

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KARAYOLU TEMEL TABAKALARINDA SIKIŞMA KONTROLÜ İÇİN LWD
YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN SPSS ANALİZİYLE
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS

Divine IRIBAGIZA

ŞUBAT-2025
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KARAYOLU TEMEL TABAKALARINDA SIKIŞMA KONTROLÜ İÇİN LWD
YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN SPSS ANALİZİYLE
ARAŞTIRILMASI**

**ASSESSING THE RELIABILITY OF THE LIGHTWEIGHT
DEFLECTOMETER METHOD FOR COMPACTION CONTROL IN
HIGHWAY BASE LAYERS THROUGH SPSS ANALYSIS**

YÜKSEK LİSANS

Divine IRIBAGIZA

**ŞUBAT-2025
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KARAYOLU TEMEL TABAKALARINDA SIKIŞMA KONTROLÜ İÇİN LWD
YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN SPSS ANALİZİYLE
ARAŞTIRILMASI**

**ASSESSING THE RELIABILITY OF THE LIGHTWEIGHT
DEFLECTOMETER METHOD FOR COMPACTION CONTROL IN
HIGHWAY BASE LAYERS THROUGH SPSS ANALYSIS**

YÜKSEK LİSANS

Divine IRIBAGIZA

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Tevfik SEFEROĞLU

**ŞUBAT-2025
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Karayolu Temel Tabakalarında Sıkışma Kontrolü İçin Lwd Yönteminin Kullanılabilirliğinin Spss Analiziyle Araştırılması**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

03/02/2025

.....
Divine IRIBAGIZA

TEŞEKKÜR

Bu tezin yazımı boyunca ve tüm iki yılım boyunca çok fazla destek ve yardım aldım, ancak ALLAH olmadan bu kadar ileri gidemezdim, minnettarım.

Öncelikle tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Tefik SEFEROĞLU'na ve tezimin arazi verilerini temin eden Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR yürütücülüğündeki proje ekibine ve bu projenin destekçisi Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge birimi çalışanlarına teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Anlayışlı geri bildirimleri ve çalışmalarımı daha yüksek bir seviyeye getirdikleri için yüksek lisans programı boyunca inşaat mühendisliği bölümünde ders aldığım öğretmenlerime minnettarım.

Bilge öğütleri ve anlayışlı kulakları için babam, annem ve kardeşlerime sonsuz şükranlarımı sunarım. Onlar her zaman benim yanımdalar.

Okulum Gümüşhane Üniversitesi'ne zihnimi şekillendirdiği ve kariyerimde en iyi olmak için ihtiyacım olan bilgiyi bana verdiği için teşekkür etmek istiyorum. Ayrıca meslektaşlarıma da işbirlikleri için minnettarım. Hasta desteği ve araştırmamı ilerletmek için bana verilen tüm fırsatlar için minnettarım, ayrıca doğru yönü seçmem ve tezimi başarıyla tamamlamam için gereken araçlar da sağlandı.

Son olarak, uluslararası ofise, özellikle de Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AYYILDIZ ve Öğr. Gör. Mesut TOPRAK olmak üzere uluslararası ofise ve araştırmamın dışında zihnimi dinlendirmek için uyarıcı tartışmalar ve mutlu oyalanmalar sağlayan arkadaşlarıma, aileme ve sınıf arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Divine IRIBAGIZA
GÜMÜŞHANE –2025

ÖZET

Düşen Ağırlıklı Hafif Deflektometre (LWD), alt zemin, bağlanmamış ve granüler tabakaların ve dolgu malzemelerinin taşıma kapasitesini ölçmek için kullanılan taşınabilir bir cihazdır. Yol inşaatı ve bakım projelerinde, doğru ve güvenilir zemin sıkıştırma değerlendirmeleri kritik öneme sahiptir. Mevcut teknikler arasında LWD, taşınabilirlik, kolaylık ve kullanım kolaylığı nedeniyle öne çıkmakta ancak Nükleer Yoğunluk Ölçer (NDG) ve Kum Konisi (SC) yöntemleri gibi yerleşik yöntemlerle karşılaştırıldığında güvenilirliği devam eden bir araştırma konusu olmayı sürdürmektedir. Bu çalışma, LWD, NDG ve SC yöntemlerinin kapsamlı bir karşılaştırmalı analizini yaparak bu boşluğu giderme amacını taşımaktadır. Gümüşhane'deki bir yol inşaatı projesi boyunca her bir noktanın her üç yönteme de tabi tutulduğu 15 noktadan veri toplanmış, toplanan veriler, zemin sıkışma değerlendirmesinde LWD'nin tutarlılığını, doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için Sosyal Bilimler İstatistik Paketi (SPSS) kullanılarak işlenmiş ve regresyon, korelasyon, ANOVA, faktör analizi ve T-Test yöntemleriyle analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, bu farklı tekniklerden elde edilen sonuçlar arasındaki tutarsızlıklar veya korelasyonlar araştırılmıştır.

Bu araştırmanın bulguları yol inşaatındaki zemin sıkışması değerlendirme uygulamaları için önemli çıkarımlara sahiptir. LWD sertliği ve yoğunluğa bağlı parametreler arasında gözlemlenen zayıf korelasyonlar, LWD'ye bağımsız bir araç olarak güvenmek yerine tamamlayıcı kullanıma olan ihtiyacı vurgulamaktadır. LWD'den elde edilen sertlik verilerinin NDG veya SC'den alınan yoğunluk ve nem ölçümleriyle birleştirilmesi, sıkıştırma kalitesine ilişkin daha kapsamlı bir değerlendirme sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu araştırma, zemin sıkışma değerlendirme tekniklerinin anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve inşaat mühendisliği ve altyapı geliştirme alanındaki karar vericiler için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Düşen ağırlıklı hafif deflektometre (LWD), Nükleer yoğunluk, Kum konisi, Güvenilirlik, SPSS, Temel tabakası, Sıkıştırma kontrolü

SUMMARY

Lightweight Deflectometer (LWD) is a portable device used to measure the load-bearing capacity of subgrades, unbound and granular layers, and backfill materials. Accurate and reliable soil compaction assessments are critical in road construction and maintenance projects. Among the existing techniques, LWD stands out for its portability, convenience, and ease of use. However, its reliability remains a topic of ongoing research compared to established methods like the Nuclear Density Gauge (NDG) and Sand Cone (SC) methods. This study aims to fill this gap by conducting a comprehensive comparative analysis of the LWD, NDG, and SC methods. Data were collected from 15 points where each point was subjected to all three methods along a road construction project in Gümüşhane. The collected data were processed using the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) to evaluate the consistency, accuracy, and reliability of LWD in soil compaction assessment and analyzed using regression, correlation, ANOVA, factor analysis, and T-Test methods. The study investigated inconsistencies or correlations among the results obtained from these different techniques.

The findings of this research have significant implications for soil compaction evaluation practices in road construction. Weak correlations observed between LWD stiffness and density-dependent parameters highlight the need for complementary use rather than relying solely on LWD as an independent tool. Combining the stiffness data from LWD with density and moisture measurements from NDG or SC would provide a more comprehensive assessment of compaction quality.

In conclusion, this research contributes to the understanding of soil compaction evaluation techniques and provides valuable insights for decision-makers in civil engineering and infrastructure development.

Keywords: Lightweight deflectometer (LWD), Nuclear density, Sand cone, Reliability, SPSS, Base layer, Compaction control.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1.GENEL BİLGİLER	1
1.1.Giriş	1
1.2.Literatür Taraması	3
1.2.1.SPSS'in İnşaat Sektöründe Kullanımı	11
1.3.Yol İnşaatı ve Sıkıştırma Kontrol Teknikleri	13
1.3.1.Nükleer Yoğunluk Ölçer (NDG).....	14
1.3.2.Kum Konisi Testi (SC)	15
1.3.3.LWD'nin Geleneksel Yöntemlere Göre Avantajları	15
1.3.4.LWD'nin Sınırlamaları	16
1.3.5.Otoyol Taban Katmanını Sıkıştırmasında LWD	16
1.3.6.Küresel Altyapı Geliştirmede LWD'nin Rolü	16
1.4.Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	17
2.MATERYAL VE YÖNTEM	19
2.1. Arazi Çalışmaları	19
2.2. SPSS Analizleri	23
3.BULGULAR ve İRDELEME	27
3.1. Araziden Elde Edilen Veriler	27
3.2. SPSS Analiz Bulguları	33
3.2.1. Korelasyon ve regresyon.....	34
3.2.2. ANOVA test.....	44
3.2.3. T-TEST	46
3.2.4. Güvenilirlik İstatistikleri (Cronbach's Alpha)	48
3.2.5. Faktör analizi.....	49

3.3. Bulguların Literatürle Kıyaslanması	52
3.3.1. Yüzey Sertliği ve Sıkıştırma Yoğunluğu	54
3.3.2. Derinlik Değişimleri ve Ölçüm Sınırlamaları	57
3.3.3. Kum Konisi Yöntemi ile Karşılaştırma	57
3.3.4. Bulguların Özeti	57
4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKÇA.....	61
ÖZGEÇMİŞ	65



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. LWD testi örneği (Siddiki, 2012)	8
Tablo 2. LWD'den toplanan veriler.....	27
Tablo 3. NDG'den toplanan veriler	30
Tablo 4. Kum konisinden veriler	33
Tablo 5. Yüzeyde LWD Emod ve NDG Sıkıştırma.....	34
Tablo 6. Yüzeyde LWD ve NDG arasındaki korelasyon.....	35
Tablo 7. 5cm derinlikte LWD Emod ve NDG Sıkıştırma.....	36
Tablo 8. 5 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki korelasyon.....	36
Tablo 9. 10cm derinlikte LWD Emod ve NDG Sıkıştırma.....	37
Tablo 10. 10 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki korelasyon.....	38
Tablo 11. 15cm derinlikte LWD Emod ve NDG Sıkıştırma.....	39
Tablo 12. 15 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki korelasyon.....	39
Tablo 13. LWD Emod ve SC sıkıştırması arasındaki korelasyon.....	42
Tablo 14. LWD Emod ve Kum konisi sıkıştırması arasındaki Regresyon	43
Tablo 15. LWD, NDG ve Kum konisi arasında ANOVA tanımlayıcı test.....	44
Tablo 16. LWD, NDG ve Kum konisi arasındaki Varyansların ANOVA Homojenliği testi	44
Tablo 17. LWD, NDG ve Kum konisi arasındaki Varyansların ANOVA Homojenliği testi	44
Tablo 18. Homojen alt kümelerdeki gruplar için görüntülenen araçlar	45
Tablo 19. LWD ve NDG arasındaki T testi grup istatistikleri	46
Tablo 20. Bağımsız numune testi (LWD vs NDG).....	46
Tablo 21. LWD ve kum konisi arasındaki T testi grup istatistikleri.....	46
Tablo 22. Bağımsız numune testi (LWD vs Kum Konisi).....	47
Tablo 23. Yüzeyde LWD ve NDG Arasında Güvenilirlik Analizi	48
Tablo 24. 5 cm derinlikte LWD ve NDG arasında Güvenilirlik Analizi	48
Tablo 25. 10 cm derinlikte LWD ve NDG arasında Güvenilirlik Analizi	48
Tablo 26. 15 cm derinlikte LWD ve NDG arasında Güvenilirlik Analizi	48
Tablo 27. LWD ve Kum Konisi Arasında Güvenilirlik Analizi	48
Tablo 28. KMO ve Bartlett's Testi	49
Tablo 29. Açıklanan Toplam Varyans	50
Tablo 30. Döndürülmüş Bileşen Matrisi	51

Tablo 31. Topluluklar Tablosu.....	51
------------------------------------	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bileşenleriyle birlikte LWD cihazı	9
Şekil 2. Bileşenleriyle birlikte Nükleer yoğunluk ölçüm cihazı (ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu NRC, URL 1-www.epa.gov/radtown/nuclear- gauges)	14
Şekil 3. Kum Konisi cihazı Bileşenlerle (URL-2 zemintest.com.tr/kum-konisi- deneyi/)	15
Şekil 4. Alttemel tabakası üzerinde 2,5 m aralıklarla testlerin yapılacağı noktalarının belirlenmesi ve LWD, nükleer yoğunluk test cihazlarının ve kum konisinin kurulması (KGM-ARGE/2012-22, Sikişma kontrolünde nükleer metoda alternatif sistemlerin araştırılması. 20.07.2017, KGM, Ankara)	19
Şekil 5. Alttemel tabakası için elek analizi eğrisi	20
Şekil 6. LWD için yük-yer değiştirme ve zaman ilişkileri.....	21
Şekil 7. Yüzeyde LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçları.....	35
Şekil 8. 5 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçları	37
Şekil 9. 10 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçlar	38
Şekil 10. 15 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçları	39
Şekil 11. Noktada Altı LWD Testinde Sapma Ölçümleri (A1–A15) (SPSS Sonuçlar) .	40
Şekil 12. LWD ve SC arasındaki regresyon sonuçları	43
Şekil 13. Kum birim ağırlığının LWD modülü (ELWD) üzerindeki etkisi (Amr vd., 2013).	55
Şekil 14. (a) 10 kg ve 15 kg için radyal mesafelerde TB1–1 modülleri (Sapma) (Senseney ve Mooney, 2010).....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

LWD	: Light Weight Deflectometer/Hafif Deflektometre
NDG	: Nuclear Density Gauge/ Nükleer Yoğunluk Ölçer
SC	: Sand Cone/ Kum Konisi
DCP	: Dynamic Cone Penetrometer
ELWD	: Elastic Modulus Lightweight Deflectometer/ Hafif Deflektometre Elastik Modül
FWD	: Falling Weight Deflectometer/ Düşen Ağırlık Deflektometresi
SPSS	: Statistical Package for the Social Sciences/ Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi
ASTM	: American Society for Testing and Materials/ Amerikan Test ve Malzeme Derneği
DIN	: Deutsches Institut für Normung/ Alman Standartları Enstitüsü
Evd	: Dinamik modül
APT	: Accelerated Pavement Testing/ Hızlandırılmış Kaplama Testi
km	: kilometre
µm	: Mikrometre
MMLS	: Multi-axle Load Simulator/ Çok Eksenli Yük Simülatörü
m	: Metre
TFT	: Thin-Film Transistor/ İnce Film Transistörü
SSG	: Soil Stiffness Gauge/ Zemin Sertlik Ölçer
KTÜ	: Karadeniz Teknik Üniversitesi
R ²	: Belirleme Katsayısı
r	: Korelasyon Katsayısı
Sig./ p	: p-değeri (anlamlılık değeri)
N	: Serbestlik derecesi
SD/Std.	: Standart Sapma.
df	: Serbestlik Derecesi
F	: F-istatistiği.
t	: t-istatistiği
α	: Cronbach alfa
KMO	: Kaiser-Meyer-Olkin
TB	: Test Bed/ Deneme Alanı

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Zemin sıkışmasını ölçmek için Hafif Deflektometre (LWD), Nükleer Yoğunluk Ölçer (NDG) ve Kum Konisi (SC) yöntemleri dahil olmak üzere çeşitli yöntemler mevcuttur. Her tekniğin doğruluk, taşınabilirlik, maliyet etkinliği ve kullanım kolaylığı açısından avantajları ve sınırlamaları vardır.

LWD ölçümlerinde, cihaz toprak yüzeyine dinamik bir yük uygulayarak ve sonuçta ortaya çıkan sapmayı ölçerek çalışır. Cihaz tipik olarak düşme ağırlığına bağlı bir yükleme plakasından, sapmayı ölçen bir sensör sisteminden ve veri toplama ve analiz için elektronik bileşenlerden oluşur. Toprak yüzeyine yerleştirildiğinde düşme ağırlığı serbest kalır ve bu da sapmaya oluşturan bir darbeye neden olur. Sensör sistemi, bu sapmayı ölçer ve veriler analiz edilerek zeminin sertliği ve taşıma kapasitesi belirlenir.

NDG veya SC testi gibi geleneksel toprak sıkıştırma test yöntemleriyle karşılaştırıldığında LWD çeşitli avantajlar sunmaktadır. LWD, gerçek zamanlı ölçümler sağlar, tahribatsızdır ve minimum kurulum süresi gerektirir. Ayrıca LWD çok yönlüdür ve çeşitli toprak türleri ve hava koşullarına uygundur. ASTM tarafından tanımlanan uluslararası standartlar, jeoteknik testlerde LWD'nin kullanımını düzenleyerek kalibrasyon ve özel test protokolleri yoluyla doğruluk ve güvenilirliği garanti etmektedir ASTM E2583-07(2007).

LWD testlerinden toplanan veriler, toprak sıkışmasının kalitesini değerlendirmek ve ilave sıkıştırmanın gerekli olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Bu, mühendislerin inşaat süreçlerini optimize etmesine, oturma veya arıza risklerini azaltmasına ve sıkıştırılmış toprak üzerine inşa edilen yapıların uzun vadeli stabilitesini ve performansını sağlamasına yardımcı olur.

Sıkıştırma kontrolü için LWD'nin dünya çapında artan popülaritesi göz önüne alındığında, performansının NDG ve SC testleri gibi yerleşik yöntemlerle karşılaştırılması çok önemlidir. NDG, toprak yapısını bozmadan toprak nemini ve kuru yoğunluğunu ölçmek için gama radyasyonunu kullanan, hızı ve tekrarlanabilirliğiyle bilinmektedir. Bu arada SC testi, zemindeki bir deliği doldurmak için gereken kum hacmini belirleyerek toprağın yerindeki yoğunluğunu ölçer ve bu testin saha koşullarında yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

LWD'nin hem NDG hem de SC yöntemleriyle sağlam bir şekilde karşılaştırılmasına duyulan ihtiyaç, LWD'nin sıkıştırma kontrolünde alternatif veya tamamlayıcı bir araç olarak kullanılabilirliğini doğrulamak için kritik öneme sahiptir. LWD çeşitli pratik avantajlar sunsa da NDG veya SC testi gibi geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında doğruluğu ve güvenilirliği konusunda hala belirsizlikler bulunmaktadır. İnşaat sektöründe yaygın olarak benimsenmesini sağlamak için LWD ile bu yöntemler arasında güçlü bir alan ilişkisi kurmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

LWD, dinamik yükleme altında zemin yüzeyinin sapmasını ölçerek toprak sıkışmasını değerlendirmek için kullanılan taşınabilir bir cihazdır. Hızlı, yerinde ölçüm sağlama yeteneği onu özellikle saha uygulamaları için uygun kılmaktadır. Buna karşılık, NDG yöntemi, gama radyasyonu yayan bir cihaz kullanarak toprak yoğunluğunu ve nem içeriğini ölçer ve toprak yapısını bozmadan doğrudan yoğunluk ölçümlerine olanak tanımaktadır. Bu arada SC yöntemi, zemindeki bir deliğin kumla doldurulmasını, delikten çıkan numunenin birim hacim ağırlık ve su muhtevasına bağlı olarak zeminin, yerinde yoğunluğunu belirlemek için kullanılan kum hacminin ölçülmesini içermektedir.

