donatı derinliği kullanılmıştır. Buradaki amaç, donatı derinliğinin zemin güçlendirmedeki etkilerini değerlendirmektir. 4 ve 7 numaralı deneylerde ise iki farklı donatı derinliğinde iki güçlendirme elemanının aynı anda kullanılması sağlanmıştır. Bu deneyler, donatı sayısının, yani güçlendirme elemanı sayısının zemin güçlendirmedeki etkilerini incelemeye yönelik yapılmıştır.

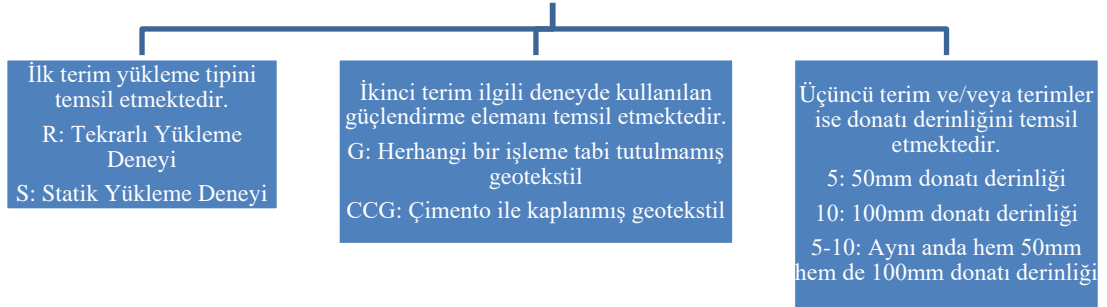
Statik yükleme deneylerinde yapılan bu 7 konfigürasyon, aynı şekilde tekrarlı yükleme deneylerinde de uygulanmıştır. Tekrarlı yükleme deneyleri, zemin malzemesinin dinamik yükler altındaki performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneylerin kısaltılmış isimlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için, deney konfigürasyonlarına ait görsel açıklamalar Şekil 3.18.'de sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Statik yükleme ve Tekrarlı yükleme deney programı

Deney No	Deney Türü	Deney Açıklaması	Donatı Türü	Gömülme Derinliği (u) (mm)	
1		S-UR*	-	-	
2		S-G-5		50	
3	Statik Yükleme Deneyi (S)	S-G-10	Geotekstil (G)	100	
4		S-G-5-10		50 ve 100	
5		S-CCG-5	Çimento ile	50	
6		S-CCG-10	Kaplanmış Geotekstil	100	
7		S-CCG-5-10	(CCG)	50 ve 100	
8			R-UR*	-	-
9			R-G-5		50
10	Tekrarlı Yükleme Deneyi (R)	R-G-10	G	100	
11		R-G-5-10		50 ve 100	
12		R-CCG-5		50	
13		R-CCG-10	CCG	100	
14		R-CCG-5-10		50 ve 100	

*UR: Donatısız durumu temsil etmektedir.

S-CCG-5-10



Şekil 3.18. Deney isimlerinin kısaltmalarının açıklaması

Deneilerde kullanılan donatı konfigürasyonlarının şematik gösterimi Şekil 3.19.'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu şema, farklı donatı düzenlerinin yerleşimlerini, donatıların miktarını, derinliklerini ve aralarındaki mesafeyi görselleştirerek deneysel çalışmada kullanılan yöntemlerin ve parametrelerin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.19. Deneylerin şematik çizimi

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Statik Yükleme Deney Sonuçları

Bu bölümde, çalışma kapsamında kum taban zemininin statik yükler altındaki davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen statik yükleme deneyleri detaylandırılmıştır. Deneyler sırasında, yükleme plakasına uygulanan kPa cinsinden düşey gerilme (q) değerine bağlı olarak zeminde meydana gelen deformasyonlar ölçülmüş ve bu deformasyonlar, yükleme plakası çapına (D) oranlanarak boyutsuzlaştırılmıştır. Bu boyutsuz oran, yüzde cinsinden ifade edilerek deformasyon oranı (d/D) olarak tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, yatay eksende düşey gerilme ve düşey eksende hem deformasyon hem de deformasyon oranını gösterecek şekilde grafiklerle sunulmuştur.

Killi ve siltli ince daneli zeminler üzerinde gerçekleştirilen statik yükleme deneylerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri, çoğu zaman zeminin tam göçme yüküne ulaştığı durumu açıkça gösterememektedir. Bu durum, zeminin nihai taşıma kapasitesinin (q_u) belirlenmesini güçleştirmektedir. Ancak, bu tür zeminlerde taşıma kapasitesini tahmin etmek amacıyla literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir [69–71]. Bu çalışmada, bu yöntemlerden dört tanesi incelenmiştir ve bunlar şu şekilde açıklanabilir:

- *0.1B* Yöntemi: Temelin genişliğinin (B) %10'una karşılık gelen deformasyon miktarına denk gelen yük, nihai taşıma kapasitesi olarak kabul edilmektedir.
- Teğet Kesiştirme Yöntemi: Yük-deformasyon eğrisinde, deformasyon miktarında ani bir artışın gözlemlendiği noktadaki yük değeri nihai taşıma kapasitesini belirler [72].
- Log-Log Yöntemi: Yük ve deformasyon verileri logaritmik ölçeklerde değerlendirilerek kesişim noktası analiz edilir ve bu noktadaki yük değeri nihai taşıma kapasitesi olarak belirlenir [73].
- Hiperbolik Yöntem: Yük-deformasyon eğrileri hiperbolik bir modelle temsil edilir ve modelin ulaşabileceği asimptot değer, nihai taşıma kapasitesini ifade eder.

Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilen yük-deformasyon eğrileri, her durumda belirgin bir göçme yükünü ortaya koyamamıştır. Bu tür belirsiz durumlarda, diğer yöntemlere kıyasla hesaplama açısından daha pratik ve nesnel sonuçlar sunduğu için *0.1B* yöntemi tercih edilmiştir (Örnek, 2009). Çalışmada kullanılan dairesel temellere uygun olarak, bu yöntem *0.1D* olarak yeniden tanımlanmıştır. Bu kapsamda, plaka çapına göre deformasyon oranı $d/D=10\%$ (*0.10D*) olduğunda taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır.

Ayrıca, deney verilerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi amacıyla, deformasyon oranları $d/D=5\%$ (*0.05D*) ve $d/D=15\%$ (*0.15D*) için de taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Bu ek analizler, farklı deformasyon seviyelerinde taban zemininin taşıma kapasitesini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirme imkanı sunmuştur.

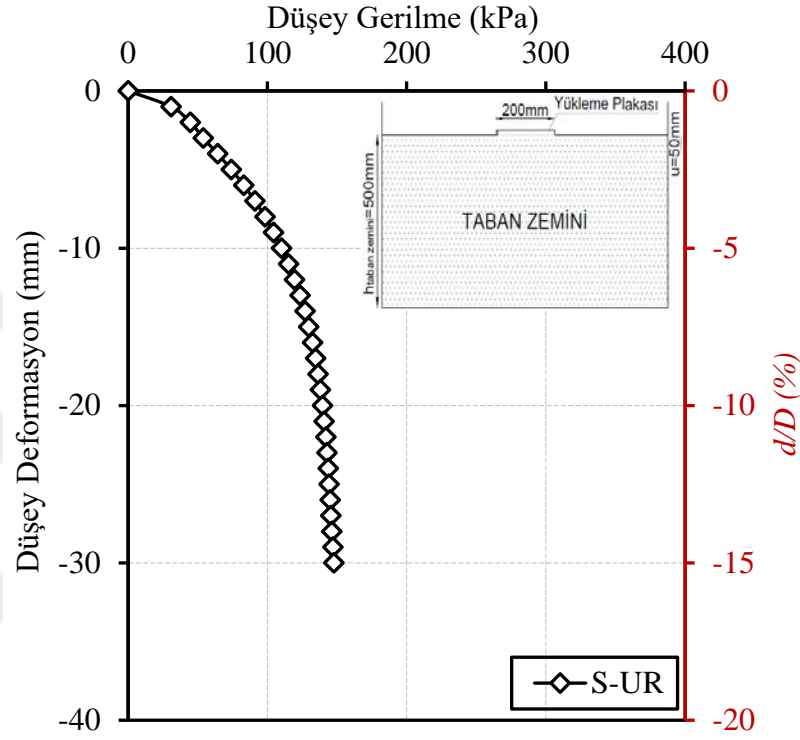
4.1.1 1 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-UR)

Referans statik yükleme deneyi olarak gerçekleştirilen S-UR'den elde edilen gerilme (q)-deformasyon veya deformasyon oranı (d/D) eğrisi Şekil 4.1.'te sunulmuştur. Ayrıca yükleme plakası çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen deformasyon değerleri dikkate alındığında elde edilen taban zemini taşıma gücü değerleri Çizelge 4.1.'de sunulmuştur.

R-UR taban zemini üzerinde gerçekleştirilen statik yükleme deneyi sonucunda yükleme plakası çapının %5'i kadar deformasyon dikkate alındığında taşıma gücü değeri 110 kPa olarak kaydedilmiştir. R-UR taban zemini üzerinde gerçekleştirilen statik yükleme deneyi sonucunda yükleme plakası çapının %10'u kadar deformasyon dikkate alındığında taşıma gücü değeri 140 kPa olarak kaydedilmiştir. R-UR taban zemini üzerinde gerçekleştirilen statik yükleme deneyi sonucunda yükleme plakası çapının %15'i kadar deformasyon dikkate alındığında taşıma gücü değeri 148 kPa olarak kaydedilmiştir.

Referans statik yükleme deneyi (S-UR) kapsamında gerçekleştirilen analizlerde, taban zemininin gerilmesi (q) ile deformasyon ve deformasyon oranı (d/D) arasındaki ilişki incelenmiş ve elde edilen eğri Şekil 4.1.'te sunulmuştur. Bu eğri, taban zemininin statik yükleme altında gösterdiği davranışı ve taşıma kapasitesine ulaşma eğilimlerini

detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, yükleme plakası çapının belirli yüzdelere karşılık gelen deformasyon değerleri temel alınarak, taban zeminin taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda, yükleme plakasının %5, %10 ve %15'i kadar deformasyon değerlerine karşılık gelen taşıma gücü verileri Çizelge 4.1.'de özetlenmiştir.



Şekil 4.1. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-UR)

Çizelge 4.1. S-UR deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri

Deney No	Deney Açıklaması	q_u (kPa)	d/D (%)
1	S-UR	110	5
		140	10
		148	15

R-UR taban zeminini üzerinde yapılan statik yükleme deneyi sonuçlarına bakıldığında, farklı deformasyon seviyelerinde elde edilen taşıma gücü değerleri dikkate değer bilgiler sunmaktadır. Yükleme plakası çapının %5'i oranında bir deformasyon meydana geldiğinde, zeminin taşıma gücünün 110 kPa olarak kaydedildiği gözlemlenmiştir. Deformasyonun yükleme plakası çapının %10'u seviyesine ulaşması durumunda ise taşıma gücü 140 kPa olarak belirlenmiştir. Daha yüksek bir deformasyon seviyesi olan %15'lik bir oran dikkate alındığında, zeminin taşıma gücünün 148 kPa olduğu tespit edilmiştir.

Deney kapsamında, yükleme plakası çapının belirli oranlarına karşılık gelen deformasyon seviyeleri esas alınmış ve buna uygun taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Bu oranlar, yükleme plakası çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen deformasyon değerlerini içermektedir. Belirlenen deformasyon seviyelerinde taşıma gücü değerleri, taban zemini üzerindeki yük dağılımı ve dayanım kapasitesi hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2.'de sunulmuş olup, zemin özelliklerinin karşılaştırmalı bir analizi için önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

Çizelge 4.2. S-G-5 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri

Deney No	Deney Açıklaması	q_u (kPa)	d/D (%)
2	S-G-5	238	5
		384	10
		461	15

S-G-5 taban zemini üzerinde gerçekleştirilen statik yükleme deneyinin sonuçları detaylı olarak incelendiğinde, yükleme plakası çapının %5'i kadar deformasyon dikkate alındığında taban zemininin taşıma gücünün 238 kPa olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, taban zemininin düşük seviyeli deformasyonlarda dahi oldukça yüksek bir dayanım sergilediğini göstermektedir. Deformasyon oranının yükleme plakası çapının %10'una yükselmesi durumunda taşıma gücü 384 kPa olarak kaydedilmiştir. Bu artış, deformasyonun ilerlemesiyle taban zemininin taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Son olarak, yükleme plakası çapının %15'i kadar deformasyon meydana geldiğinde taban zemininin taşıma gücü 461 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, taban zemini davranışının maksimum kapasiteye yakın bir seviyeye ulaştığını ifade etmektedir.

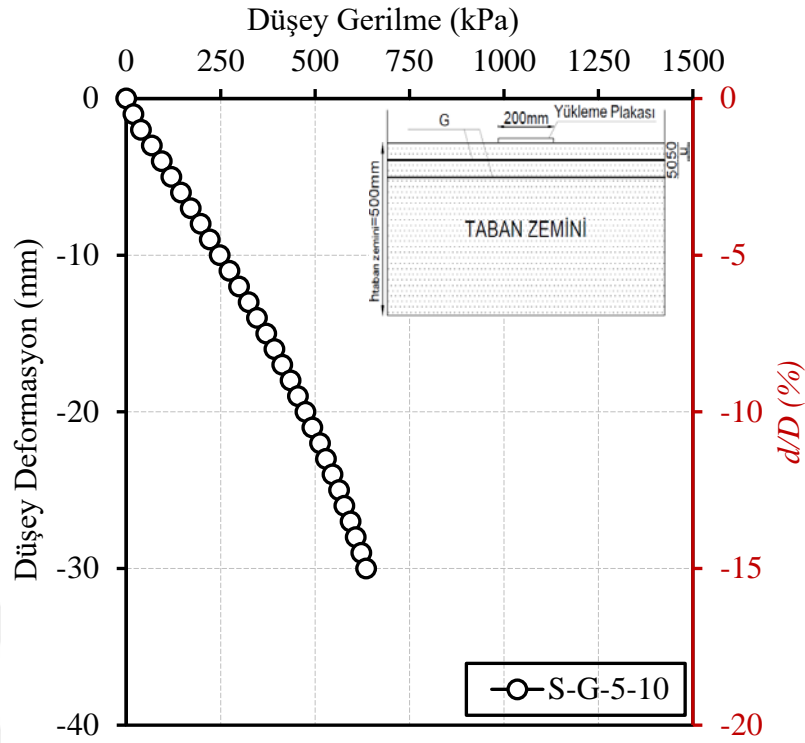
Bu sonuçlar, S-G-5 taban zemininin taşıma kapasitesini farklı deformasyon oranları üzerinden inceleme imkanı sağlamaktadır. Zeminin taşıma gücündeki artış, deformasyon oranlarının büyümesiyle doğru orantılı olarak gözlemlenmiştir. Bu durum, taban zemininin yük taşıma kapasitesinin deformasyon seviyelerine bağlı olarak değiştiğini ve farklı mühendislik uygulamaları için önemli bilgiler sunduğunu göstermektedir. Deneyden elde edilen veriler, zeminin yük altında sergilediği dayanımın kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır ve bu tür analizlerin ulaştırma ve geoteknik mühendisliği çalışmalarında kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

sergilediği dayanımı ortaya koymaktadır. Yükleme plakası çapının %10'u kadar bir deformasyon meydana geldiğinde ise taşıma gücü 312 kPa olarak kaydedilmiştir. Bu artış, deformasyon oranının büyümesiyle taban zemininin yük taşıma kapasitesinde önemli bir yükseliş olduğunu göstermektedir. Daha yüksek bir deformasyon oranı olan %15 dikkate alındığında, taşıma gücü 379 kPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, taban zemininin maksimum taşıma kapasitesine yaklaştığını ifade etmektedir.

Elde edilen bu sonuçlar, S-G-10 taban zemininin yük taşıma performansı açısından kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Deformasyon oranının artışıyla birlikte taşıma gücünde gözlemlenen değişim, taban zemininin mekanik dayanımı hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Deneyden elde edilen veriler, taban zemininin farklı deformasyon seviyelerinde sergilediği davranışların karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, ulaştırma ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında güvenli tasarımlar yapmak ve zemin özelliklerini optimize etmek için kritik bir temel oluşturmaktadır.

4.1.4 4 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-G-5-10)

Bu çalışmada dördüncü statik yükleme deneyi olarak gerçekleştirilen S-G-5-10 testi kapsamında, taban zeminin statik yükleme altındaki performansı ve taşıma kapasitesi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen gerilme (q) ile deformasyon ve deformasyon oranı (d/D) arasındaki ilişkiyi gösteren eğri Şekil 4.4.'te sunulmuştur. Bu grafik, taban zemini üzerinde uygulanan yükleme ile oluşan deformasyon arasındaki bağıntıyı görselleştirerek taban zemininin mekanik davranışını ortaya koymaktadır. Ayrıca, farklı deformasyon seviyelerinde hesaplanan taşıma gücü değerleri Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Bu değerler, zeminin dayanım kapasitesini farklı deformasyon oranlarında incelemek için kritik bir veri sağlamaktadır.



Şekil 4.4. Düsey gerilme – düsey deformasyon ilişkisi (S-G-5-10)

Çizelge 4.4. S-G-5-10 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri

Deney No	Deney Açıklaması	q_u (kPa)	d/D (%)
4	S-G-5-10	247	5
		474	10
		635	15

Deney sırasında, yükleme plakası çapının %5, %10 ve %15'i oranında deformasyon seviyeleri dikkate alınmıştır. Yükleme plakası çapının %5'ine karşılık gelen deformasyonda, zeminin taşıma gücü değeri 247 kPa olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, taban zemininin düşük deformasyon seviyelerinde sergilediği dayanımı ve yük taşıma kapasitesini göstermektedir. Deformasyon oranının yükleme plakası çapının %10'una ulaşması durumunda, taşıma gücü 474 kPa olarak ölçülmüştür. Bu artış, taban zemininin deformasyon arttıkça yük taşıma kapasitesinde önemli bir yükseliş gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yükleme plakası çapının %15'i oranındaki deformasyon dikkate alındığında ise taşıma gücü değeri 635 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, taban zemininin maksimum dayanım seviyesine ulaştığına işaret etmektedir.

Bu sonuçlar, S-G-5-10 taban zemininin farklı deformasyon seviyelerinde gösterdiği taşıma kapasitesi performansını detaylı bir şekilde değerlendirme imkanı sunmaktadır. Elde edilen taşıma gücü değerleri, taban zeminin deformasyona bağlı olarak sergilediği dayanım değişimlerini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, S-G-5-10 taban zemini, farklı deformasyon oranlarında gösterdiği performans ile ulaştırma ve geoteknik mühendisliği tasarımları için önemli veriler sunmaktadır. Bu veriler, taban zeminin davranışının daha iyi anlaşılmasına ve bu tür zeminler üzerinde uygulanacak mühendislik çözümlerinin güvenilir şekilde planlanmasına olanak sağlamaktadır.

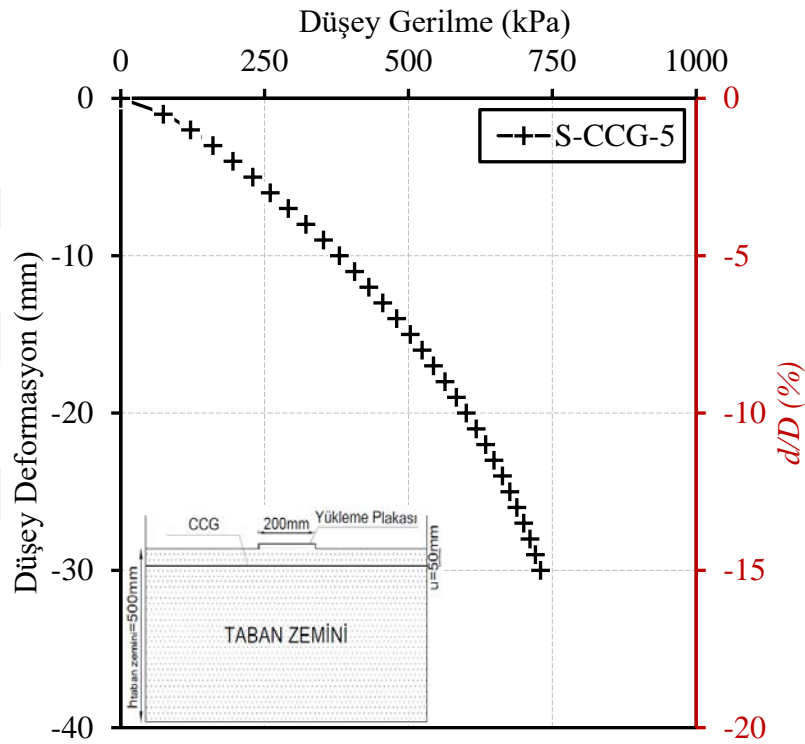
4.1.5 5 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-CCG-5)

Bu çalışmada, beşinci statik yükleme deneyi olarak gerçekleştirilen S-CCG-5 testi kapsamında, taban zemininin yükleme altındaki davranışı ve taşıma kapasitesi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ile deformasyon ve deformasyon oranı (d/D) arasındaki ilişkiyi gösteren eğri, Şekil 4.5.'te sunulmuştur. Bu grafik, taban zemininin uygulanan yüke karşı verdiği tepkiyi görselleştirmek ve zemin davranışını analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. Farklı deformasyon seviyelerinde hesaplanan taşıma gücü değerleri ise Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Bu değerler, taban zemininin mekanik performansını farklı deformasyon oranları üzerinden anlamak için önemli bir veri seti sunmaktadır.

Deneyde, yükleme plakası çapının %5, %10 ve %15'i oranında deformasyon seviyeleri dikkate alınmıştır. Yükleme plakası çapının %5'ine karşılık gelen deformasyonda, taban zemininin taşıma gücü 380 kPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, taban zemininin düşük seviyelerdeki deformasyonlara karşı sergilediği dayanımı göstermektedir. Deformasyon oranı yükleme plakası çapının %10'una ulaştığında, taşıma gücü 600 kPa olarak belirlenmiştir. Bu artış, taban zemininin deformasyonun ilerlemesiyle birlikte daha yüksek bir taşıma kapasitesine ulaştığını ortaya koymaktadır. Yükleme plakası çapının %15'lik deformasyon oranında ise taşıma gücü 729 kPa olarak kaydedilmiştir. Bu değer, taban zemininin maksimum taşıma kapasitesine oldukça yaklaştığını ifade etmektedir.

Bu deney sonuçları, S-CCG-5 taban zemininin taşıma kapasitesinin deformasyon oranlarına bağlı olarak nasıl değiştiğini detaylı bir şekilde göstermektedir. Taşıma gücündeki artış, deformasyon seviyelerinin yükselmesiyle doğru orantılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum, taban zemininin yük taşıma kapasitesinin deformasyon oranına duyarlı olduğunu ve farklı mühendislik uygulamaları için bu tür analizlerin kritik olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, S-CCG-5 taban zeminini, düşük deformasyon seviyelerinde sergilediği dayanımdan, yüksek deformasyon oranlarında ulaştığı maksimum taşıma kapasitesine kadar kapsamlı bir analiz imkanı sunmaktadır. Elde edilen veriler, ulaştırma ve geoteknik mühendisliği projelerinde daha güvenilir ve etkin tasarımlar yapmak için önemli bir temel sağlamaktadır. Bu sonuçlar, taban zeminini performansının farklı deformasyon oranları üzerinden değerlendirilmesinin zemin davranışını anlamada ne kadar önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-CCG-5)

Çizelge 4.5. S-CCG-5 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri

Deney No	Deney Açıklaması	q_u (kPa)	d/D (%)
5	S-CCG-5	380	5
		600	10
		729	15

4.1.6 6 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-CCG-10)

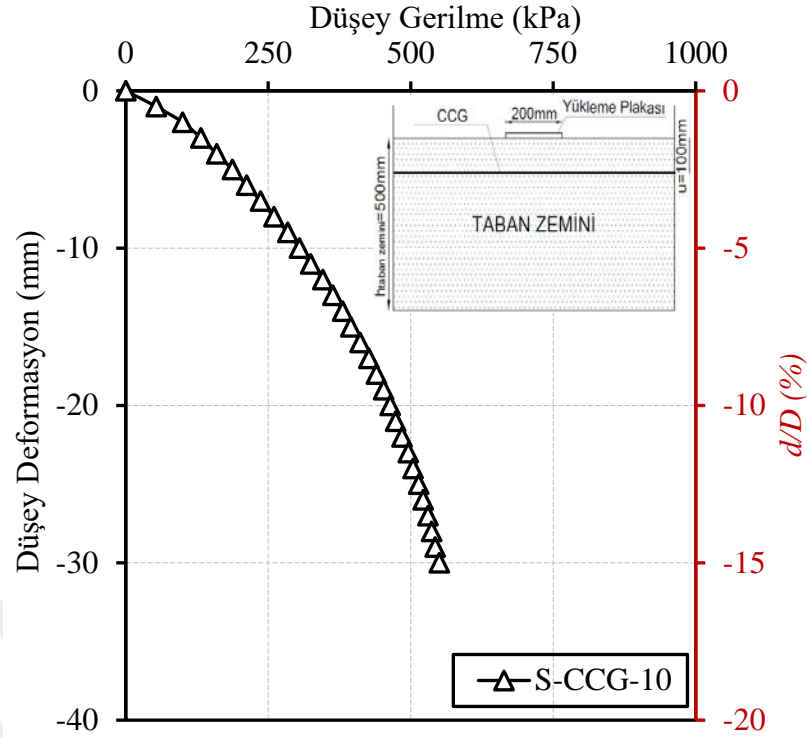
Bu çalışmada altıncı statik yükleme deneyi olarak gerçekleştirilen S-CCG-10 deneyi, taban zeminin mekanik performansını ve statik yükleme altındaki davranışını incelemek amacıyla yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ile deformasyon ve deformasyon oranı (d/D) arasındaki ilişkiyi gösteren eğri, Şekil 4.6.'da sunulmuştur. Bu eğri, taban zemininin uygulanan yüke karşı gösterdiği tepkiyi ve deformasyonla birlikte sergilediği davranışı net bir şekilde gözler önüne

sermektedir. Ayrıca, farklı deformasyon seviyeleri için belirlenen taşıma gücü değerleri Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Bu değerler, taban zemininin dayanım kapasitesini çeşitli deformasyon oranlarına göre detaylı bir şekilde anlamamıza olanak tanımaktadır.

Deney kapsamında, yükleme plakası çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen deformasyon oranları dikkate alınmıştır. Yükleme plakası çapının %5'ine karşılık gelen deformasyon seviyesinde, taban zemininin taşıma gücü değeri 305 kPa olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, taban zemininin düşük deformasyon seviyelerinde taşıma kapasitesinin sınırlarını göstermektedir. Deformasyon oranı %10 seviyesine ulaştığında, taşıma gücü değeri 464 kPa olarak ölçülmüştür. Bu artış, taban zemininin yük taşıma kapasitesinin deformasyonun ilerlemesiyle belirgin bir şekilde yükseldiğini göstermektedir. Yükleme plakası çapının %15'lik deformasyon oranına ulaşıldığında ise taşıma gücü 550 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, taban zemininin maksimum taşıma kapasitesine yaklaştığını ifade etmektedir.

Deney sonuçları, S-CCG-10 taban zemininin farklı deformasyon seviyelerinde sergilediği mekanik performans hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Taşıma gücündeki artış, deformasyon seviyelerinin yükselmesiyle doğrudan ilişkilidir ve taban zemininin mekanik dayanımının deformasyon oranına duyarlı olduğunu göstermektedir. Bu tür analizler, zemin davranışının detaylı bir şekilde anlaşılması ve mühendislik tasarımlarının daha güvenilir bir şekilde yapılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, S-CCG-10 taban zemini üzerinde gerçekleştirilen bu çalışma, düşük deformasyon seviyelerinden yüksek deformasyon oranlarına kadar uzanan bir yelpazede taban zemininin mekanik dayanımını incelemektedir. Elde edilen veriler, ulaştırma ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında daha sağlam ve güvenilir tasarımlar yapılabilmesi için değerli bir temel sağlamaktadır. Bu deney, taban zemini performansının statik yükleme altındaki değişimini ve deformasyon oranlarının zemin taşıma kapasitesine etkisini ayrıntılı bir şekilde ortaya koyarak, mühendislik projelerinde uygulanabilir ve pratik bilgiler sunmaktadır.