Bu yöntemlerin karşılaştırmalı bir analizi, zemin sıkışmasının değerlendirilmesinde bunların uygunluğunun, güvenilirliğinin ve doğruluğunun değerlendirilmesi açısından önemlidir. Sosyal Bilimler İstatistik Paketi (SPSS) gibi istatistiksel araçlar, toplanan verileri analiz etmek ve farklı yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki korelasyonları veya tutarsızlıkları belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür karşılaştırmalı çalışmalar, mühendislerin ve uygulayıcıların belirli zemin koşulları ve proje gereksinimleri için en uygun yöntem konusunda bilgilendirilmesi açısından önemli olduğu gibi inşaat uygulamalarının iyileştirilmesine ve altyapı projelerinin ömrünün ve güvenliğinin sağlanmasına da katkıda bulunurlar.

Bu çalışma, karayolu temel tabakalarının sıkışma kontrolünde, LWD ile geleneksel sıkışma ölçüm yöntemleri (NDG ve SC) arasındaki ilişkiyi incelemeyi amaçlamaktadır. Bu araştırmanın arkasındaki motivasyon, LWD gibi tahribatsız, yerinde yöntemlerin özellikle test verimliliği ve maliyet açısından sunduğu avantajlarda yatmaktadır. LWD, NDG ve SC yöntemlerine pratik bir alternatif sunarken, pek çok mühendis ve yüklenici, yerleşik performans kayıtları nedeniyle hâlâ NDG ve SC yöntemlerine güvenmektedir. LWD ile bu yöntemler arasındaki korelasyon, özellikle sıkıştırma kontrolü açısından, LWD'nin benimsenmesi için kritik bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir.

Bu çalışma kapsamında, 2015 yılında Gümüşhane-Kürtün karayolunda gerçekleştirilen karşılaştırmalı deneysel bir çalışmanın sonuçları incelenmiştir. Çalışmada LWD, NDG ve SC yöntemleri arasındaki korelasyon SPSS yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bulguların, LWD'nin bir sıkıştırma kontrol aracı olarak uygulanabilirliği ve geleneksel yöntemlerin yerini alma veya tamamlama potansiyeli konusunda değerli bilgiler sunmaktadır.

1.2 Literatür Taraması

LWD, konsantre yük altında elastik malzemelerdeki gerilim ve gerinim davranışını modelleyen Boussinesq denklemi aracılığıyla test edilen malzemenin elastik modülünü (ELWD) hesaplayabilmektedir. LWD testlerinin etki alanı genellikle yük plakasının çapının 1 ila 1.5 katı kadar uzanmaktadır.

LWD, taşınabilirliği, kullanım kolaylığı ve gerçek zamanlı sonuçlar sağlama yeteneği sayesinde çeşitli inşaat ortamları ve toprak türleri için giderek daha popüler hale gelmektedir. Sahada hızlı testlerin gerekli olduğu yol yapımı sırasında uygun sıkıştırmanın sağlanabilmesi için kullanışlıdır. LWD birçok ülkede geniş çapta kabul görmüş ve artık ASTM E2835-11 (2011) ve DIN 18134 (2012) dahil olmak üzere kalibrasyon, test ve veri yorumlama için doğru prosedürlere ilişkin yönergeler sağlayan çeşitli uluslararası standartlar tarafından yönetilmektedir.

LWD'nin NDG ve SC testleri gibi daha geleneksel yöntemlere göre en önemli avantajlarından biri, tahribatsız yapısı ve minimum hazırlık gereksinimleridir. Ancak LWD'nin özellikle daha derin zemin katmanlarının güvenilir bir şekilde değerlendirilmesindeki kullanımı birtakım zorluklar barındırmaktadır. Nazzal vd. (2007) LWD'nin yüzey sertliğini ölçmek için daha doğru olduğunu ancak daha büyük derinliklerde değişken sonuçlar verebileceğini belirtmektedir. Bunun nedeni, LWD tarafından üretilen dinamik yükün sınırlı etki derinliğidir.

NDG, toprak sıkışmasını değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Radyasyon ve toprak kütlesi arasındaki etkileşimi değerlendirmek için gama radyasyonunu kullanarak toprak yoğunluğunu ölçmekte olup, probun toprağa yerleştirildiği doğrudan iletim ve probun yüzeye yerleştirildiği geri saçılım gibi iki modda çalışabilmektedir. NDG'nin birincil avantajı, toprağı bozmadan hem yoğunluğu hem de nem içeriğini ölçebilme yeteneğinde yatmaktadır. Bu yöntem, özellikle büyük ölçekli projeler için oldukça tekrarlanabilir ve güvenilir kabul edilmektedir. Bu arada SC yöntemi de toprağın yerinde yoğunluğun belirlemek için kullanılan geleneksel bir tekniktir. Bir test deliğinin kalibre edilmiş kumla doldurulmasını ve deliğin

doldurulması için gereken hacmin ölçülmesini içermektedir. Bu yöntem doğru olmasına rağmen zaman alıcı ve hataları önlemek için dikkatli kullanım gerektirmektedir. Nazzal vd. (2007) SC ve NDG testlerini LWD ile karşılaştırmış ve LWD'nin sonuçlarının daha hızlı ve toprağı daha az tahrip ederek elde edildiğini ancak daha yüksek nem içeriğine sahip topraklarda NDG ile karşılaştırıldığında doğruluğunun azaldığını belirtmiştir.

Çeşitli çalışmalar LWD sonuçları ile NDG ve SC testlerinden elde edilenler arasındaki korelasyonu araştırmıştır. Nazzal vd. (2017) LWD kullanılarak elde edilen elastik modül ile Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD) kullanılarak elde edilen elastik modül arasında güçlü bir korelasyon ($R^2=0.94$) bulmuştur. Bu bulgu, LWD'nin yüzey sertliğini ölçmek için güvenilir olduğunu ancak daha derin toprak katmanları için kullanıldığında tutarlı olmadığını göstermektedir. Benzer şekilde, LWD ile Dinamik Koni Penetrometresi (DCP) arasında $R^2 = 0.87$ 'lik bir korelasyon gözlemlenmiş ve bu da yüzey testi için kullanımının daha uygun olduğunu göstermiştir.

Neil vd. (2010) LWD'nin iri taneli malzemelerde, özellikle madencilik ortamında kullanımını araştırmıştır. LWD'nin, çakıl ve kayalık topraklar gibi NDG'nin daha az etkili olduğu malzemeler için NDG'ye güvenilir bir alternatif olarak hizmet edebileceğini bulmuşlardır. Neil vd. ayrıca dinamik modül (Evd) ile kuru yoğunluk arasındaki korelasyonun iri taneli zeminlerde kalite kontrolü sağlayacak kadar güçlü olduğunu kaydetmiştir.

Buna karşılık, Grasmick vd. (2015) yaptıkları çalışmada, LWD'nin geleneksel test yöntemleriyle karşılaştırılması sırasında etki derinliğini incelemiştir. Çalışmanın sonuçları, LWD'nin radyal sensörlerle birlikte kullanıldığında, geleneksel LWD testlerinden beklenen plaka çapının 1 ila 1.5 katından önemli ölçüde daha derin olan 750 mm derinliğe kadar sapmaları ölçebildiğini göstermiştir. Bu durum LWD'nin, özellikle ek sensörlerle güçlendirildiğinde, toprağın daha derin katmanlarını değerlendirmek için potansiyel olarak kullanılabilirliğini ve onu başlangıçta düşünülen daha çok yönlü hale getirebileceğini göstermektedir.

LWD'nin performansı toprak tipine ve nem içeriğine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Amr vd. (2013) farklı kum türleri üzerinde kapsamlı testler gerçekleştirmiş ve kuru birim ağırlıktaki her 1 kN/m³ artış için LWD modülünün ortalama 21 MPa arttığını belirtmişlerdir. Çalışma aynı zamanda LWD ölçümlerinin silis kumu için kireçli kuma kıyasla daha yüksek olduğunu bulmuş bu da toprak bileşiminin LWD okumalarında önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Bu, artan nem içeriğinin daha yüksek sapmaya ve daha düşük LWD modülü değerlerine yol açtığını gösteren Tan vd. (2014) bulgularıyla benzerlik göstermektedir. Nemin etkisinin,

sertliği önemli ölçüde etkileyebildiği iyi derecelenmiş topraklarda bu etkinin daha belirgin olduğu bulunmuştur.

Nazzal vd. (2007) ayrıca LWD'nin etki derinliğinin, test edilen malzemenin sertliğine bağlı olarak plaka çapının yaklaşık 1 ila 2 katına karşılık geldiğini doğrulamıştır. Bu, LWD'nin etkinliğinin çok katmanlı sistemlerde, özellikle de alt katmanların sertliği yüzey katmanlarından önemli ölçüde farklı olduğunda daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bu durumlarda LWD'yi desteklemek için ek sensörlere veya yöntemlere ihtiyaç duyulabilmektedir.

LWD'nin taşınabilirlik ve hız açısından önemli avantajları olmasına rağmen Amr vd. (2013) yaptıkları çalışmada çok katmanlı sistemleri daha doğru ölçmek için daha fazla sensör eklenmesiyle performansının artırılabilceğine dikkat çekmiştir. Ayrıca Neil vd. (2010) LWD'nin iri taneli zeminlerde iyi performans göstermesine rağmen ince taneli, kohezyonlu zeminlerde güvenilirliğini artırmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır.

Pratik açıdan bakıldığında LWD'nin tahribatsız test kapasitesi, onu geleneksel yöntemlerin hasara veya gecikmelere neden olabileceği hassas malzemelerin sıkıştırılmasının değerlendirilmesi için ideal kılmaktadır. Ancak Tan vd. (2014) performansının daha az tutarlı olduğu ıslak ve oldukça plastik topraklardaki sınırlamaları gidermek için LWD teknolojisinde daha fazla gelişme ihtiyacı bulunduğunu belirtmektedir. Özellikle yüzey katmanlarında toprak sıkışma değerlendirmesinde LWD'nin değerli bir araç olarak kullanılmasına yönelik tavsiyeleri bulunmaktadır. Ancak NDG ve SC testleri gibi geleneksel yöntemlerle olan korelasyonunun halen aktif bir araştırma alanı olduğu vurgulanmaktadır. LWD, hız ve kullanım kolaylığı açısından önemli avantajlar sunarken, özellikle daha büyük derinliklerde veya değişken toprak koşullarındaki doğruluğu daha fazla iyileştirme gerektirmektedir. Gelecekteki araştırmalar LWD teknolojisinin geliştirilmesine, diğer yöntemlerle entegrasyonunun araştırılmasına ve karmaşık toprak sistemlerindeki sınırlamaların ele alınmasına odaklanmsı gerektiğini belirtmişlerdir.

Stamp ve Mooney (2013) yaptıkları çalışmalarında, LWD tasarım özelliklerinin ölçülen sapma ve dolayısıyla tahmini dinamik modül değerleri üzerindeki etkisinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Araştırma, ASTM E2835-11 (2011) ve ASTM E2583-07 (2007) spesifikasyonlarına uygun iki LWD tasarımına odaklanmaktadır. Sapma sensörünün türü (ivmeölçere karşı jeofon), algılama konfigürasyonu (plaka tepkisine karşı zemin tepkisi), plaka sertliği ve uygulanan yükün özellikleri gibi kritik faktörlerin etkisini değerlendirmek için her bir tasarıma çeşitli modifikasyonlar

uygulanmıştır. LWD sertliği ve yük darbesinin etkileri saha testleri ve sonlu elemanlar (FE) analizi ile daha da incelenmiştir. Bulgular, iki LWD konfigürasyonunun aynı zemin koşulları altında sürekli olarak farklı sapma ve elastik modül değerleri verdiğini göstermektedir. Dahası, bu farklılıkların tahmin edilmesi zordur ve LWD tasarımının ölçüm sonuçları üzerindeki önemli etkisinin altını çizmektedir.

Tang vd. (2015) bağlanmamış üstyapı tabakalarının esnek davranışını ve temel-altyapı arayüzünde geogridlerle güçlendirilmiş yumuşak zemin alt tabakalarının kalıcı deformasyonunu araştırmıştır. İki tip yumuşak zemin alt tabakası üzerine inşa edilen üstyapı yapıları üzerinde iki adet küçültülmüş ölçekli hızlandırılmış üstyapı testi (APT I ve APT II) gerçekleştirilmiştir. Her bir test, üç farklı geogrid ile modifiye edilmiş ve bir modifiye edilmemiş kontrol tabakası olan dört bölüm içermektedir. Esnek ve kalıcı deformasyonlar gömülü aletler kullanılarak ölçülürken, yüzey sapmaları LWD testi ile değerlendirilmiştir. Tekrarlayan hareketli tekerlek yükleri, üçte bir ölçekli model mobil yük simülatörü (MMLS3) kullanılarak uygulanmıştır. Bulgular, geogridlerin dahil edilmesinin LWD veya MMLS3 yükleri altında taban tabakasının veya alt zeminin esnek davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ortaya koymuştur. Geogrid takviyeli bölümlerdeki yüzey sapmaları ve alt zemin esnek deformasyonu kontrol bölümlerindekilerle karşılaştırılabileceği belirtilmiş ancak alt zeminin kalıcı deformasyonu iki geogrid ile modifiye edilmiş kesitte önemli ölçüde azalmış, bu da tekrarlı yüklemeler altında uzun vadeli alt zemin deformasyonunu azaltmadaki etkinliğini göstermiştir.

Marradi ve Marvogli (2007) rijitlik (taşıma kapasitesi) ve sıkıştırma seviyelerine odaklanarak alt zemin ve temel katmanı performansını değerlendirmek için LWD kullanımını analiz etmiştir. Enerji Kaybı (yük-sapma grafiğinden elde edilen) ile malzeme performansı arasındaki korelasyonu araştırmışlar ve yük frekansı, Maksimum Sapma, Faz Gecikmesi ve ofsetin Enerji Kaybı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Hassasiyet analizi, Faz Gecikmesinin en büyük etkiye sahip olduğunu, bunu Maksimum Sapmanın izlediğini ve ofset etkilerinin minimum olduğunu göstermiştir. Yeni Zelanda ve İtalya'daki saha denemelerinden elde edilen sonuçlar, sıkıştırma kontrolü ve toprak işleri kalite güvencesi için LWD'nin güvenilirliğini doğrulamıştır. Ayrıca, Yüzey Modülü arttıkça Enerji Kaybının azaldığını ve Enerji Kaybını, tepe sapma değerlerine odaklanan Yüzey Modülünün aksine, tüm yük-sapma geçmişini hesaba katan değerli bir performans göstergesi haline getirdiğini bulmuşlardır.

Fleming vd. (2006) toprak işleri ve yol temellerini değerlendirmek için bir araç olarak LWD gözden geçirerek güçlü yönlerini, sınırlamalarını ve veri kalitesini

tartışmışlardır. Çalışma, LWD'nin yol alt katmanlarını, granüler kaplamayı, alt temel katmanlarını ve ince yüzeyli yolları değerlendirmedeki esnekliğini vurgulamıştır. Bununla birlikte, LWD'den elde edilen sertlik modülü sonuçlarının genellikle FWD ile elde edilen sonuçlardan farklı olduğunu ve saha koşullarına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. LWD ile FWD ve ince film transistör (TFT) cihazları gibi diğer cihazlar arasındaki korelasyon sahaya ve malzemeye göre değişmiştir. Örneğin, siltli kil üzerinde 450 mm granüler kaplamaya sahip bir sahada, korelasyon $LWD = 0.97$ FWD ile $R^2=0.6$, başka bir sahada $R^2=0.92$ ile $TFT = 0.96$ LWD olarak bulunmuştur. Nazzal vd. (2007) çeşitli testlerde ortalama $FWD = 0.97$ PFWD ilişkisi gözlemleyerek korelasyonlardaki değişkenliği daha da vurgulamıştır. Etki derinliği açısından, LWD'nin malzemeleri 270-280 mm (yaklaşık bir plaka çapı) derinliğe kadar zorladığı görülmüştür; bu, Zemin Sertlik Ölçer (SSG) gibi cihazlardan daha derindir ve Statik Plaka Testleriyle karşılaştırılabilir. Bununla birlikte, sahaya özgü değişkenlik cihazın performansını etkilemiş ve korelasyonlar malzeme türü, katman kalınlığı, su içeriği ve stres seviyeleri gibi faktörlerden etkilenmiştir. LWD modül sonuçları, FWD sonuçlarından daha fazla olmak üzere düşme yüksekliğine de duyarlıdır.

Sıkıştırma gözlemleri, LWD'den elde edilen sapma-zaman izlerinin sıkıştırma sırasındaki malzeme davranışını yansıttığını göstermiştir. Gevşek veya kısmen sıkıştırılmış durumlar önemli ölçüde kalıcı sapma gösterirken, tamamen sıkıştırılmış katmanlar sıfıra daha yakın dönen izler sergilemiş ve bu da yük tepkisinin iyileştiğini göstermiştir. LWD, sıkıştırma ve sertlik değerlendirmesi için çok yönlü ve pratik bir araç olsa da, sonuçları malzeme özelliklerine, saha koşullarına ve stres seviyelerine bağlıdır. Bu değişkenlik, doğru değerlendirmeleri sağlamak için dikkatli yorumlama ve sahaya özgü kalibrasyon gerektirmektedir.

Siddiki vd. (2008) etkili sıkıştırma için üç temel gerekliliğin altını çizmektedir: modül, yoğunluk ve nem içeriği. Çalışmaları, LWD ile FWD arasında güçlü korelasyonlar kurmaktadır. Özellikle, LWD modül değerleri geleneksel FWD modül değerlerinden yaklaşık üç ila dört kat daha yüksektir. Büyüklükteki bu farka rağmen, çalışma LWD ile belirlenen elastik modülün FWD'den elde edilenle iyi korelasyon gösterdiğini doğrulamaktadır.

Siddiki (2012)'a göre NDG testi ile birlikte LWD kullanımına yönelik ayrıntılı bir metodoloji sunmaktadır. Süreç, test alanını hazırlamak için prova haddeleme ile başlamış ve ardından bilgilendirme amacıyla alt zemin üzerinde 10 LWD testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Bölüm 301.06 yoğunluk gerekliliklerine uygunluğu

sağlamak için Nükleer Yoğunluk Ölçer yoğunluk testlerinin yanı sıra 10 tam LWD testi gerçekleştirilir. Tüm veriler TD-409 LWD Formuna kaydedilir ve sonraki proje bölümleri için izin verilen maksimum sapmayı belirlemek üzere 10 testin tümü için ortalama sapma hesaplanır. LWD testinin çeşitli avantajları vurgulanmıştır. Süreç hızlı ve basittir, test başına sadece üç dakika gerektirir. Müfettişler test sırasında sahada kalabilir ve sonuçlar silindir operatörü tarafından hemen görülebilir. Test sonuçları ayrıca su içeriği ve sıkıştırma performansının daha iyi anlaşılmasını sağlar. Ayrıca, veriler elektronik olarak kolayca aktarılabilir, böylece verimlilik ve dokümantasyon artar. Çalışma ayrıca LWD'nin agregalar (No. 53, 73, 11 ve 12), yapısal dolgu (1 inç ve 1.5 inç boyutlarında), ¾ inç elek üzerinde tutulan agregalara sahip granüler topraklar ve kimyasal olarak modifiye edilmiş topraklar dahil olmak üzere bir dizi malzeme için uygunluğunu vurgulamaktadır. Ancak, yöntemin bazı sınırlamaları vardır. Test konumunda 1.5 inçten büyük agrega boyutları %15'i geçmemeli ve yüzey eğimi %5'i geçmemelidir. Ayrıca, donmuş yüzeylerde veya sapmanın 0.2 mm'den az olduğu durumlarda ölçüm yapılmamalıdır.

Bu kapsamlı değerlendirme, LWD'nin sıkıştırma kontrolü için değerli bir araç olduğunun altını çizmektedir. Uygulama için kritik kısıtlamaları belirlerken verimlilik, güvenilirlik ve çeşitli malzeme ve koşullarla uyumluluk sağlar.

Tablo 1. LWD testi örneği (Siddiki, 2012)

Test numarası	Yer	Yaş Yoğunluk (g/cm ³)	Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Vuruş 1	Vuruş 2	Vuruş 3	Ortalama
1	218+00 EB	138.9	130.2	0.39	0.38	0.36	0.3767
2	218+20 EB	146.6	137.4	0.33	0.31	0.3	0.3133
3	218+40 EB	146.9	137.7	0.32	0.31	0.3	0.31
4	218+60 EB	145.7	136.6	0.27	0.27	0.26	0.2667
5	219+00 EB	144.2	135.1	0.33	0.3	0.3	0.31
6	219+00 EB	139.2	130.5	0.31	0.3	0.29	0.3
7	218+50 EB	140.0	131.2	0.39	0.39	0.37	0.3833
8	218+30 EB	139.0	130.3	0.42	0.4	0.39	0.4033
9	218+10 EB	138.7	130.0	0.36	0.35	0.34	0.35
10	218+00 EB	138.4	129.7	0.35	0.35	0.34	0.3467
Toplam							3.36
Ortalama							0.336



Şekil 1. Bileşenleriyle birlikte LWD cihazı

a. Üst sabitleme ve serbest bırakma mekanizması, bu mekanizma, düşen ağırlığı test öncesinde yerinde tutar ve test sırasında doğru anda serbest bırakır.

Üst fix ve salınım mekanizması, ağırlığın test öncesinde güvenli bir şekilde tutulmasını ve doğru anda serbest bırakılmasını sağlar. Ağırlığın serbest bırakılmasının hassas bir şekilde kontrol edilmesi, etki kuvvetinin tutarlı bir şekilde uygulanmasını sağlar; bu da güvenilir defleksiyon ölçümleri için kritik öneme sahiptir.

b. Kılavuz çubuk, düşen ağırlığa düz bir yol sağlar, böylece doğru bir şekilde dikey olarak düşmesini sağlar. Kılavuz çubuk, düşen ağırlığın hizalanmasını koruyarak etki kuvvetinin doğrudan yükleme plakasına uygulanmasını sağlar. Bu, hatalı ölçümlere yol açabilecek açı dışı darbelerden kaçınır.

c. Düşen ağırlık kavrama, ağırlığı test öncesinde yerinde tutar ve salınım mekanizmasının bir parçasıdır. Tutamak, ağırlığın serbest bırakılana kadar güvenli bir şekilde yerinde kalmasını sağlar ve erken hareketi engeller. Ağırlığın doğru yükseklik ve zamanda düşmeye hazır olmasını sağlar, bu da testin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini korur.

d. Düşen ağırlık, yükleme plakasına düşürülerek etki kuvvetini oluşturan kalibre edilmiş bir kütledir. Düşen ağırlık, test edilen malzemeyi deformasyona uğratmak için gerekli olan dinamik yükü üretmek için gereklidir. Düşen ağırlığın büyüklüğü, malzemeye uygulanan kuvvet miktarını belirler ve bu doğrudan defleksiyonla ilişkilidir

ve dolayısıyla malzemenin sertliğini etkiler. Ağırlığın düştüğü yükseklik de iletilen enerjiyi etkiler.

e. Kilit pimi, düşen ağırlığı kullanılmadığı zaman yerinde tutar ve yanlışlıkla düşmesini engeller. Kilit pimi, ağırlığın test öncesinde güvenli bir şekilde yerinde kalmasını sağlar. Bu güvenlik özelliği, erken serbest bırakmayı engeller, böylece test prosedürünün güvenli ve kontrollü olmasını sağlar. Kullanıcının, pim kasıtlı olarak çıkarılana kadar ağırlığın düşmeyeceğinden emin olarak testi kurmasına olanak tanır.

f. Sönümleme sistemi, düşen ağırlık tarafından üretilen fazla enerjiyi emerek titreşimleri azaltır ve cihazın zarar görmesini engeller. Sönümleme sistemi, yalnızca amaçlanan etki kuvvetinin test edilen malzemeye uygulanmasını sağlar. LWD'nin mekanik strese maruz kalma veya zarar görme riskini en aza indirir, cihazın uzun ömürlü olmasını ve doğruluğunu korur. Ayrıca, ağırlık indikten sonra gereksiz salınımları engelleyerek doğru defleksiyon ölçümlerinin yapılmasına yardımcı olur.

g. Devrilme önleyici aparat, cihazı stabilize eder ve test sırasında devrilmesini engeller. Bu özellik, LWD'nin operasyon sırasında özellikle düşen ağırlık yükleme plakasına vurduğunda stabilitesini sağlar. Cihazın kaymasını veya devrilmesini engeller, bu da hatalı ölçümlere yol açabilir. Antitipping özelliği, özellikle düzensiz yüzeylerde güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek için önemlidir.

h. Sensörlü kupa, yük uygulandığında yüzeyin defleksiyonunu ölçen sensörü yerinde tutar. Kupa ve sensör, uygulanan yük tarafından meydana gelen defleksiyonu tespit etmek için anahtar rol oynar. Sensör, yüzeyin düşen ağırlığa karşı dikey kaymasını ölçer ve bu veriler malzemenin sertliğini hesaplamak için kullanılır. Sensörün fiicanda doğru şekilde yerleştirilmesi, doğru ölçümler için önemlidir.

i. Taşıma Kulpü, LWD'yi taşımayı ve test alanında hareket ettirmeyi kolaylaştıran bir tutamağı veya desteğı ifade eder. Taşıma Kulpü, taşınabilirliği artırarak LWD'yi farklı test alanlarına taşımayı kolaylaştırır. Cihazın hasar görmeden taşınmasını sağlar ve operatörün cihazı hızlı bir şekilde test için yerleştirmesine yardımcı olur.

j. Yükleme plakası, test edilen malzemenin üzerine yerleştirilen düz ve sert bir yüzeydir ve kuvvetin uygulandığı noktadır. Yükleme plakası, etki kuvvetini malzeme yüzeyine dağıtmak için kritik öneme sahiptir. Plaka tarafından uygulanan yükün büyüklüğü ve dağılımı, defleksiyonu doğrudan etkiler ve bu defleksiyon, malzemenin sertliğini (E-modülü) değerlendirmek için kullanılır. Defleksiyonun doğru ölçülmesi, plakanın nasıl yerleştirildiğine ve kuvvetin nasıl düzgün dağıldığına bağlıdır.

k. Yazıcı cihazı, test tamamlandıktan sonra test sonuçlarının yazılı kopyalarını üretir. Yazıcı cihazı defleksiyon ölçümleri, uygulanan yük ve hesaplanan malzeme

özelliklerini (örneğin, E-modülü) içeren test sonuçlarının fiziksel bir kaydını sağlar. Bu, belgeleme, ileri analiz ve inşaat projesine dahil olan diğer paydaşlarla sonuçları paylaşmak için kullanışlıdır.

1.2.1 SPSS'in İnşaat Sektöründe Kullanımı

SPSS, yol inşaat projeleri de dahil olmak üzere inşaat sektöründe kalite kontrol süreçlerini geliştirmek için etkili bir şekilde kullanılmıştır. İstatistiksel analiz yetenekleri, çeşitli etki faktörlerini analiz ederek inşaat kalitesinin değerlendirilmesini ve iyileştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Betonun basınç dayanımını etkileyen faktörleri analiz etmek için SPSS ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanan bir çalışmada, çimento, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, su, süperplastikleştiriciler, iri agrega ve ince agrega gibi malzemelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analiz, 28 günlük kürden sonra ölçülen basınç dayanımına sahip 400 beton numunesinden alınan verilere dayanmakta olup özellikle çoklu regresyon modellemesi için yaygın olarak kullanılan SPSS istatistiksel analiz programı kullanılmıştır. SPSS aracılığıyla ortalamalar, standart sapmalar ve regresyon katsayılarını da içeren temel istatistiksel ölçümler hesaplanmıştır. Regresyon modelinin ve bireysel değişkenlerin önemini değerlendirmek için ANOVA tabloları oluşturulmuştur. Model, çimento, yüksek fırın cürufu ve ince agregaların basınç dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı pozitif etkilere sahip olduğunu, su ve süper akışkanlaştırıcıların katkılarının ise istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermiştir ($p > 0,05$).

SPSS kullanımı değişkenler arasındaki ilişkilerin belirlenmesini sağlamış, beton üretiminde malzemelerin önemine dair içgörüler sağlamış ve tahmine dayalı modellerin geliştirilmesini kolaylaştırmıştır. Örneğin, sonuçlar çimento ve ince agrega miktarının artırılmasının basınç dayanımını sürekli olarak iyileştirdiğini, aşırı suyun ise azalttığını göstermiştir. Bu çalışma, SPSS'in malzeme performansını etkileyen kritik faktörleri belirleyerek inşaat kalite kontrolünü nasıl destekleyebileceğini örneklemektedir. Araştırma, istatistiksel yöntemler kullanarak beton karışım tasarımlarının optimize edilmesine, üretimdeki değişkenliğin azaltılmasına ve inşaat malzemelerinin genel kalitesinin artırılmasına katkıda bulunmuştur. Bu bulgular, SPSS'in inşaat mühendisliğinde veri odaklı karar alma için temel bir araç olarak rolünün altını çizmektedir (Atasoy, 2015).

Bölgesel inşaat hammaddesi fiyat değişikliklerini inceleyen bir çalışma, veri analizi ve yorumlaması için SPSS'i kullanmıştır. SPSS'in frekans analizi ve grafik

araçları, Gujarat (Hindistan) genelindeki fiyat eğilimlerini ve değişikliklerini belirlemede etkili olmuştur. Sonuçlar, ince kum ve iri kum gibi malzemeler için belirli bölgelerde tutarlı fiyatlandırmalar olduğunu gösterirken, diğerlerinde, özellikle agregalar için önemli farklılıklar görülmüştür. İstatistiksel yetenekleri sayesinde SPSS, malzeme tedarik stratejilerini optimize etmek için eyleme geçirilebilir içgörüler sağlamıştır. Bölgeleri etkin maliyet ve yüksek maliyetli bölgeler olarak sınıflandırarak, çalışma istatistiksel araçların inşaat yönetimindeki önemini vurgulamıştır. Bu araştırma, SPSS'in maliyet kontrolünde karar vermeyi geliştirme potansiyelini vurgulayarak, onu müteahhitler ve inşaat yöneticileri için değerli bir kaynak haline getirmiştir. Bu örnek, SPSS'in inşaat maliyetleri yönetme ve kaynak tahsis verimliliğini iyileştirme rolünü göstererek, kalite kontrol ve optimizasyon süreçlerindeki önemini daha da desteklemektedir (Ashish ve Jayeshkumar, 2013).

Bir diğer çalışma, SPSS'in yol inşaat projelerinde işgücü verimliliğini analiz etmedeki önemli rolünü vurgulamaktadır. SPSS, tanımlayıcı istatistikler, korelasyon analizi ve regresyon modellemesi yoluyla, malzeme bulunabilirliği, saha koşulları ve işgücü yönetimi gibi verimliliği etkileyen birincil faktörlere ilişkin içgörüler sağlamıştır. SPSS'in kullanımı, kritik sorunların veri odaklı olarak sıralanmasına ve önceliklendirilmesine olanak tanımış, gecikmeleri ele alma, işçi güvenliğini iyileştirme ve zamanında malzeme tedarikini sağlamada proaktif önlemlerin önemini vurgulamıştır. Çalışmanın bulguları, SPSS'in büyük veri kümelerini ele alma ve özellikle sonuçları etkileyen birden fazla birbirine bağlı değişkenin olduğu inşaat projelerinde uygulanabilir içgörüler elde etmedeki çok yönlülüğünü vurgulamaktadır. Araştırma, SPSS'i kullanarak kaynak tahsisini optimize etmede, proje verimliliğini artırmada ve gecikmeleri azaltmada istatistiksel araçların önemini göstermiştir, böylece yol inşaat projelerinin genel güvenilirliğine ve başarısına katkıda bulunmuştur (Subramani ve Rajiv, 2016).

SPSS uygulaması sosyal bilimlerin çok ötesine uzanmış ve inşaat mühendisliği ve yol inşaatı gibi diğer disiplinlerde önemli bir kullanım alanı bulmuştur. Bu genişleme, çeşitli analitik ihtiyaçları ele almada uyarlanabilirliğini ve etkinliğini göstermektedir.

SPSS, korelasyon analizi, regresyon analizi, ANOVA ve T testleri aracılığıyla araştırmacıların temel değişkenler arasındaki ilişkileri titizlikle değerlendirmelerine, kalıpları belirlemelerine ve anlamlı sonuçlar çıkarmalarına olanak tanımaktadır. Örneğin, daha geleneksel NDG ve SC testlerine kıyasla LWD'nin bir sıkıştırma kontrol yöntemi olarak güvenilirliğini vurgulayabilir ve kullanımını desteklemek için istatistiksel kanıt sağlayabilir. Bu yetenek, yol yapım projelerinde kalite kontrolü için en

verimli ve uygun maliyetli yöntemleri belirlemede özellikle değerlidir. Araştırmacılar, SPSS'i otoyol taban tabakası sıkıştırma verilerine uygulayarak, farklı derinliklerin test sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirebilir, farklı yöntemlerin hassasiyetini belirleyebilir ve LWD'nin genel performansını değerlendirebilirler.

Özetle, SPSS yol inşaatı araştırmalarında istatistiksel analizin titizliğini ve derinliğini artıran güçlü bir araçtır. Çok yönlülüğü, çeşitli yöntemlerin güvenilirliğini ve verimliliğini değerlendirmek ve veri odaklı karar vermeyi sağlamak için kritik bir varlık haline getirir. Verileri sistematik olarak analiz ederek ve yorumlayarak, SPSS mühendislik uygulamalarının ilerlemesine katkıda bulunur ve otoyol inşaatında sıkıştırma kontrolü ve kalite güvencesinde yenilikleri teşvik eder.

1.3 Yol İnşaatı ve Sıkıştırma Kontrol Teknikleri

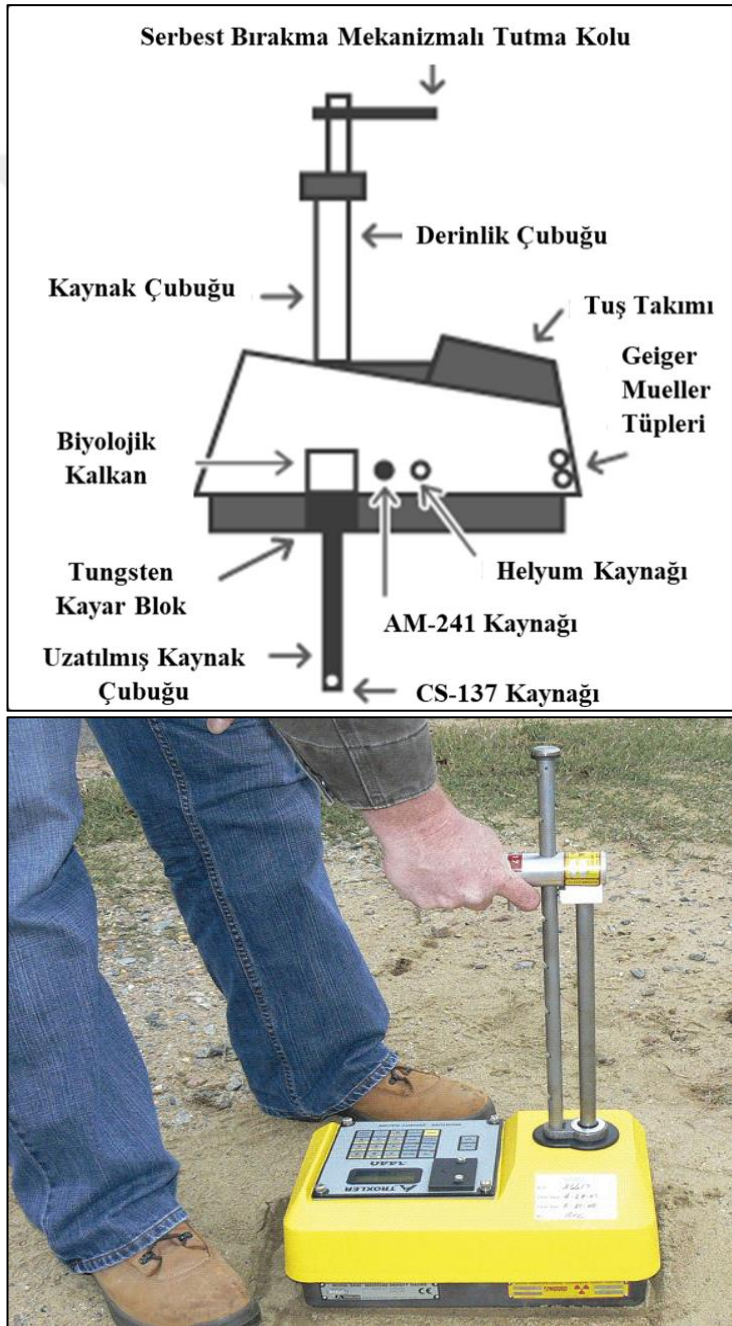
Yol inşaatı, dayanıklı, güvenli ve verimli ulaşım ağlarının oluşturulmasını sağlayan inşaat mühendisliğinin temel bir yönüdür. Bu yolların kalitesi ve uzun ömürlülüğü, kaplama yapısının temelini oluşturan taban katmanlarının sağlamlığı ve sıkışmasından doğrudan etkilenir. Taban katmanlarının uygun şekilde sıkıştırılması, oturmayı en aza indirir, yük taşıma kapasitesini artırır ve deformasyona karşı direnci artırır. Sıkıştırma işlemindeki başarısızlıklar yolun erken bozulmasına neden olabilir, bu da bakım maliyetlerinin artmasına ve halk için güvenlik tehlikelerine neden olabilir.