Şekil 4.6. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-CCG-10)

Çizelge 4.6. S-CCG-10 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri

Deney No	Deney Açıklaması	q_u (kPa)	d/D (%)
6	S-CCG-10	305	5
		464	10
		550	15

4.1.7 7 Numaralı Deneyin Sonuçları (S-CCG-5-10)

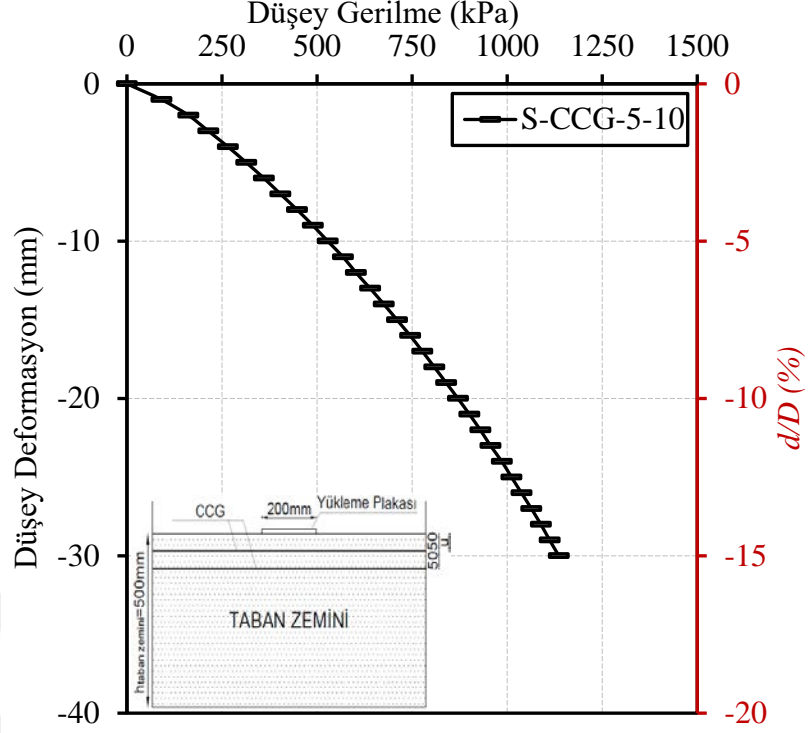
Bu çalışmada, yedinci statik yükleme deneyi olarak gerçekleştirilen S-CCG-5-10, taban zemininin yük taşıma kapasitesini ve statik yükleme altındaki mekanik davranışını değerlendirmek için yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen gerilme (q) ile deformasyon ve deformasyon oranı (d/D) arasındaki ilişki, Şekil 4.7.'de grafiksel olarak sunulmuştur. Bu grafik, taban zeminin uygulanan yüke karşı nasıl tepki verdiğini ve deformasyonla birlikte gösterdiği davranış değişimlerini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, yükleme plakası çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen deformasyon oranları dikkate alınarak hesaplanan taşıma gücü değerleri Çizelge 4.7.'de yer almaktadır. Bu veriler, taban zemininin yükleme altında sergilediği performansın detaylı bir analizine olanak tanımaktadır.

Deneyde, yükleme plakası çapının %5'lik deformasyon oranına karşılık gelen taşıma gücü değeri 528 kPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, taban zemininin düşük

seviyelerdeki deformasyon altında sahip olduğu dayanım kapasitesini göstermektedir. Deformasyon oranı %10'a yükseldiğinde taşıma gücü, belirgin bir artışla 871 kPa değerine ulaşmıştır. Bu durum, deformasyon arttıkça taban zemininin yük taşıma kapasitesinin de kayda değer bir şekilde arttığını ifade etmektedir. Deformasyon oranı %15 seviyesine ulaştığında ise taşıma gücü değeri 1136 kPa olarak ölçülmüştür. Bu, taban zemininin yük taşıma kapasitesinin zirveye yaklaştığı bir noktayı işaret etmektedir.

Elde edilen bu sonuçlar, S-CCG-5-10 taban zemininin statik yükleme sırasında farklı deformasyon seviyelerinde sergilediği taşıma kapasitesini anlamak için önemli ipuçları sunmaktadır. Taban zemininin taşıma gücünün, deformasyon oranıyla paralel bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, taban zemininin yük taşıma performansını değerlendirirken deformasyon seviyelerinin dikkate alınmasının ne denli kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak, S-CCG-5-10 deneyi, taban zeminin statik yükleme altındaki davranışını ve mekanik dayanımını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Sonuçlar, ulaştırma ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında sağlam ve güvenilir tasarımlar için gerekli olan temel verileri sağlamış, deformasyon oranının taşıma kapasitesine olan etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur.



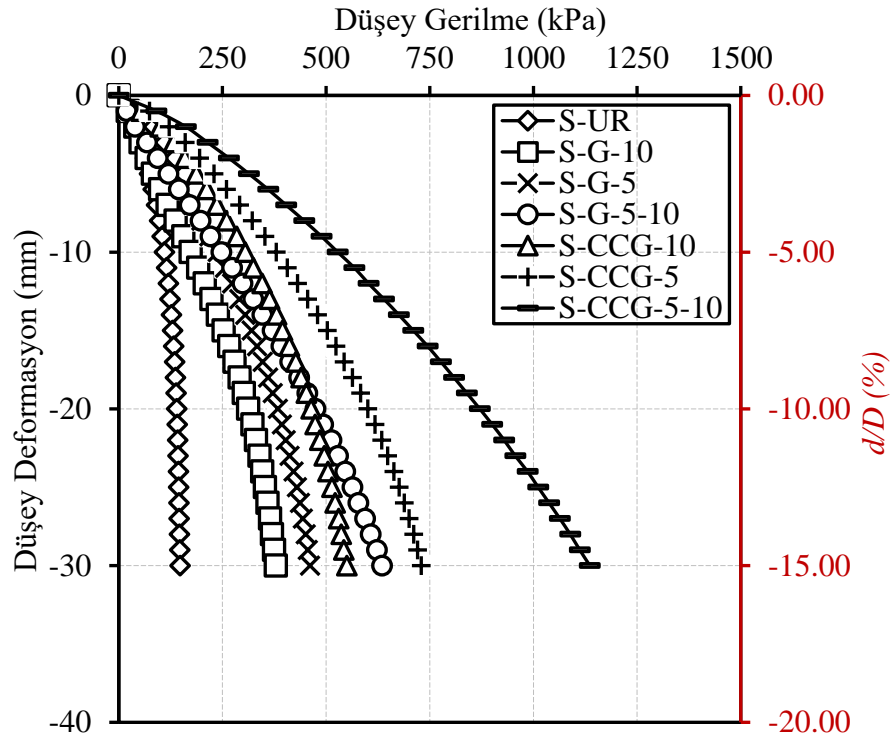
Şekil 4.7. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi (S-CCG-5-10)

Çizelge 4.7. S-CCG-5-10 deneyinde farklı deformasyon oranlarına denk gelen q_u değerleri

Deneş No	Deneş Açıklaması	q_u (kPa)	d/D (%)
7	S-CCG-5-10	528	5
		871	10
		1136	15

4.1.8 Tüm Deneşlerin Karşılaştırılması

Şekil 4.8., statik yükleme koşulları altında kum taban zemininin gerilme-deformasyon davranışını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu şekil, taban zeminine eklenen donatı türlerinin (G ve CCG) ve bu donatıların konfigürasyonlarının, taban zemininin yük-deformasyon davranışına olan etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Deneş sonuçları, donatı kullanılmasının, taban zemininin yük taşıma performansını anlamlı bir şekilde artırdığını ve deformasyon davranışını olumlu yönde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8. Düşey gerilme – düşey deformasyon ilişkisi

Deney sonuçlarına göre, taban zeminine donatı olarak G ve CCG uygulanması, referans deney ile karşılaştırıldığında kayda değer bir iyileştirme sağlamıştır. Donatı kullanımı, taban zemininin deformasyon altında daha yüksek gerilme değerlerine ulaşmasını ve yük taşıma kapasitesinin artmasını mümkün kılmıştır. Özellikle CCG donatısının, G donatısına kıyasla daha etkin bir iyileştirme sağladığı dikkat çekmektedir. Bu sonuç, CCG donatısının yük aktarımında ve deformasyon kontrolünde daha verimli bir performans sergilediğini göstermektedir.

Genel olarak, donatı kullanımının, özellikle de CCG konfigürasyonunun, kum taban zemininin mekanik özelliklerini geliştirdiği ve yükleme altındaki davranışını optimize ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, donatı seçiminin ve yerleşim biçiminin, zemin iyileştirme çalışmalarında kritik bir rol oynadığını bir kez daha doğrulamaktadır.

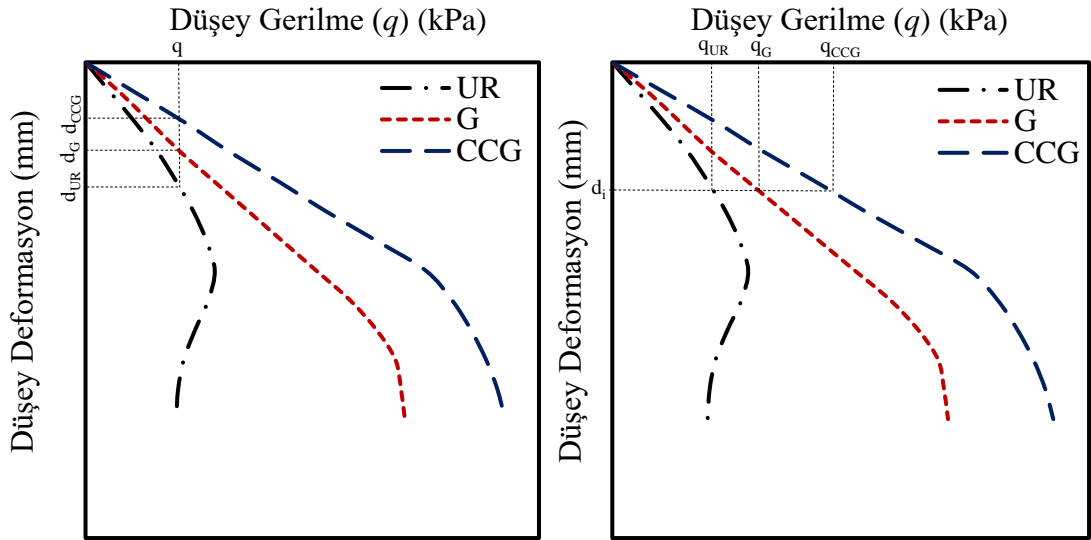
Statik yükleme deneyleri sonucunda farklı deformasyon oranlarına (%5, %10 ve %15) karşılık gelen taşıma kapasitesi (q_u) değerleri analiz edilerek değerlendirilmiştir. Bu değerler, taban zemininin deformasyon davranışını ve yük taşıma kapasitesini farklı deformasyon seviyelerinde karşılaştırmalı olarak inceleme fırsatı sunmaktadır. Deney sonuçlarından elde edilen taşıma kapasitesi değerleri, Çizelge 4.8.'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.8. Statik yükleme deneylerinden farklı d/D (%) oranları için elde edilen q_u (kPa) değerleri

		Deney No						
		1	2	3	4	5	6	7
d/D (%)		S-UR	S-G-5	S-G-10	S-G-5-10	S-CCG-5	S-CCG-10	S-CCG-5-10
q_u (kPa)	5	110	238	174	247	380	305	528
	10	140	384	312	474	600	464	871
	15	148	461	379	635	729	550	1136

Çizelgede yer alan veriler, her bir deformasyon oranı için donatılı ve donatısız taban zeminlerinin taşıma kapasitesindeki değişimleri açıkça göstermektedir. %5, %10 ve %15 deformasyon oranlarına karşılık gelen taşıma kapasiteleri, donatı türlerinin ve konfigürasyonlarının taban zemini performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmaya olanak tanımaktadır. Özellikle, artan deformasyon oranıyla taşıma kapasitesinde meydana gelen artışlar, taban zemini-donatı etkileşiminin yük taşıma mekanizmalarını nasıl geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu analiz, taban zemini iyileştirme çalışmalarında deformasyon seviyelerinin taşıma kapasitesine etkilerini daha iyi anlamak ve uygun donatı seçimini desteklemek açısından önemli bir veri kaynağı sunmaktadır.

Donatılı taban zeminlerinin, donatısız durumlara kıyasla taşıma kapasitesindeki artışı ve deformasyon davranışındaki iyileştirmeleri analiz etmek için Taşıma Kapasitesi İyileştirme Faktörü (I_F) ve Deformasyon Değerinde Yüzdesel Azalma (PRS) temel performans ölçütleri olarak kullanılmaktadır. Bu iki parametre, donatının zemin performansı üzerindeki etkisini matematiksel olarak ifade ederek karşılaştırmalı bir değerlendirme yapma olanağı sunar. I_F ve PRS değerlerinin hesaplanmasında kullanılan parametreler, Şekil 4.9.'da detaylandırılmıştır.



Şekil 4.9. PRS ve I_F değerlerinin hesaplanmasında kullanılan parametrelerin açıklaması [74,75]

I_F ve PRS , zemin iyileştirme çalışmalarında donatının performansını hem taşıma kapasitesi hem de deformasyon kontrolü açısından objektif bir şekilde değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Bu parametreler, zemin davranışının iyileştirilmesi açısından donatı türünün ve yerleşim biçiminin etkinliğini analiz etmek için kapsamlı bir araç sunmaktadır.

4.1.8.1 Taşıma Kapasitesi İyileştirme Faktörü (I_F)

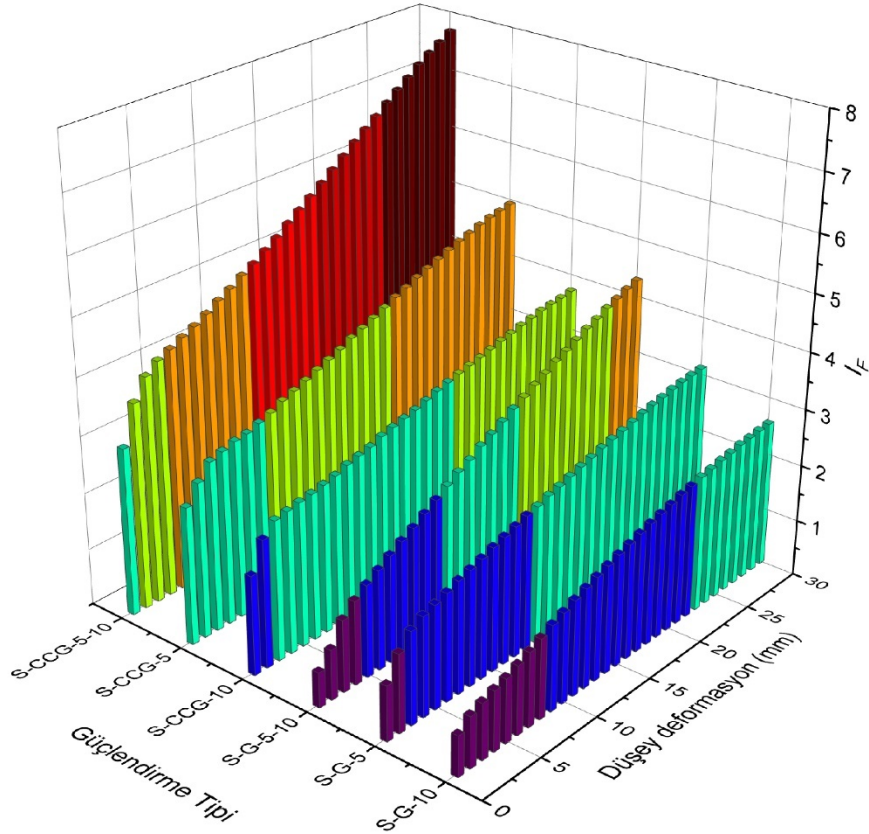
Taşıma kapasitesindeki artışı niceliksel olarak değerlendirmek için kullanılan I_F , boyutsuz bir parametre olarak Denklem (5.1) ile ifade edilmektedir. Bu parametre, belirli bir deformasyon seviyesi (d_i) dikkate alınarak, donatılı bir taban zemininin taşıma kapasitesini ($q_{donatılı}$) aynı deformasyon seviyesindeki donatısız bir taban zeminin taşıma kapasitesi ($q_{donatısız}$) ile karşılaştırır. I_F , aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$I_F = \left(\frac{q_{donatılı}}{q_{donatısız}} \right)_{d=d_i} \quad (5.1)$$

Bu oran, donatının taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini açıkça göstermekte ve donatılı taban zemininin donatısız taban zeminine göre ne kadar üstün olduğunu ortaya koymaktadır.

Donatı türü ve düşey deformasyon değerlerine bağlı olarak I_F değerlerindeki değişimler, Şekil 4.10.'da detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu şekil, farklı donatı türlerinin (G ve CCG) taban zemininin taşıma kapasitesine olan etkilerini ve bu

etkilerin deformasyon seviyelerine göre nasıl değiştiğini açıkça göstermektedir. Veriler, donatı türüne ve konfigürasyonuna bağlı olarak I_F değerlerinde belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymakta, aynı zamanda deformasyon seviyelerinin artışıyla birlikte bu etkilerin daha belirgin hale geldiğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.10. Donatı türü ve düşey deformasyon değerine bağlı olarak I_F değerinin değişimi

Şekil 4.10.'da sunulan veriler, G donatılı ve CCG donatılı taban zeminlerinde I_F değerlerinin deformasyon seviyeleri arttıkça kademeli olarak yükseldiğini göstermektedir. Bu durum, deformasyon ilerledikçe donatıların taban zeminini üzerindeki etkisinin daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır. G donatılı taban zeminlerine ait statik yükleme deneyleri sonuçlarına göre, S-G-5-10 taban zeminini en yüksek I_F değerlerine ulaşmış, bunu sırasıyla S-G-5 ve S-G-10 taban zeminleri takip etmiştir. Örneğin, S-G-10 taban zeminini 4 mm deformasyon seviyesinde 1.05 I_F değerine sahipken, bu değer deformasyon ilerledikçe 30 mm seviyesinde 2.56'ya yükselmiştir. Benzer şekilde, S-G-5 taban zeminini 4 mm deformasyonda 1.74 I_F değerine sahip olmuş, bu değer 30 mm seviyesinde 3.12'ye çıkmıştır. S-G-5-10 taban zeminini ise başlangıçta 4 mm deformasyon değerinde 1.46 I_F değeri gösterirken,

deformasyonun artmasıyla birlikte 30 mm seviyesinde 4.30'a ulaşmıştır. Bu sonuçlar, G donatılı taban zeminlerinde taşıma kapasitesindeki iyileştirmenin, donatının konfigürasyonuna bağlı olarak farklılık gösterdiğini ve çoklu donatı düzenlemesinin en yüksek performansı sağladığını kanıtlamaktadır.

CCG donatılı taban zeminlerinde de benzer bir artış eğilimi gözlemlenmiş olup, bu zeminlerin genel olarak G donatılı zeminlere kıyasla daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir. CCG donatılı zeminlerin I_F eğrileri, G donatılı olanların geliştirilmiş bir versiyonu niteliğindedir. Örneğin, S-CCG-10 taban zemini 4 mm deformasyon seviyesinde 2.48 I_F değeri göstermiş, bu değer 30 mm seviyesinde 3.72'ye ulaşmıştır. S-CCG-5 taban zemini ise başlangıç deformasyonunda (4 mm) 3.03 I_F değeri gösterirken, deformasyon ilerledikçe bu değer 30 mm'de 4.94'e yükselmiştir. En iyi performansı sergileyen S-CCG-5-10 taban zemini, 4 mm deformasyonda 4.13 I_F değeriyle başlamış ve 30 mm seviyesinde 7.69 değerine ulaşarak tüm taban zeminleri arasında en yüksek taşıma kapasitesi iyileştirmesini sağlamıştır. Bu bulgular, CCG donatılı zeminlerin taşıma kapasitesindeki iyileştirme açısından G donatılı zeminlere göre daha üstün bir performans sunduğunu ve donatı konfigürasyonunun etkinliği artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Ayrıca, Şekil 4.10.'da görselleştirilen I_F değerleri, detaylı bir şekilde Çizelge 4.9.'da sunulmuştur. Bu çizelge, farklı donatı türleri ve deformasyon seviyelerine karşılık gelen I_F değerlerini sayısal olarak ifade ederek, şekil üzerindeki trendlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu çizelge, G ve CCG donatılı zeminlerin taşıma kapasitesindeki artışları daha açık bir şekilde karşılaştırma imkanı sunmaktadır.

Çizelge 4.9. Donatı türü ve deformasyon değerine bağlı olarak I_F değerinin değişimi

Düşey Deformasyon (mm)	I_F					
	S-G-10	S-G-5	S-G-5-10	S-CCG-10	S-CCG-5	S-CCG-5-10
4	1.05	1.74	1.46	2.48	3.03	4.13
8	1.40	2.02	2.00	2.65	3.27	4.55
12	1.74	2.29	2.50	2.90	3.61	5.04
16	2.01	2.52	2.96	3.11	3.95	5.62
20	2.24	2.75	3.40	3.32	4.30	6.24
24	2.41	2.93	3.80	3.51	4.61	6.86
28	2.53	3.08	4.15	3.67	4.86	7.44
30	2.56	3.12	4.30	3.72	4.94	7.69

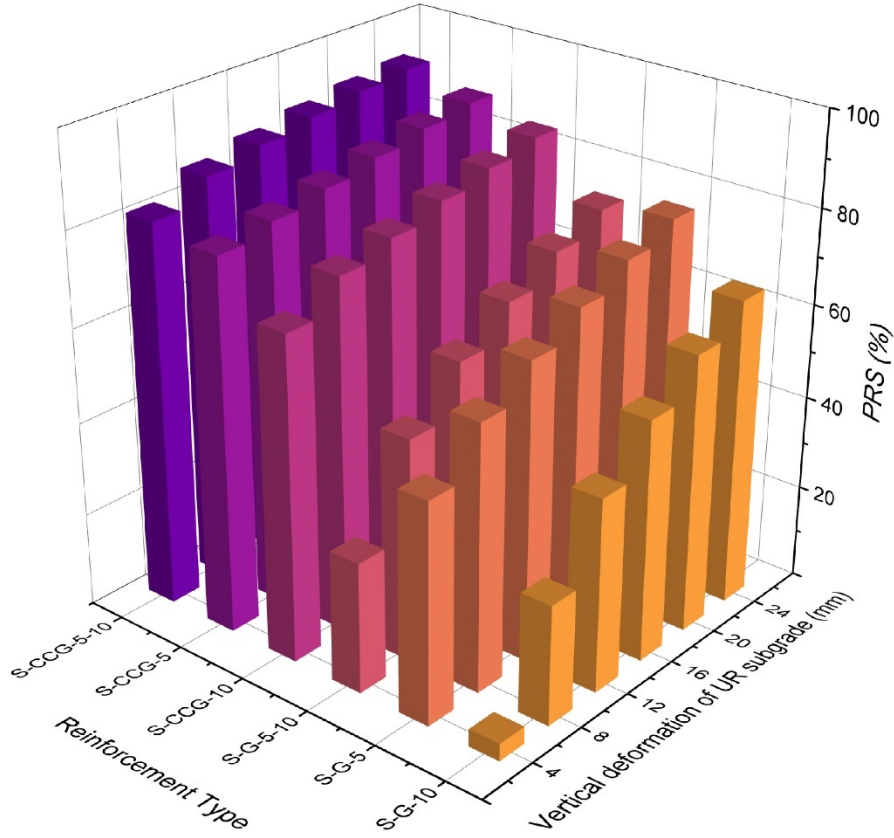
4.1.8.2 Deformasyon Değerinde Yüzdesele Azalma (*PRS*)

Deformasyon davranışındaki iyileştirmeler, *PRS* adı verilen bir diğer boyutsuz parametre ile değerlendirilmektedir. Denklem (5.2) ile ifade edilen *PRS*, eşdeğer bir taşıma kapasitesindeki donatılı ve donatısız taban zeminlerinin deformasyon değerlerini karşılaştırarak deformasyondaki azalmayı yüzdesele olarak belirler. *PRS* şu şekilde hesaplanır:

$$PRS = \left(\frac{d_{donatısız} - d_{donatılı}}{d_{donatısız}} \right)_{q=q_i} \times 100 \quad (5.2)$$

Burada $d_{donatısız}$ taban zemininin deformasyonu, $d_{donatılı}$ ise donatılı taban zemininin aynı taşıma kapasitesindeki deformasyonudur. *PRS*, deformasyonun ne kadar azaldığını yüzdesele olarak ifade ederek donatının deformasyon kontrolündeki etkisini gösterir.

Şekil 4.11.'de sunulan *PRS* değerleri incelendiğinde, deformasyon seviyelerinin artışıyla birlikte tüm taban zeminlerinde *PRS* değerlerinin yükselme eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu durum, kullanılan donatı türleri arasındaki performans farklarını daha belirgin hale getirmiştir. Özellikle, CCG donatısının deformasyon değerlerini azaltmada G donatısına kıyasla önemli bir üstünlük sağladığı anlaşılmaktadır. Bu davranış, CCG donatısının çekme kuvvetlerini karşılama kapasitesini artıran membran etkisi, deformasyon sırasında yatay harekete karşı geliştirdiği sınırlama etkisi ve düşey gerilmeleri daha geniş bir alana yayarak dağıtan gerilme dağıtım etkisi ile açıklanabilir. Bu etkiler, özellikle yol altyapılarında kullanılan donatı malzemelerinin performansını artırmada kritik bir öneme sahiptir. G donatısının ağır yükleme koşullarında hasara daha yatkın olduğu, buna karşın CCG donatısının daha dayanıklı bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Bu nedenle, *PRS* sonuçları CCG'nin yol altyapısı gibi ağır yüke maruz kalan sistemlerde daha etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11. Donatı türü ve S-UR taban zemininin düşey deformasyon değerine bağlı olarak *PRS* değerinin değişimi

CCG donatılı taban zeminlerinde *PRS* değerlerinin deformasyon arttıkça tutarlı bir şekilde yükseldiği görülmüştür. S-CCG-5-10 taban zemininin *PRS* değerleri, 4 mm düşey deformasyon seviyesinde %81.50 olarak başlamış ve 24 mm seviyesine kadar kademeli bir artışla %92.69'a ulaşmıştır. S-CCG-5 taban zemini için 4 mm deformasyonda %79.38 olarak ölçülen *PRS* değeri, 24 mm'ye ulaştığında %89.25'e yükselmiştir. S-CCG-10 taban zemini ise 4 mm deformasyonda %68.93 olan *PRS* değerini, deformasyonun 24 mm'ye ulaşmasıyla %85.92'ye çıkarmıştır. Bu sonuçlar, CCG donatısının deformasyonu önemli ölçüde azalttığını ve bu azalma oranının deformasyon ilerledikçe arttığını göstermektedir.

G donatılı taban zeminlerinde de deformasyon arttıkça *PRS* değerlerinin yükseldiği gözlenmiştir; ancak bu artış, CCG donatılı zeminler kadar belirgin değildir. S-G-5-10 taban zemininin *PRS* değerleri, 4 mm deformasyonda %27.88'den başlayarak 24 mm deformasyonda %75.08'e ulaşmıştır. S-G-5 taban zemini için bu değerler, 4 mm deformasyonda %47.00 ve 24 mm deformasyonda %77.50 olarak kaydedilmiştir. S-G-10 taban zemini ise 4 mm deformasyonda %3.75 olan *PRS* değerini, 24 mm

deformasyona ulaştığında %65.50'ye çıkarmıştır. Bu sonuçlar, G donatısının deformasyon azalma performansının sınırlı olduğunu ve CCG donatısının yanal sınırlama ve membran etkisi gibi avantajlarının daha yüksek performansa katkı sağladığını göstermektedir.

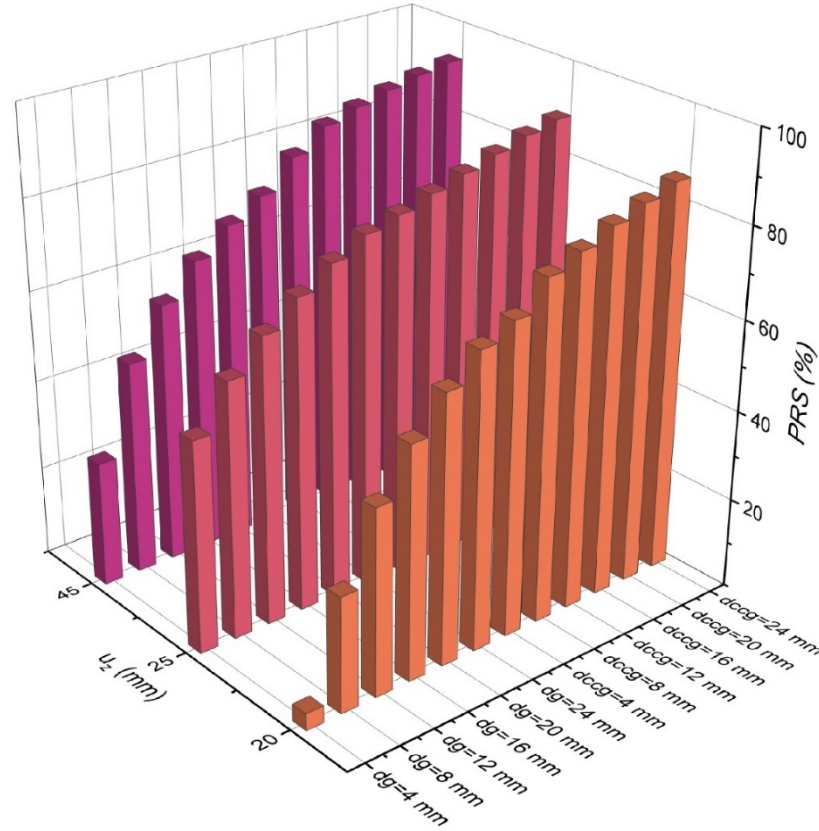
Genel olarak, deformasyon seviyeleri arttıkça *PRS* değerleri tüm donatı türleri için artış göstermiştir. Ancak CCG donatılı taban zeminlerinin, deformasyonu azaltmada sağladığı üstünlük daha belirgin olmuştur. S-CCG-5-10 taban zemini, tüm deformasyon seviyelerinde en yüksek *PRS* değerlerine ulaşarak, CCG donatısının üstün mekanik etkiler sağladığını ve deformasyon azaltma performansında G donatısına göre daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, CCG'nin yapısal dayanıklılığı ve yanal hareketlere karşı geliştirdiği direnç ile açıklanabilir. Özellikle ağır yükleme koşullarında CCG'nin deformasyona karşı gösterdiği direnç, bu tür malzemelerin tercih edilmesinde önemli bir avantaj sunmaktadır [76–79].