Karayollarının taban katmanlarının zaman içinde trafik yüklerini desteklemek için gerekli gücü ve dayanıklılığı sağlamak için sıkıştırma kontrolü önemlidir. Sıkıştırılmamış veya yetersiz sıkıştırılmış katmanlar yol yapısında zayıf noktalara yol açarak çukurlara, çatlaklara ve düzgün olmayan yüzeylere neden olabilir. Etkili sıkıştırma kontrolü, toprak parçacıklarının sıkı bir şekilde paketlenmesini sağlayarak yol tabanını zayıflatabilecek hava boşluklarını en aza indirir. Sıkıştırma kalitesini değerlendirmek için her birinin kendi yararları ve sınırlamaları olan çeşitli yöntemler kullanılır.

Yol yapımında, toprağın sıkıştırma derecesini değerlendirmek için NDG ve SC testi dahil olmak üzere çeşitli geleneksel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler köklüdür ve sahada onlarca yıldır kullanılmaktadır. Bununla birlikte, LWD gibi daha yenilikçi çözümlere olan ihtiyacı doğuran çevresel güvenlik kaygıları ve zaman tüketimi gibi zorlukları da beraberinde getirmektedirler.

1.3.1 Nükleer Yoğunluk Ölçer (NDG)

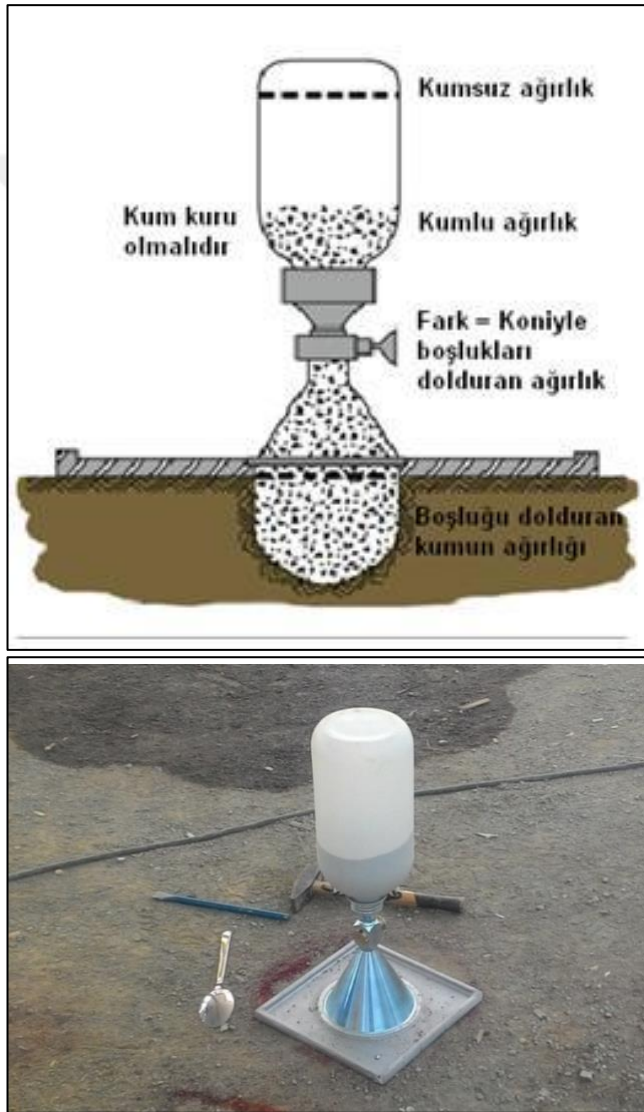
NDG yöntemi yol yapımında en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Toprağa gama radyasyonu yayarak, numuneyi bozmadan malzemenin yoğunluğunu ve nem içeriğini ölçerek çalışır. NDG hızlı, güvenilir ölçümler sunar ve sondanın ne kadar derine yerleştirildiğine bağlı olarak çeşitli derinliklerdeki toprak yoğunluğunu değerlendirebilir. Bununla birlikte, NDG, içerdiği radyoaktif madde nedeniyle özel kullanım ihtiyacının yanı sıra güvenli çalışmaya yönelik düzenleyici gereklilikler de dahil olmak üzere sınırlamalarla birlikte kullanılmaktadır.



Şekil 2. Bileşenleriyle birlikte Nükleer yoğunluk ölçüm cihazı. (URL 1)

1.3.2 Kum Konisi Testi (SC)

Kum Konisi yöntemi basit ve güvenilir olmasına rağmen yoğun emek gerektirmektedir. Toprağın yerinde yoğunluğunu belirlemek için sıkıştırılmış toprakta bir delik kazmayı ve onu bilinen yoğunlukta kumla doldurmayı gerektirir. Kullanılan kumun dikkatli bir şekilde kalibre edilmesi gerekir ve işlemin kendisi, hassas bir şekilde gerçekleştirilmediği takdirde zaman alıcı olabilir ve hatalara maruz kalabilir. Buna rağmen Kum Konisi yöntemi, zeminlerin yerinde yoğunluğunun belirlenmesindeki doğruluğu nedeniyle hala yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3. Kum Konisi cihazı Bileşenlerle (URL 2)

1.3.3 LWD'nin Geleneksel Yöntemlere Göre Avantajları

- Taşınabilirlik ve Hız: LWD, farklı test noktalarına kolaylıkla taşınabilen hafif, taşınabilir bir cihazdır. NDG'den farklı olarak özel güvenlik önlemleri gerektirmez, bu da konuşlandırılmasını hızlandırır.

- Tahribatsız: LWD testi müdahalesizdir, yani toprağı bozabilecek delik kazmayı veya zemine nüfuz etmeyi gerektirmez. Bu, toprağın bütünlüğünü etkilemeden birden fazla testin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır.

- Gerçek Zamanlı Sonuçlar: LWD, toprak sertliğı hakkında anında veri sağlayarak sahada hızlı karar alınmasını sağlar.

- Çok yönlülük: LWD, çeşitli toprak türlerinde ve farklı çevre koşullarında kullanılabilir, bu da onu çok çeşitli inşaat projelerine uygun hale getirir.

1.3.4 LWD'nin Sınırlamaları

LWD çok sayıda avantaj sunsa da sınırlamaları da vardır. LWD testleri için etki derinliğı tipik olarak sığdır ve genellikle yük plakasının çapının yalnızca 1 ila 1.5 katı kadar uzanır. Bu, çok katmanlı bir toprak sisteminde daha derin katmanların sıkışma kalitesinin değerlendirilmesini daha az etkili hale getirir. Ek olarak, LWD sonuçları yüzey düzensizliklerinden etkilenebilir ve NDG ve SC gibi geleneksel yöntemlere kıyasla performansının daha fazla doğrulanması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

1.3.5 Otoyol Taban Katmanı Sıkıştırmasında LWD

Yol yapımında, özellikle otoyolların taban katmanlarında, sıkıştırma, kaplamanın uzun vadeli performansı açısından çok önemlidir. LWD, mühendislerin sıkıştırılmış katmanların sertliğini hızlı bir şekilde değerlendirmesine olanak tanıdığından, bu bağlamda kalite kontrol için giderek daha fazla kullanılmaktadır. LWD, taban katmanlarının elastik modülünü ölçerek karayolunun zaman içinde trafik yüklerine ve çevresel baskılara dayanabilmesini sağlamaya yardımcı olmaktadır.

1.3.6 Küresel Altyapı Geliştirmede LWD'nin Rolü

Küresel karayolu altyapısı genişlemeye devam ettikçe daha hızlı, daha verimli sıkıştırma kontrol yöntemlerine olan talep de artmıştır. LWD'nin hızlı, tahribatsız test sağlama yeteneğı, hız ve doğruluğun çok önemli olduğu modern yol inşaatı projelerinin ihtiyaçlarıyla uyumludur. Bu, LWD'yi otoyolların, havalimanlarının ve diğer kritik altyapıların inşasında değerli bir araç haline getirmektedir.

Sonuç olarak, yol yapımında güvenilir, doğru ve verimli sıkıştırma kontrolü yöntemlerine olan ihtiyaç, LWD gibi teknolojilerin yaygın şekilde benimsenmesine yol açmıştır. NDG ve SC gibi geleneksel yöntemlerin avantajları bulunurken LWD, modern inşaat projeleri için daha hızlı, daha pratik bir çözüm sunmaktadır. Bu tezde araştırıldığı

gibi, LWD'nin kullanılabilirliği ve etkinliği, sıkıştırma kontrolü için birincil bir araç olarak hizmet etme potansiyelini belirlemek amacıyla NDG ve SC yöntemleriyle karşılaştırmalı analiz yoluyla eleştirel bir şekilde incelenecektir.

1.4 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez, SC testinden elde edilen sıkışma yüzdesinin LWD'den elde edilen elastik modül ile karşılaştırarak döngüsel bir yükleme yaklaşımını izleyecektir. Ayrıca çalışma, LWD ile NDG arasındaki ilişkiyi araştırarak ve bu farklı metodolojilerden elde edilen verilerin nasıl hizalandığını ve etkileşime girdiğini analiz edecektir. Temel amaç, LWD'nin gerçek dünya uygulamalarında etkinliğini ve güvenilirliğini değerlendirmek ve geleneksel sıkıştırma kontrol yöntemlerinin yerini alma veya tamamlama potansiyelini araştırmaktır.

Hız, maliyet verimliliği ve doğruluk için sürekli olarak optimize edilmiş metodolojiler arayan modern yol inşaatının daha geniş bağlamında, LWD gibi yeniliklerin önemi göz ardı edilemez. Zemin sıkıştırma, inşaat mühendisliği projelerinde, özellikle de kaplamaların yapısal bütünlüğünün ve uzun ömürlülüğünün sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. LWD, diğer yöntemlerin gerektirdiği kapsamlı kurulum gerekmeden hızlı, yerinde ölçümler sağlayarak umut verici bir çözüm sunmaktadır.

Bu çalışma, LWD'nin doğruluğunu, kesinliğini ve güvenilirliğini NDG ve SC testleri gibi köklü tekniklerle karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye odaklanacaktır. SPSS gibi istatistiksel araçları kullanan bu araştırma, saha testlerinden toplanan verilerin kapsamlı bir karşılaştırmalı analizini gerçekleştirecek ve sonuçlar arasındaki korelasyonları, tutarsızlıkları ve ortaya çıkan kalıpları ayırt etmeyi sağlayacaktır. Bu ilişkiler belirlenerek çalışma, LWD'nin modern sıkıştırma değerlendirme metodolojilerine nasıl entegre edilebileceğinin daha derinlemesine anlaşılmasına katkıda bulunacaktır.

Küresel yol inşaatı çabalarında yeni teknolojilerin benimsenmesine yönelik artan ivme göz önüne alındığında, genişleyen ulaşım ağlarını desteklemek için verimli ve doğru altyapı geliştirilmesine yönelik artan bir ihtiyaç vardır. Mühendisler, gelişmiş araçları iş akışlarına entegre ederek sürekli olarak inovasyonun sınırlarını zorlamakta ve LWD bu hareketin ön saflarında yer almaktadır. LWD'nin minimum kesintiyle gerçek zamanlı sonuçlar sağlama yeteneği, özellikle zaman ve hassasiyetin çok önemli olduğu büyük ölçekli altyapı projelerinde onu çekici bir alternatif haline getirmektedir.

LWD'nin güçlü yönlerinin ve sınırlamalarının kapsamlı bir değerlendirmesi, gerçek dünya senaryolarında uygulanabilirliğini ve etkinliğini belirlemek için esastır. Bu tez, LWD'yi geleneksel yöntemlerle karşılaştırarak, LWD'nin pratik faydalarını aydınlatmayı ve toprak sıkışma değerlendirmesi konusunda giderek artan bilgi birikimine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bunu yaparak, modern metodolojilerin dünya çapında daha verimli ve bilinçli uygulamalara yol açmasını sağlayarak, inşaat mühendisliğinde, özellikle yol inşaatı ve altyapı geliştirmede karar alma süreçlerini bilgilendirmeyi amaçlamaktadır.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Arazi Çalışmaları

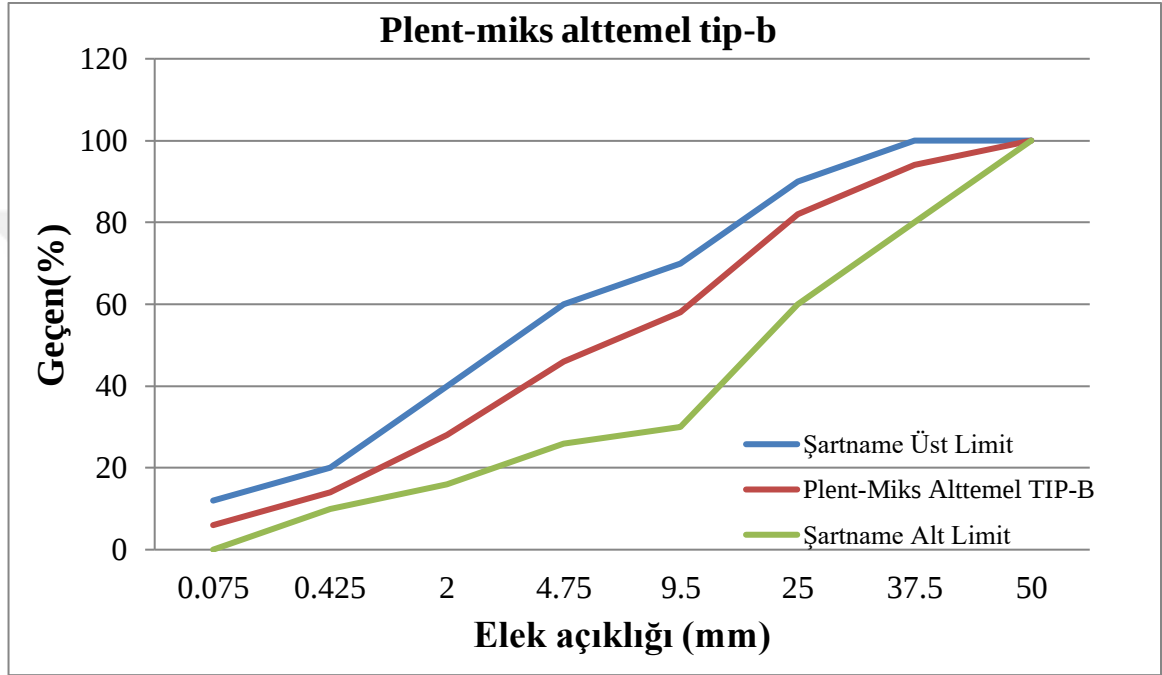
Bu bölümde, karayolu zemin tabakalarında sıkıştırma kontrolü için LWD etkinliğini değerlendirmek için kullanılan araçlar, test prosedürleri ve istatistiksel teknikler ayrıntılı olarak özetlenmiştir. LWD'nin performansı NDG ve SC testleri gibi geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmış, alttemel tabakalarının sıkışma kalitesini değerlendirmek için yol kesitlerinde yapılan saha deneylerinin sonuçlarından yararlanılmıştır. Saha çalışmaları sırasında zemin sertliği, yoğunluğu ve nem içeriğine ilişkin veriler birden fazla derinlikten toplanarak farklı yöntemler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmasına olanak sağlamıştır.

Saha çalışması Trabzon-Kürtün karayolunun seçilen kesimlerinde kuru birim ağırlık, su içeriği ve sıkıştırma yüzdesi gibi sıkıştırma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla testler yapılarak gerçekleştirilmiştir. SC testinden elde edilen sonuçlar, LWD ve NDG ile karşılaştırma için referans değerler olarak kullanılmıştır. Bu yöntemler arasındaki ilişkileri daha ayrıntılı analiz etmek için, SPSS yazılımı kullanılarak regresyon ve korelasyon dahil istatistiksel analiz yapılmıştır. Bu analiz, LWD ile geleneksel yaklaşımlar arasındaki tutarlılığın araştırılmasına yardımcı olarak LWD'nin yol inşaatı projelerinde güvenilirliği ve pratik uygulanabilirliği konusunda değerli bilgiler sağlamıştır.