Şekil 4.11.'de görselleştirilen *PRS* değerleri, detaylı bir şekilde Çizelge 4.10.'da sunulmuştur. Çizelge 4.10., farklı donatı türleri ve deformasyon seviyelerine karşılık gelen *PRS* değerlerini sayısal olarak ortaya koyarak, şekil üzerinde gözlemlenen eğilimlerin daha net bir şekilde anlaşılmasına olanak tanımaktadır. Bu sayısal veriler, deformasyon seviyeleri ilerledikçe *PRS* değerlerinde meydana gelen artışları daha açık bir şekilde göstermekte ve hem G donatılı hem de CCG donatılı taban zeminlerinin karşılaştırmalı performansını analiz etmeye imkân sağlamaktadır. Çizelge, deformasyon azaltma performansının donatı türüne göre nasıl değiştiğini sayısal olarak ifade ederek, özellikle CCG donatısının üstün performansını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.10. Donatı türü ve deformasyon değerine bağlı olarak *PRS* değerinin değişimi

Düşey Deformasyon (mm)	<i>PRS</i> (%)					
	S-G-10	S-G-5	S-G-5-10	S-CCG-10	S-CCG-5	S-CCG-5-10
4	3.75	47.00	27.88	68.93	79.38	81.50
8	25.63	56.75	47.63	75.38	81.63	86.19
12	41.33	63.63	58.08	78.29	83.71	88.38
16	51.56	69.13	65.31	81.25	85.84	90.22
20	59.45	73.85	70.85	83.70	87.80	91.65
24	65.50	77.50	75.08	85.92	89.25	92.69

PRS değerlerinin donatı etkinlik faktörüne (u_z) göre değişimi Şekil 4.12.'de görselleştirilmiştir. Bu grafik, donatı türlerine göre PRS değerlerinin u_z ile olan ilişkisini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Donatı etkinlik faktörünün temel tanımı ve hesaplama yöntemleri, Bölüm 4.3'te ayrıntılı olarak ele alınmıştır. İlgili detayları ve donatı etkinlik faktörünün PRS üzerindeki etkisini daha kapsamlı bir şekilde anlamak isteyen okuyucular, Bölüm 4.3'e başvurabilir.



Şekil 4.12. PRS değerlerinin donatı etkinlik faktörü ile değişimi

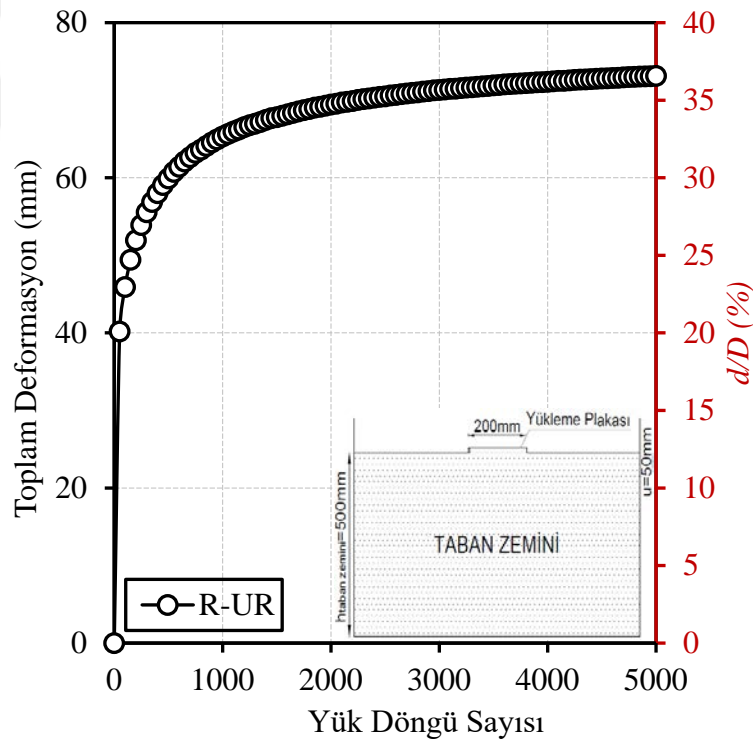
4.2 Tekrarlı Yükleme Deney Sonuçları

4.2.1 8 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-UR)

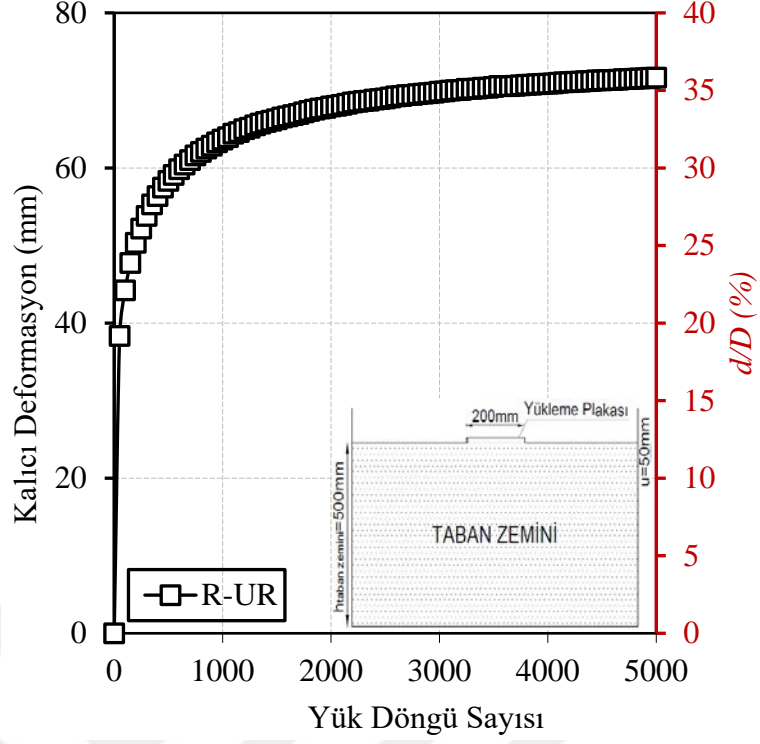
Bu bölümde, deney programında yer alan 8 numaralı deneyden elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Deneyin sonunda elde edilen toplam deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki, ve aynı şekilde kalıcı deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.'de görsel olarak sunulmuştur. Bu grafiklerin incelenmesiyle, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerlerinin, yük döngü sayısındaki artışla paralel bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, belli bir yük

döngü sayısından sonra, her iki deformasyon türündeki artış hızının belirgin bir şekilde azaldığı dikkat çekmiştir. Deneyin sonunda, yani 5000 yük döngüsünde, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerlerinin sırasıyla 73.15 mm ve 71.65 mm olarak ölçüldüğü belirlenmiştir.

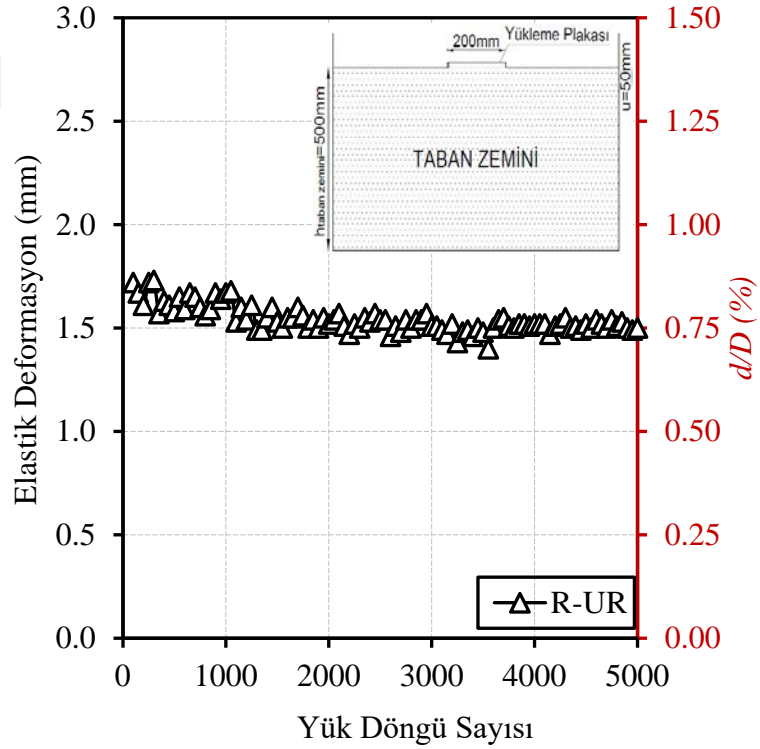
Bunun yanı sıra, elastik deformasyon değerleri de hesaplanmıştır. Elastik deformasyonlar, her bir yük döngüsü için toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki fark alınarak elde edilmiştir. Şekil 4.13.'te, elastik deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik yer almaktadır. Grafik incelendiğinde, elastik deformasyonların yük döngü sayısındaki artışla birlikte azalan bir trend gösterdiği gözlemlenmiştir. Elastik deformasyonlardaki bu azalma, 5000 yük döngüsü sonunda 1.5 mm'ye ulaşarak sonlanmıştır. Bu durum, taban zemininin elastik deformasyon kapasitesinin yük döngüleri arttıkça giderek azaldığını ve nihayetinde stabilize olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.13. 8 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.14. 8 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

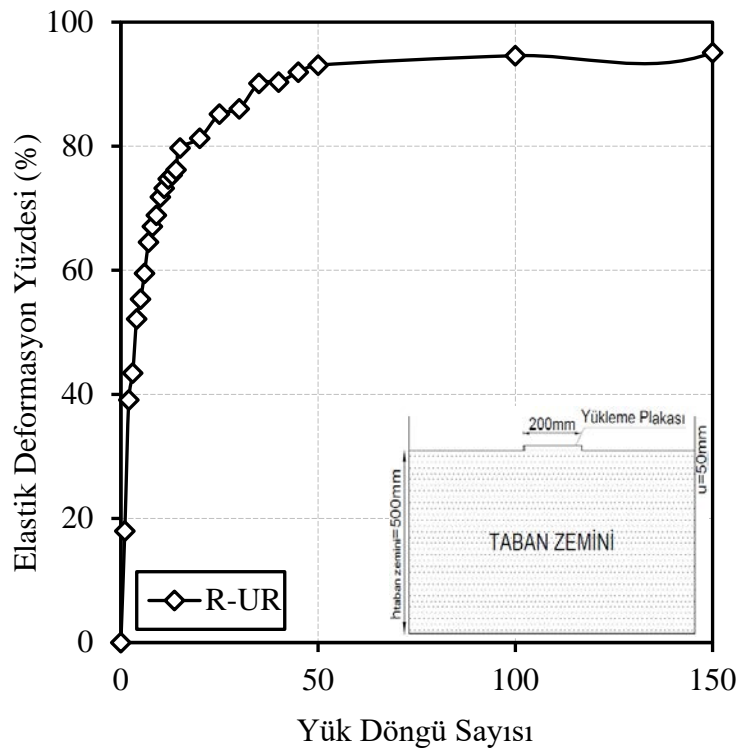


Şekil 4.15. 8 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

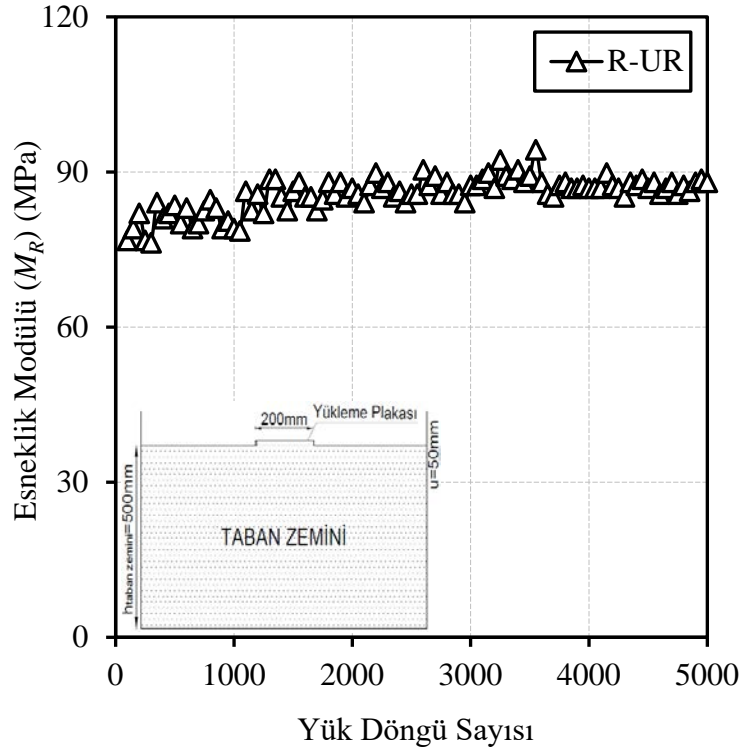
Bu çalışmada, 8 numaralı deneyin ilk 150 yük döngüsü için elastik deformasyon yüzdesi hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.16.'te görselleştirilmiştir. Başlangıçtaki yük döngülerinde kalıcı deformasyonlar daha baskın olduğundan, elastik deformasyon

yüzdesi bu döngülerde düşük kalmıştır. Ancak, yük döngü sayısı arttıkça kalıcı deformasyonların artış hızı azalmış, bu da elastik deformasyonların toplam deformasyon içindeki oranının giderek arttığı anlamına gelmiştir. Özellikle, 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesi hızla artmış ve %85,17'ye ulaşmıştır.

Şekil 4.17.'te ise, 8 numaralı deneyin esneklik modülü ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, esneklik modülünün yük döngü sayısının artışıyla birlikte sürekli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu artış, taban zemininin elastik özelliklerinin yük döngüleri boyunca geliştiğini ve taban zemininin daha sağlam hale geldiğini göstermektedir. 5000. yük döngüsünde ise esneklik modülü değeri 88 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, taban zemininin dayanımının uzun süreli tekrarlı yüklemelere karşı giderek güçlendiğini ve esnekliğinin arttığını göstermektedir.



Şekil 4.16. 8 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.17. 8 numaralı deney için esneklik modülü-yük döngü sayısı ilişkisi

Sonuç olarak, Çizelge 4.11.'de 5000 yük döngüsü sonunda elde edilen toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, esneklik modülü değerleri ve 25 yük döngüsü sonunda ulaşılan elastik deformasyon yüzdesi sunulmuştur. Bu tablo, deneyin sonunda taban zemininin davranışını ve değişen yük döngüleri altındaki performansını özetleyerek, elde edilen verilerin genel bir değerlendirmesini sağlar.

Çizelge 4.11. R-UR deney sonuçları

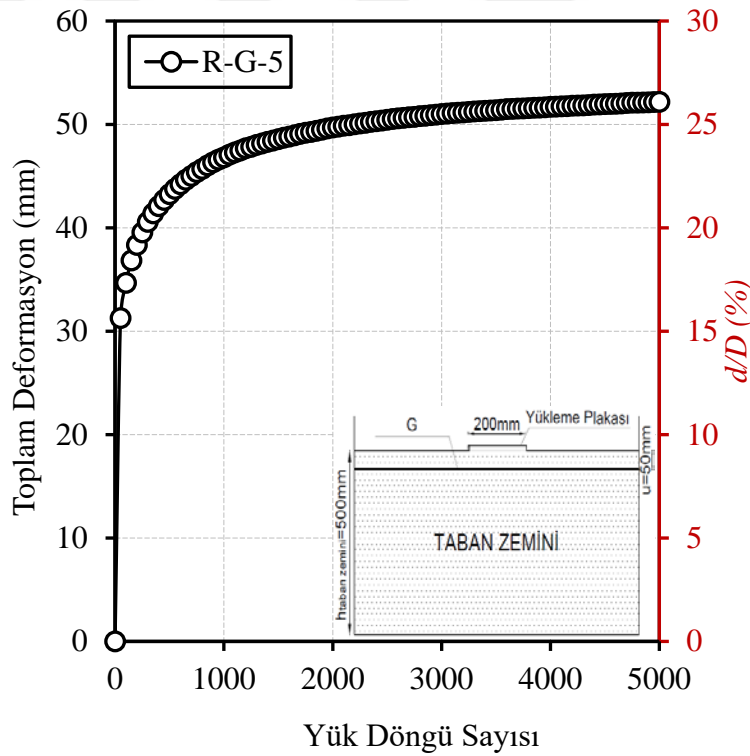
Toplam deformasyon (mm)	Kalıcı deformasyon (mm)	Elastik deformasyon (mm)	Esneklik modülü (M_R) (MPa)	Elastik deformasyon yüzdesi (%)
73.15	71.65	1.5	88	85.17

4.2.2 9 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-G-5)

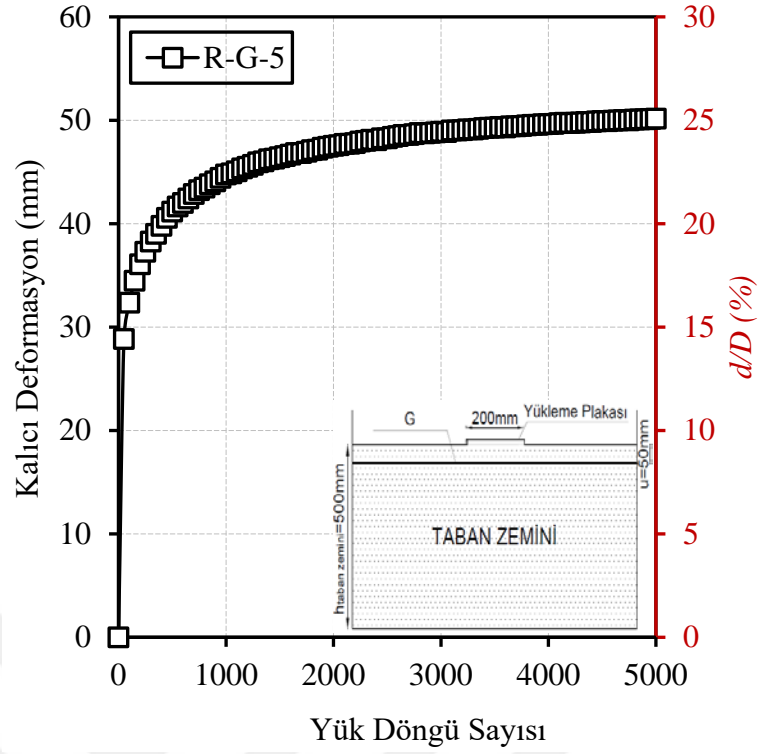
Bu bölümde, deney programı kapsamında gerçekleştirilen 9 numaralı deneyden elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde yorumlanmıştır. Deneyin sonunda, toplam deformasyon ile yük döngü sayısı ve kalıcı deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'de görselleştirilmiştir. Grafiklerin incelenmesi sonucu, her iki deformasyon türünün de yük döngü sayısındaki artışla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, belirli bir yük döngü sayısından sonra, yani sistem belirli bir noktaya ulaştığında, toplam deformasyon ve

kalıcı deformasyon değerlerinin artış hızında belirgin bir azalma görülmüştür. Bu durum, taban zemininin deformasyon kapasitesine yaklaştığına ve yük döngü sayısının artışı ile birlikte daha fazla deformasyona karşı daha dirençli hale geldiğine işaret etmektedir. Deneyin sonunda, 5000. yük döngüsünde toplam deformasyon 52.18 mm, kalıcı deformasyon ise 50.16 mm olarak ölçülmüştür.

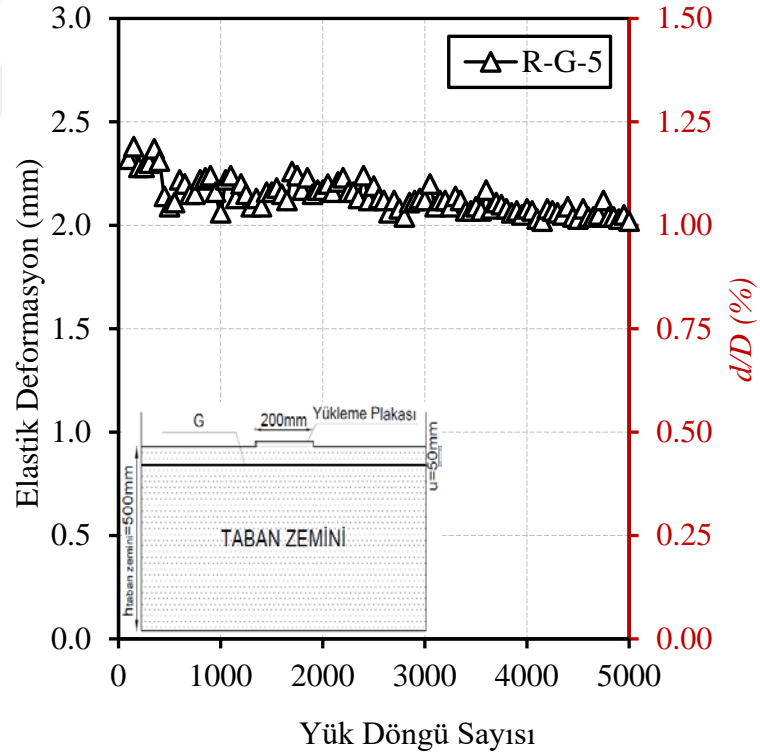
Ayrıca, elastik deformasyonlar da hesaplanmıştır. Elastik deformasyonlar, her bir yük döngüsü için toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki fark alınarak elde edilmiştir. Elastik deformasyonların yük döngü sayısı ile ilişkisi Şekil 4.20'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, elastik deformasyonların yük döngü sayısındaki artışla birlikte azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Elastik deformasyonlardaki bu azalma, 5000. yük döngüsünde 2.02 mm'ye düşerek sonlanmıştır. Bu durum, taban zeminindeki elastik deformasyon kapasitesinin yük döngüleri arttıkça azalmaya başladığını ve nihayetinde stabilize olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18. 9 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.19. 9 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

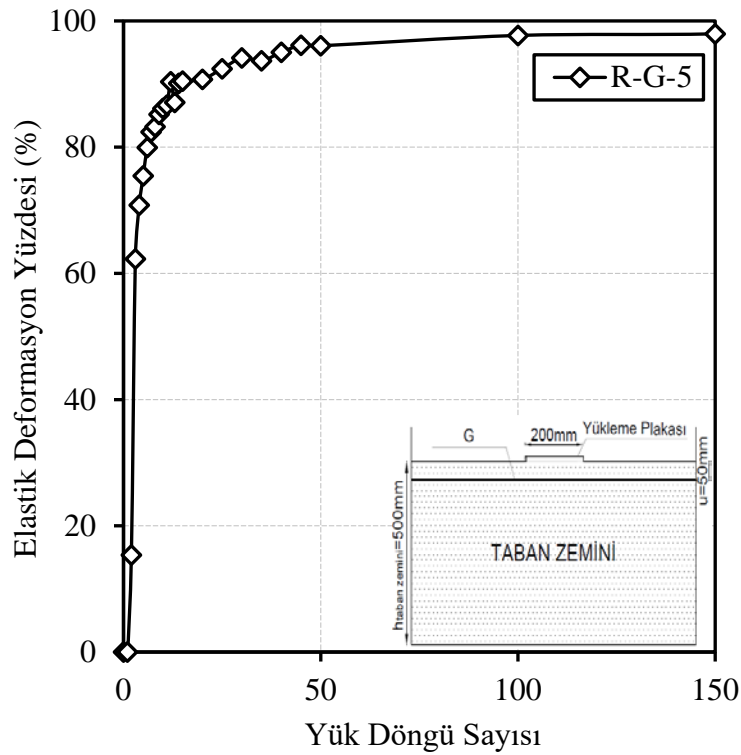


Şekil 4.20. 9 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

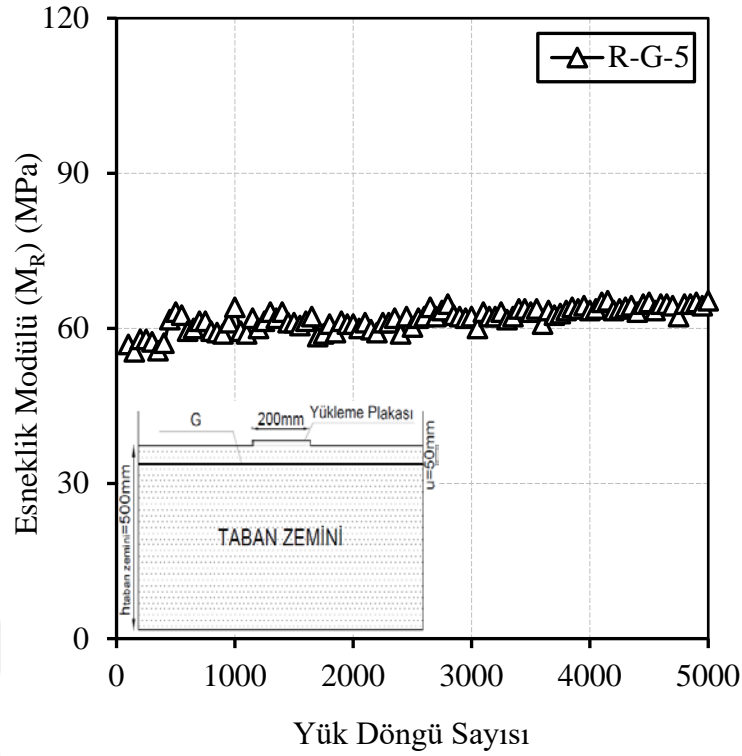
İlk 150 yük döngüsü için hesaplanan elastik deformasyon yüzdeleri, Şekil 4.21.'da sunulmuştur. Başlangıçta, özellikle ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyonların daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, elastik deformasyon yüzdesi başlangıçta

düşük çıkmıştır. Ancak, yük döngü sayısının artmasıyla birlikte, kalıcı deformasyonların artış hızı yavaşlamış ve elastik deformasyonların toplam deformasyon içindeki payı giderek artmıştır. 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlı bir şekilde artarak %94.14'e ulaşmıştır.

Ayrıca, Şekil 4.22.'da 9 numaralı deneyin esneklik modülü ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu grafikte, esneklik modülünün yük döngü sayısının artışıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. 5000 yük döngüsü sonunda esneklik modülünün değeri 65.35 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.21. 9 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.22. 9 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi

Sonuç olarak, Çizelge 4.12.'de, 5000 yük döngüsünde ulaşılan toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, esneklik modülü değerleri ve 25. yük döngüsündeki elastik deformasyon yüzdesi gibi önemli veriler özetlenmiştir. Bu veriler, taban zemininin deformasyon karakteristiklerini ve elastik özelliklerini yük döngüleri sırasında nasıl değiştirdiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.12. R-G-5 deney sonuçları

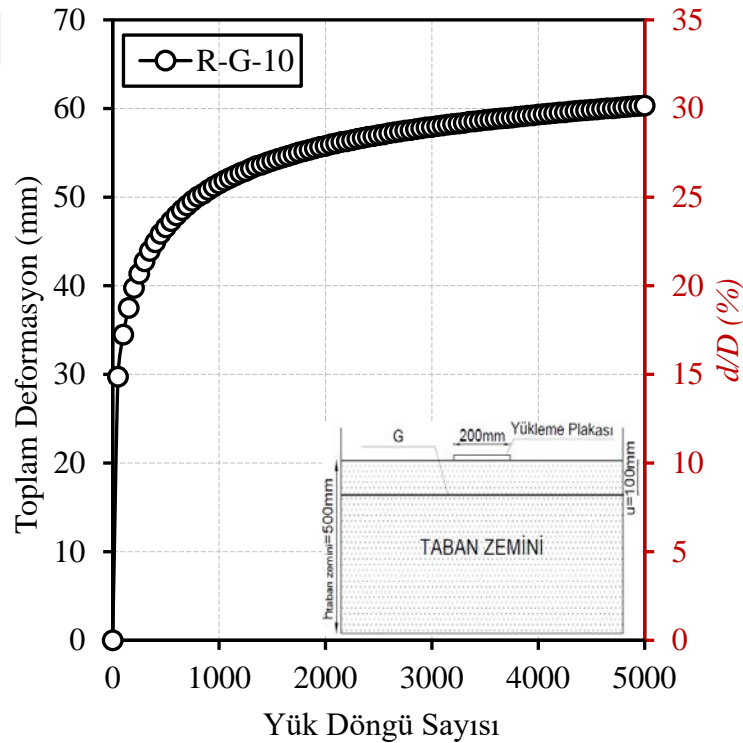
Toplam deformasyon (mm)	Kalıcı deformasyon (mm)	Elastik deformasyon (mm)	Esneklik modülü (M_R) (MPa)	Elastik deformasyon yüzdesi (%)
52.18	50.16	2.02	65.35	94.14

4.2.3 10 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-G-10)

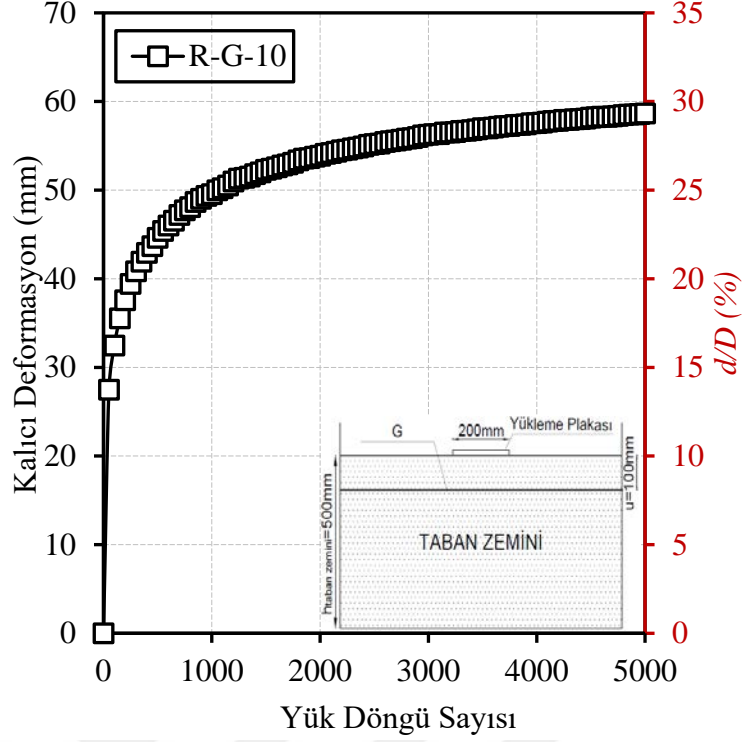
Bu bölümde, deney programı kapsamında gerçekleştirilen 10 numaralı deneyin sonuçları ayrıntılı bir şekilde yorumlanacaktır. Deneyin sonunda elde edilen toplam deformasyon ile yük döngü sayısı ve kalıcı deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 4.23. ve Şekil 4.24.'de görselleştirilmiştir. Bu grafiklerin incelenmesiyle, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerlerinin yük döngü sayısındaki artışa paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, belli bir yük döngü sayısından sonra bu deformasyonların artış hızında belirgin bir azalma

meydana gelmiştir. Bu durum, yük döngülerinin ilerleyen safhalarında sistemin deformasyona karşı daha dirençli hale geldiğini ve deformasyon kapasitesine yakın bir noktada olduğunu göstermektedir. Deneyin sonunda, yani 5000 yük döngüsü sonunda ulaşılan toplam deformasyon değeri 60.33 mm, kalıcı deformasyon değeri ise 58.65 mm olarak belirlenmiştir.