Şekil 4. Alttemel tabakası üzerinde 2,5 m aralıklarla testlerin yapılacağı noktalarının belirlenmesi ve LWD, nükleer yoğunluk test cihazlarının ve kum konisinin kurulması (Akpınar vd., 2015)

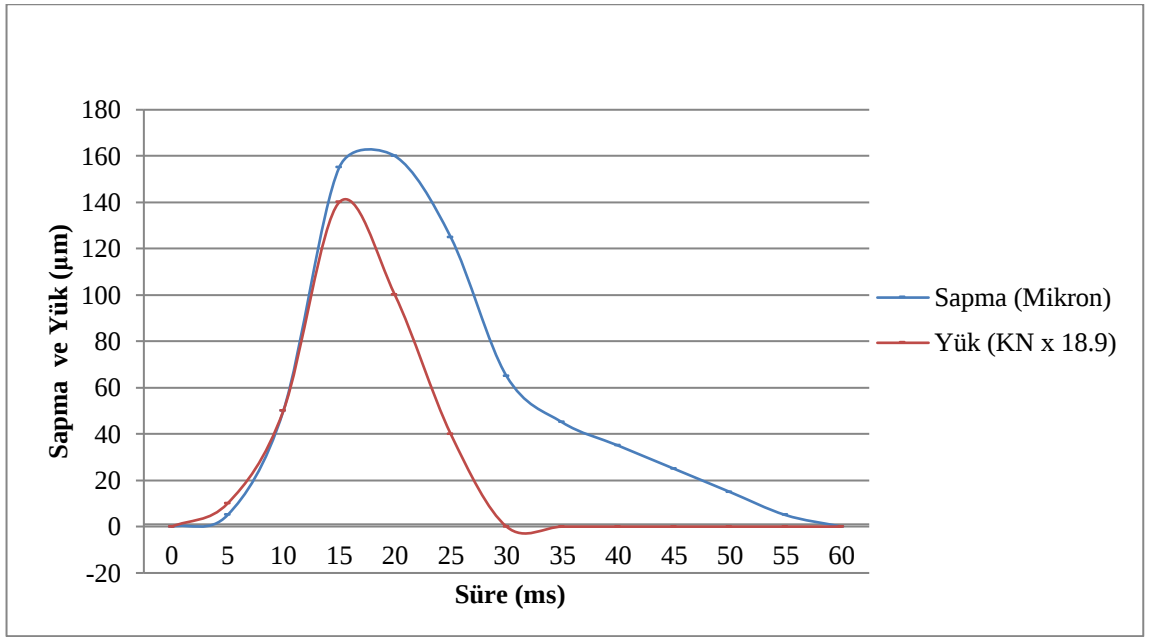
Alt temel tabakası için kullanılan agregalar devlet yolu üzerinde Km: 89+500 adresindeki Mescitli Kireçtaşı Ocağından temin edilmiştir. Alttemel katmanının tasarımı, tolerans sınırları dahilinde çalışarak, Şekil 5'te belirtilen derecelendirme ve Türkiye'de Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) elek analizi standartlarına bağlı kalmıştır. Uygun sıkıştırmayı sağlamak için, Modifiye Proktor testi ile belirlenen karışımın optimum nem içeriği %4.35 olup ve yeterli sıkıştırma ile maksimum 2.254 ton/m³ kuru birim ağırlığa ulaşmıştır.



Şekil 5. Alttemel tabakası için elek analizi eğrisi

Bu çalışmada kullanılan LWD'de, belirli yüksekliklerden 150 veya 300 mm çapında bir plaka üzerine bırakılan 10 kg'lık bir ağırlık kullanılmıştır. Bu darbenin neden olduğu sapma, zeminin elastik modülünü ölçmek için kullanılmıştır. LWD'nin ana avantajı hızı ve invazif olmayan yapısıdır; her testin tamamlanması yalnızca 5-8 dakika sürmekte, tüm testler için 300 mm'lik bir plaka kullanılmıştır. Şekil 6'da test sırasında gözlemlenen tipik zaman-sapma ilişkileri gösterilmektedir.

Sahada kullanılan LWD cihazı, 15 kN'a kadar yükleri ölçebilen hassas bir yük hücresi ile donatılmıştır. 150 mm ve 300 mm çapında plakalar kullanılmış ancak 200 mm'lik plaka da opsiyonel olarak mevcuttur. Cihaz üç jeofona kadar desteklenebilmekte ve 2000 saatlik test çalıştırma kapasitesine sahip standart pillerle çalışabilmektedir. Ek özellikler arasında jeofon koruma sistemi ve çift plaka kurulumu bulunmaktadır.



Şekil 6. LWD için yük-yer değiştirme ve zaman ilişkileri

Granülometri, nem içeriği ve tane şekli, LWD ölçümlerinde kritik bir rol oynayarak zemin sertliği ve sıkışma davranışını etkiler. Bu faktörler test sonuçlarını genellikle etkileyebilse de, bu çalışmada çalışma alanındaki zemin özellikleri ve sıkışma seviyeleri önemli ölçüde değişiklik göstermemiştir. MR değerlerindeki farklılıkların, büyük ölçüde LWD cihazının çalışma prensibi ve hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, cihazın altındaki jeofon, yüzeyin pürüzlülüğüne ve sertliğine bağlı olarak farklı ölçümler alabilir, bu da sonuçları doğrudan etkileyebilir.

Boussinesq'un elastik teorisi, LWD'nin güvenilirliğini değerlendirmek için temel bir rol oynar; çünkü elastik bir yarı uzaya uygulanan dairesel bir yük altındaki gerilme dağılımını ve deformasyonu tahmin etmek için bir temel sağlar. LWD testlerinde, yüzey deformasyonları, yük plakasının merkezine monte edilen bir jeofon ve zemine temas eden destek çubuğuna yerleştirilen en fazla iki radyal jeofon kullanılarak ölçülmektedir. Hız ölçümlerinden entegre edilen bu deformasyonlar ve cihaz gövdesine monte edilmiş bir kuvvet transdüseri tarafından ölçülen uygulanan kuvvet (P), zemin sertliğini yansıtan elastisite modülünü (Emod) belirlemek için kullanılmaktadır. Geleneksel LWD modülü, merkez jeofonda (d_0) ölçülen maksimum deformasyonun, Boussinesq'un homojen, izotropik ve statik doğrusal elastik yarı uzay varsayımları ile ilişkilendirilmesiyle hesaplanmaktadır. Ancak, gerçek zemin koşulları genellikle bu varsayımlardan sapmakta olup, zemin bileşimi, su içeriği ve tabakalaşmadaki değişiklikler, LWD ile elde edilen elastisite modülü tahminlerinin doğruluğunu etkileyebilmektedir.

LWD cihazı veri üretirken, ELWD'nin hesaplanmasına yönelik denklem, uygulanan yük, neden olunan sapma ve malzemenin sertliği arasındaki ilişkiden yararlanmaktadır. LWD tarafından uygulanan basıncı, yükleme plakasının yarıçapını ve ölçülen yüzey sapmasını hesaba katarak defleksiyon değerleri ve Emod (elastik modulus) değerleri hesap edilmektedir.

$$E_{LWD} = \frac{A(1-\mu^2)P}{a d o \pi} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Bu eşitlikte:

P = Uygulanan kuvvet,

A = Temas gerilmesi,

do = Merkez jeofonu (Sapmayı ölçer),

μ = Poisson oranı,

a = Plaka yarıçapı

Poisson oranı (μ), LWD analizinde kritik bir parametre olup, zeminin yük altındaki yanal deformasyon tepkisini tanımlar. Bu oran, zemin türüne ve nem içeriğine bağlı olarak genellikle 0.2 ile 0.5 arasında değişir. Bu çalışmada, seçilen Poisson oranı, gözlemlenen zemin koşulları ve malzeme özellikleri dikkate alınarak belirlenmiş ve böylece zemin sertliğinin gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesi sağlanmıştır. Daha düşük Poisson oranları (0.2–0.3), tane yapılı ve kuru zeminleri temsil eder; bu tür zeminlerde yanal deformasyon daha az olduğu için hesaplanan elastisite modülü değerleri daha yüksek çıkar ve zemin daha sert görünür. Öte yandan, daha yüksek Poisson oranları (0.4–0.5), kohezyonlu ve suya doymuş zeminlerde daha fazla yanal deformasyona yol açar ve bu durum elastisite modülünün daha düşük hesaplanmasına neden olarak zeminin sertliğinin olduğundan düşük tahmin edilmesine sebep olabilir.

Poisson oranındaki değişimler, hesaplanan elastik modülü doğrudan etkileyerek zeminin sıkışma kalitesinin yanlış değerlendirilmesine neden olabilir. Bu nedenle, saha koşullarına uygun Poisson oranının seçilmesi, güvenilir ve doğru LWD sonuçları elde etmek için kritik öneme sahiptir.

LWD testinde yük dağılımı açısından, sapma, cihazın farklı noktalarda kaydettiği deplasman verilerine dayanarak ölçülür. Bu deplasman, genellikle LWD cihazına entegre edilmiş sensörler aracılığıyla izlenir ve sismik testlerle daha çok ilişkilendirilen jeofon kullanımından farklı olarak, uygulanan yükten kaynaklanan defleksiyonu ölçer.

Ölçülen defleksiyon, zeminin sertliği ve sıkışma kalitesi hakkında önemli bir gösterge sağlar.

Test sırasında, bilinen bir dinamik yük, genellikle ağırlık düşürme mekanizmasıyla toprak yüzeyine uygulanır. Yük uygulandıkça, basınç etki noktasından radyal olarak yayılır. Kohezyonlu topraklarda basınç, genellikle etki noktasında daha yoğunlaşırken, granüler topraklarda daha homojen bir şekilde yayılır. Bu yük uygulaması, yüzey tabakasının ilk olarak deforme olmasına neden olur, daha derin katmanlar ise yükün dağılımı nedeniyle daha az deformasyona uğrar. Sonuç olarak, yumuşak topraklar daha büyük defleksiyon yanıtı verirken, sert topraklar deformasyona daha dirençli olduğundan daha az defleksiyon gösterir.

LWD tarafından ölçülen defleksiyon, toprağın çeşitli derinliklerdeki sertliğini gösterir. Yüksek defleksiyon değerleri, genellikle daha yumuşak ve az sıkışmış topraklara işaret ederken, düşük defleksiyon değerleri daha yoğun ve sıkıştırılmış katmanları işaret eder. Bu anlayış, sıkışma kalitesini değerlendirmek ve yol inşaatında toprağın trafik yüklerine karşı dayanıklılığını tahmin etmek açısından önemlidir.

2.2 SPSS Analizleri

SPSS, son sürümlerde resmi olarak IBM SPSS Statistics olarak bilinir, sosyal bilimler, pazar araştırması, sağlık, eğitim ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli disiplinlerde veri analizini kolaylaştıran kapsamlı ve yaygın olarak kullanılan bir istatistiksel yazılım paketidir. Başlangıçta sosyal bilim araştırmalarını desteklemek için geliştirilen SPSS, çeşitli alanlardaki verileri yönetmek ve analiz etmek için çok yönlü bir araca dönüşmüştür. Kapsamlı analitik yetenekleri, kullanıcı dostu arayüzü ve sağlam veri yönetimi özellikleri onu modern araştırmalar için vazgeçilmez bir kaynak haline getirmiştir.

Yazılım, tanımlayıcı ve iki değişkenli istatistikler, öngörücü analiz ve gelişmiş istatistiksel modelleme için geniş bir istatistiksel araç yelpazesi sunmaktadır. Bunlar arasında çapraz tablolama yapma, veri dağılımlarını inceleme, korelasyonları analiz etme, t-testleri ve ANOVA gerçekleştirme ve öngörücü modelleme için regresyon yöntemleri uygulama becerisi yer alır. Ayrıca, SPSS faktör ve küme analizi gibi gelişmiş gruplama tekniklerini destekleyerek araştırmacılara hem keşifsel hem de doğrulayıcı analizler yapma esnekliği sağlamaktadır.

SPSS'in tanımlayıcı özelliklerinden biri, asgari teknik uzmanlığa sahip kullanıcılar için açılır menü sistemi ve ileri düzey kullanıcılar için tescilli sözdizimi programlama dilini birleştiren ikili arayüzüdür. Bu ikililik, karmaşık veri kümelerini ele almada

yeniden üretilebilirliği ve verimliliği teşvik ederken erişilebilirliği garanti etmektedir. Sözdizimi arayüzü, araştırmacıların tekrarlayan görevleri otomatikleştirmesini, karmaşık analizler gerçekleştirmesini ve dinamik betikleme için Python uzantılarını entegre etmesini sağlar. Dahası, SPSS'in R istatistikleriyle uyumluluğu işlevselliğini önemli ölçüde genişleterek gelişmiş istatistiksel prosedürlerin sorunsuz bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır.

Modern mühendislik araştırmalarında, istatistiksel analiz deneysel verileri değerlendirmek, kalıpları belirlemek ve korelasyonlar kurmak için olmazsa olmazdır. Bu çalışma kapsamında, otoyol alttemel tabakalarında sıkıştırma kontrolü için LWD'nin güvenilirliğini değerlendirmek için bir araç olarak SPSS programı kullanılmıştır. Büyük veri kümelerini verimli bir şekilde işlemek üzere tasarlanan SPSS, sahada toplanan verileri analiz etmek için gereken hassasiyeti ve derinliği sunmuştur.

Bu çalışmanın odak noktası, LWD'den elde edilen modül değerleri, NDG'den alınan ölçümler ve SC yönteminden türetilen sıkıştırma verileri arasındaki ilişkileri araştırmaktır. SPSS, bu araştırmayı tanımlayıcı istatistikler, regresyon analizi ve korelasyon testleri aracılığıyla kolaylaştırmıştır. Bu analizler, LWD ölçümleri ile geleneksel sıkıştırma kontrol yöntemlerinden elde edilenler arasındaki ilişkilerin gücünü ve tutarlılığını değerlendirmeye yardımcı olmuştur. Nem içeriği, derinlik ve sapma gibi değişkenleri inceleyerek, çalışmanın sahadaki sıkıştırma sonuçlarını etkileyen faktörler hakkında kapsamlı bir bilgi düzeyine ulaşılmıştır.

Bu araştırmaya SPSS'in entegre edilmesi, LWD'nin performansını nesnel olarak değerlendirmek için veri odaklı bir çerçeve sağlamıştır. Bu analizlerden elde edilen bulgular, LWD'nin geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini belirlemeye katkıda bulunacak ve karayolu alttemel ya da temel tabakası yapımında potansiyel benimsenmesine ilişkin değerli içgörüler sunacaktır. Sonuçlar, LWD'nin verimli ve doğru sıkıştırma kontrolü elde etmedeki rolünün anlaşılmasını geliştirmeyi ve nihayetinde karayolu inşaatı uygulamalarında ilerlemelere katkıda bulunmayı amaçlamıştır.

Bu çalışmada SPSS analizleri, LWD, NDG ve SC yöntemlerini karşılaştırmak için bir araç olarak hizmet vermektedir. Bu sıkıştırma kontrol teknikleri arasındaki ilişkileri değerlendirmek için korelasyon analizi, regresyon analizi, Varyans Analizi (ANOVA), faktör analizi ve T-testleri dahil olmak üzere çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler, geleneksel sıkıştırma değerlendirme yöntemlerine kıyasla LWD'nin tutarlılığını, doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için seçilmiştir.

LWD modülü ve NDG yoğunluğu gibi temel değişkenler arasındaki ilişkilerin gücünü ve yönünü belirlemek için korelasyon analizi kullanılmıştır. Pearson korelasyonu sürekli değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi değerlendirirken, veriler doğrusal olmayan eğilimler gösteriyorsa Spearman'ın sıra korelasyonu uygulanabilecektir. Bu testler, LWD ölçümlerinin NDG ve SC yöntemlerinin sonuçlarıyla uyumlu olup olmadığını belirlemeye yardımcı olmuştur.

Regresyon analizi, sıkıştırma yoğunluğu gibi bağımlı bir değişken ile LWD modülü veya nem içeriği gibi bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modellediği için bu çalışmada kullanılan bir başka önemli araç olmuştur. Basit ilişkileri değerlendirmek için doğrusal regresyon kullanılırken, çoklu regresyon değişken kombinasyonlarının sıkıştırma sonuçlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu yaklaşım, sıkıştırma kalitesini belirlemek için LWD verilerinin tahmin gücünü değerlendirmeye yardımcı olacaktır.

Farklı derinlikler (yüzeyde, 5 cm, 10 cm ve 15 cm) veya malzemeler arasında sıkıştırma sonuçlarındaki farklılıkları değerlendirmek için ANOVA (Varyans Analizi) uygulanacaktır. Tek yönlü ANOVA, çeşitli derinliklerdeki LWD ve NDG sonuçları gibi birden fazla grup arasındaki ortalama değerleri karşılaştırırken, iki yönlü ANOVA derinlik ve nem içeriği gibi iki bağımsız faktörün sıkıştırma ölçümleri üzerindeki etkileşim etkilerini değerlendirecektir.

T-testi, farklı veri kümelerinin ortalamalarını karşılaştırarak farklılıklarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için önemli bir istatistiksel araçtır. Bu tezde, LWD'nin ölçümlerini NDG ve SC yöntemlerinin ölçümleriyle karşılaştırarak güvenilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. T-testi, bu yöntemler arasında sıkıştırma ölçümlerinde önemli farklılıkların belirlenmesine olanak tanıyarak, LWD'nin NDG ve SC'nin yoğunluk odaklı ölçümlerinin aksine yüzey sertliğine odaklandığını vurgulamıştır. Bu yaklaşım, LWD'nin otoyol taban katmanını sıkıştırma kontrolü için güçlü ve nesnel bir analizini sağlamıştır.

Güvenilirlik İstatistikleri, özellikle Cronbach'ın Alfa'sı, bir veri setinin iç tutarlılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek için kullanılan hayati bir ölçüdür. Bu tezde, LWD, NDG ve SC yöntemlerinden elde edilen ölçümlerin tutarlılığını değerlendirmek için uygulandı. Verilerin güvenilirliğini sağlayarak, Cronbach'ın Alfa'sı karşılaştırmalı analizin sağlamlığını doğruladı ve her yöntemin sonuçlarının değişen koşullar altında kararlılığını vurguladı. Bu istatistiksel yaklaşım, sıkıştırma kontrolünde LWD'nin etkinliği ve değişkenliği hakkında çıkarılan sonuçlara güven sağladı.

SPSS Faktör Analizi, bir veri kümesindeki temel kalıpları ve ilişkileri belirlemek için kullanılan istatistiksel bir araçtır. Bu tezde, NDG ve SC yöntemlerine kıyasla ölçümlerini etkileyen temel faktörleri belirleyerek LWD'nin güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu analiz, yüzey sertliği ve değişkenliği gibi LWD performansını etkileyen en önemli değişkenleri izole etmeye yardımcı olarak, sıkıştırma kontrolü için uygulanabilirliği ve geleneksel yöntemlerle uyumu hakkında daha derin içgörüler sağlamıştır.