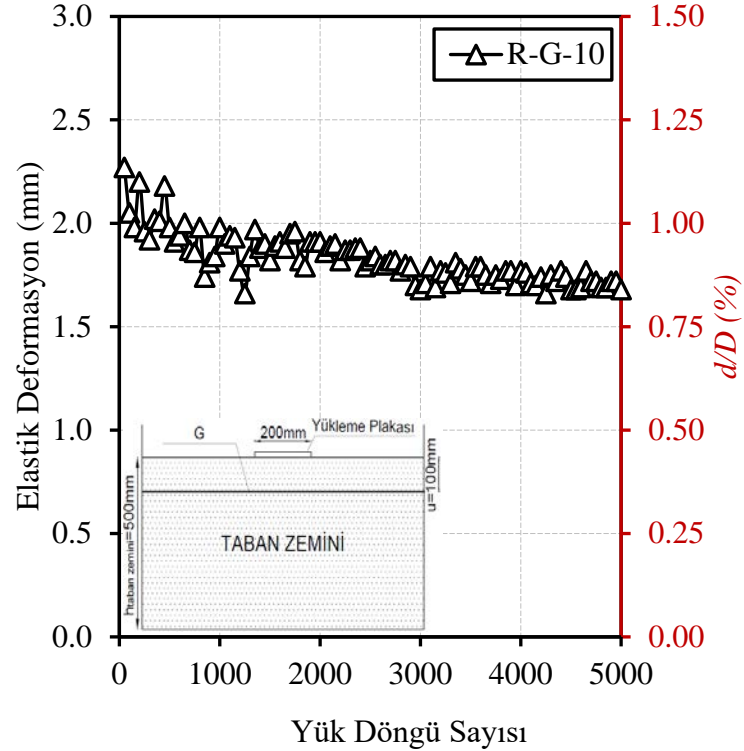
Ayrıca, her yük döngüsüne ait elastik deformasyon değerleri, toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen elastik deformasyon değerlerinin yük döngü sayısı ile ilişkisi Şekil 4.25.'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, elastik deformasyonların yük döngü sayısındaki artışla birlikte azalan bir trend izlediği gözlemlenmiştir. Elastik deformasyonlardaki bu azalma, 5000 yük döngüsünde 1.68 mm'ye kadar düşerek sonlanmıştır. Bu durum, taban zemininde elastik deformasyonların kapasitesinin azalmaya başladığını ve yük döngü sayısı arttıkça daha az elastik deformasyon meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.23. 10 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.24. 10 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

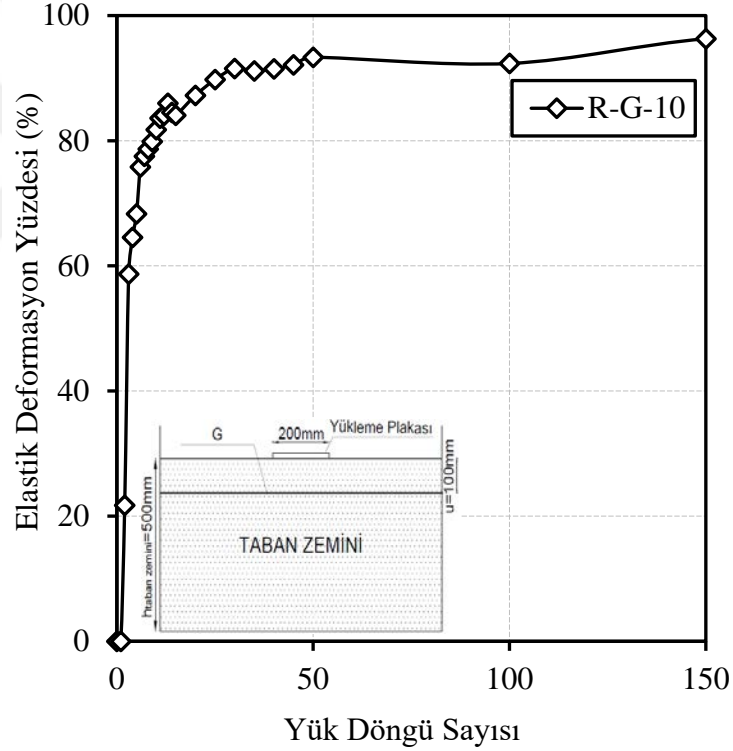


Şekil 4.25. 10 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

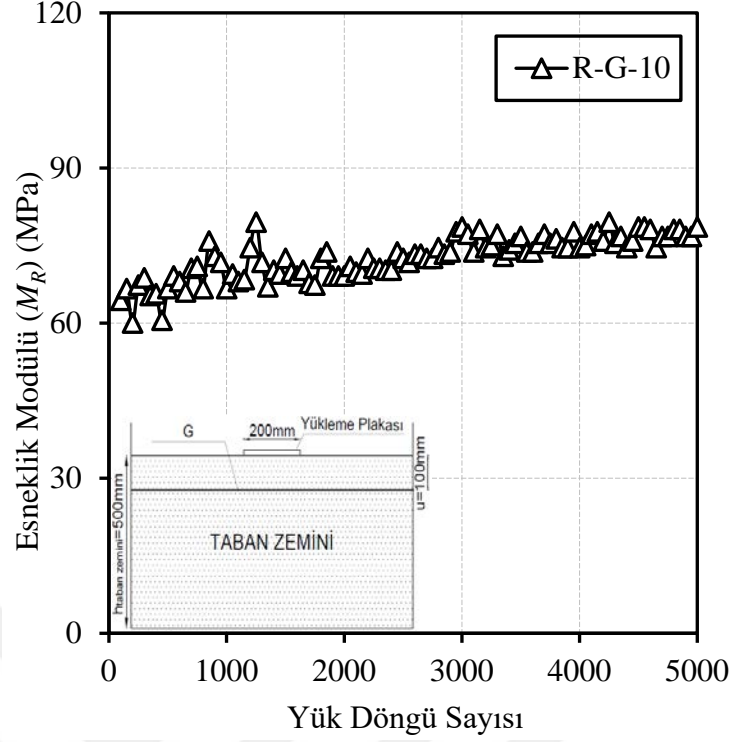
İlk 150 yük döngüsü için hesaplanan elastik deformasyon yüzdesi, Şekil 4.26.'te sunulmuştur. Başlangıçta, özellikle ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyonlar daha belirgin olduğu için elastik deformasyon yüzdesi düşüktür. Ancak yük döngüsü

sayısının artmasıyla, kalıcı deformasyonların artış hızının yavaşlaması ve elastik deformasyonların payının artması gözlemlenmiştir. 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlı bir şekilde artarak %91.54'e ulaşmıştır. Bu, elastik deformasyonların toplam deformasyon içinde giderek daha büyük bir paya sahip olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, Şekil 4.27.'te 10 numaralı deney için esneklik modülü ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki sunulmaktadır. Bu grafikte, esneklik modülünün yük döngü sayısının artışıyla birlikte arttığı açıkça gözlemlenmiştir. 5000 yük döngüsü sonunda esneklik modülünün değeri 78.57 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu, sistemin yük döngüleri sırasında elastik özelliklerinin artarak güçlendiğini ve taban zemininin esnekliğinin yük döngüleri ile birlikte arttığını göstermektedir.



Şekil 4.26. 10 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.27. 10 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi

Sonuç olarak, Çizelge 4.13.'te 5000 yük döngüsünde ulaşılan toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, esneklik modülü değerleri ve 25. yük döngüsündeki elastik deformasyon yüzdesi özetlenmiştir. Bu veriler, sistemin deformasyon karakteristikleri, elastik özellikleri ve yük döngüleri sırasında nasıl davrandığı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Çizelge 4.13. R-G-10 deney sonuçları

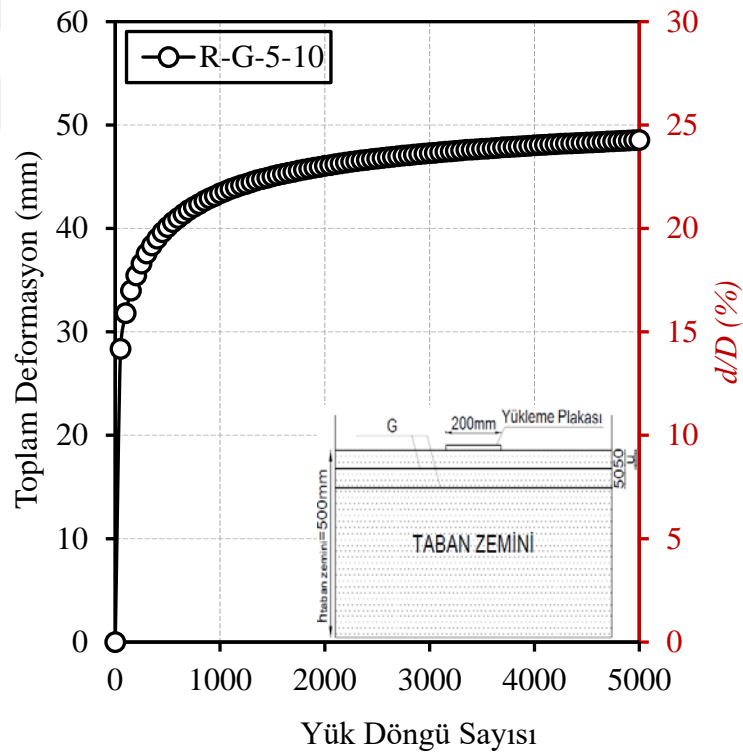
Toplam deformasyon (mm)	Kalıcı deformasyon (mm)	Elastik deformasyon (mm)	Esneklik modülü (M_R) (MPa)	Elastik deformasyon yüzdesi (%)
60.33	58.65	1.68	78.57	91.54

4.2.4 11 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-G-5-10)

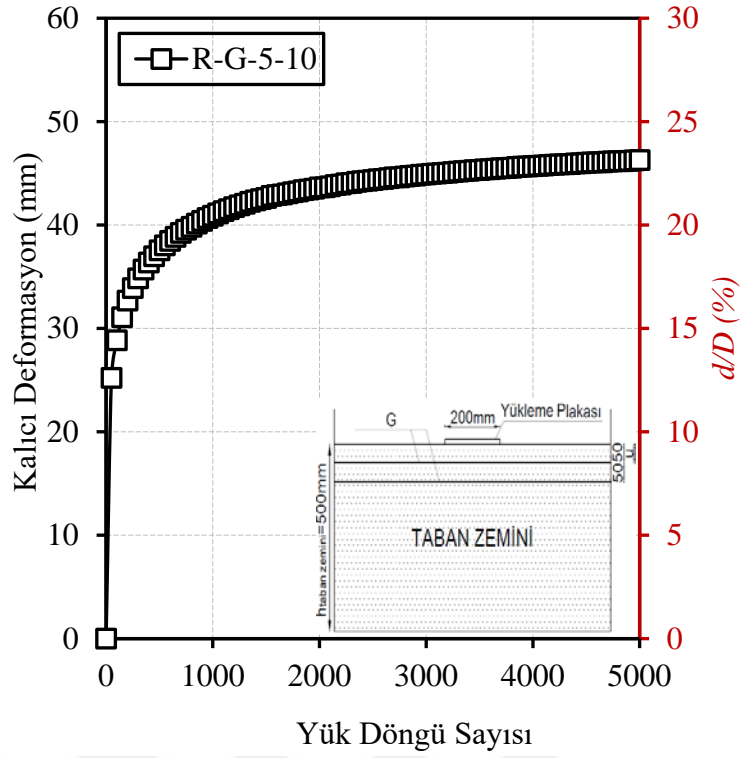
Bu bölümde, deney programında yer alan 11 numaralı deneyden elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde yorumlanacaktır. Deneyin sonunda elde edilen toplam deformasyon ile yük döngü sayısı ve kalıcı deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 4.28. ve Şekil 4.29.'de görselleştirilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerlerinin yük döngü sayısındaki artışa paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, belirli bir yük döngü sayısından sonra deformasyonlardaki artış hızında belirgin bir azalma

gözlemlenmiştir. Bu durum, taban zemininin deformasyon kapasitesinin büyük ölçüde azalmış olabileceğini ve daha fazla yük döngüsü ile artan deformasyonların etkisinin giderek zayıfladığını göstermektedir. Deneyin sonunda, yani 5000 yük döngüsü sonunda, toplam deformasyon 48.56 mm, kalıcı deformasyon ise 46.27 mm olarak ölçülmüştür.

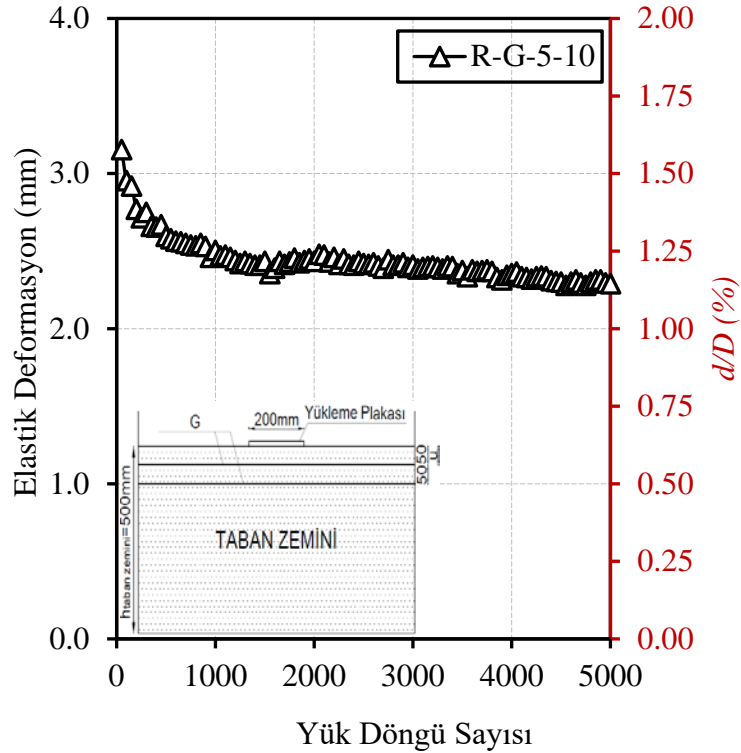
Ayrıca, her bir yük döngüsü için elastik deformasyon değerleri, toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır. Elastik deformasyonların yük döngü sayısı ile olan ilişkisi Şekil 4.30.'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, elastik deformasyonların yük döngü sayısındaki artışla birlikte azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Elastik deformasyonlardaki bu azalma, 5000 yük döngüsünde 2.25 mm'ye düşerek sonlanmıştır. Bu durum, taban zemininin elastik deformasyon kapasitesinin yük döngüleri arttıkça azaldığını ve sonunda stabilize olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.28. 11 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.29. 11 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

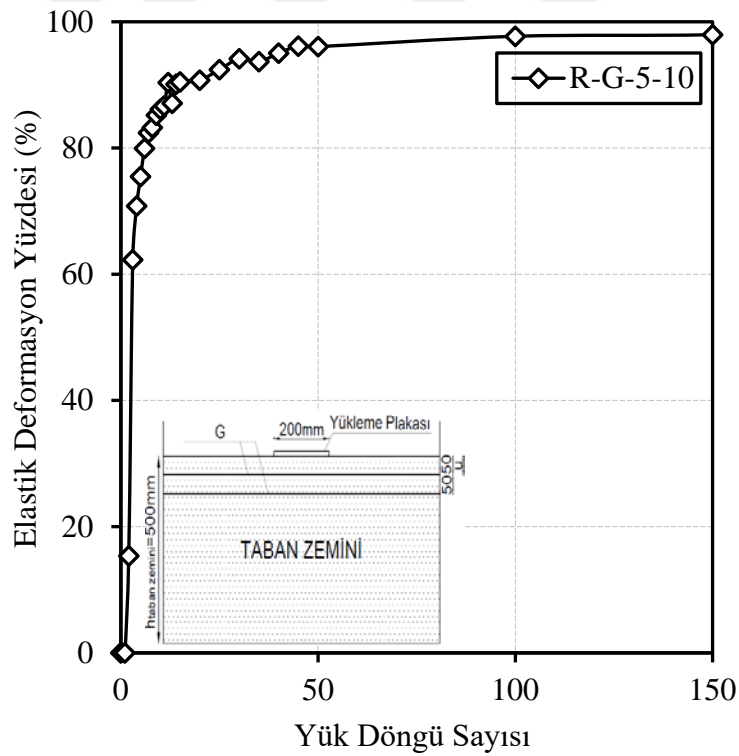


Şekil 4.30. 11 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

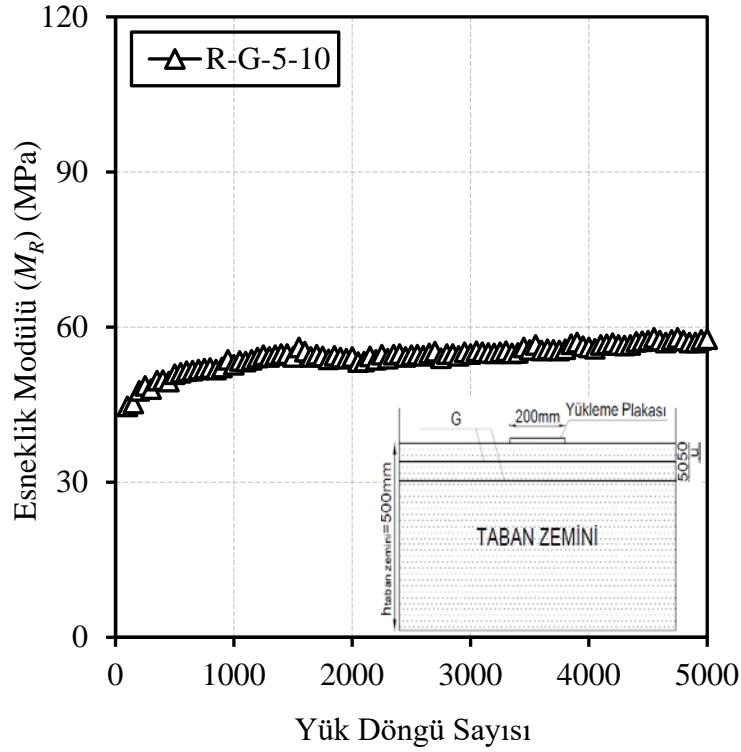
11 numaralı deney için ilk 150 yük döngüsü boyunca hesaplanan elastik deformasyon yüzdesi, Şekil 4.31.'da sunulmuştur. Başlangıç yük döngülerinde kalıcı deformasyonların daha belirgin olduğu gözlemlendiği için elastik deformasyon

yüzdeleri başlangıçta düşüktür. Ancak, yük döngü sayısının artmasıyla birlikte kalıcı deformasyonların artış hızının azaldığı ve elastik deformasyonların toplam deformasyon içindeki payının giderek arttığı görülmüştür. Özellikle 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlı bir şekilde artarak %95.27 değerine ulaşmıştır. Bu, elastik deformasyonların yük döngülerinin ilerleyen aşamalarında daha baskın hale geldiğini ve kalıcı deformasyonların etkisinin giderek azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.32.'de ise 11 numaralı deneyin esneklik modülü ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki sunulmuştur. Bu grafikte, esneklik modülünün yük döngü sayısının artmasıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. 5000 yük döngüsü sonunda esneklik modülü değeri 57.52 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu, deneyin ilerleyen safhalarında taban zemininin elastik özelliklerinin güçlendiğini ve esnekliğinin arttığını göstermektedir.



Şekil 4.31. 11 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.32. 11 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi

Sonuç olarak, Çizelge 4.14.'te 5000 yük döngüsünde ulaşılan toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, esneklik modülü değerleri ve 25 yük döngüsündeki elastik deformasyon yüzdesi özetlenmiştir. Bu veriler, taban zemininin deformasyon karakteristiklerini, elastik özelliklerini ve yük döngüleri sırasında nasıl davrandığını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.14. R-G-5-10 deney sonuçları

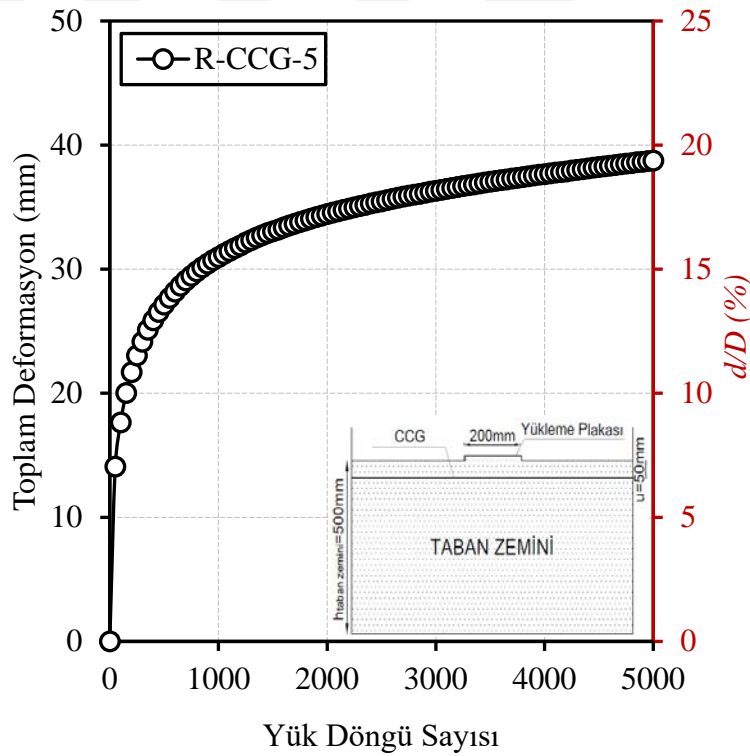
Toplam deformasyon (mm)	Kalıcı deformasyon (mm)	Elastik deformasyon (mm)	Esneklik modülü (M_R) (MPa)	Elastik deformasyon yüzdesi (%)
48.56	46.27	2.25	57.52	95.27

4.2.5 12 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-CCG-5)

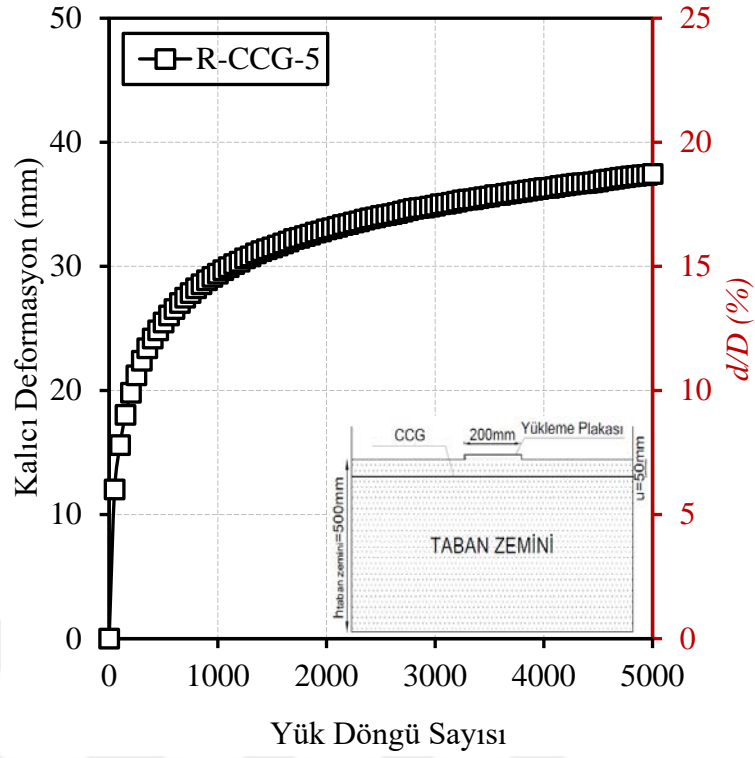
Bu bölümde, deney programında yer alan 12 numaralı deneyden elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde yorumlanacaktır. Deneyin sonunda elde edilen toplam deformasyon ile yük döngü sayısı ve kalıcı deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişkiler, sırasıyla Şekil 4.33. ve Şekil 4.34.'de görselleştirilmiştir. Grafiklerin incelenmesi sonucunda, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerlerinin yük döngü sayısındaki artışa paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, belirli bir yük döngü sayısından sonra deformasyonlardaki artış hızında önemli

bir azalma görülmüştür. Bu, taban zemininin deformasyon kapasitesinin çoğunlukla azaldığı ve daha fazla yük döngüsünün deformasyona etkisinin giderek daha düşük olduğunu göstermektedir. Deneyin sonunda, yani 5000 yük döngüsünde ulaşılan toplam deformasyon değeri 48.76 mm, kalıcı deformasyon ise 37.45 mm olarak belirlenmiştir.

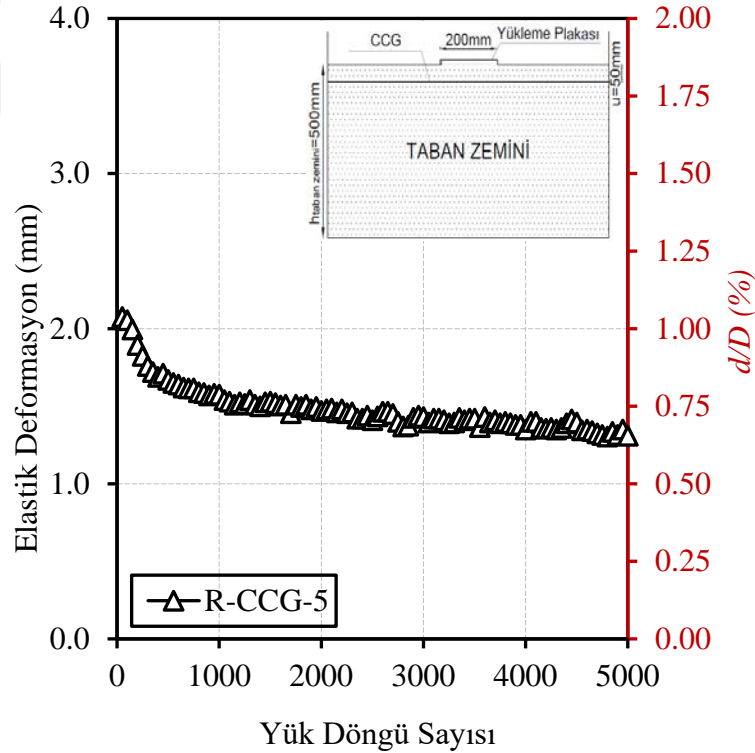
Ayrıca, her yük döngüsü için elastik deformasyon değerleri, toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen elastik deformasyonların yük döngü sayısı ile olan ilişkisi Şekil 4.35.'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, elastik deformasyonların yük döngü sayısı arttıkça azalan bir eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Elastik deformasyonlardaki bu azalma, 5000. yük döngüsünde 1.31 mm'ye düşerek sonlanmıştır. Bu durum, taban zemininde elastik deformasyonların kapasitesinin tükenmeye başladığını ve yük döngüleri ile birlikte elastik deformasyonların azalmasına yol açtığını göstermektedir.



Şekil 4.33. 12 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.34. 12 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

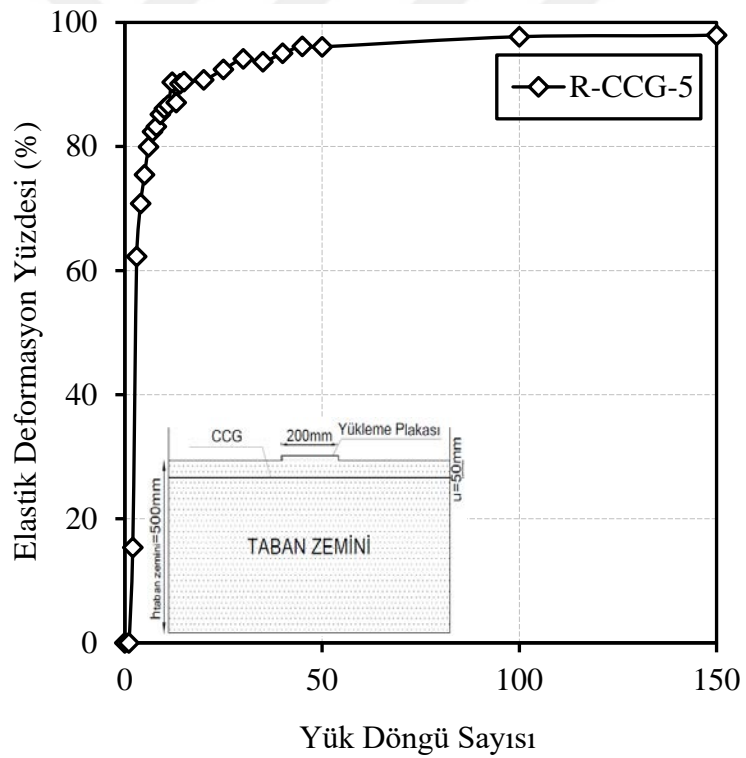


Şekil 4.35. 12 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

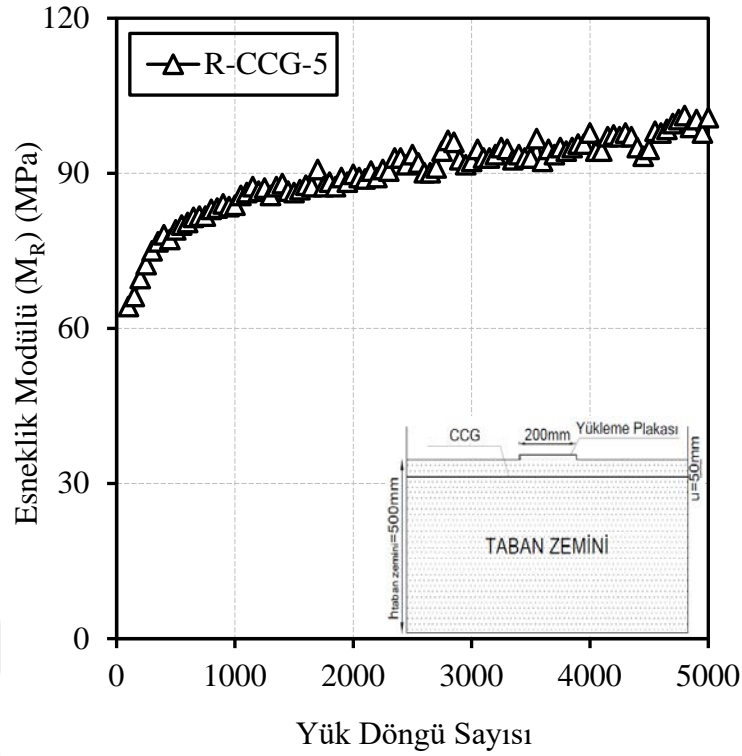
12 numaralı deneyin ilk 150 yük döngüsü için hesaplanan elastik deformasyon yüzdesi, Şekil 4.36.'te sunulmuştur. Başlangıçta, özellikle ilk yük döngülerinde kalıcı deformasyonların daha baskın olduğu için elastik deformasyon yüzdesi düşük

seviyelerde kalmaktadır. Ancak, yük dögüsü sayısının artmasıyla birlikte kalıcı deformasyonların artış hızı yavaşlamakta ve elastik deformasyonların toplam deformasyon içindeki payı giderek artmaktadır. Özellikle, 25. yük dögüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlı bir şekilde artarak %98.50'ye ulaşmıştır. Bu, elastik deformasyonların yük dögülerinin ilerleyen aşamalarında kalıcı deformasyonlardan daha fazla yer kaplamaya başladığını göstermektedir.

Ayrıca, Şekil 4.37.'te 12 numaralı deneyin esneklik modülü ile yük dögü sayısı arasındaki ilişki sunulmuştur. Bu grafikte, esneklik modülünün yük dögü sayısı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. 5000 yük dögüsü sonunda esneklik modülü değeri 100.76 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu, taban zemininin elastik özelliklerinin yük dögüleri sırasında arttığını ve malzemenin esneklik kapasitesinin daha da güçlendiğini göstermektedir.



Şekil 4.36. 12 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük dögü sayısı ilişkisi



Şekil 4.37. 12 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi

Sonuç olarak, Çizelge 4.15.'te 5000 yük döngüsünde ulaşılan toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, esneklik modülü değerleri ve 25 yük döngüsündeki elastik deformasyon yüzdesi özetlenmiştir. Bu veriler, deneyin başlangıcından sonuna kadar sistemin deformasyon karakteristiklerini, elastik özelliklerini ve yük döngüleri sırasında nasıl davrandığını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.15. R-CCG-5 deney sonuçları

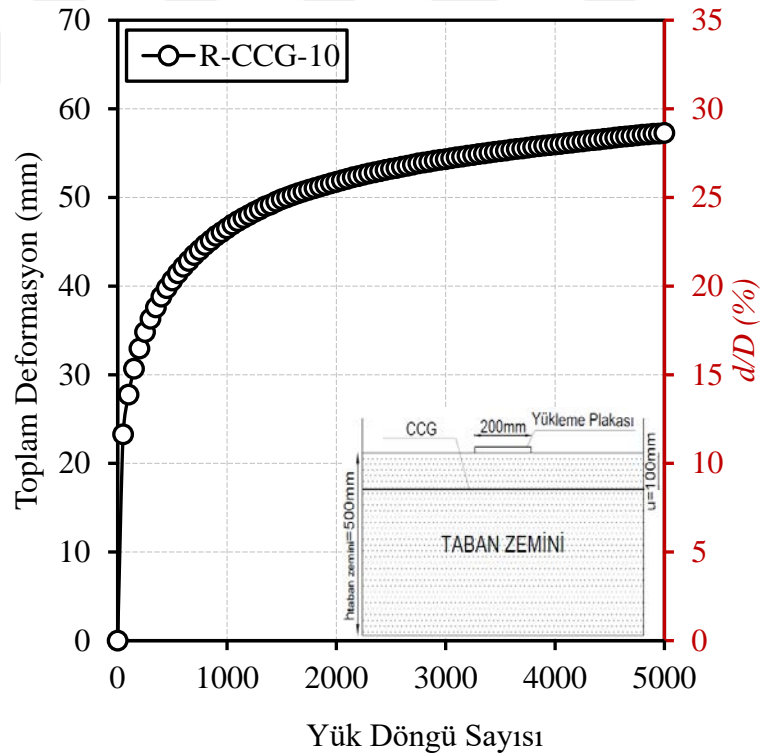
Toplam deformasyon (mm)	Kalıcı deformasyon (mm)	Elastik deformasyon (mm)	Esneklik modülü (M_R) (MPa)	Elastik deformasyon yüzdesi (%)
38.76	37.45	1.31	100.76	98.50

4.2.6 13 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-CCG-10)

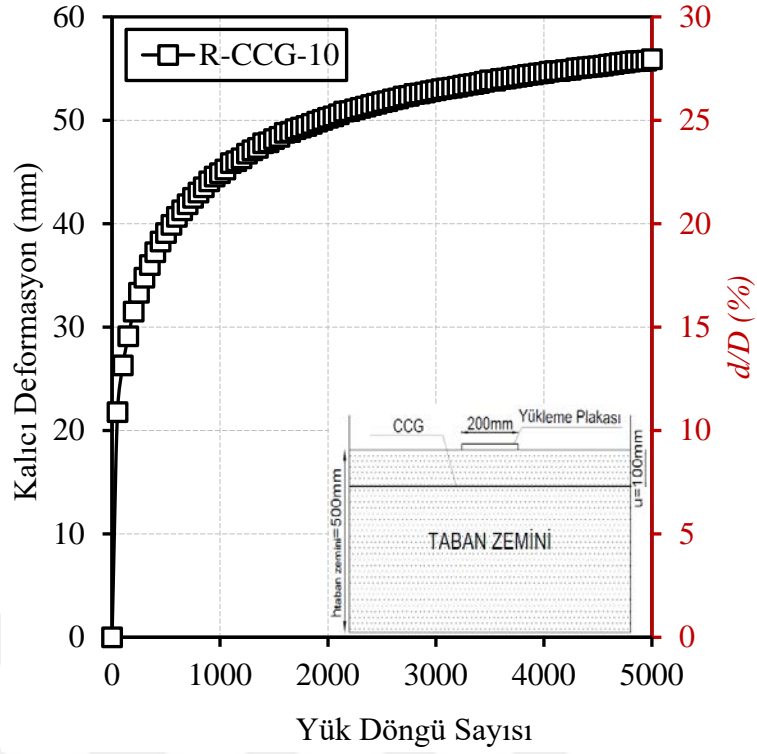
Bu bölümde, deney programında yer alan 13 numaralı deneyden elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde analiz edilecektir. Deneyin sonunda elde edilen toplam deformasyon ile yük döngü sayısı ve kalıcı deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişkiler, sırasıyla Şekil 4.38. ve Şekil 4.39.'de görselleştirilmiştir. Bu grafiklerin incelenmesi sonucunda, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerlerinin yük döngü sayısındaki artışla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Ancak,

belirli bir yük döngü sayısından sonra her iki deformasyon türündeki artış hızının azalması dikkat çekicidir. Bu durum, taban zemininin deformasyon kapasitesinin sınırlı olduğunu ve daha fazla yük döngüsü ile deformasyonun etkisinin azaldığını göstermektedir. Deneyin sonunda, yani 5000 yük döngüsünde, toplam deformasyon değeri 57.29 mm, kalıcı deformasyon ise 55.90 mm olarak ölçülmüştür.

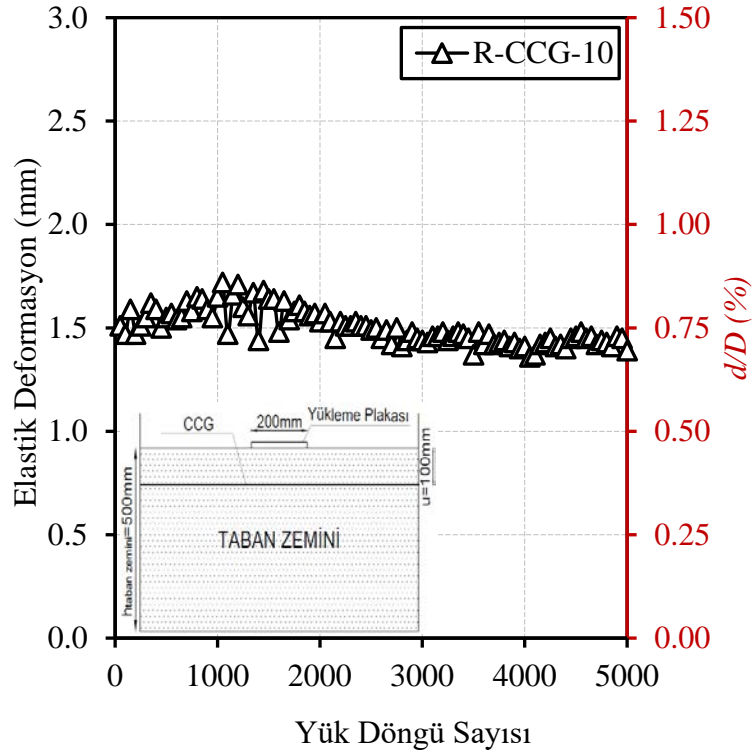
Ek olarak, her yük döngüsü için elastik deformasyon değerleri hesaplanmış ve bu değerler toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki farklar alınarak elde edilmiştir. Elastik deformasyonların yük döngü sayısı ile ilişkisi, Şekil 4.40.'de sunulmuştur. Bu grafik incelendiğinde, elastik deformasyonların yük döngü sayısındaki artışla birlikte azalan bir eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Elastik deformasyonlardaki bu azalma, 5000 yük döngüsü sonunda 1.39 mm'ye düşerek sonlanmıştır. Bu durum, yük döngülerinin ilerleyen safhalarında elastik deformasyonların daha az yer kapladığını ve taban zemininin elastik kapasitesinin azalmaya başladığını göstermektedir.



Şekil 4.38. 13 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.39. 13 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

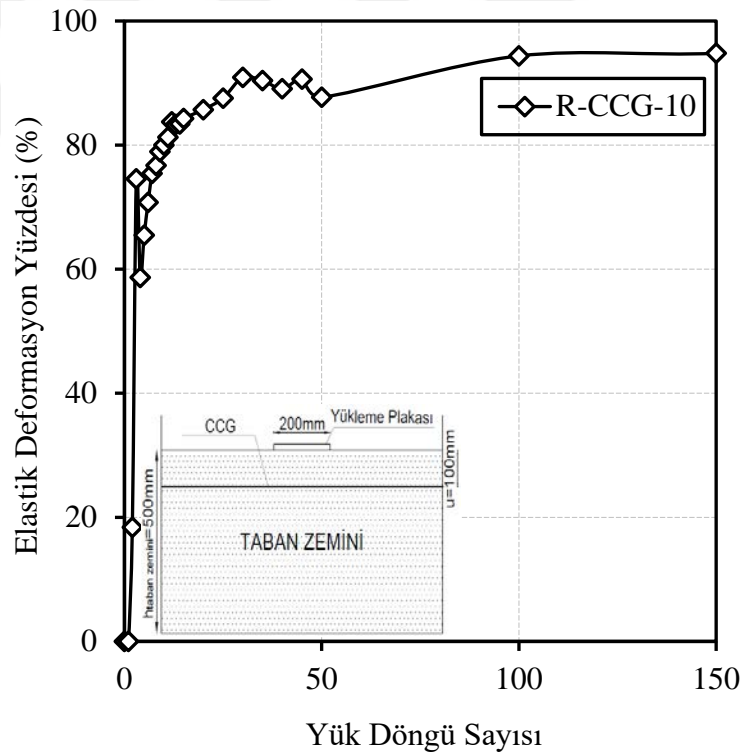


Şekil 4.40. 13 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

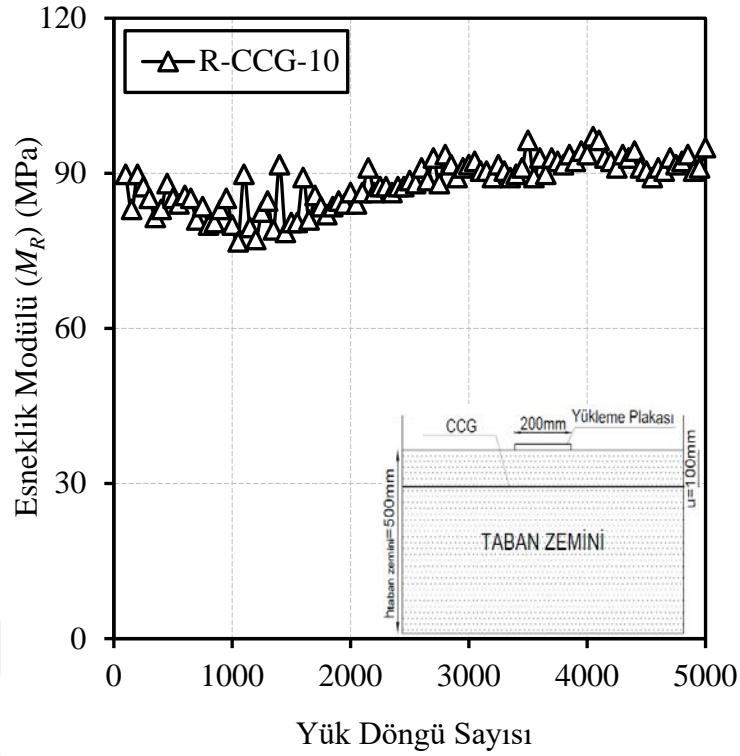
13 numaralı deney için ilk 150 yük döngüsü boyunca hesaplanan elastik deformasyon yüzdesi, Şekil 4.41.'da sunulmuştur. Başlangıç yük döngülerinde kalıcı

deformasyonların daha baskın olduğu için elastik deformasyon yüzdesi düşüktür. Ancak, yük döngüsü sayısı arttıkça kalıcı deformasyonların artış hızı azalmakta ve elastik deformasyonların toplam deformasyon içindeki payı artmaktadır. Özellikle 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlı bir şekilde artarak %90.91'e ulaşmıştır. Bu, elastik deformasyonların yük döngülerinin ilerleyen aşamalarında giderek daha baskın hale geldiğini ve kalıcı deformasyonlardan daha fazla yer kapladığını göstermektedir.

Şekil 4.42.'da ise 13 numaralı deneyin esneklik modülü ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, esneklik modülünün yük döngü sayısının artmasıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. 5000 yük döngüsü sonunda esneklik modülü değeri 94.96 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu, yük döngülerinin taban zemininin elastik özelliklerini güçlendirdiğini ve taban zemininin esneklik modülünün arttığını göstermektedir.



Şekil 4.41. 13 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.42. 13 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi

Sonuç olarak, Çizelge 4.16.'da 5000 yük döngüsünde ulaşılan toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, esneklik modülü değerleri ve 25 yük döngüsündeki elastik deformasyon yüzdesi özetlenmiştir. Bu veriler, deneyin her aşamasında taban zemininin deformasyon özelliklerini, elastik ve kalıcı deformasyonların dinamiklerini ve taban zemininin genel davranışını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.16. R-CCG-10 deney sonuçları

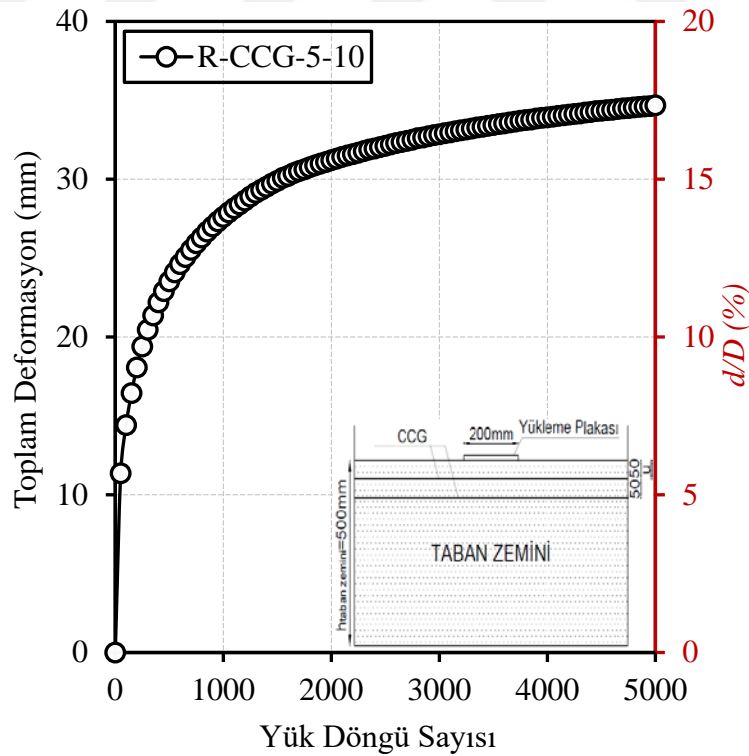
Toplam deformasyon (mm)	Kalıcı deformasyon (mm)	Elastik deformasyon (mm)	Esneklik modülü (M_R) (MPa)	Elastik deformasyon yüzdesi (%)
57.29	55.90	1.39	94.96	90.91

4.2.7 14 Numaralı Deneyin Sonuçları (R-CCG-5-10)

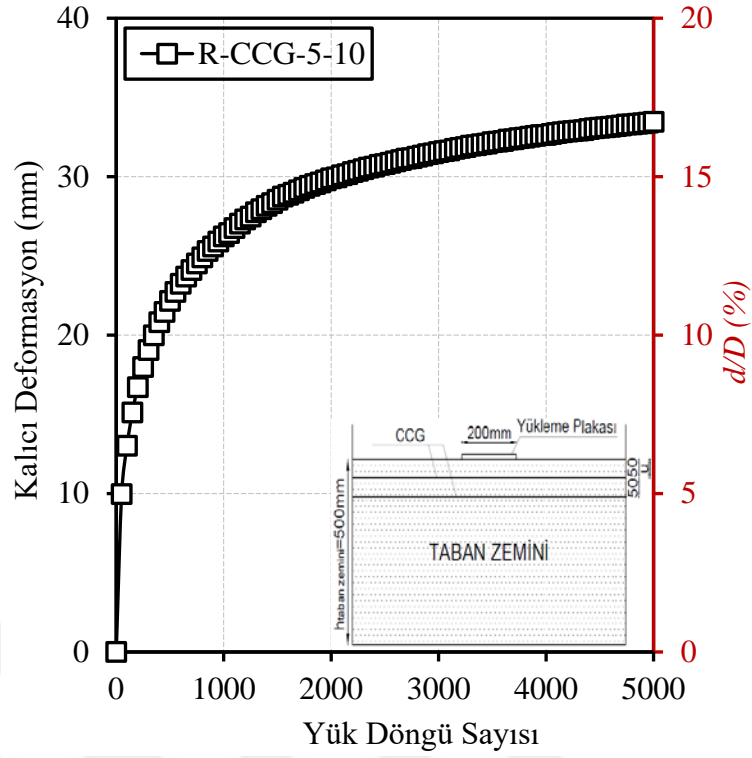
Bu bölümde, deney programında yer alan 14 numaralı deneyden elde edilen çıktılar ayrıntılı bir şekilde analiz edilecektir. Deneyin sonunda elde edilen toplam deformasyon ile yük döngü sayısı ve kalıcı deformasyon ile yük döngü sayısı arasındaki ilişkiler, sırasıyla Şekil 4.43. ve Şekil 4.44.'de görselleştirilmiştir. Bu grafiklerin incelenmesiyle, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon değerlerinin yük döngü sayısındaki artışla birlikte paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak,

belirli bir yük döngü sayısından sonra, her iki deformasyon türündeki artış hızının belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durum, taban zemininin deformasyon kapasitesinin sınırlı olduğunu ve yük döngülerinin ilerlemesiyle deformasyonun daha yavaş bir hızla arttığını göstermektedir. Deneyin sonunda, yani 5000. yük döngüsünde, toplam deformasyon değeri 34.69 mm, kalıcı deformasyon ise 33.46 mm olarak ölçülmüştür.

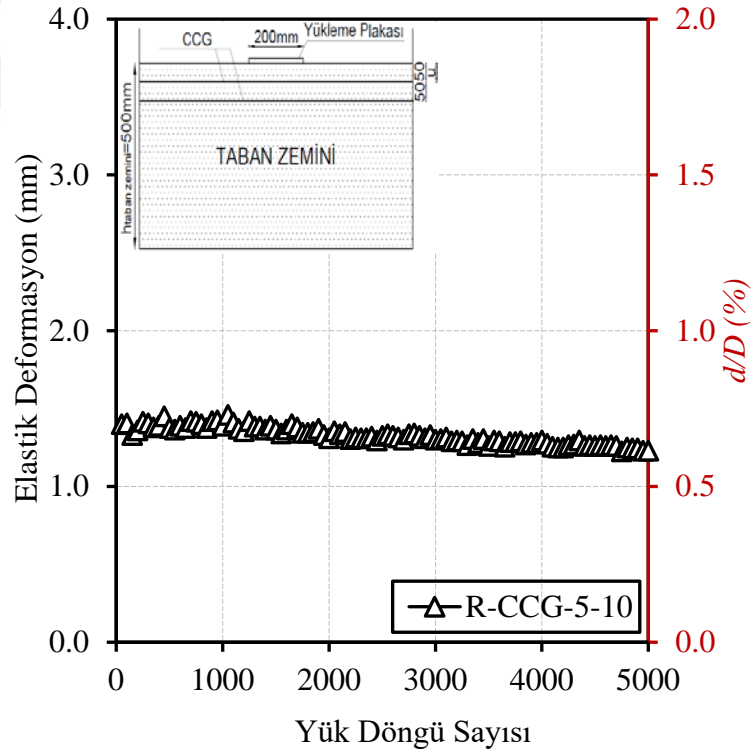
Elastik deformasyon değerleri de her yük döngüsü için hesaplanmış ve bu değerler toplam deformasyon ile kalıcı deformasyon arasındaki farklar alınarak elde edilmiştir. Şekil 4.45.'te, elastik deformasyonlar ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, yük döngü sayısındaki artışla birlikte elastik deformasyonların giderek azalan bir trend izlediği gözlemlenmiştir. Elastik deformasyonlardaki bu azalma, 5000 yük döngüsü sonunda 1.23 mm'ye düşerek sonlanmıştır. Bu, yük döngülerinin sonlarına doğru elastik deformasyonların daha az bir oranda etkili olduğunu ve taban zemininin elastik kapasitesinin azalmaya başladığını göstermektedir.



Şekil 4.43. 14 numaralı deneyin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.44. 14 numaralı deneyin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

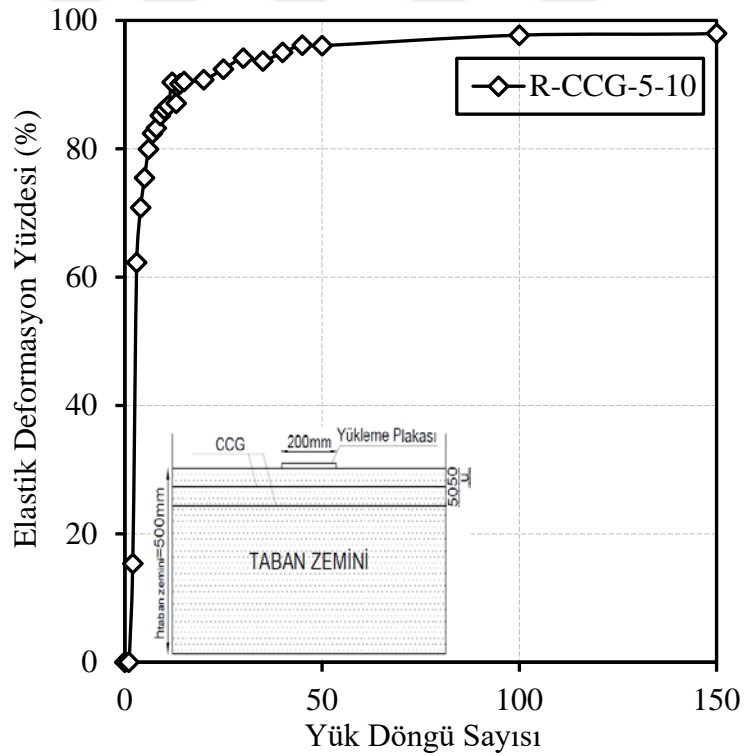


Şekil 4.45. 14 numaralı deneyin elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

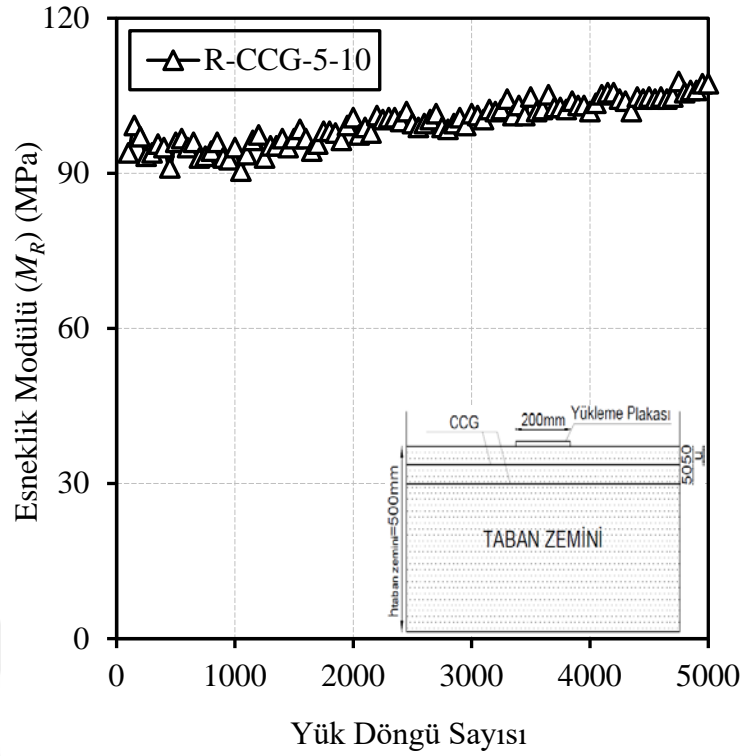
14 numaralı deney için elastik deformasyon yüzdesi, ilk 150 yük döngüsü boyunca hesaplanmış ve Şekil 4.46.'te sunulmuştur. Başlangıç yük döngülerinde kalıcı deformasyonlar daha baskın olduğu için elastik deformasyon yüzdesi düşüktür. Ancak

ilerleyen yük döngülerinde kalıcı deformasyonların artış hızı azalmaktadır ve bu nedenle elastik deformasyonların toplam deformasyon içindeki payı giderek artmaktadır. Özellikle, 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesi hızlı bir şekilde artarak %98.50'ye ulaşmıştır. Bu, elastik deformasyonların yük döngülerinin ilerleyen aşamalarında daha baskın hale geldiğini ve kalıcı deformasyonlardan daha fazla yer kapladığını göstermektedir.

Şekil 4.47.'te ise 14 numaralı deneyin esneklik modülü ile yük döngü sayısı arasındaki ilişki verilmiştir. Grafik incelendiğinde, esneklik modülünün yük döngü sayısı ile arttığı gözlemlenmiştir. 5000 yük döngüsü sonunda esneklik modülü değeri 107.32 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu, taban zemininin esneklik modülünün yük döngülerinin ilerlemesiyle birlikte arttığını ve taban zemininin elastik özelliklerinin güçlendiğini göstermektedir.



Şekil 4.46. 14 numaralı deneyin elastik deformasyon yüzdesi-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.47. 14 numaralı deney için esneklik modülü- yük döngü sayısı ilişkisi

Sonuç olarak, Çizelge 4.17.'de 5000 yük döngüsü sonucunda ulaşılan toplam deformasyon, kalıcı deformasyon, elastik deformasyon, esneklik modülü değerleri ve 25 yük döngüsü sonunda ulaşılan elastik deformasyon yüzdesi özetlenmiştir. Bu veriler, deneyin her aşamasında taban zemininin deformasyon davranışlarını ve elastik özelliklerini detaylı bir şekilde yansıtmaktadır.