Bu SPSS yöntemlerinin birlikte kullanımı, saha verilerinin analiz edilmesi ve yorumlanması için sağlam bir çerçeve sağlayacaktır. Korelasyon, regresyon, ANOVA, faktör analizi ve T-testlerini kullanarak bu tez, karayolu yapımındaki sıkışma ölçümleri sırasında, NDG ve Kum Konisi gibi geleneksel sıkıştırma kontrol yöntemlerine alternatif olarak LWD'nin güvenilirliği ve uygulanabilirliği hakkında kapsamlı bir değerlendirme sunmayı amaçlamaktadır.

3. BULGULAR ve İRDELEME

3.1 Araziden Elde Edilen Veriler

Bu bölümde, LWD, NDG ve SC yöntemi kullanılarak yapılan saha testleri aracılığıyla toplanan deneysel veriler (Akpınar vd., 2015) sunulmakta ve bu sonuçlar ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmektedir. Bu testler, NDG ve SC yöntemi ile bir karayolu inşaat projesinin alttemel tabakalarındaki birim hacim ağırlık, su muhtevası, sıkışma yüzdesi gibi değerleri verirken LWD testiyle de Kuvvet (kN), Darbe (ms), Basınç (KPa), Sapma (μm) ve Esaltık Modül (Mpa) değerlerini sağlamaktadır.

Yol yüzeyinde sıra ve sütunlar halinde düzenlenmiş 15 farklı noktada saha testleri gerçekleştirilmiştir. Ekipmanın taşınabilirliği nedeniyle testler bu lokasyonlarda kolaylıkla gerçekleştirilmiş, spesifik olarak LWD testi, alttemel tabakası yüzeyindeki 15 noktanın her birine altı vuruş içermektedir. Benzer şekilde yüzeyde ve 5 cm, 10 cm ve 15 cm derinlikte aynı 15 noktadan NDG ve Kum konisi yöntemleri kullanılarak veriler alınmıştır.

Tablo 2. LWD'den toplanan veriler (Akpınar vd., 2015)

LWD Ölçüm Sonuçları (10 kg-15"-50 KPa)						
Ölçüm Noktaları	Vuruş Sayısı	Kuvvet (KN)	Darbe (ms)	Basınç (Kpa)	Sapma (μm)	Elastik modül (Mpa)
1	1	5.1	25	72	90	211
	2	5.1	25	71.5	90	209
	3	5	24	71.1	94	199
	4	5	25	71.2	92	203
	5	5.1	24	71.9	96	197
	6	5	24	70.7	97	192
2	1	4.9	24	69.5	349	52
	2	4.9	23	70	166	111
	3	5	24	70.7	146	127
	4	5	24	70	142	130
	5	5	24	70	141	131
	6	5	24	70.5	138	134
3	1	5	25	70.2	442	42
	2	5.1	24	71.6	164	115
	3	5	23	71.4	158	119
	4	5.1	24	72	152	125
	5	5.1	25	72.4	148	129
	6	5.1	24	72	159	119

Tablo 2. (Devamı)

LWD Ölçüm Sonuçları(10 kg-15"-50 KPa)						
Ölçüm Noktaları	Vuruş Sayısı	Kuvvet (KN)	Darbe (ms)	Basınç (Kpa)	Sapma (µm)	Elastik modül (Mpa)
4	1	5	24	70.4	196	95
	2	5	24	70.3	131	142
	3	4.9	24	70	124	149
	4	4.9	24	69.5	118	155
	5	5	24	71	127	147
	6	4.9	23	70	126	146
5	1	5.1	27	72.1	223	85
	2	5.1	25	71.7	214	88
	3	5.1	25	71.6	201	94
	4	5	24	71.2	194	96
	5	5.1	25	71.7	192	98
	6	—	—	—	—	—
6	1	4.9	24	70	249	73
	2	4.9	24	69.6	152	120
	3	5	23	70.2	149	124
	4	4.9	24	69.7	142	129
	5	4.9	23	70	142	130
	6	4.9	24	69.2	147	124
7	1	5.1	24	72.4	164	116
	2	5.1	24	71.8	129	146
	3	5	24	71.4	122	153
	4	5	24	71.4	125	150
	5	5	24	71.1	125	150
	6	5	24	70.1	130	143
8	1	4.9	24	69.7	403	46
	2	5.1	24	71.5	191	90
	3	5.1	24	72	175	108
	4	5	24	71.3	168	112
	5	5	24	71	160	117
	6	5.1	24	71.6	159	118
9	1	4.9	24	69	245	74
	2	4.9	24	69.7	174	106
	3	4.9	24	69.4	172	106
	4	4.9	24	69.7	171	107
	5	4.9	23	69.8	161	114
	6	4.9	24	69.5	164	112

Tablo 2. (Devamı)

LWD Ölçüm Sonuçları(10 kg-15"-50 KPa)						
Ölçüm Noktaları	Vuruş Sayısı	Kuvvet (KN)	Darbe (ms)	Basınç (Kpa)	Sapma (µm)	Elastik modül (Mpa)
10	1	5	24	70.8	242	77
	2	5.1	24	71.5	148	127
	3	5.1	24	71.8	136	139
	4	5	24	71	135	138
	5	5.1	24	71.5	130	145
	6	5	24	70.6	134	138
11	1	5	24	71.1	149	126
	2	5.1	24	71.5	122	155
	3	5.1	24	71.8	117	162
	4	5	24	71.3	117	160
	5	5	24	70.8	122	153
	6	5.1	24	72.1	117	162
12	1	5.1	24	71.5	299	63
	2	5	24	71	162	115
	3	5	24	71.4	142	132
	4	5.1	24	71.5	142	132
	5	5	24	71.4	145	130
	6	5.1	24	71.5	146	129
13	1	4.8	24	68.1	155	116
	2	4.8	24	68.4	111	162
	3	4.9	24	68.8	86	132
	4	4.9	24	69.2	84	209
	5	4.9	24	69.7	89	206
	6	4.9	24	69.4	88	208
14	1	4.9	24	69.5	142	129
	2	4.9	24	69.2	102	179
	3	4.9	24	69	105	174
	4	4.9	24	68.6	102	177
	5	4.9	24	69.8	108	172
	6	4.9	24	68.9	105	173
15	1	5.1	24	72	185	102
	2	5.1	24	71.8	137	137
	3	5	24	70.6	146	127
	4	5	24	70.5	141	132
	5	5	24	70.9	132	141
	6	5	24	71.4	123	153

Tablo 3. NDG'den toplanan veriler (Akpınar vd., 2015)

		Yaş Yoğunluk (kg/m³)	Kuru Yoğunluk (kg/m³)	% Rutubet içeriği	% Sıkışma
A1	Yuzey	2328	2222	4.7	98.6
		2304	2216	4.0	98.3
		2265	2175	4.1	96.5
	5cm	2219	2122	4.6	94.10
		2241	2139	4.8	94.90
		2228	2125	4.8	94.3
	10cm	2239	2145	4.4	95.2
		2235	2132	4.8	94.6
		2252	2160	4.3	95.8
	15cm	2247	2153	4.3	95.5
		2265	2172	4.3	96.4
		2274	2170	4.8	96.3
A2	Yuzey	2420	2329	3.9	103.3
		2297	2209	4.0	98
		2329	2240	3.9	99.4
	5cm	2337	2262	3.3	100,.4
		2347	2270	3.4	100.7
		2348	2260	3.9	100.3
	10cm	2320	2232	4.0	99.0
		2289	2210	3.6	98.1
		2308	2215	4.2	98.3
	15cm	2307	2224	3.7	98.7
		2295	2214	3.7	98.2
		2302	2224	3.5	98.7
A3	Yuzey	2295	2211	3.8	98.1
		2310	2212	4.5	98.1
		2360	2266	4.1	100.5
	5cm	2296	2192	4.7	97.3
		2307	2215	4.2	98.3
		2297	2211	3.9	98.1
	10cm	2303	2207	4.4	97.9
		2330	2240	4.0	99.4
		2310	2240	3.9	98.7
	15cm	2297	2214	3.8	98.2
		2298	2206	4.2	97.9
		2295	2194	4.6	97.3

Tablo 3. (Devamı)

		YaşYoğunluk (kg/m ³)	KuruYoğunluk (kg/m ³)	% Rutubet	% Sıkışma
A4	Yuzey	2287	2166	5.6	96.1
		2277	2165	5.2	96.1
		2272	2167	4.9	96.1
	5cm	2303	2200	4.7	97.6
		2300	2182	5.4	96.8
		2319	2219	4.5	98.4
	10cm	2306	2206	4.5	97.9
		2307	2212	4.3	98.1
		2292	2201	4.1	97.6
	15cm	2263	2168	4.4	96.2
		2281	2174	4.9	96.5
		2268	2160	5.0	95.8
A5	Yuzey	2381	2261	5.3	100.3
		2385	2269	5.1	100.7
		2394	2271	5.5	100.7
	5cm	2324	2213	5.0	98.2
		2315	2193	5.6	97.3
		2338	2219	5.3	98.5
	10cm	2313	2199	5.2	97.6
		2333	2227	4.8	98.8
		2321	2207	5.2	97.9
	15cm	2325	2212	5.1	98.1
		2321	2212	4.9	98.1
		2296	2176	5.5	96.6
A10	Yuzey	2358	2268	4.0	100.6
		2302	2208	4.2	98
		2323	2236	3.9	99.2
	5cm	2296	2208	4.0	98.0
		2301	2216	3.9	98.3
		2291	2202	4.1	97.7
	10cm	2294	2208	3.9	98.0
		2310	2228	3.7	98.8
		2293	2209	3.8	98.0
	15cm	2280	2193	4.0	97.3
		2280	2192	4.0	97.3
		2284	2202	3.7	97.7
A11	Yuzey	2367	2367	4.1	100.9
		2389	2389	3.5	102.3
		2344	2344	3.6	100.4
	5cm	2337	2337	3.6	100.1
		2356	2356	4.0	100.5
		2348	2348	3.9	100.3
	10cm	2332	2332	3.9	99.6
		2336	2336	3.6	100.1
		2343	2343	3.3	100.7
	15cm	2364	2364	3.6	101.3
		2355	2355	3.4	101.1
		2356	2356	4.1	100.4

Tablo 3. (Devamı)

		YaşYoğunluk (kg/m ³)	Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	% Rutubet	% Sıkışma
A12	Yuzey	2297	2216	3.7	98.3
		2316	2228	4.0	98.8
		2342	2260	3.6	100.3
	5cm	2294	2200	4.3	97.6
		2282	2202	3.7	97.7
		2291	2198	4.3	97.5
	10cm	2288	2194	4.3	97.3
		2296	2205	4.1	97.8
		2287	2207	3.6	97.9
	15cm	2280	2185	4.3	96.9
		2284	2204	3.7	97.8
		2277	2187	4.1	97.0
A13	Yuzey	2299	2213	3.9	98.2
		2313	2226	3.9	98.7
		2308	2193	5.2	97.3
	5cm	2379	2288	4.0	101.5
		2361	2274	3.8	100.9
		2364	2283	3.5	101.3
	10cm	2328	2243	3.8	99.5
		2330	2252	3.5	99.9
		2327	2248	3.5	99.7
	15cm	2310	2219	4.1	98.4
		2334	2242	4.1	99.4
		2313	2225	4.0	98.7
A14	Yuzey	2319	2223	4.3	98.6
		2303	2226	3.4	98.8
		2312	2217	4.3	98.4
	5cm	2358	2261	4.3	100..3
		2374	2296	3.4	101.9
		2351	2265	3.8	100.5
	10cm	2356	2271	3.7	100.8
		2363	2272	4.0	100.8
		2364	2285	3.5	101.4
	15cm	2319	2236	3.7	99.2
		2336	2266	3.1	100.5
		2330	2246	3.8	99.6
A15	Yuzey	2366	2285	3.5	101.4
		2327	2236	4.1	99.2
		2314	2221	4.2	98.5
	5cm	2333	2235	4.4	99.2
		2349	2259	4.0	100.2
		2352	2258	4.1	100.2
	10cm	2332	2232	4.5	99.0
		2340	2252	3.9	99.9
		2326	2240	3.8	99.4
	15cm	2317	2218	4.5	98.4
		2343	2241	4.6	99.4
		2318	2231	3.9	99.0

Tablo 4. Kum konisinden veriler (Akpınar vd., 2015)

Kum Konisi Sıkışma Yüzdeleri	
Nokta	%Sıkışma
1	93
2	92.6
3	91.3
4	94.1
5	92.2
6	93.8
7	93.7
8	95
9	93.5
10	96
11	97
12	95.4
13	94.2
14	95.8
15	95.4

LWD ölçümlerinde gözlemlenen tutarsızlıklar, zemin özellikleri ve LWD cihazının hassasiyeti gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Zemin yapısı, sonuçlardaki değişkenliği önemli ölçüde etkileyen bir faktördür. Granüler malzeme oranı yüksek veya nem oranı fazla olan zeminler, uygulanan yüke karşı daha değişken tepkiler verebilir ve bu da sertlik ölçümlerinin tutarsız olmasına yol açar.

Bir diğer tutarsızlık kaynağı ise LWD cihazının sensörünün yüksek hassasiyetidir. Cihazın sensörü, yüzey koşullarındaki küçük değişikliklere karşı oldukça duyarlıdır ve bu durum, zemin tam olarak sıkıştırılmadığı zaman ölçümlerde değişkenliğe yol açabilir. Bu hassasiyet, zeminin yeterince stabil olmaması durumunda güvenilir olmayan ölçümlere neden olabilir.

Ancak yapılan testlerde gözlemlenen bir diğer önemli eğilim, LWD ölçümlerinin tekrar edilen darbelerle daha güvenilir hale geldiğidir. Darbe sayısı arttıkça ölçümler daha stabil ve tutarlı hale gelmiştir. Bu durum, zeminin daha stabil ve kompakt bir hale gelmesi için zamana ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, birden fazla darbe, zeminin yerleşmesine yardımcı olarak LWD tarafından ölçülen sertlik değerlerindeki farklılıkları azaltmaktadır.

3.2 SPSS Analiz Bulguları

Karşılaştırmalı analiz, çeşitli derinliklerde yoğunluk, nem içeriği ve sertlik gibi toprak özelliklerini inceleyerek LWD'nin etkinliğini ve güvenilirliğini daha yerleşik NDG ve SC yöntemlerine göre değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Her yöntemden toplanan veriler sistematik olarak sunulacak ve sonuçlar, farklı yaklaşımlar arasındaki korelasyonları, tutarsızlıkları ve tutarlılıkları araştırmak için analiz edilecektir. Bu karşılaştırma, LWD'nin, özellikle yol yapımında, sıkıştırma kontrolünde geleneksel yöntemlere uygun bir alternatif veya tamamlayıcı araç olarak hizmet edip edemeyeceğinin belirlenmesinde önemlidir. Bu analizden elde edilen bilgiler, LWD'nin modern altyapı projelerinde pratik uygulanabilirliğini anlamak için bir temel sağlayacaktır.

3.2.1 Korelasyon ve regresyon

Çeşitli derinliklerde LWD modülü (E_{mod}) ile NDG sıkıştırma yüzdesi arasındaki korelasyon analizi, bu iki test yöntemi arasındaki ilişkiye dair fikir vermektedir. Pearson korelasyon katsayısı (r) -1 ile 1 arasında değişmektedir; burada 1'e yakın değerler güçlü bir pozitif korelasyona, -1'e yakın değerler güçlü bir negatif korelasyona ve 0'a yakın değerler ise çok az korelasyona veya yakın korelasyon olmadığına işaret etmektedir.

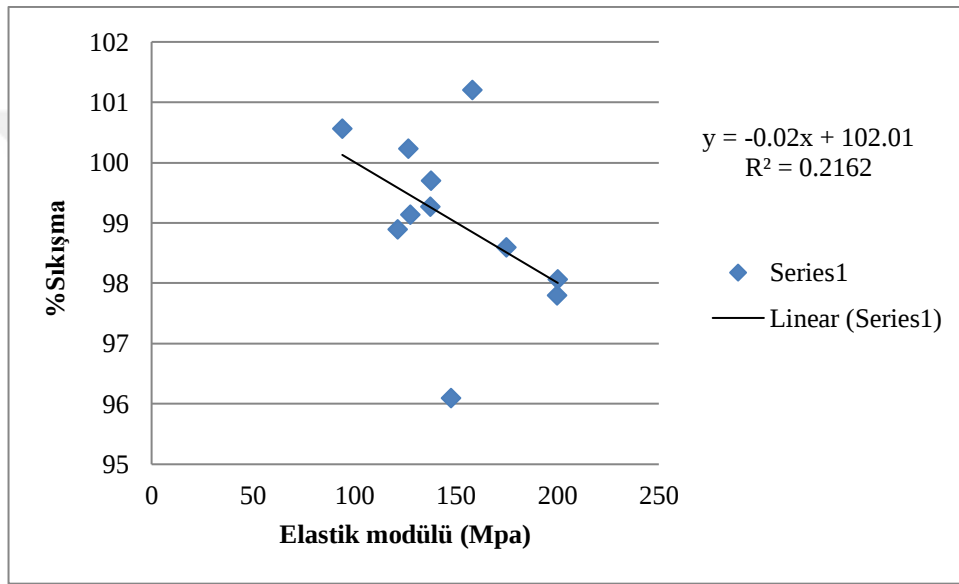
LWD E_{mod} ile çeşitli derinliklerdeki NDG sıkıştırma yüzdesi arasındaki regresyon analizi, bu iki test yöntemi arasındaki ilişkinin gücü hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. R² ile gösterilen belirleme katsayısı, bağımlı değişkendeki (NDG sıkıştırma yüzdesi) varyansın bağımsız değişken (LWD modülü) tarafından açıklanabilen oranını gösterir. R² değeri 0 ile 1 arasında değişir ve yüksek değerler daha güçlü bir açıklayıcı ilişkiye işaret etmektedir.