Çizelge 4.17. R-CCG-5-10 deney sonuçları

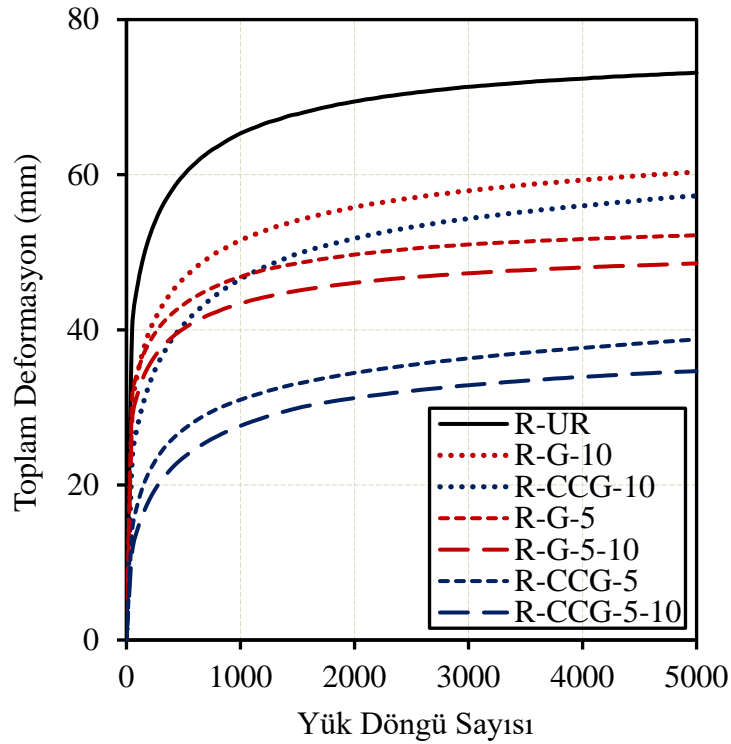
Toplam deformasyon (mm)	Kalıcı deformasyon (mm)	Elastik deformasyon (mm)	Esneklik modülü (M_R) (MPa)	Elastik deformasyon yüzdesi (%)
34.69	33.46	1.23	107.32	98.50

4.2.8 Tüm Deneylerin Karşılaştırılması

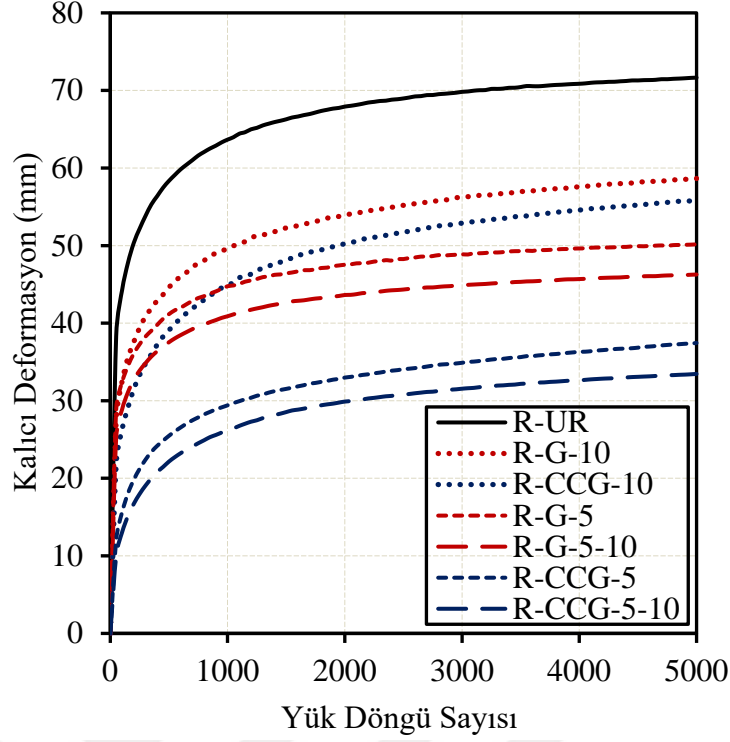
4.2.8.1 Toplam Deformasyon ve Kalıcı Deformasyon

Şekil 4.48. ve Şekil 4.49. hem güçlendirilmemiş hem de güçlendirilmiş taban zeminlerinin toplam deformasyonlarını ve kalıcı deformasyonlarını sırasıyla göstermektedir. Grafiklerin incelenmesi sonucunda, yük döngü sayısı arttıkça hem kalıcı deformasyon hem de toplam deformasyon değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki zemin türünün deformasyon davranışının yük

döngüleri ile ilişkili olduğunu ve deformasyonların zamanla arttığını göstermektedir. Ancak, tüm deneylerde gözlemlenen ortak bir özellik, toplam ve kalıcı deformasyonların ilk yük döngülerinde daha belirgin bir şekilde arttığı, ancak yük döngü sayısı arttıkça deformasyonlardaki artış hızının yavaşladığıdır. Yük döngü sayıları arttıkça, her iki deformasyon türü de belirli bir değere yakınsama eğilimindedir. Bu yakınsama, deformasyonlardaki artış oranının belirgin bir şekilde azaldığını ve taban zemininin deformasyon kapasitesinin sınırına ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.48. Tüm deneylerin toplam deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi



Şekil 4.49. Tüm deneylerin kalıcı deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

Ouria ve Mahmoudi [42] tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, hem işleme tabi tutulmamış geotekstil (G) hem de çimento ile kaplanmış geotekstil (CCG) üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulguları, özellikle aksenal şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak çekme dayanımlarında büyük artışlar gözlemlenmiştir. %0,2 aksenal şekil değiştirme değerinde, çimento ile kaplanmış geotekstil (CCG) ile yapılan çekme testlerinde aksenal kuvvetin 4,5 kat arttığı, %0,4 aksenal şekil değiştirme değerinde ise aynı parametre için aksenal kuvvetin yaklaşık 2,75 kat arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, %2 aksenal şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değerinde ise CCG'nin yaklaşık 5 katlık önemli bir artış sağladığı saptanmıştır.

Bu bulgular, çimento ile kaplanmış geotekstilin, işleme tabi tutulmamış geotekstile göre çok daha üstün bir performans sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. CCG'nin bu üstün performansının birkaç faktöre bağlı olduğu söylenebilir. İlk olarak, çimento kaplamanın, geotekstilin çekme kuvvetlerine karşı dayanıklılığını artırarak daha güçlü bir membran etkisi sağladığı ve bu sayede daha yüksek çekme kuvvetlerine dayanabileceği görülmektedir. İkinci olarak, çimento kaplamanın, geotekstilin kesme kuvvetlerine karşı dayanma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ve bu şekilde daha

güçlü bir yanal sınırlama etkisi yarattığı anlaşılmaktadır. Üçüncü olarak, CCG'nin gerilme dağılım performansının, işleme tabi tutulmamış geotekstilden çok daha iyi olduğu ve bu gelişmiş gerilme dağılımının yük altındaki performansını artırdığı tespit edilmiştir. Bu iyileştirmelerin, geotekstilin çimento ile kaplanmasının doğrudan bir sonucu olarak çekme dayanımındaki artışla bağlantılı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.48. ve Şekil 4.49. incelendiğinde, toplam deformasyon ve kalıcı deformasyon eğrilerinin benzer bir davranış sergilediği gözlemlenmektedir. Bu durum, her iki deformasyon türü için yapılan yorumların büyük ölçüde aynı olacağını ve her iki parametrede de aynı eğilimlerin görüleceğini göstermektedir. Deneysel sonuçlarına göre, 5000 yük döngüsü sonunda en fazla deformasyon değerine R-UR taban zemininden ulaşılmıştır. Bu da R-UR taban zemin koşulunun en kötü performansı gösterdiğini ve diğer tüm koşullardan daha yüksek deformasyon değerleri elde edildiğini ortaya koymaktadır.

Deneysel sonuçlarda CCG kullanıldığı tüm durumlar, G kullanıldığı duruma göre deformasyon açısından daha iyi performans göstermektedir. Bu bulgu, CCG'nin zemin üzerinde daha yüksek bir dayanım ve direnç sağladığını ve deformasyonları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. R-UR deneyinde 5000 yük döngüsü sonunda elde edilen 71.65 mm kalıcı deformasyon değeri, en yüksek kalıcı deformasyon değerini temsil etmektedir. Bu, güçlendirilmemiş zeminlerde kalıcı deformasyonların daha belirgin şekilde arttığını göstermektedir.

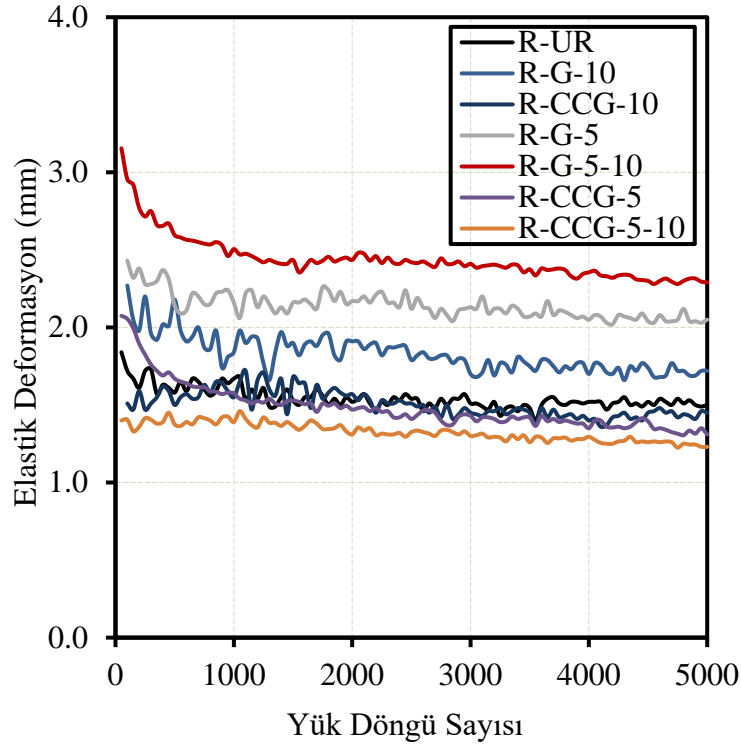
Donatının farklı derinliklerde yerleştirildiği senaryolara göre deformasyon değerleri de farklılık göstermektedir. Donatının 100 mm derinliğe yerleştirildiği durumlarda R-G-10 için kalıcı deformasyon değeri 58.65 mm, R-CCG-10 için ise 55.90 mm olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, CCG'nin 100 mm derinlikte dahi G'ye göre daha düşük deformasyon sağladığını ortaya koymaktadır. Donatının 50 mm derinliğe yerleştirildiği durumda ise R-G-5 için 52.18 mm kalıcı deformasyon, R-CCG-5 için ise 38.76 mm kalıcı deformasyon değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç, 50 mm derinlikte yerleştirilen CCG'nin, G'ye göre deformasyonları daha etkili bir şekilde sınırladığını göstermektedir. Son olarak, donatının hem 50 mm hem de 100 mm derinliğe iki tabaka olarak yerleştirildiği durumda R-G-5-10 için 48.56 mm kalıcı deformasyon, R-CCG-5-10 için ise 34.69 mm kalıcı deformasyon elde edilmiştir. Bu durum, hem 50 mm

hem de 100 mm derinlikte iki tabaka olarak yerleştirilen CCG'nin, deformasyonları daha düşük seviyelerde tutarak taban zemini performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Deneysel veriler, CCG'nin taban zemini güçlendirmede G'ye göre daha etkili olduğunu ve deformasyonları önemli ölçüde azalttığını, özellikle donatı derinliği azaldıkça ve donatı iki tabaka olarak yerleştirildiğinde performansın daha belirgin şekilde iyileştiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasındaki deneysel veriler, CCG'nin G'ye göre, güçlendirilmiş taban zemini uygulamalarında daha üstün performans gösterdiğini ve taban zemini stabilizasyonunu artıran önemli faktörlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür güçlendirmeler, taban zemini özelliklerinin iyileştirilmesine ve deformasyonların azaltılmasına yardımcı olabilecek potansiyele sahiptir.

4.2.8.2 Elastik Deformasyon

Şekil 4.50.'de yer alan tüm tekrarlı yükleme deneylerine ait elastik deformasyon değerleri incelendiğinde, genel bir eğilim olarak elastik deformasyonların yük döngü sayısının artmasıyla birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, deneylerin tamamı için benzer bir davranışı işaret etmektedir. Özellikle R-UR deneyine bakıldığında, deneyin başlangıcında elastik deformasyon değeri yaklaşık 1.85 mm iken, yük döngüleri ilerledikçe bu değer belirgin bir şekilde azalarak 1.50 mm'ye gerilemiştir. Bu, taban zemini davranışının zamanla daha stabil hale geldiğini ve elastik deformasyonların daha az bir oranla gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.50. Tüm deneyler için elastik deformasyon-yük döngü sayısı ilişkisi

Taban zemininde donatı olarak G kullanıldığı durumlarda ise elastik deformasyonların artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, G'nin elastik deformasyonların artmasına neden olduğunu gösteren bir bulgudur. R-UR deneyine göre, G kullanılan taban zeminlerinde elastik deformasyonların değerleri daha yüksek çıkmıştır. En fazla elastik deformasyon değeri, R-G-5-10 deneyinde elde edilmiş olup, bunu sırasıyla R-G-5 ve R-G-10 deneyleri takip etmiştir. Bu durum, G'nin elastik deformasyonların artmasına yol açan bir faktör olduğunu destekler niteliktedir.

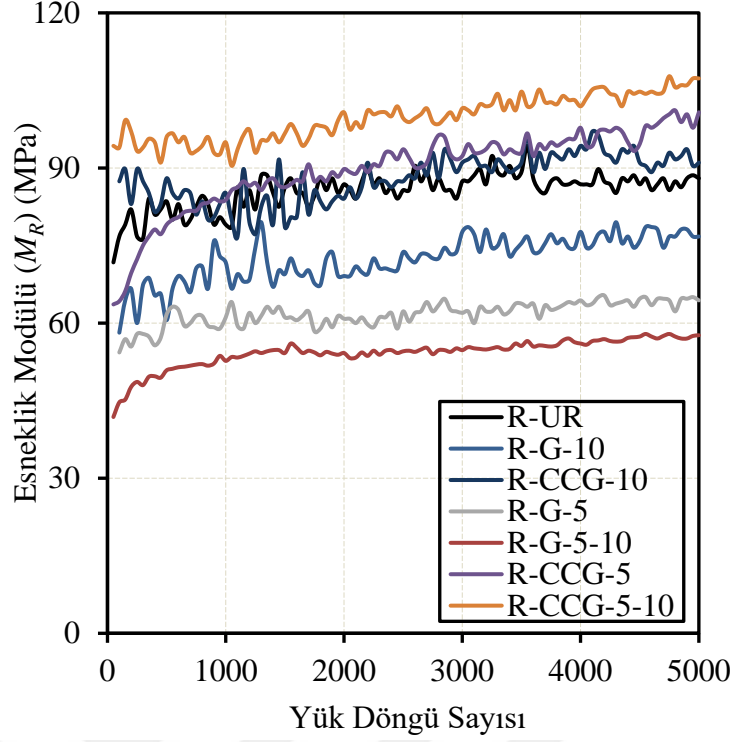
Öte yandan, taban zemininde donatı olarak CCG kullanıldığında ise elastik deformasyonlarda bir azalma meydana gelmiştir. CCG kullanımı, elastik deformasyonların azalmasına neden olmuştur ve bu sonuç, CCG'nin taban zeminin elastik özelliklerini iyileştirdiğini gösterir. CCG'nin uygulandığı deneylerde elastik deformasyonlar R-UR deneyine kıyasla daha düşük seviyelerde kalmıştır. En düşük elastik deformasyon değeri, R-CCG-5-10 deneyinden elde edilmiştir. Bu deneyde, elastik deformasyonlar minimum seviyeye inmiş olup, bunu sırasıyla R-CCG-5 ve R-CCG-10 deneyleri takip etmiştir. Bu sonuçlar, CCG'nin elastik deformasyonları azaltma açısından daha verimli bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. CCG'nin

elastik deformasyonları azaltıcı etkisi, çimento kaplamının geotekstilin mukavemetini artırarak daha az deformasyon meydana gelmesini sağladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, elastik deformasyonların genel olarak yük döngüsü sayısı arttıkça azaldığı gözlemlenirken, G'nin elastik deformasyonları artırdığı, CCG'nin ise elastik deformasyonları azalttığı sonucuna varılabilir. Bu bulgular, donatı türlerinin zemin davranışını nasıl etkilediğini ve farklı geotekstil türlerinin performans farklarını anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.

4.2.8.3 Esneklik Modülü (M_R)

Şekil 4.51.'da sunulan tüm tekrarlı yükleme deneylerine ait, zeminlerin dayanım özelliklerini belirlemek için kritik bir parametre olan esneklik modülünü göstermektedir. Esneklik modülü, bir zemin materyalinin elastik özelliklerini, yani uygulanan yükler karşısında ne kadar elastik bir şekilde geri döneceğini belirler. Bu parametre, ulaştırma ve geoteknik mühendisliğinde, özellikle taşıma kapasitesinin değerlendirilmesinde ve yük altında zeminlerin nasıl deformasyona uğrayacağını anlamada oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Esneklik modülünün değeri, zeminlerin yük taşıma kapasitesini, elastik deformasyon miktarını ve genellikle yapısal davranışlarını tanımlar.



Şekil 4.51. Tüm deneyler için esneklik modülü - yük döngü sayısı ilişkisi

Esneklik modülü ölçümleri, tekrarlı yükleme koşullarında yapılan deneyler kullanılarak elde edilmiştir. Bu tür tekrarlı yükleme deneyleri, taban zemininin yükler altında zamanla nasıl davrandığını ve bu yüklerin taban zemini yüzeyi üzerindeki etkisini simüle etmeye yarar. Esneklik modülü ölçümü, özellikle üç eksenli basınç deneylerinin bir türü olan tekrarlı yükleme testlerinden elde edilebilir. Bu deneyde, zemin örnekleri üzerine belirli aralıklarla tekrarlı yükler uygulanır, bu sayede zeminin her bir yük döngüsüne verdiği tepki ölçülür. Tekrarlı yüklemenin, özellikle trafik yüklerini doğru bir şekilde simüle ettiği kabul edilmektedir [80]. Trafik yükleri, zemin üzerinde sürekli olarak tekrarlanan ve zamanla birikerek zemin özelliklerini etkileyen yüklerdir. Bu nedenle, tekrarlı yükleme deneylerinin sonuçları, gerçek hayattaki trafik yüklerinin zemin üzerindeki etkilerini simüle etme açısından oldukça değerli bilgiler sunar.

Bu tez çalışmasında esneklik modülü hesaplamaları için Qian vd.'nin [81] önerdiği bir eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlik, tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen verilerle esneklik modülünü hesaplamaya olanak tanır. Esneklik modülü hesaplamak için kullanılan Denklem (5.1) şu şekildedir:

$$\delta = \frac{Blq(1 - \nu^2)}{E} \quad (5.1)$$

Burada, δ elastik deformasyon değerlerini, l etki faktörünü, B yükleme plakasının çapını, E esneklik modülünü ve ν Poisson oranını temsil etmektedir. Bu denkleme göre, esneklik modülü değeri elastik deformasyonların, yükleme plakasının çapı ve etki faktörü gibi parametrelerle ilişkili olarak hesaplanır. Etki faktörü, yükleme plakasının farklı noktalarındaki yük dağılımını dikkate alarak hesaplanır. Ahlvin ve Ulery [82]'nin yaptığı çalışmaya göre, etki faktörü yükleme plakasının orta noktasında 2, kenarında ise 1.2 olarak kabul edilmiştir. Bu tez çalışmasında ise literatürde yapılan çalışmalara uygun olarak buradaki iki değer ortalaması alınmıştır [66,67]. Poisson oranı, zeminlerin elastik özelliklerini belirlerken kullanılan bir başka önemli parametredir. Literatürde yapılan önceki çalışmalarda, Poisson oranının 0.5 olarak kabul edilmesi gerektiği belirtilmiştir [66,67]. Bu tezde de, zeminlerin elastik özelliklerini daha doğru bir şekilde modellemek için Poisson oranı 0.5 olarak alınmıştır.

Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen esneklik modülü değerleri, zeminlerin elastik davranışlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Zeminler, yük altındaki elastik deformasyonlarla sınırlı bir şekilde değişir ve esneklik modülü, bu deformasyonların büyüklüğünü belirleyen ana parametrelerden biridir. Esneklik modülünün doğru bir şekilde belirlenmesi, özellikle trafik yüklerinin ve çevresel etkilerin zemin üzerindeki etkilerinin simülasyonu açısından çok önemlidir.

Şekil 4.51.'dan elde edilen verilere göre, tüm deneyler için esneklik modülü değerlerinin yük döngü sayısı arttıkça belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, taban zemininin daha fazla yük döngüsüne maruz kaldıkça elastik özelliklerinin güçlendiğini ve dayanım kapasitelerinin arttığını göstermektedir. R-UR deneyine bakıldığında, deney başlangıcında esneklik modülü değeri yaklaşık 70 MPa civarındayken, yük döngü sayısının artmasıyla birlikte bu değer deney sonunda 88 MPa değerine kadar yükselmiştir. Bu durum, taban zemininin yük döngüleri sırasında elastik özelliklerinde bir iyileşme yaşandığını ve zeminlerin daha sağlam hale geldiğini ortaya koymaktadır.

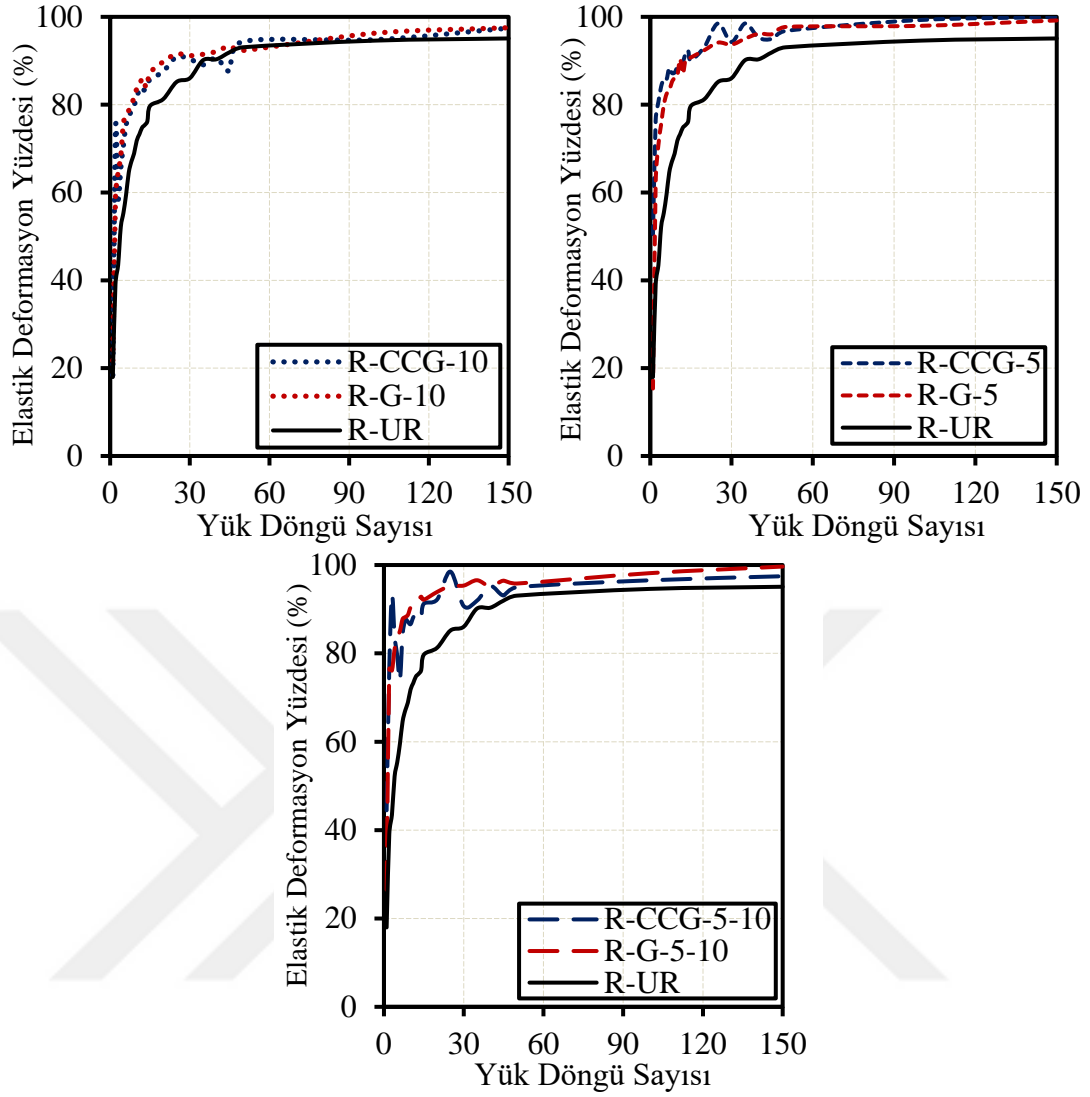
Taban zemininde donatı olarak G kullanıldığı durumlarda ise esneklik modülünün, R-UR deneyinden elde edilen esneklik modülü değerlerine göre azaldığı gözlemlenmiştir. Yani, G kullanılması, taban zemininin elastik özelliklerini zayıflatmış ve esneklik modülünü düşürmüştür. Bu durumun en belirgin olduğu deney ise R-G-5-10 deneyidir, burada en düşük esneklik modülü değerine ulaşılmıştır. Bunu sırasıyla R-G-5 ve R-G-10 deneyleri takip etmiştir. Bu sonuç, geotekstil malzemesinin taban zemini üzerinde elastik özelliklerde bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Diğer yandan, taban zemininde donatı olarak CCG kullanıldığında ise esneklik modülünün R-UR deneyinden elde edilen esneklik modülü değerlerine göre artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Yani, CCG kullanımı taban zemininin elastik özelliklerini iyileştirmiş ve esneklik modülünü artırmıştır. En yüksek esneklik modülü değerleri R-CCG-5-10 deneyinde elde edilmiştir. Bunu sırasıyla R-CCG-5 ve R-CCG-10 deneyleri takip etmiştir. Bu sonuçlar, çimento kaplanmış geotekstilin, taban zemininin elastik dayanımını artırmada önemli bir rol oynadığını ve bu tip donatıların taban zemini davranışını iyileştirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, donatının türüne bağlı olarak esneklik modülünde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. G kullanımı esneklik modülünü düşürürken, CCG kullanımı taban zemininin elastik özelliklerini artırmıştır. Bu durum, ulaştırma ve geoteknik mühendisliğinde kullanılan donatı malzemelerinin, taban zemini davranışlarını önemli ölçüde etkilediğini ve doğru malzeme seçimlerinin taban zemini performansını iyileştirebileceğini göstermektedir.

4.2.8.4 Elastik Deformasyon Yüzdesi

Şekil 4.52.'ta, ilk 150 yük döngüsü için elde edilen elastik deformasyon yüzdesi değerleri sunulmuştur. Elastik deformasyon yüzdesi, her bir yük döngüsünde elastik deformasyonun o döngüdeki toplam deformasyona oranı ile hesaplanmaktadır [16]. Bu hesaplama, Denklem (5.2) kullanılarak yapılmaktadır.

$$[Elastik deormasyon yüzdesi]_{N=n} = \left[\frac{Elastik deformasyon}{Toplam deformasyon} \right]_{N=n} \quad (5.2)$$



Şekil 4.52. Elastik deformasyon yüzdesi – yük döngü sayısı ilişkisi

Deneilerde başlangıç yük döngülerinde, kalıcı deformasyonların daha baskın olduğu gözlemlenmiştir; bu nedenle elastik deformasyon yüzdeleri başlangıçta düşüktür. Ancak, yük döngülerinin ilerleyen aşamalarında kalıcı deformasyonların artış hızı azalmaya başlamıştır, bu da elastik deformasyonların toplam deformasyon içindeki oranının artmasına yol açmıştır.

Özellikle, 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesinde hızlı bir artış gözlemlenmiştir. R-UR deneyinde elastik deformasyon yüzdesi 25. yük döngüsüne kadar %85.17 değerine ulaşmıştır. Diğer deneylerde de benzer bir trend gözlemlenmiştir. R-G-10, R-G-5, R-G-5-10, R-CCG-10, R-CCG-5 ve R-CCG-5-10 deneyleri için 25. yük döngüsündeki elastik deformasyon yüzdesi değerleri sırasıyla %91.54, %94.14, %95.27, %90.91, %98.50 ve %98.50 değerlerine ulaşmıştır.

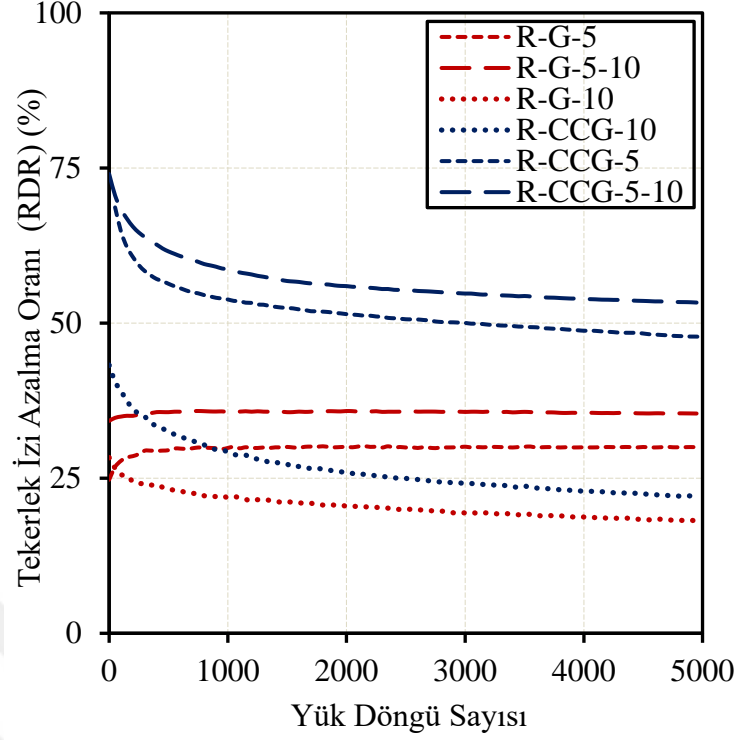
Bu sonuçlar, elastik deformasyonların yük döngülerinin ilerleyen aşamalarında kalıcı deformasyonlara göre daha baskın hale geldiğini ve toplam deformasyonun büyük bir kısmını oluşturduğunu göstermektedir.

Yaklaşık olarak ilk 45 yük döngüsünden sonra, tüm deneylerde elastik deformasyon yüzdesi değerleri sabit bir orana yakınsamaya başlamıştır. Bu da, ilk baştaki hızlı artışın ardından, zeminlerin daha stabil bir elastik davranış sergilemeye başladığını gösterir. Ayrıca, donatılı taban zeminlerinin donatısız taban zeminine kıyasla daha yüksek elastik deformasyon yüzdesi gösterdiği belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bu, donatının taban zeminlerinin elastik özelliklerini iyileştirdiği ve deformasyonlarının çoğunun elastik bölgede kaldığını göstermektedir. Donatılı taban zeminlerinin elastik deformasyonlarının yüksek olması, bu tür zeminlerin daha sağlam ve esnek yapılar oluşturduğunu ve özellikle trafik yükleri altında daha iyi performans gösterdiğini desteklemektedir.

4.2.8.5 Tekerlek İzi Azalma Oranı (*RDR*)

Trafik yükleri gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalan karayolu yapılarında elastik deformasyonlar geçici olsa da, yükleme kaldırıldığında bu bölgelerde geri dönüşü olmayan kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu kalıcı deformasyonlar, genellikle "tekerlek izi" olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.53.'de, tekerlek izi azalma oranı (*RDR*) değerleri sunulmuştur. *RDR*, bir zeminin güçlendirilmesiyle kalıcı deformasyonlarda meydana gelen azalışı yüzdesel olarak açıklayan bir parametre olup, Denklem (5.3)'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır [16].

$$[RDR]_{N=n} = \left[1 - \frac{\text{Kalıcı deformasyon}_{\text{güçlendirilmiş}}}{\text{Kalıcı deformasyon}_{\text{güçlendirilmemiş}}} \right]_{N=n} \times 100 \quad (5.3)$$



Şekil 4.53. Tekerlek izi azaltma oranı (RDR) - yük döngü sayısı ilişkisi

Şekil 4.53.'de, 5000 yük döngüsü için her 50 yük döngüsünde bir hesaplanan *RDR* değerleri yer almaktadır. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, CCG donatılı taban zeminlerinin *RDR* değerlerinin G donatılı taban zeminlerine kıyasla daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle, CCG donatılı taban zeminlerinde ilk yükleme döngüleri sırasında, *RDR* değerlerinin yüksek bir seviyeden başladığı ve zamanla yavaşça azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. *RDR* değerlerindeki bu düşüş, sabit bir değere yakınsadıkça devam etmiştir. Bu eğilim, zemin güçlendirilmesinin etkisini açık bir şekilde göstermektedir. R-G-10 taban zemininde de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir; *RDR* değerleri başlangıçta yüksek olup, zamanla azalmış ve belirli bir seviyeye yaklaşmıştır.

Diğer taraftan, R-G-5 taban zemininde başlangıç *RDR* değerleri belirli bir seviyeden başlayıp kademeli olarak artmıştır ve nihayetinde sabit bir değere yakınsamıştır. R-G-5-10 taban zemininde ise *RDR* değerleri, deney süresi boyunca neredeyse sabit kalmıştır. Bu, donatının derinliği ve tipi ile *RDR* değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 5000 yük döngüsünün sonunda, farklı taban zeminleri için elde edilen *RDR* değerleri sırasıyla %53,31 (R-CCG-5-10), %47,74 (R-CCG-5), %35,42 (R-G-5-10), %29,99 (R-G-5), %21,98 (R-G-10) ve %18,14 (R-UR) olarak bulunmuştur. Bu

değerler, güçlendirilmiş taban zeminlerinin, güçlendirilmemiş taban zeminine göre daha iyi performans gösterdiğini ve kalıcı deformasyonların azaltılmasında etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan değerlendirme, CCG'nin taban zeminlerini güçlendirmek için kullanılmasının, G kullanımıyla kıyaslandığında tekerlek izlerini azaltma konusunda daha üstün bir performans sergilediğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu bulgu, özellikle trafik yüklerinin etkisi altında olan karayolu yapılarının dayanıklılığını artırmaya yönelik tasarım iyileştirmeleri için önemli bir veridir.

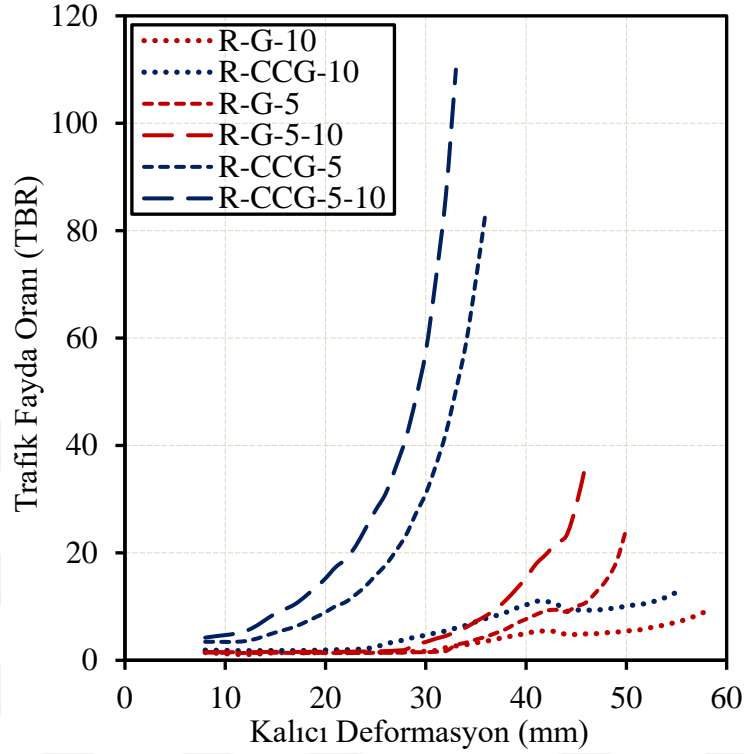
4.2.8.6 Trafik Fayda Oranı (*TBR*)

Güçlendirilmiş bir karayolu yapısının ömrünü güçlendirilmemiş bir yapıyla kıyaslamak için trafik fayda oranı (*TBR*) kullanılır. *TBR*, yol kaplamasının ömrü hakkında önemli bilgiler sunar ve güçlendirilmiş (donatılı) yol kaplamalarının ömrünü donatısız kaplamalarla karşılaştırırken kullanılır. Aynı zamanda trafiğin etkisini de göz önünde bulundurur. *TBR*, bir güçlendirilmiş karayolu yapısında belirli bir kalıcı deformasyon seviyesine ulaşmak için gerekli olan yük döngüsü sayısının, güçlendirilmemiş bir karayolu yapısındaki aynı kalıcı deformasyon seviyesine ulaşmak için gerekli yük döngüsü sayısına oranı olarak tanımlanır [11,16]. Bu oran, güçlendirilmiş yapıların daha uzun ömürlü olacağına işaret eder. *TBR* değerleri, Denklem (5.4)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$[TBR]_{n. kalıcı def.} = \left[\frac{Yük\ döngü\ sayısı_{güçlendirilmiş}}{Yük\ döngü\ sayısı_{güçlendirilmemiş}} \right]_{n. kalıcı def.} \quad (5.4)$$

CCG ve G donatılı taban zeminlerinin *TBR* değerleri, farklı kalıcı deformasyon seviyelerinde hesaplanmış ve bu veriler Şekil 4.54.'de görsel olarak sunulmuştur. Şekil 4.54.'den görülebileceği üzere, tüm donatılı taban zeminlerinin *TBR* değerleri, kalıcı deformasyon seviyesi arttıkça yükselmiştir. Özellikle CCG-5-10 ve CCG-5 taban zeminlerinde *TBR* değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, CCG'nin G'ye kıyasla kaplama ömrü açısından daha üstün bir performans sergilediğini açıkça göstermektedir. Yani, CCG donatılı taban zeminleri, kalıcı deformasyonların arttığı durumlarda bile daha az yıpranma yaşamakta ve bu da güçlendirilmiş yolların daha uzun süre dayanacağını gösterir. CCG'nin bu üstün performansı, özellikle trafik

yüklerine karşı daha yüksek direnç gösterdiği için, yol kaplamalarının ömrünü önemli ölçüde artırmaktadır. Bu da, CCG'nin karayolu yapılarındaki güçlendirme uygulamaları için daha verimli bir malzeme olduğunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil 4.54. Trafik Fayda Oranı (TBR)-yük döngü sayısı ilişkisi

4.3 Donatı Etkinlik Faktörü (u_z)

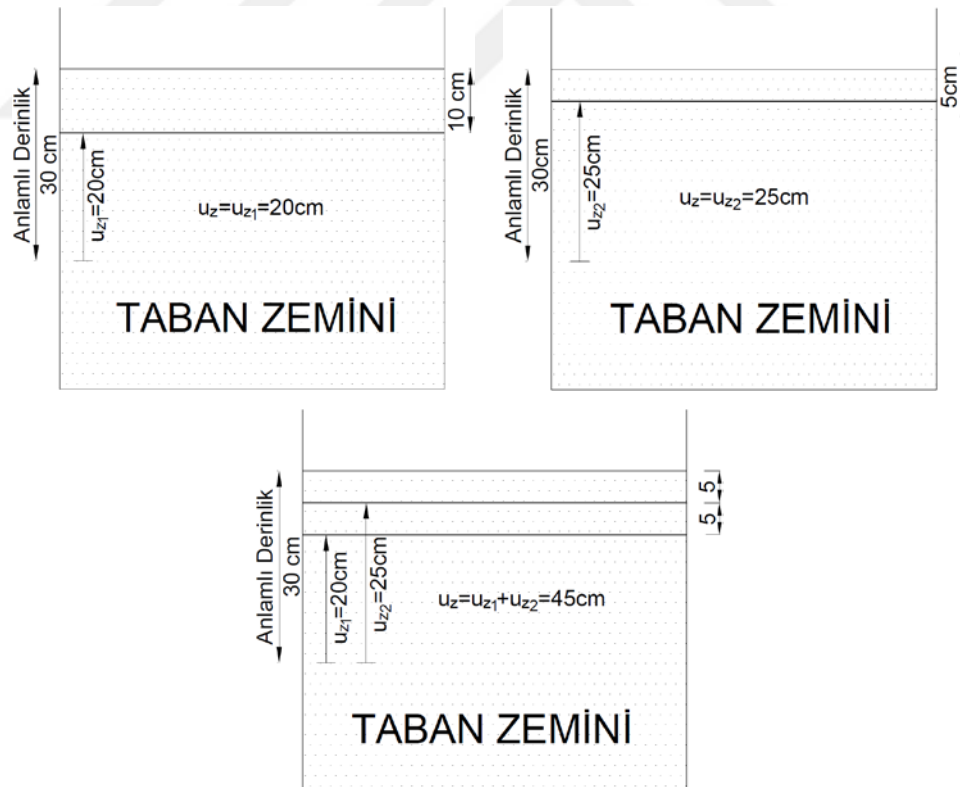
Geosentetik malzemeler, özellikle temelin altındaki zeminin yüksek gerilmelere maruz kaldığı bölgelerde oldukça etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu etkililik, temel altındaki gerilme bölgesinde en yüksek gerinimlerin oluşması ve bu sayede geosentetik malzemelerin zemin içindeki gerinim desenlerini etkili bir şekilde değiştirebilme potansiyeline sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Temel altındaki bu yüksek gerilme bölgesinin derinliği, kullanılan geosentetik malzeme türüne ve zeminin özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Boussinesq'in yarı sonsuz ortamda gerilme dağılımı üzerine yaptığı analizlere göre [83], yüzeye uygulanan düşey gerilmenin 1.0 temel çapı derinliğinde yaklaşık %28'e kadar azaldığı, 1.5 temel çapı derinliğinde ise bu değer %15'e düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, geosentetik malzemelerin etkinliğinin, temel çapının yaklaşık 1.5 katı olan bir derinlikten daha derinlerde azalma eğilimi gösterdiğini ortaya

koymaktadır. Bu nedenle, geosentetik malzemelerin derin uygulamalarda faydalarının sınırlı olabileceği ve etkinliklerinin bu derinlik eşiğinin altında daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır [84].

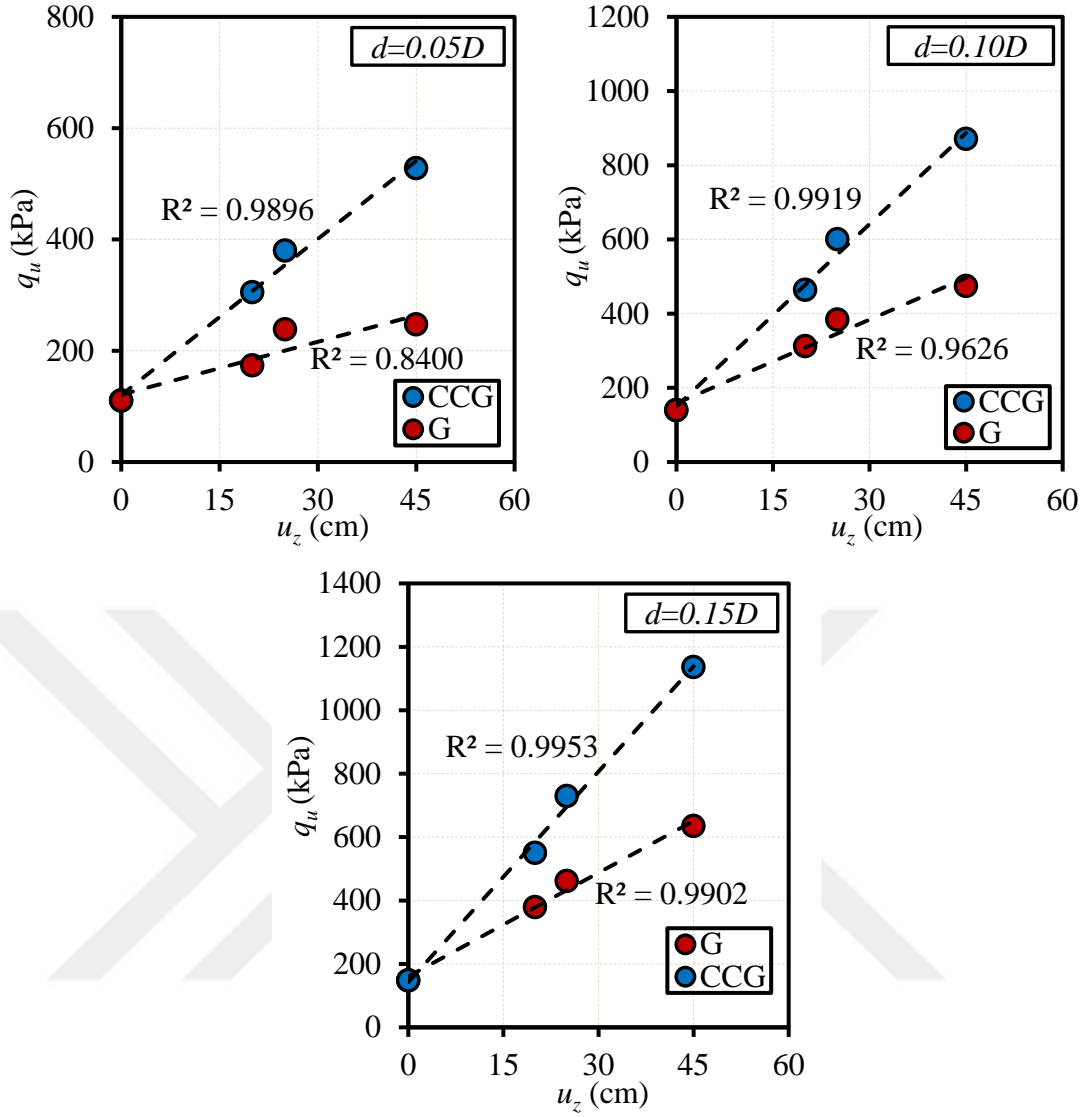
Bu bağlamda, mevcut çalışmada, temel çapının 1.5 katı olan anlamlı derinliğin altındaki toplam donatı mesafesini temsil eden ve "donatı etkinlik faktörü" olarak adlandırılan u_z parametresi tanımlanmıştır. Bu parametre, donatı malzemelerinin sayısı ve konumu ile nihai taşıma kapasitesi (q_u) arasındaki ilişkiyi kurmaya yönelik önemli bir araçtır. u_z , yüzeyden donatı derinliği, donatıların sayısı ve donatılar arasındaki düşey mesafelerin birleşik etkisini hesaba kattığı için, geosentetik malzemelerin performansını değerlendirmede kritik bir role sahiptir.

Mevcut çalışmadaki farklı donatı konfigürasyonları için u_z parametresinin hesaplanma yöntemi ve ayrıntılı açıklamaları Şekil 4.55.'te görselleştirilmiştir. Bu hesaplama yöntemi, farklı donatı yerleşimlerinin ve özelliklerinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.



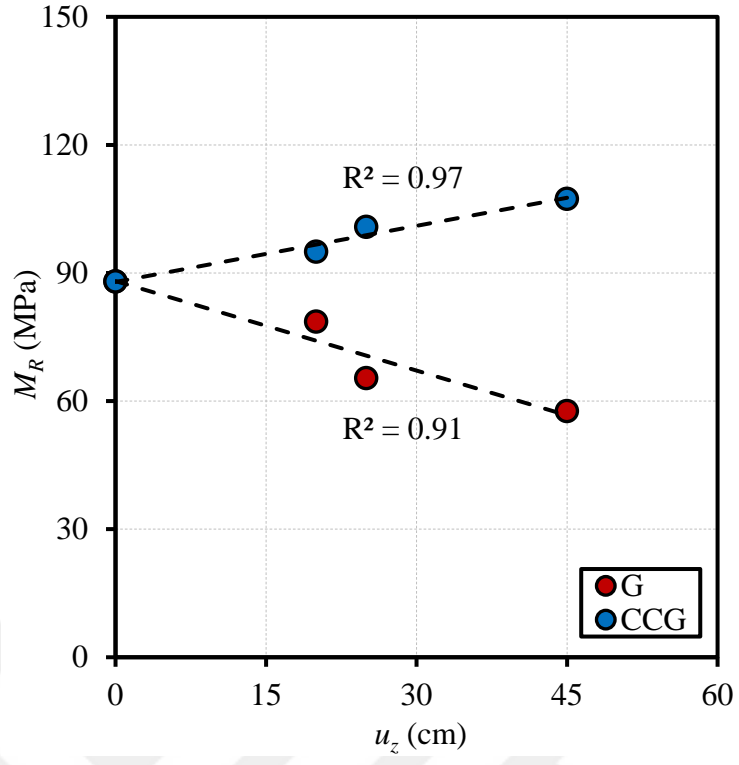
Şekil 4.55. u_z parametresinin hesaplanma yöntemi

Sonrasında, statik yükleme deneylerinden elde edilen $0.05D$, $0.10D$ ve $0.15D$ deformasyon değerlerindeki nihai taşıma kapasitesi (q_u) değerleri, donatısız, G donatılı ve CCG donatılı durumlar için u_z ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 4.56.). $0.05D$ deformasyon değerindeki q_u ile u_z arasındaki ilişki, sırasıyla CCG donatılı ve G donatılı durumlar için sırasıyla 0.99 ve 0.84 değerlerine sahip R^2 değerleriyle tatmin edici olarak kabul edilmiştir. Bu durum, her iki güçlendirme senaryosunda bu değişkenler arasında güçlü doğrusal ilişkiler olduğunu göstermektedir. $0.10D$ deformasyon değerindeki q_u ile u_z arasındaki ilişki, sırasıyla CCG donatılı ve G donatılı durumlar için sırasıyla 0.99 ve 0.96 değerlerine sahip R^2 değerleriyle tatmin edici olarak kabul edilmiştir. Bu durum, her iki güçlendirme senaryosunda bu değişkenler arasında güçlü doğrusal ilişkiler olduğunu göstermektedir. $0.15D$ deformasyon değerindeki q_u ile u_z arasındaki ilişki, sırasıyla CCG donatılı ve G donatılı durumlar için sırasıyla 1.00 ve 0.99 değerlerine sahip R^2 değerleriyle tatmin edici olarak kabul edilmiştir. Bu durum, her iki güçlendirme senaryosunda bu değişkenler arasında güçlü doğrusal ilişkiler olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.56. 0.05D, 0.10D ve 0.15D deformasyon değerleri için q_u ile u_z arasındaki ilişki

Ayrıca, tekrarlı yükleme deneylerinden belirlenen 5000 yük döngüsünün sonundaki M_R değerleri ile u_z parametresi arasındaki ilişki de incelenmiştir (Şekil 4.57.). 5000 yük döngüsünün sonundaki M_R değerleri ile u_z parametresi arasındaki ilişki, sırasıyla CCG donatılı ve G donatılı durumlar için sırasıyla 0.97 ve 0.91 değerlerine sahip R^2 değerleriyle tatmin edici olarak kabul edilmiştir. Bu ilişki, M_R ile u_z arasında güçlü bir bağlantı olduğunu ve bu faktörlerin birbiriyle yüksek derecede ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.57. 5000 yük döngüsü sonundaki M_R ile u_z arasındaki ilişki

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında, geotekstil (G) ve çimento ile kaplanmış geotekstilin (CCG), karayolu taban zemininin stabilizasyonundaki etkinliği kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, büyük ölçekli 7 adet statik yükleme deneyi ve 7 adet tekrarlı yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Büyük ölçekli statik yükleme deneylerinden elde edilen veriler, taban zeminlerinin yük-deformasyon davranışlarını, taşıma kapasitesindeki iyileştirme faktörünü (I_F) ve deformasyon değerindeki yüzdesel azalmayı (PRS) analiz etmek için kullanılmıştır. Bu analizler, donatılı ve donatısız taban zeminlerinin performanslarını detaylı bir şekilde karşılaştırmayı mümkün kılmıştır. Büyük ölçekli tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar ise taban zeminlerinin toplam, kalıcı ve elastik deformasyonları, esneklik modülü (M_R), elastik deformasyon yüzdesi, trafik fayda oranı (TBR) ve tekerlek izi azalma (RDR) oranı gibi parametreler açısından incelenmiştir. Bu parametreler, tekrarlı yükleme koşullarında taban zeminin davranışını anlamada kritik bilgiler sağlamıştır. Buna ek olarak, donatı malzemelerinin sayısı ve yerleşim konumları ile nihai taşıma kapasitesi (q_u) arasındaki ilişkiyi ifade eden yeni bir parametre olan "donatı etkinlik faktörü (u_z)" önerilmiştir. Bu parametre, donatıların taban zemini performansını iyileştirme üzerindeki etkilerini değerlendirme açısından yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

5.1 Büyük Ölçekli Statik Yükleme Deney Sonuçları

5.1.1 Donatının Taban Zemini Davranışına Etkisi

- Deney sonuçları, kum taban zeminlerinin taşıma kapasitelerini ve deformasyon performanslarını donatı eklenmesiyle önemli ölçüde iyileştirdiğini açıkça göstermiştir. Donatılı taban zeminlerinde, taşıma kapasitesinde sağlanan artış ve deformasyon kontrolündeki iyileşme, donatısız taban zeminiyle kıyaslandığında oldukça belirgindir. Özellikle CCG donatısı, deformasyon azaltma performansı ve yük taşıma kapasitesinde sağladığı etkiler açısından hem tek katmanlı hem de çok katmanlı G donatısına kıyasla daha yüksek performans sergilemiştir.

5.1.2 Deformasyon Seviyelerine Göre Yük Taşıma Kapasitesi (q_u)

Deneyle, deformasyon oranlarının sırasıyla $0.05D$, $0.10D$ ve $0.15D$ olarak ele alındığı üç temel yük taşıma kapasitesi senaryosunu değerlendirmiştir. Bu deformasyon oranları için elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Donatısız taban zeminlerinin yük taşıma kapasitesi, özellikle yüksek deformasyon oranlarında sınırlı kalmış ve düşük stabilite göstermiştir.

G donatılı zeminlerde, yük taşıma kapasitesindeki iyileşmeler şu şekilde rapor edilmiştir:

- S-G-5 taban zemini için 4 mm deformasyon değerinde, taşıma kapasitesi 1.74 katına, deformasyon 30mm'ye çıktığında ise 3.12 katına ulaşmıştır.
- S-G-10 taban zemininde, deformasyon seviyelerine bağlı olarak taşıma kapasitesi iyileştirme faktörünü (I_F) 4 mm deformasyon değerinde 1.05'ten deformasyon ilerledikçe 30 mm deformasyon değerinde 2.56'ya yükseltmiştir.
- Çok katmanlı bir düzenleme olan S-G-5-10 taban zemininde, 4 mm deformasyon seviyesinde I_F değerini 1.46'dan 30 mm deformasyon seviyesinde 4.30'a çıkararak tek katmanlı G donatılı düzenlemelere kıyasla daha etkili bir iyileşme sağlamıştır.

CCG donatılı zeminlerde ise çok daha çarpıcı sonuçlar elde edilmiştir:

- S-CCG-10 taban zemini, deformasyon seviyelerine bağlı olarak taşıma kapasitesini (I_F) 4 mm deformasyonda 2.48 seviyesine çıkarmış, deformasyonun 30 mm'ye ulaşmasıyla bu değer 3.72'ye kadar yükselmiştir.
- S-CCG-5 taban zemininde, taşıma kapasitesindeki iyileştirme (I_F) başlangıçta 3.03 seviyesindeyken, deformasyonun artmasıyla birlikte 4.94'e ulaşmıştır.
- Çift katmanlı bir düzenleme olan S-CCG-5-10 taban zemini, tüm taban zemini türleri arasında en yüksek taşıma kapasitesi iyileştirme faktörüne (I_F) ulaşmış ve deformasyon seviyesi 30 mm olduğunda bu değer 7.69 olarak ölçülmüştür.

5.1.3 Deformasyon Azaltma Performansı

Deformasyon kontrolündeki iyileşme, yüzdesel olarak ifade edilen *PRS* ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler, deformasyon seviyeleri arttıkça *PRS* değerlerinin de arttığını, ancak bu artışın donatının türüne ve düzenlemesine göre önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. G donatılı zeminlerde, *PRS* değerleri şu şekildedir:

- S-G-5 taban zemini, deformasyon seviyesi 4 mm olduğunda %47.00, deformasyon 24 mm'ye ulaştığında ise %77.50 bir *PRS* değeri göstermiştir.
- S-G-10 taban zemini, deformasyon seviyesi 4 mm iken %3.75 gibi düşük bir *PRS* değeri ile başlamış, ancak deformasyon ilerledikçe deformasyon seviyesi 24 mm değerine ulaşınca bu değer %65.50'ye kadar yükselmiştir.
- Çok katmanlı S-G-5-10 taban zemininde ise, deformasyon seviyesi 4 mm olduğunda %27.88, 24 mm deformasyonda ise %75.08 bir *PRS* değeri ile G donatılar arasında en iyi performansı sergilemiştir.

CCG donatılı zeminlerde ise *PRS* değerleri çok daha yüksek seviyelere ulaşmıştır:

- S-CCG-5 taban zemini, deformasyon seviyesi 4 mm iken %79.38 bir *PRS* değeri sağlamış, deformasyon 24 mm olduğunda ise bu değer %89.25 seviyesine yükselmiştir.
- S-CCG-10 taban zemini, deformasyon seviyesi 4 mm iken %68.93, 24 mm deformasyonda ise %85.92 *PRS* değeri ile stabil bir iyileşme göstermiştir.
- Çift katmanlı düzenleme olan S-CCG-5-10 taban zemini, 4 mm deformasyonda %81.50 *PRS* değeri ile başlamış ve deformasyonun 24 mm'ye ulaşmasıyla birlikte %92.69 *PRS* değeri ile tüm taban zeminleri arasında en yüksek iyileştirmeyi sağlamıştır.

5.1.4 Donatı Türü ve Konfigürasyonun Etkisi

Donatı türü ve konfigürasyonu, taban zemininin taşıma kapasitesi ve deformasyon azaltma performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmuştur. Özellikle çok katmanlı düzenlemeler, tek katmanlı düzenlemelere kıyasla daha yüksek performans sergilemiştir.

- G donatılı taban zeminlerinde, çok katmanlı düzenleme olan S-G-5-10 taban zemini, deformasyon ilerledikçe taşıma kapasitesinde (I_F) ve deformasyon azaltma performansında (PRS) tek katmanlı düzenlemelere göre daha yüksek değerler elde etmiştir.
- CCG donatılı zeminlerde, çift katmanlı düzenleme olan S-CCG-5-10 taban zemini, her iki parametrede de açık ara en yüksek performansı göstermiş ve özellikle ağır yükleme koşullarına sahip sistemler için en uygun donatı düzenlemesi olarak öne çıkmıştır.

5.1.5 Mekanizma ve Uygulamalar

CCG donatısının üstün performansı, taban zemini üzerindeki yüklerin etkin bir şekilde dağıtılmasını sağlayan çeşitli mekanizmalarla açıklanabilir. Bu mekanizmalar arasında membran etkisi, yanal sınırlama etkisi ve gerilme dağıtım etkisi önemli bir rol oynamaktadır. Membran etkisi, donatının deformasyon sırasında çekme kuvvetlerini karşılayarak taban zemininin stabilitesini artırmasına yardımcı olurken, yanal sınırlama etkisi zemin parçacıklarının yatay hareketini engelleyerek daha dayanıklı bir yapı oluşturulmasını sağlamaktadır. Gerilme dağıtım etkisi ise düşey yüklerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak zeminin yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Bu mekanizmalar, özellikle yol altyapısı, havaalanı pistleri ve diğer ağır yükleme koşullarına sahip mühendislik yapılarında CCG donatısının uygulanabilirliğini ön plana çıkarmaktadır.