Tablo 5. Yüzeyde LWD E_{mod} ve NDG Sıkıştırma

Nokta	Elastik modülü (Mpa)	%Sıkışma
A1	200	97.8
A2	126.6	100.23
A3	121.4	98.9
A4	147.8	96.1
A5	94	100.57
A10	137.4	99.27
A11	158.4	101.2
A12	127.6	99.13
A13	200.2	98.067
A14	175	98.6
A15	138	99.7

Tablo 6. Yüzeyde LWD ve NDG arasındaki korelasyon

Korelasyon		LWD Elastik modülü (Mpa)	NDG sıkışma
Pearson korelasyon	LWD Elastik modülü (Mpa)	1.000	-0.465
	NDG sıkışma	-0.465	1.000
Sig. (2- kuyruklu)	LWD Elastik modülü (Mpa)	-	0.150
	NDG sıkışma	0.150	-
N	LWD Elastik modülü (Mpa)	11	11
	NDG sıkışma	11	11



Şekil 7. Yüzeyde LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçları

Yüzeyde (0 cm), korelasyon katsayısı -0.465 olup, LWD modülü ile NDG sıkıştırma yüzdesi arasında orta düzeyde negatif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Bu, LWD modülü arttıkça NDG ile ölçülen sıkıştırma yüzdesinin yüzeyde azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Negatif korelasyon, muhtemelen bu yöntemlerin nem içeriği, malzeme değişkenliği veya ilk sıkıştırma özellikleri gibi yüzey faktörlerine nasıl tepki verdiğiindeki farklılıklar nedeniyle, LWD ile ölçülen yüzey sertliğinin NDG ile ölçülen yoğunlukla doğrudan uyumlu olmadığını göstermektedir. Yüzeydeki nispeten daha yüksek R^2 , LWD'nin yüzey sıkışmasını tahmin etmede bir miktar etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, NDG sonuçlarındaki değişkenliğin %78'inden fazlası hala açıklanamamıştır; bu da nem içeriği, toprak heterojenliği veya sıkıştırma homojenliği gibi faktörlerin NDG

ölçümlemlerini muhtemelen LWD'nin yakalayamayacağı şekillerde etkilediğini göstermektedir.

R^2 değerinin 0.2162 olması, NDG sıkıştırma yüzdesindeki değişimin %21.62'sinin yüzey seviyesindeki LWD modülü ile açıklanabileceğini göstermektedir. Bu sonuç, LWD ile ölçülen yüzey sertliği ile NDG ile ölçülen sıkıştırma yoğunluğu arasında zayıf ila orta düzeyde bir ilişki olduğunu göstermektedir. Güçlü bir ilişki olmasa da bu değer tüm derinlikler arasında en yüksek değerdir ve LWD okumalarının yüzeyde en yüksek tahmin değerine sahip olduğunu göstermektedir.

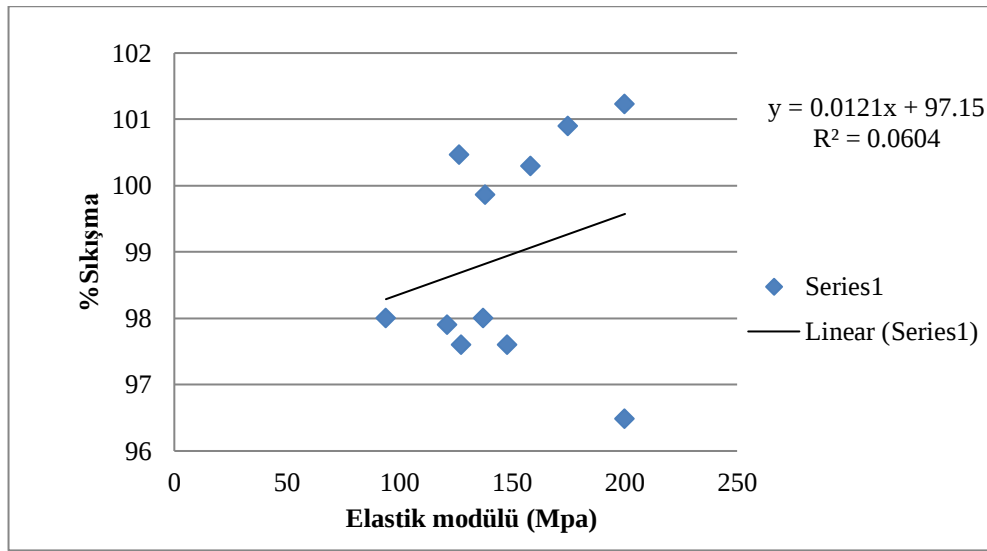
Yüzeydeki nispeten daha yüksek R^2 değeri, LWD'nin yüzey sıkışmasını tahmin etmede bir miktar etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, NDG sonuçlarındaki değişkenliğin %78'inden fazlası hala açıklanamamıştır; bu da nem içeriği, zemin heterojenliği veya sıkıştırma homojenliği gibi faktörlerin NDG ölçümlemlerini muhtemelen LWD'nin yakalayamayacağı şekillerde etkilediğini göstermektedir.

Tablo 7. 5cm derinlikte LWD Emod ve NDG Sıkıştırma

Nokta	Elastik modülü (Mpa)	%Sıkışma
A1	200	96.48
A2	126.6	100.47
A3	121.4	97.9
A4	147.8	97.6
A5	94	98
A10	137.4	98
A11	158.4	100.3
A12	127.6	97.6
A13	200.2	101.23
A14	175	100.9
A15	138	99.87

Tablo 8. 5 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki korelasyon

Korelasyon		LWD Elastik modülü (Mpa)	NDG sıkışma
Pearson korelasyon	LWD Elastik modülü (Mpa)	1.000	0.246
	NDG sıkışma	0.246	1.000
Sig. (2- kuyruklu)	LWD Elastik modülü (Mpa)	-	0.466
	NDG sıkışma	0.466	-
N	LWD Elastik modülü (Mpa)	11	11
	NDG sıkışma	11	11



Şekil 8. 5 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçları

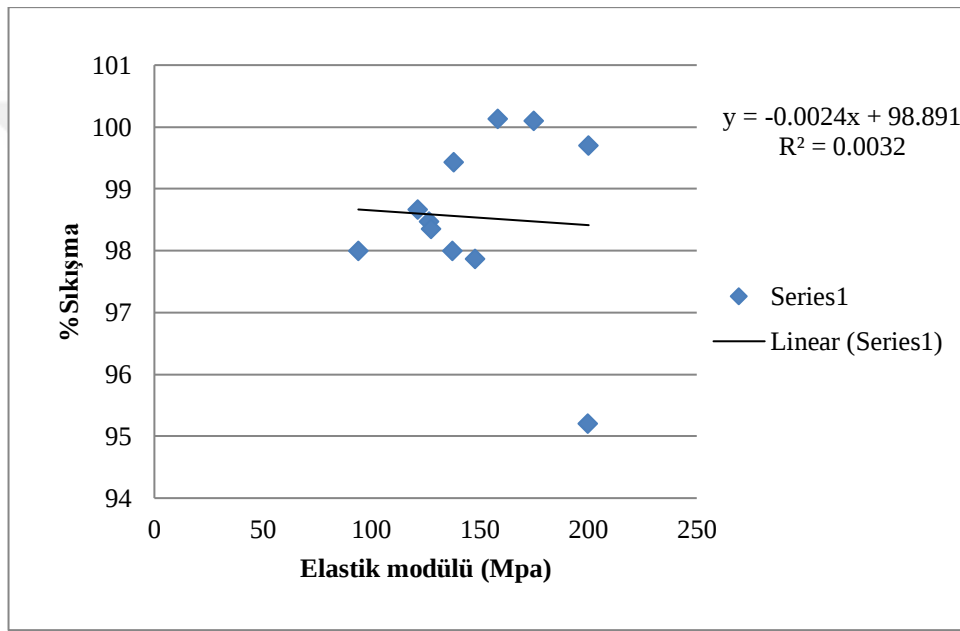
5cm derinlikte korelasyon katsayısı 0.246'dır ve zayıf bir pozitif korelasyona işaret etmektedir. İlişki güçlü olmasa da bu, LWD modülü arttıkça NDG sıkıştırma yüzdesinin de hafif bir artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu derinlikteki pozitif korelasyon, yüzey koşullarının etkileri azaldıkça ve sıkıştırma tutarlılığı arttıkça iki yöntem arasında daha iyi bir uyumu yansıtıyor olabilir. R^2 değerinin 0.0604 olması, NDG sıkıştırma yüzdesindeki değişimin sadece %6.04'inin 5 cm derinlikteki LWD modülü ile açıklanabileceğini göstermektedir. Bu da bu derinlikte iki değişken arasında çok zayıf bir ilişki olduğunu göstermektedir. Yüzeye kıyasla R^2 'deki düşüş, derinlik arttıkça LWD'nin tahmin gücünün hızla azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni LWD'nin öncelikle yüzey sertliğini ölçmesi, NDG'nin ise belirli derinliklerdeki yoğunluğu ölçmesidir. Bu nedenle, yüzeyde ölçülen rijitliğin zeminin alt derinliklerindeki sıkıştırma yoğunluğu üzerinde minimum etkisi olduğu düşünülmektedir.

Tablo 9. 10cm derinlikte LWD Emod ve NDG Sıkıştırma

Nokta	Elastik modülü (Mpa)	%Sıkıştırma
A1	200	95.2
A2	126.6	98.47
A3	121.4	98.67
A4	147.8	97.87
A5	94	98
A10	137.4	98
A11	158.4	100.13
A12	127.6	98.35
A13	200.2	99.7
A14	175	100.1
A15	138	99.43

Tablo 10. 10 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki korelasyon

Korelasyon		LWD Elastik modülü (Mpa)	NDG sıkıştırma
Pearson korelasyon	LWD Elastik modülü (Mpa)	1.000	-0.056
	NDG sıkıştırma	-0.056	1.000
Sig. (2-kuyruklu)	LWD Elastik modülü (Mpa)	-	0.870
	NDG sıkıştırma	0.870	-
N	LWD Elastik modülü (Mpa)	11	11
	NDG sıkıştırma	11	11



Şekil 9. 10 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçları

10 cm derinlikte korelasyon katsayısı -0,056'dır ve neredeyse ihmal edilebilir bir korelasyona işaret etmektedir. Bu zayıf negatif değer, bu derinlikte LWD modülü ile NDG sıkıştırma yüzdesi arasında önemli bir ilişki olmadığını göstermektedir. Sonuçlar, korelasyon eksikliği, sıkıştırma değişkenliği, taban malzemesindeki heterojenlik veya iki cihazın bu ara derinlikteki sertlik ve yoğunluğu değerlendirme biçimindeki farklılıklar gibi faktörlere bağlanabilmektedir.

R^2 değeri 0.0032 olan 10 cm derinlikteki NDG sıkıştırma yüzdesindeki değişimin sadece %0.32'si LWD modülü ile açıklanmaktadır. Bu son derece zayıf bir ilişkidir ve LWD okumalarının bu derinlikteki NDG sonuçları için neredeyse hiçbir öngörü değerine sahip olmadığını göstermektedir. Sıfıra yakın R^2 değeri, LWD sertlik ölçümleri ile 10 cm'de NDG sıkıştırma yoğunluğu arasındaki ilişkinin ihmal edilebilir düzeyde

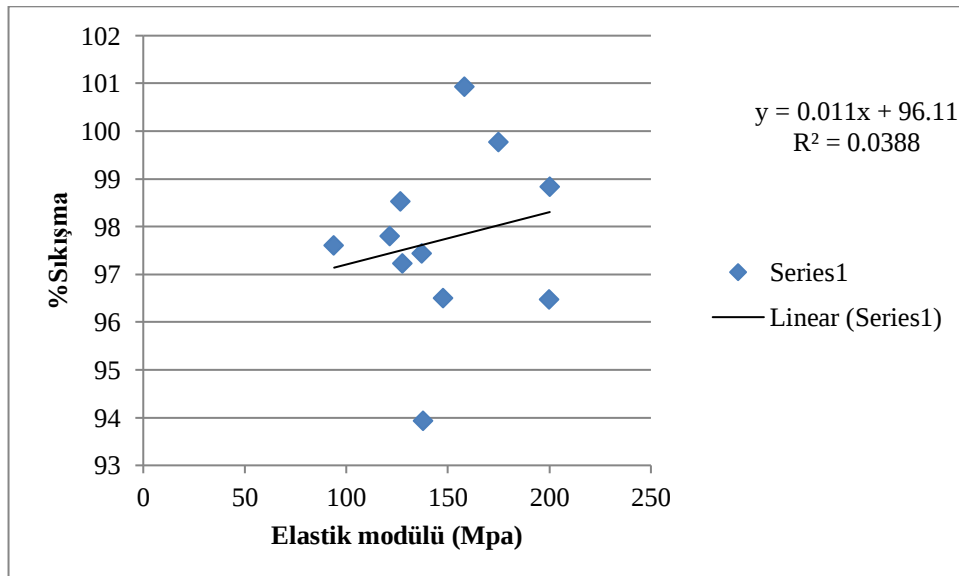
olduğunu göstermektedir. Bu derinlikte yüzey sertliğinin etkisinin tamamen dağıldığını ve diğer faktörlerin NDG ölçümlerine hakim olduğunu göstermektedir.

Tablo 11. 15cm derinlikte LWD Emod ve NDG Sıkıştırma

Nokta	Elastik modülü (Mpa)	%Sıkıştırma
A1	200	96.48
A2	126.6	98.53
A3	121.4	97.8
A4	147.8	96.5
A5	94	97.6
A10	137.4	97.43
A11	158.4	100.93
A12	127.6	97.23
A13	200.2	98.83
A14	175	99.77
A15	138	93.93

Tablo 12. 15 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki korelasyon

Korelasyon			
		LWD Elastik modülü (Mpa)	NDG sıkıştırma
Pearson korelasyon	LWD Elastik modülü (Mpa)	1.000	0.197
	NDG sıkıştırma	0.197	1.000
Sig. (2- kuyruklu)	LWD Elastik modülü (Mpa)	-	0.281
	NDG sıkıştırma	0.281	-
N	LWD Elastik modülü (Mpa)	11	11
	NDG sıkıştırma	11	11

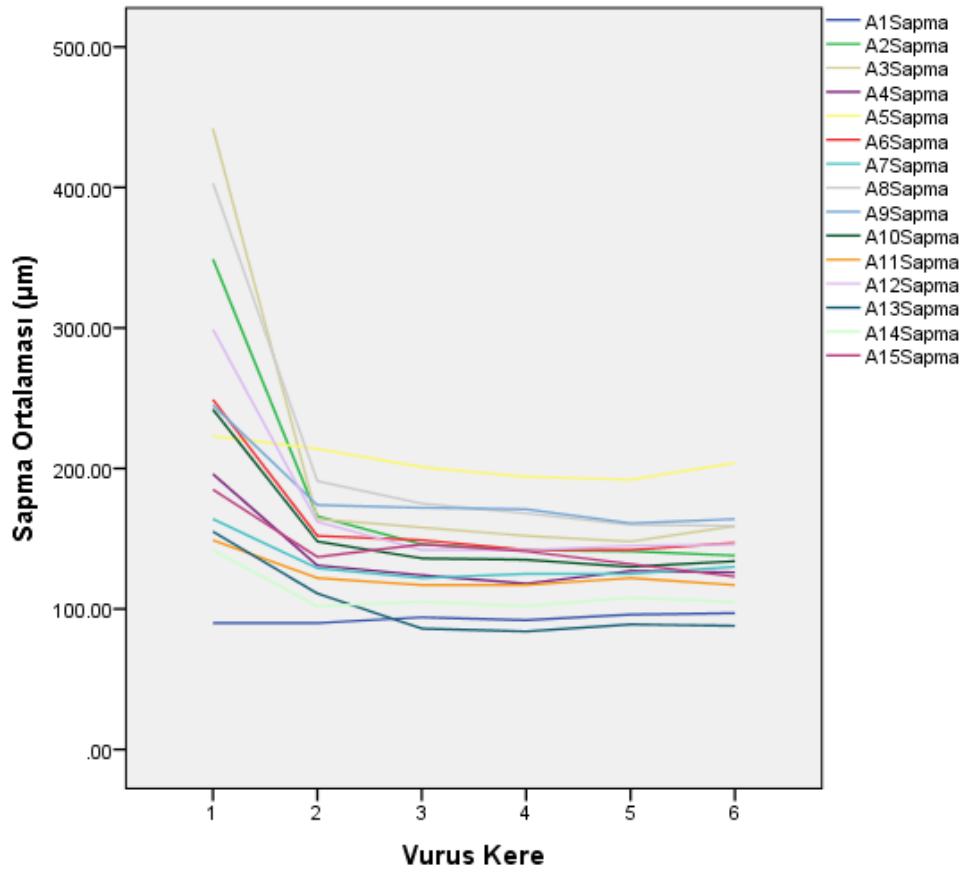


Şekil 10. 15 cm derinlikte LWD ve NDG arasındaki regresyon sonuçları

15 cm derinlikte korelasyon katsayısı 0.197'dir ve bir başka zayıf pozitif korelasyona işaret etmektedir. Hala zayıf olsa da bu derinlikteki pozitif ilişki, daha derin katmanların hem LWD hem de NDG ölçümlerine biraz daha tutarlı bir yanıt verdiğini gösterebilir. Bunun nedeni nem değişimleri veya malzeme ayrışması gibi yüzey seviyesindeki faktörlerin etkisinin azalması olabilir.

0.0388'lik R^2 değeri, 15 cm'deki NDG sıkışma yüzdesindeki değişimin sadece %3.88'inin LWD modülü ile açıklanabileceğini göstermektedir. Bu da bu derinlikte iki değişken arasında çok zayıf bir ilişki olduğunu göstermektedir. LWD, 10 cm'deki sonuçlara benzer şekilde, 15 cm'deki NDG sıkışmasını tahmin etmede minimum etkiye sahiptir. R^2 'deki 10 cm'den 15 cm'ye hafif artış ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum, LWD ölçümlerinin daha derin katmanlardaki sıkışma yoğunluğunu değerlendirmede etkili olmadığı sonucunu güçlendirmektedir.

Aşağıdaki grafik, altı ardışık LWD testi boyunca 15 noktadaki (A1 ila A15) sapma ölçümlerini göstermektedir. X eksenini LWD tekrar sayısını (1'den 6'ya kadar) temsil ederken, y eksenini mikrometre (μm) cinsinden kaydedilen sapma değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 11. Nuktada Altı LWD Testinde Sapma Ölçümleri (A1–A15) (SPSS Sonuçlar)

İlk testten ikinci teste kadar çoğu noktada sapmada önemli bir azalma görülmektedir. Bu, yüzey seviyesindeki sıkıştırma nedeniyle başlangıçtaki sapmanın yüksek olduğunu ve malzeme daha fazla sıkıştırıldıkça kademeli olarak azaldığını gösterir. Hızlı düşüş, malzemenin ilk testler sırasında yüklemeye hızlı bir şekilde uyum sağladığını göstermektedir.