Sonuç olarak, donatılı taban zeminleri hem taşıma kapasitesindeki iyileşme hem de deformasyon kontrolündeki başarı açısından donatısız taban zeminlerine göre büyük avantajlar sunmaktadır. Özellikle CCG donatılı taban zeminleri, tüm parametrelerde daha üstün bir performans sergilemiş ve en yüksek iyileştirme faktörleri ile deformasyon azaltma performansı değerlerini göstermiştir. Çift katmanlı S-CCG-5-10 düzenlemesi, zemin iyileştirme teknolojilerinde en etkili yöntemlerden biri olarak öne çıkmıştır.

5.2 Büyük Ölçekli Tekrarlı Yükleme Deney Sonuçları

5.2.1 Deformasyon Davranışı

- R-UR taban zemininde 5000 yük döngüsü sonunda elde edilen 71.65 mm kalıcı deformasyon, en yüksek deformasyon değeri olarak kaydedilmiştir, bu da bu taban zeminin en kötü performansı sergilediğini göstermektedir.
- R-CCG-10 taban zemini, R-G-10'a göre daha düşük deformasyon sağlamakta ve 5000 yük döngüsünde CCG kullanılan taban zeminlerinde deformasyonlar belirgin şekilde azalırken, CCG'nin taban zemini dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Örneğin, R-CCG-5 taban zemininde kalıcı deformasyon 38.76 mm iken, R-G-5 taban zemininde bu değer 52.18 mm'dir.
- Hem 50 mm hem de 100 mm derinliğe iki tabaka olarak yerleştirilen CCG, deformasyonları büyük ölçüde azaltarak, R-CCG-5-10 taban zemininde kalıcı deformasyonu 34.69 mm'ye düşürmüştür. R-G-5-10 taban zemininde ise bu değer 46.27 mm idi. Bu, CCG'nin taban zemini stabilizasyonunu artırmada önemli bir rol oynadığını gösteriyor.
- Tüm tekrarlı yükleme deneylerinde elastik deformasyonların genel eğilimi şu şekildedir. Yük döngü sayısı arttıkça elastik deformasyonlar azalır; bu, zemin davranışının zamanla daha stabil hale geldiğini ve elastik deformasyonların daha düşük seviyelere indiğini göstermektedir.
- R-UR deneyinde elastik deformasyon başlangıçta 1.85 mm iken, yük döngüleri arttıkça deney sonunda bu değer 1.50 mm'ye gerilemiştir, bu da elastik deformasyonların zamanla azaldığını göstermektedir.
- G kullanılan taban zeminlerinde deney sonundaki elastik deformasyonlar daha yüksektir; örneğin, R-G-5-10 deneyinde 2.10 mm, R-G-5 deneyinde 1.90 mm, ve R-G-10 deneyinde 1.75 mm elastik deformasyon gözlemlenmiştir.
- CCG kullanıldığında deney sonundaki elastik deformasyonlar belirgin şekilde azalmıştır; R-CCG-5-10 deneyinde 1.20 mm, R-CCG-5 deneyinde 1.35 mm, ve R-CCG-10 deneyinde 1.45 mm elastik deformasyon ölçülmüştür.
- CCG, elastik deformasyonları azaltarak G'ye göre daha verimli bir çözüm sunar ve zemin stabilitesini artırır, çünkü geotekstili çimento ile kaplama işlemi geotekstilin mukavemetini artırarak daha az deformasyona yol açar.

5.2.2 Esneklik Modülü (M_R)

- R-UR deneyinde, esneklik modülü başlangıçta yaklaşık 70 MPa iken, yük döngü sayısının artmasıyla deney sonunda 88 MPa değerine yükselmiştir, bu da taban zeminlerinin elastik özelliklerinin güçlendiğini ve daha dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.
- G donatısı kullanıldığında, esneklik modülü azalmıştır. En düşük esneklik modülü değeri R-G-5-10 deneyinde elde edilmiştir, bu da G malzemesinin elastik özellikleri zayıflattığını gösterir.
- CCG kullanıldığında esneklik modülü artmış, bu da çimento ile kaplanmış geotekstilin taban zeminlerinin elastik dayanımını artırdığını göstermektedir. En yüksek esneklik modülü R-CCG-5-10 deneyinde elde edilmiştir.
- Donatı türüne bağlı olarak esneklik modülünde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. G kullanımı esneklik modülünü düşürürken, CCG kullanımı elastik özellikleri artırmıştır. Bu, doğru donatı malzemesi seçiminin zemin performansını iyileştirebileceğini gösterir.

5.2.3 Elastik deformasyon Yüzdesi

- İlk yük döngülerinde kalıcı deformasyonlar daha baskındır, bu yüzden elastik deformasyon yüzdesi başlangıçta düşüktür. Ancak, yük döngülerinin ilerleyen aşamalarında kalıcı deformasyonların artış hızı azalır ve elastik deformasyonlar toplam deformasyonun büyük bir kısmını oluşturur.
- 25. yük döngüsüne kadar elastik deformasyon yüzdesinde hızlı bir artış gözlemlenmiştir. R-UR deneyinde elastik deformasyon yüzdesi %85.17'ye ulaşırken, diğer deneylerde bu değer sırasıyla %91.54 (R-G-10), %94.14 (R-G-5), %95.27 (R-G-5-10), %90.91 (R-CCG-10), %98.50 (R-CCG-5) ve %98.50 (R-CCG-5-10) olarak bulunmuştur.
- Yaklaşık 45. yük döngüsünden sonra, elastik deformasyon yüzdesi sabit bir orana yakınsamaya başlamıştır. Bu, zeminlerin ilk baştaki hızlı artışın ardından daha stabil bir elastik davranış sergilediğini göstermektedir.
- Donatılı taban zeminleri, donatısız taban zeminlerine kıyasla daha yüksek elastik deformasyon yüzdesi göstermektedir. Bu durum, donatının zeminlerin

elastik özelliklerini iyileştirerek daha sağlam ve esnek yapılar oluşturduğunu ve trafik yükleri altında daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

5.2.4 Tekerlek İzi Azalma Oranı (*RDR*)

- 5000 yük döngüsünün sonunda, farklı taban zeminlerinin *RDR* değerleri sırasıyla şu şekilde bulunmuştur: %53.31 (R-CCG-5-10), %47.74 (R-CCG-5), %35.42 (R-G-5-10), %29.99 (R-G-5), %21.98 (R-G-10), ve %18.14 (R-UR). Bu, güçlendirilmiş zeminlerin daha iyi performans gösterdiğini ve kalıcı deformasyonların azaltılmasında etkili olduğunu göstermektedir.
- CCG donatısının taban zeminlerini güçlendirmek için kullanılması, G donatısına kıyasla tekerlek izi azaltma konusunda daha iyi bir performans sergilemektedir. Bu bulgu, karayolu yapılarının dayanıklılığını artırma tasarımlarında önemli bir veri sunmaktadır.

5.2.5 Trafik Fayda Oranı (*TBR*)

- CCG ve G donatılı taban zeminlerinde hesaplanan *TBR* değerleri, kalıcı deformasyon seviyesi arttıkça yükselmiştir. Bu, donatılı zeminlerin daha uzun ömürlü olduğunu ve daha fazla kalıcı deformasyona dayanabileceğini göstermektedir.
- Özellikle R-CCG-5-10 ve R-CCG-5 taban zeminlerinde *TBR* değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. CCG'nin G'ye kıyasla daha yüksek kaplama ömrü sağladığı ve kalıcı deformasyon arttıkça daha az yıprandığı sonucuna varılmaktadır.

5.3 Donatı Etkinlik Faktörü (u_z)

Bu çalışmada, geosentetik malzemelerin etkinliğini daha iyi anlamak için "donatı etkinlik faktörü" (u_z) parametresi önerilmiştir. Bu parametre, donatı malzemelerinin sayısı, konumu ve taşıma kapasitesi arasındaki ilişkiyi temsil eder. Temel çapının 1.5 katı derinliğin altındaki donatıların etkinliği u_z ile değerlendirilir.

Statik yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- $0.05D$ deformasyon değerindeki taşıma kapasitesi (q_u) ile u_z arasındaki ilişki CCG donatılı ve G donatılı durumlar için sırasıyla $R^2=0.99$ ve $R^2=0.84$ değerleriyle güçlü doğrusal bir ilişki göstermiştir.
- $0.10D$ deformasyon değerindeki q_u ile u_z arasındaki ilişki CCG ve G donatılı durumlar için sırasıyla $R^2=0.99$ ve $R^2=0.96$ değerleriyle tatmin edici bir doğrusal ilişki göstermiştir.
- $0.15D$ deformasyon değerindeki q_u ile u_z arasındaki ilişki ise sırasıyla $R^2=1.00$ ve $R^2=0.99$ değerleriyle mükemmel bir doğrusal ilişki sunmuştur.

Tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen 5000 yük döngüsü sonundaki M_R değerleriyle u_z parametresinin arasındaki ilişki sonuçları aşağıdaki gibidir:

- CCG ve G donatılı durumlar için sırasıyla $R^2=0.97$ ve $R^2=0.91$ değerleri elde edilmiştir. Bu, M_R ile u_z arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve bu faktörlerin birbiriyle yüksek derecede bağlantılı olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] Dash, S.K., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R., Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations, *Geosynthetics International*, 11(1), 35-42, 2004.
- [3] 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*, 22 (2), 181–191, 2021.
- [4] Hegde, A., & Sitharam, T. G., Behaviour of geocell reinforced soft clay bed subjected to incremental cyclic loading, *Geomechanics and Engineering*, 10(4), 405-422, 2016.
- [5] Mamatha, K.H., Dinesh, S. V., Performance evaluation of geocell-reinforced pavements, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13 (3), 277–286, 2019.
- [6] Mehrjardi, G. T., Khazaei, M., Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6), 603-615, 2017.
- [7] Nair, A.M., Latha, G.M., Repeated load tests on geosynthetic reinforced unpaved road sections, *Geomechanics and Geoengineering*, 11 (2), 95–103, 2016.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] Qian, Y., Han, J., Pokharel, S.K., Parsons, R.L., Determination of Resilient Modulus of Subgrade Using Cyclic Plate Loading Tests, *Geo-Frontiers*, 4743–4751, 2011.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Tafreshi, S.N.M., Khalaj, O., Dawson, A.R., Repeated loading of soil containing granulated rubber and multiple geocell layers, *Geotextiles and Geomembranes*, 42 (1), 25–38, 2014.
- [14] Zhang, L., Zhao, M., Shi, C., Zhao, H., Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (5), 475–482, 2010.
- [15] Ming-Hua, Z., Ling, Z., Xin-Jun, Z., Research progress in two-direction reinforced composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles, *China Journal of Highway and Transport*, 22(1), 1-10, 2009.
- [16] Yakup Önal, Geosentetiklerle güçlendirilmiş karayolu temel tabakasının davranışının tekrarlı yükler altında incelenmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi*, Osmaniye, 2021.
- [17] Eltarabily, M. G., Moghazy, H. E., Negm, A. M., Assessment of slope instability of canal with standard incoat concrete-filled geotextile mattresses lining, *Alexandria Engineering Journal*, 58(4), 1385-1397, 2019.

- [18] Nasiri, M., Hajiazizi, M., An experimental and numerical investigation of reinforced slope using geotextile encased stone column, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(5), 543-552, 2021.
- [19] Sharma, P., Mouli, B., Jakka, R. S., Sawant, V. A., Economical design of reinforced slope using geosynthetics, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 1631-1637, 2020.
- [20] Melo, M. T. S., Palmeira, E. M., Santos, E. C. G., da Luz, M. P., Geosynthetic performance against slope erosion caused by high intensity rainfall, *Geosynthetics International*, 28(4), 421-434, 2021.
- [21] Song, X., Huang, M., He, S., Song, G., Shen, R., Huang, P., Zhang, G., Erosion control treatment using geocell and wheat straw for slope protection, *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 5553221, 2021.
- [22] Song, G., He, S., Song, X., Duan, Z., Zhang, Y., Kong, D., Huang, M., The use of geocell as soil stabilization and soil erosion countermeasures, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2155-2169, 2021.
- [23] Portelinha, F. H. M., Bueno, B. D. S., Zornberg, J. G., Performance of nonwoven geotextile-reinforced walls under wetting conditions: laboratory and field investigations, *Geosynthetics International*, 20(2), 90-104, 2013.
- [24] Portelinha, F. H. M., Zornberg, J. G., Pimentel, V., Field performance of retaining walls reinforced with woven and nonwoven geotextiles, *Geosynthetics International*, 21(4), 270-284, 2014.
- [25] Altay, G., Kayadelen, C., Canakci, H., Bagriacik, B., Ok, B., Oguzhanoglu, M. A., Experimental investigation of deformation behavior of geocell retaining walls, *Geomechanics and Engineering*, 27(5), 419-431, 2021.
- [26] Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S.M., Brönnimann, R., Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade, *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (1), 21–37, 2006.

- [27] Leshchinsky, B., Ling, H.I., Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement, *Geotextiles and Geomembranes*, 36 33–43, 2013.
- [28] Tanyu, B.F., Aydilek, A.H., Lau, A.W., Edil, T.B., Benson, C.H., Laboratory evaluation of geocell-reinforced gravel subbase over poor subgrades, 20 (2), 47–61, 2015.
- [29] Chen, R. H., Huang, Y. W., Huang, F. C., Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression, *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 35-44, 2013.
- [30] Saride, S., Pradhan, S., Sitharam, T. G., Puppala, A. J., Numerical analysis of geocell reinforced ballast overlying soft clay subgrade, *Geomechanics & engineering*, 5(3), 263-281, 2013.
- [31] Patra, C. R., Das, B. M., Atalar, C., Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(5), 454-462, 2005.
- [32] Ghosh, A., Ghosh, A., Bera, A.K., Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2), 144-173, 2005.
- [33] Yoon, Y. W., Cheon, S. H., Kang, D. S., Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands, *Geotextiles and Geomembranes*, 22(5), 439-453, 2004.
- [34] Bathurst, R.J., Nernheim, A., Walters, D.L., Allen, T.M., Burgess, P., Saunders, D.D., Influence of reinforcement stiffness and compaction on the performance of four geosynthetic-reinforced soil walls, *Geosynthetics International*, 16 (1), 43–59, 2015.
- [35] Collin, J.G., Kinney, T.C., Fu, X., Full scale highway load test of flexible pavement systems with Geogrid reinforced base courses, *Geosynthetics International*, 3 (4), 537–549, 1996.

- [36] Astaraki, F., Esmaceli, M., Reza Roozbini, M., Influence of geocell on bearing capacity and settlement of railway embankments, an experimental study, *Geomechanics and Geoengineering*, 1–17, 2020.
- [37] 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.
- [38] Giroud, J.P., Han, J., Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. II. Calibration and Applications, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (8), 787–797, 2004.
- [39] Palmeira, E.M., Antunes, L.G.S., Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance, *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (6), 547–558, 2010.
- [40] 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.
- [41] Suku, L., Prabhu, S. S., Ramesh, P., Babu, G. S., Behavior of geocell-reinforced granular base under repeated loading, *Transportation Geotechnics*, 9, 17-30, 2016.
- [42] Ouria, A., Mahmoudi, A., Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface, *Geotextiles and Geomembranes*, 46 (1), 29–39, 2018.
- [43] Jongvivatsakul, P., Ramdit, T., Ngo, T.P., Likitlersuang, S., Experimental investigation on mechanical properties of geosynthetic cementitious composite mat (GCCM), *Construction and Building Materials*, 166 956–965, 2018.
- [44] Ebadi, M., Habibagahi, G., Hataf, N., Effect of cement treatment on soil-non woven geotextile interface, *Scientia Iranica*, 22(1), 69-80, 2015.
- [45] Ouria, A., Karamzadegan, S., Emami, S., Interface properties of a cement coated geocomposite, *Construction and Building Materials*, 266 121014, 2021.

- [46] Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahmi, I., Behavior of Geocell-Reinforced Granular Bases under Static and Repeated Loads, In Contemporary topics in ground modification, problem soils, and geo-support 409–416, 2009.
- [47] Tafreshi, S.N.M., Dawson, A.R., Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading - Comparing use of 3D and planar geotextile, Geotextiles and Geomembranes, 28 (5), 434–447, 2010.
- [48] Pokharel, S., Han, J., Manandhar, C., Yang, X., Leshchinsky, D., Halahmi, I., Parsons, R., Accelerated pavement testing of geocell-reinforced unpaved roads over weak subgrade, Transportation Research Record, (2204), 67–75, 2011.
- [49] Han, J., Pokharel, S.K., Yang, X., Manandhar, C., Leshchinsky, D., Halahmi, I., Parsons, R.L., Performance of Geocell-Reinforced RAP Bases over Weak Subgrade under Full-Scale Moving Wheel Loads, Journal of Materials in Civil Engineering, 23 (11), 1525–1534, 2011.
- [50] Qian, Y., Han, J., Pokharel, S. K., Parsons, R. L., Stress analysis on triangular-aperture geogrid-reinforced bases over weak subgrade under cyclic loading: An experimental study, Transportation Research Record, 2204(1), 83-91, 2011.
- [51] Sun, X., Han, J., Kwon, J., Parsons, R.L., Wayne, M.H., Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved roads under cyclic plate loading tests, Geotextiles and Geomembranes, 43 (5), 440–449, 2015.
- [52] Khalaj, O., Moghaddas Tafreshi, S.N., Mašek, 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.
- [53] Wu, H., Huang, B., Shu, X., Zhao, S., Evaluation of geogrid reinforcement effects on unbound granular pavement base courses using loaded wheel tester, Geotextiles and Geomembranes, 43 (5), 462–469, 2015.

- [54] 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 (1), 21–38, 2019.
- [55] Rayabharapu, V.K., Saride, S., Geocell reinforced dense sand bases overlying weak sand sub-grades under repeated loading, Springer Singapore 2019.
- [56] George, A.M., Banerjee, A., Taylor, T., Puppala, A.J., Large-Scale Experimental Studies to Evaluate the Resilient Modulus of Geocell-Reinforced Reclaimed Asphalt Pavement Bases, *Geosynthetics*, 37 (2), 30–39, 2019.
- [57] Tavakoli Mehrjardi, G., Azizi, A., Haji-Azizi, A., Asdollafardi, G., Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction, *Transportation Geotechnics*, 100349, 2020.
- [58] Altay, G., Geocell kullanılarak oluşturulan dayanma duvarlarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Osmaniye, 2019.
- [59] TS 1500, İnşaat Mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, Türk Standartları Enstitüsü, 2000.
- [60] Pokharel, S., Han, J., Manandhar, C., Yang, X., Leshchinsky, D., Halahmi, I., Parsons, R., Accelerated pavement testing of geocell-reinforced unpaved roads over weak subgrade, *Transportation Research Record*, (2204), 67–75, 2011.
- [61] Han, J., Pokharel, S.K., Yang, X., Manandhar, C., Leshchinsky, D., Halahmi, I., Parsons, R.L., Performance of Geocell-Reinforced RAP Bases over Weak Subgrade under Full-Scale Moving Wheel Loads, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (11), 1525–1534, 2011.
- [62] Kumar, V.V., Saride, S., Zornberg, J.G., Mechanical response of full-scale geosynthetic-reinforced asphalt overlays subjected to repeated loads, *Transportation Geotechnics*, 30 (July), 100617, 2021.

- [63] Palmeira, E.M., Antunes, L.G.S., Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance, *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (6), 547–558, 2010.
- [64] TS 1900-2, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-Bölüm 2, Mekanik özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, 2006.
- [65] TS EN 196-1, Çimento deney metotları- Bölüm 1, Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 2016.
- [66] Kaplan, E., Kayadelen, C., Öztürk, M., Önal, Y., Altay, G., Experimental evaluation of the usability of palm tree pruning waste (PTPW) as an alternative to geotextile, *Revista de la Construcción*, 21 (1), 69–82, 2022.
- [67] Önal, Y., Çalışıcı, M., Kayadelen, C., Altay, G., A comparative experimental study of geocell and geogrid-reinforced highway base layers under repeated loads, *Road Materials and Pavement Design*, 24(12), 2877-2892, 2023.
- [68] Öztürk, M., Altay, G., Kayadelen, C., Assessment of the utilization of cement-treated geotextile as a reinforcement element for highway base layer under cyclic loading, *Transportation Geotechnics*, 48, 101333, 2024.
- [69] Örnek, M., Yumuşak Kil Zeminlerin Geogridle Güçlendirilmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 2009.
- [70] Lutenecker, A., Adams, M., Bearing Capacity of Footings on Compacted Sand, *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 1216-1224, 09-12 Mart 1998.
- [71] Keskin, M.S., Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 2009.
- [72] Trautmann, C. H., Kulhawy, F. H., Uplift load-displacement behavior of spread foundations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(2), 168-184, 1988.

- [73] De Beer, E. E., Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand, *Geotechnique*, 20(4), 387-411, 1970.
- [74] Tafreshi, S. M., Dawson, A. R., Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), 72-84, 2010.
- [75] Ceylan Bora, N., Kayadelen, C., Altay, G., Önal, Y., Öztürk, M., Comparative effectiveness research of palm tree pruning waste and geotextiles on subgrade stabilization, *Gravevinar*, 74(10), 829-839, 2022.
- [76] Carneiro, J. R., Escórcio, F., & de Lurdes Lopes, M. (2019). Resistance of Geotextiles Against the Isolated and Combined Effect of Mechanical Damage Under Repeated Loading and Abrasion. In *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 2: Towards a Sustainable Geoenvironment 8th* (pp. 700-707). Springer Singapore.
- [77] Carneiro, J. R., Almeida, F., Carvalho, F., Lopes, M. D. L., Tensile and tearing properties of a geocomposite mechanically damaged by repeated loading and abrasion, *Materials*, 16(21), 7047, 2023.
- [78] Carlos, D. M., Carneiro, J. R., Lopes, M. D. L., Effect of different aggregates on the mechanical damage suffered by geotextiles, *Materials*, 12(24), 4229, 2019.
- [79] Öztürk, M., Altay, G., Kayadelen, C., Assessment of the utilization of cement-treated geotextile as a reinforcement element for highway base layer under cyclic loading, *Transportation Geotechnics*, 48, 101333, 2024.
- [80] Süt Ünver, İ., Static and cyclic properties of expansive clays treated with lime and fly ash with special reference to swelling and resilient moduli, *İstanbul Technical University*, 2018.
- [81] Qian, Y., Han, J., Pokharel, S.K., Parsons, R.L., Determination of Resilient Modulus of Subgrade Using Cyclic Plate Loading Tests, *Geo-Frontiers*, 4743–4751, 2011.

- [82] Ahlvin, R.G., Ulery, H.H., Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space, Highway Research Board Bulletin, (342), 1962.
- [83] Boussinesq, J., Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Gauthier-Villars, 1885.
- [84] Tafreshi, S. M., Sharifi, P., Dawson, A. R., Performance of circular footings on sand by use of multiple-geocell or-planar geotextile reinforcing layers, Soils and Foundations, 56(6), 984-997, 2016.



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
Doktora	İnşaat Müh.	Osmaniye Korkut Ata Üni.	2025

5. Akademik Ünvanlar:

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

6. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Arş. Gör.	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2019

7. Yazılan Uluslararası Kitaplar veya Kitaplarda Bölümler:

8. Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

- [1] Kayadelen Cafer, Altay Gökhan, Önal Yakup, Öztürk Mitat (2024). Particle Shape Effect on Interfacial Properties Between Granular Materials and Geotextile. Geosynthetics International, 31(3), 345-357., Doi: 10.1680/jgein.22.00346
- [2] Kayadelen Cafer, Altay Gökhan, Öztürk Mitat, Önal Yakup (2023). Experimental evaluation of the pull-out behavior of suction caissons in saturated sand soil. Ocean Engineering, 286, 115609, Doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115609
- [3] Serin Sercan, Önal Yakup, Emiroğlu Mehmet, Demir Eren (2023). Comparison of the effect of basalt and glass fibers on the fracture energy of asphalt mixes using semi-circular bending test. Construction and Building Materials, 406, 133460, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133460
- [4] Kayadelen Cafer, Önal Yakup, Altay Gökhan, Öztürk Mitat, Serin Sercan (2023). Effects of Maintenance, Traffic and Climate Condition on International

Roughness Index of Flexible Pavement. International Journal of Pavement Engineering, 1-13., Doi:10.1080/10298436.2022.2038382

[5] Serin Sercan, Önal Yakup, Kayadelen Cafer, Morova Nihat (2023). Utilization of Recyclable Concrete and Ceramic Waste as Filling Material in Hot Mix Asphalt. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 67(3), 846-854., Doi: 10.3311/PPci.21352

[6] Önal Yakup, Çalışıcı Mustafa, Kayadelen Cafer, Altay Gökhan (2023). A comparative experimental study of geocell and geogrid-reinforced highway base layers under repeated loads. Road Materials and Pavement Design, 24(12), 2877-2892., Doi: 10.1080/14680629.2023.2182126

[] Bora Necla Ceylan, Kayadelen Cafer, Altay Gökhan, Önal Yakup, Öztürk Mitat (2022). Comparative Effectiveness Research of Palm Tree Pruning Waste and Geotextiles on Subgrade Stabilization. Gradevinar, 74(10), 829-838., Doi: 10.14256/JCE.3401.2021

[8] Kaplan Ebubekir, Kayadelen Cafer, Öztürk Mitat, Önal Yakup, Altay Gökhan (2022). Experimental Evaluation of the Usability of Palm Tree Pruning Waste (PTPW) as An Alternative to Geotextile. Revista de la construcción, 21(1), 69-82., Doi:10.7764/RDLC.21.1.69

[9] Kayadelen Cafer, Altay Gökhan, Önal Suat, Önal Yakup (2022). Sequential minimal optimization for local scour around bridge piers. Marine Georesources & Geotechnology, 40(4), 462-472., Doi: 10.1080/1064119X.2021.1907635

[10] Kayadelen Cafer, Altay Gökhan, Önal Yakup (2022). Numerical simulation and novel methodology on resilient modulus for traffic loading on road embankment. International Journal of Pavement Engineering, 23(9), 3212-3221., Doi: 10.1080/10298436.2021.1886296

9. Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

[1] Öztürk Mitat, Kayadelen Cafer, Altay Gökhan, Önal Yakup (2023). Investigation of load-displacement behavior of cement-coated geotextile reinforced sandy soils. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(4), 1232-1238.

[2] Serin Sercan, Önal Yakup, Kayadelen Cafer, Mutlu Muhammet Fatih (2023). Forgiving Road Design and Improvement of Accident Black Spots: A Case Study for Düzce City. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(Ek Sayı), 105-118., Doi: 10.47495/okufbed.1184457

[3] Önal Yakup, Öztürk Mitat, Altay Gökhan, Kayadelen Cafer (2022). Comparison of the Effect of Geotextile and Palm Tree Pruning Waste on CBR Value of Sand Soil. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 570-579., Doi: 10.47495/okufbed.998633

10. Ulusal Bilimsel Toplantılarda Yayınlanmış Bildiriler:

11. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Yayınlanmış Bildiriler:

[1] Önal Yakup, Bayrak Fethiye, Balcı Furkan Emin, Kayadelen Cafer, Altay Gökhan. Evaluation of The Impact of Bitumen-Coated Geotextile on CBR Value of Sand Soil. 3th International Korkut Ata Scientific Research Conference, Kasım 22-24, 2024, 296-304.

[2] Önal Yakup, Balcı Furkan Emin, Bayrak Fethiye, Kayadelen Cafer, Altay Gökhan. Investigation of Interfacial Shear Behavior of Bitumen-Coated Geotextile-Reinforced Sand Soil. 3th International Korkut Ata Scientific Research Conference, Kasım 22-24, 2024, 541-551.

[3] Öztürk Mitat, Önal Yakup, Ok Bahadır, Altay Gökhan, Beycioğlu Ahmet, Keskin Ali. Load-displacement Behavior of Serpentine and Olivine Obtained as Waste from the Mines. *International Conference on Engineering, Natural and Applied Science 2021 (ICENAS'21)*, 166-173.

12. Diğer Yayınlar:

13. Projeler:

14. Bilimsel Kuruluşlara Üyelikler:

15. Ödüller:



T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ÇALIŞMASI BENZERLİK RAPORU FORMU
(SAVUNMA SONRASI)

FORM DR-34

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ

Adı ve Soyadı	Yakup ÖNAL
Öğrenci Numarası	2112707301
Ana Bilim/ Ana Sanat Dalı	İnşaat Mühendisliği
Danışman Unvanı, Adı-Soyadı	Prof. Dr. Cafer KAYADELEN
Tez Başlığı (Türkçe)	ÇİMENTO KAPLANMIŞ GEOTEKSTİL İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KARAYOLU TABAN ZEMİNİNİN STATİK VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Özet ve Abstract c) Giriş, d) Ana bölümler, e) Sonuç ve f) Kaynakça kısımlarından oluşan toplam **125** sayfalık kısmına ilişkin, 15/01/2025 tarihinde Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 4 'tür.

Filtreleme Tip 1 (maksimum %30)

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç,
- 3- Alıntılar dâhil.

Filtreleme Tip 2 (maksimum %10)

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

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Çalışması Benzerlik 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.

15/01/2025

Yakup ÖNAL

Danışman Onayı
UYGUNDUR

Prof. Dr. Cafer KAYADELEN
(İmzası)

Enstitü Onayı
UYGUNDUR

Öğr. Gör. İlkay AĞIR
(İmzası)

AÇIKLAMALAR

1. Lisansüstü tezler, savunma öncesinde benzerlik raporu ile birlikte Enstitüye teslim edilir.
2. Benzerlik raporu ile ilgili olarak etik kurallar dâhilindeki benzerlik oranları ilgili Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenir. (Enstitü Yönetim Kurulu tarafından tezin, intihal kapsamı dışında değerlendirilmesi için TURNITIN'den alınan raporda "benzerlik oranı"nın, "alıntılar hariç" en fazla %10, "alıntılar dahil" % 30'u geçmemesi şeklinde kabul edilmiştir).

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

80000 Osmaniye / TÜRKİYE

<http://osmaniye.edu.tr/lisansustu>

Tel: +90 328 827 10 00/4107-4006

E-Posta: lisansustu@osmaniye.edu.tr