LWD Emod ile yüzeydeki (0 cm) NDG sıkıştırma yüzdesi arasındaki -0.465'lik önceki korelasyon sonucu, sapma azaldıkça (sertlikte bir artış anlamına gelir), NDG ile ölçülen sıkıştırma yüzdesinin de azaldığını göstermektedir. Bu, yüzey sertliğinin her zaman yoğunlukla aynı hizada olmadığı fikriyle tutarlıdır ve yüzeydeki LWD ile NDG arasındaki farklılıkları vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, LWD Emod ve NDG sıkıştırma yüzdesi arasındaki korelasyon ve regresyon analizleri, bu iki sıkıştırma kontrol yöntemi arasındaki ilişki hakkında fikir vermektedir. Korelasyon sonuçları farklı derinliklerde farklı ilişkiler göstererek yüzey sertliği (LWD) ile yoğunluk ölçümlerinin (NDG) karşılaştırılmasındaki karmaşıklığı vurgulamaktadır. Yüzeyde, orta dereceli negatif korelasyon (-0.465) ters bir ilişkiye işaret etmektedir; bu da LWD modülü arttıkça (daha sert yüzey) NDG sıkıştırma yüzdesinin azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, daha derin seviyelerde korelasyonlar zayıf pozitif değerlere kaymakta (5 cm = 0.246, 10 cm = -0.056, 15 cm = 0.197) ve bu da iki yöntem arasında tutarsız bir uyum olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, LWD'nin yüzey sertliği hakkında değerli bilgiler sağlamasına rağmen, ölçümlerinin özellikle daha derinlerde yoğunluğa dayalı NDG sonuçlarıyla tutarlı bir şekilde korelasyon göstermediğini ima etmektedir. Bu durum, sıkıştırma kalitesini değerlendirirken her bir yöntemin güçlü yönlerinin ve sınırlamalarının incelikli bir şekilde anlaşılması gerektiğinin altını çizmektedir.

Regresyon analizi de bu gözlemleri desteklemekte ve LWD modülü ile NDG sıkıştırma yüzdesi arasındaki öngörücü ilişkinin derinlikle birlikte önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Yüzeyde, belirleme katsayısı ($R^2 = 0.2162$) NDG sıkıştırma yüzdesindeki değişkenliğin sadece %21.62'sinin LWD modülü ile açıklanabileceğini göstermektedir. Bu, analiz edilen derinlikler arasında en yüksek tahmin değerini temsil etse de, nispeten zayıf kalmakta ve LWD'nin yüzey seviyesindeki sıkıştırma yoğunluğunu tahmin etmede yalnızca kısmen etkili olduğunu göstermektedir. Derinlik arttıkça, R^2 değerleri 5 cm ($R^2 = 0.0605$), 10 cm ($R^2 = 0.0031$) ve 15 cm'de ($R^2 = 0.0388$) önemli ölçüde düşmekte, bu da LWD modülünün bu derinliklerdeki NDG sonuçları için neredeyse hiçbir açıklayıcı güç sağlamadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, sıkıştırmanın değerlendirilmesinde LWD ve NDG arasındaki temel

farklılıkları vurgulamaktadır. LWD yüzey sertliğini değerlendirmek için tasarlanmıştır, bu da onu yüzey katmanının ilk sıkışmasını izlemek için değerli bir araç haline getirir. Buna karşılık, NDG çeşitli derinliklerdeki yoğunluğu ölçerek alt zemin boyunca sıkışmanın daha kapsamlı bir görünümünü sağlamaktadır. Zayıf korelasyonlar ve düşük R^2 değerleri, LWD'nin NDG tarafından ölçülen sıkıştırma yoğunluğunu, özellikle de daha derin katmanlarda güvenilir bir şekilde tahmin edemediğini göstermektedir. Bu nedenle korelasyon ve regresyon analizlerine göre, sıkıştırma değerlendirmesi için yalnızca LWD'ye güvenmek yetersiz olacaktır.

Tablo 13. LWD Emod ve SC sıkıştırması arasındaki korelasyon

Korelasyon		LWD Elastik modülü (Mpa)	Kum Konisi sıkışma
LWD Elastik modülü (Mpa)	Pearson korelasyon	1	0.262
	Sig. (1- kuyruklu)		0.173
	N	15	15
Kum Konisi sıkışma	Pearson korelasyon	0.262	1
	Sig. (1- kuyruklu)	0.173	
	N	15	15

LWD modülü ile SC sıkıştırması arasındaki 0.262'lik korelasyon katsayısı zayıf bir pozitif korelasyon göstermektedir. İlişki güçlü olmamakla birlikte, LWD modülü arttıkça Kum Konisi sıkıştırma yüzdesinin de artması yönünde hafif bir eğilim olduğunu göstermektedir. Bu zayıf pozitif korelasyon, iki yöntem arasında bir miktar uyum olduğunu ima etmektedir, ancak güçlü veya tutarlı bir ilişkiye işaret edecek kadar önemli değildir. Zayıf korelasyon iki yöntem arasındaki temel farklılıklara bağlanabilir. LWD, malzemenin yük altında deformasyona direnme kabiliyetini yansıtan yüzey sertliğini veya modülünü ölçerken, Kum Konisi yöntemi, malzeme parçacıklarının ne kadar sıkı paketlenildiğini gösteren yerinde yoğunluğu ölçmektedir. Malzeme özellikleri, nem içeriği veya sıkıştırma ve sertliğin iki yöntem tarafından değerlendirilme biçimindeki farklılıklar, zayıf korelasyonu açıklayabilmektedir.

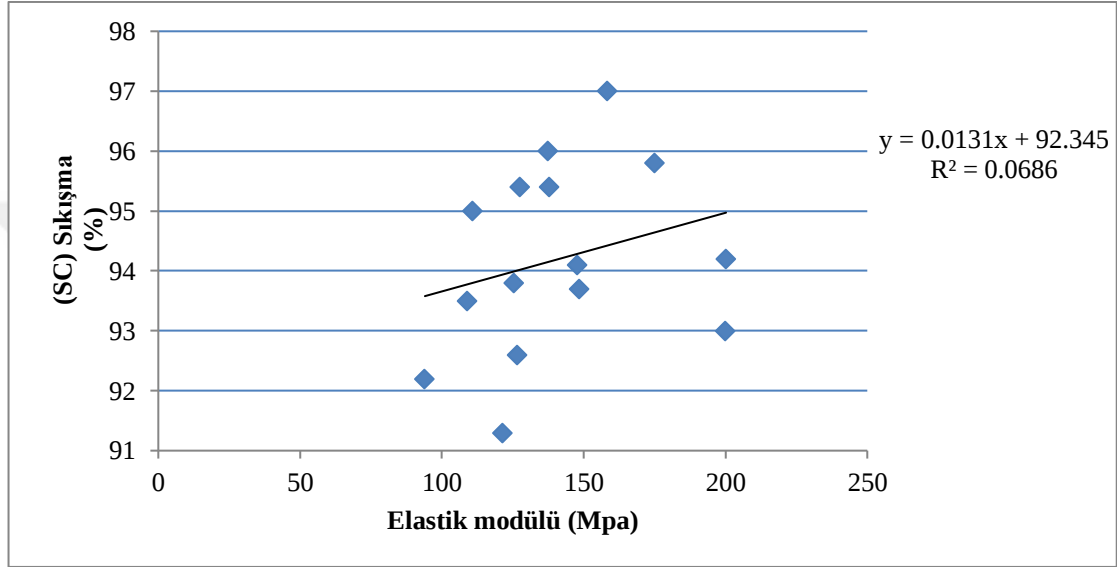
Tek kuyruklu anlamlılık değeri olan 0.173, korelasyonun yaygın olarak kullanılan 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Bu, LWD modülü ile Kum Konisi sıkıştırma yüzdesi arasında gözlemlenen korelasyonun daha geniş bir bağlamda anlamlı olduğu sonucuna varmak için yeterli kanıt olmadığı anlamına gelir. LWD Emod ve Kum konisi arasındaki analiz sonucu, ilişkinin tesadüfen

ortaya çıkmış olabileceğini ve daha kesin bir bağlantı kurmak için daha fazla analiz veya ek veri gerekebileceğini ima etmektedir.

Tablo 14. LWD Emod ve Kum konisi sıkıştırması arasındaki regresyon

Model özeti

Model	R	Karesi	Düzeltilmiş R karesi	Std. Tahmin Hatası
1	0.262 ^a	0.069	-0.003	1.5718
a. Tahminciler: (Sabit), LWD Emod				
b. Bağımlı Değişken: Kum Konisi sıkışma				



Şekil 12. LWD ve SC arasındaki regresyon sonuçları

Regresyon sonuçları, düşük R^2 değeri (0.069) ve zayıf pozitif korelasyondan ($R = 0.262$) da anlaşılacağı üzere, LWD Emod'un Kum Konisi sıkıştırma yüzdesi için çok az tahmin gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Minimum eğim (0.011) ve büyük standart hata (1.5718), LWD'nin Kum Konisi yöntemiyle ölçülen sıkıştırma için güvenilir bir tahmin edici olmadığını daha da doğrulamaktadır. Bu durum, her bir yöntem sıkıştırma davranışının farklı yönlerini yakaladığından, sıkıştırma kalitesine ilişkin kapsamlı bir anlayış elde etmek için LWD, NDG ve Kum Konisi gibi birden fazla yöntemin birlikte kullanılması ihtiyacını güçlendirmektedir.

3.2.2. ANOVA test

Tablo 15. LWD, NDG ve Kum konisi arasında ANOVA tanımlayıcı test

Tanımlayıcılar								
Sıkıştırma ölçümü								
	N	Ortalama	Std. Sapma	Std. hata	Ortalama için %95		Minimum	Maksimum
					Güven Aralığı			
					Alt sınır	Üst sınır		
LWD	15	141.3	31.3	8.08	123.99	158.67	94.00	200.20
NDG	44	98.5	1.7	0.26	97.96	99.01	93.90	101.20
Kum Konisi	15	94.2	1.6	0.4	93.33	95.07	91.30	97.00
Toplam	74	106.3	22.5	2.62	101.07	111.53	91.30	200.20

Tablo 16. LWD, NDG ve Kum konisi arasındaki Varyansların ANOVA Homojenliği testi

Varyansların Homojenliği Testi					
Sıkıştırma ölçümü					
Levene İstatistik	df1	df2	Sig.		
44.909	2	71	0.00		
ANOVA					
Sıkıştırma ölçümü					
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar Arası	23292.5	2	11646.25	59.5	0.00
Gruplar İçinde	13887.06	71	195.6	-	-
Toplam	37179.56	73	-	-	-

Tablo 17. LWD, NDG ve Kum konisi arasındaki Varyansların ANOVA Homojenliği testi

Çoklu Karşılaştırmalar						
Bağımlı Değişken: Sıkıştırma ölçümü						
Tukey HSD						
(I) Metod	(J) Metod	Ortalama Fark (I-J)	Std. hata	Sig.	%95 Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
LWD	NDG	42.85*	4.18	0.00	32.83	52.85
	Kum Konisi	47.13*	5.10	0.00	34.90	59.35
NDG	LWD	-42.85*	4.18	0.00	-52.85	-32.83
	Kum konisi	4.29	4.18	0.56	-5.72	14.29
Kum Konisi	LWD	-47.13*	5.10	0.00	-59.35	-34.90
	NDG	4.29	4.18	0.56	-14.29	5.72
Ortalama fark 0.05 seviyesinde anlamlıdır.						

Tablo 18. Homojen alt kümelerdeki gruplar için görüntülenen araçlar

Sıkıştırma ölçümü

Tukey HSD

Metod	N	Alfanın alt kümesi = 0.05	
		1	2
Kum Konisi	15	94.20	—
NDG	44	98.48	—
LWD	15	—	141.33
Sig.	—	0.61	1.00

a. Harmonik Ortalama Örnek Boyutunu Kullanır = 19.223.

b. Grup büyüklükleri eşit değildir. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılır. Tip I hata seviyeleri garanti edilmez.

Tanımlayıcı istatistikler için ortalama değerler, LWD'nin yoğunluğa dayalı yöntemlere (NDG ve SC) kıyasla sürekli olarak daha yüksek modül değerleri ürettiğini göstermektedir; LWD yoğunluk yerine yüzey sertliğini ölçtüğü için bu beklenen bir durumdur. Ayrıca, LWD için yüksek standart sapma, ölçümleri sıkı bir şekilde kümelenmiş olan NDG ve SC'ne kıyasla ölçümlerinin daha değişken olduğunu göstermektedir. Bu, LWD'nin yüzey koşullarına, malzeme heterojenliğine veya ölçüm tekniğine daha duyarlı olduğunu gösterebilmektedir.

Varyansların Homojenliği testi için, p-değeri 0.05'ten küçük olduğu için, eşit varyanslar varsayımı ihlal edilmiştir, yani yöntemler arasındaki değişkenlik önemli ölçüde farklıdır. Bu durum, LWD'nin daha tutarlı olan NDG ve Kum Konisi ölçümlerine kıyasla daha fazla değişkenlik gösterdiği gözlemini güçlendirmektedir.

ANOVA tablosundaki yüksek F-değeri ve oldukça anlamlı p-değeri ($p < 0.05$), üç yöntem arasında sıkışma ölçümlerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu göstermektedir. Bu da LWD, NDG ve SC ile ölçülen sıkıştırma değerlerinin birbirinin yerine kullanılamayacağını ve her bir yöntemin sıkıştırmayı farklı şekilde değerlendirdiğini doğrulamaktadır.

Ayrıca tablolar, hangi yöntemlerin birbirinden önemli ölçüde farklı olduğunu belirlemek için ikili karşılaştırmalar sağlayan post hoc testlerinin sonuçlarını ve alt küme 1'de SC ve NDG'nin birlikte gruplandırıldığı ve sıkıştırma ölçümlerinin istatistiksel olarak benzer olduğunu gösteren grup benzerliklerini gösteren Homojen Alt Kümeleri göstermektedir. Alt küme 2 için LWD ayrı bir alt küme oluşturur ve sıkıştırma değerlerinin hem NDG hem de SC'den önemli ölçüde farklı olduğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, ANOVA analizi LWD, NDG ve SC'nin önemli ölçüde farklı sıkışma ölçümleri ürettiğini doğrulamaktadır. LWD, yoğunluktan ziyade yüzey sertliğine odaklandığını yansıtacak şekilde sürekli olarak daha yüksek değerler

bildirmektedir. LWD ile hem NDG hem de SC arasındaki önemli ortalama farklar, bu yöntemlerin farklı doğasının altını çizmektedir. LWD sonuçlarındaki daha yüksek değişkenlik ($SD = 31.31$), yüzey heterojenliğine daha duyarlı olduğunu ve yüzey sertliğini değerlendirmek için etkili bir araç olduğunu, ancak yoğunluğa dayalı sıkıştırmanın bir tahmincisi olarak daha az güvenilir olduğunu göstermektedir. NDG ve SC, daha düşük değişkenlikleri ve benzer ortalamaları ile sıkıştırma yoğunluğunun daha tutarlı ölçümlerini sağlamaktadır.

3.2.3 T-TEST

Tablo 19. LWD ve NDG arasındaki T testi grup istatistikleri

Grup İstatistikleri					
	Metod	N	Orta	Std. Sapma	Std. Hata Ortalaması
Sıkıştırma ölçümü	LWD	1	141.33	31.31	8.08
	NDG	44	98.48	1.721	0.26

Tablo 20. Bağımsız numune testi (LWD vs NDG)

Bağımsız Numune Testi										
Levene'nin Varyansların Ortalamaların Eşitliği için t-testi Eşitliği Testi										
	F	Sig.	t	df	Sig. (2 kuyruklu)	Ortalama Fark	Std. Hata Farkı	Farkın %95 Güven Aralığı		
								Alt sınır	Üst sınır	
Eşit varyanslar varsayıldı	67.5	0.00	9.2	57	0.00	42.85	4.66	33.51	52.18	
Sıkıştırma ölçümü										
Eşit varyanslar varsayılmadı	—	—	5.3	14.03	0.00	42.85	8.08	25.50	60.2	

Tablo 21. LWD ve kum konisi arasındaki T testi grup istatistikleri

Grup İstatistikleri					
	Metod	N	Orta	Std. Sapma	Std. Hata Ortalaması
Sıkıştırma ölçümü	LWD	15	141.33	31.31	8.08
	Kum konisi	15	94.20	1.57	0.40

Tablo 22. Bağımsız numune testi (LWD vs Kum Konisi)

Bağımsız Numune Testi									
		Levene'nin Varyansların Eşitliği Testi		Ortalamaların Eşitliği için t-testi					
		F	Sig.	t	df	Sig. (2 kuyruklu)	Ortalama Fark	Std. Hata Farkı	Farkın %95 Güven Aralığı Alt Üst sınır sınır
Sıkıştırma ölçümü	Eşit varyanslar varsayıldı	22.54	0.00	5.8228	0.00		47.13	8.09	30.55 63.71
	Eşit varyanslar varsayılmadı	–	–	5.8214	0.070	0.00	47.13	8.09	29.78 64.48

SPSS T-Testi analizi için, LWD sonuçları hem NDG hem de SC'ne kıyasla önemli ölçüde daha yüksek bir ortalama sergilemektedir, bu da LWD'nin yüzey sertliğini (E-modülü) NDG ve SC yoğunluk odaklı ölçümlerinden önemli ölçüde farklı bir şekilde ölçtüğünü göstermektedir. Ayrıca, LWD'nin standart sapması çok daha büyüktür, bu da NDG ve SC'nin oldukça tutarlı sonuçlarına kıyasla LWD ölçümlerinde daha yüksek değişkenlik olduğunu göstermektedir. LWD ve NDG tablosundan, $F = 67.490$, $p = 0.000$ (anlamli) LWD ve NDG arasındaki varyansların eşit olmadığını gösterir, bu nedenle “Eşit varyanslar varsayılmadı” satırı en uygun olanıdır. Tablodan elde edilen tüm bu sonuçlardan, anlamlı p-değeri ($p < 0.001$), LWD ve NDG arasındaki sıkıştırma ölçümlerindeki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Büyük ortalama fark (42.85), LWD'nin NDG'den sürekli olarak daha yüksek ölçümler ürettiğini göstermektedir. Bu sonuç, bu yöntemlerin ölçümlerindeki temel farkı yansıtmaktadır: LWD sertliğe odaklanırken NDG yoğunluğu değerlendirmektedir. LWD'nin sonuçlarındaki yüksek standart sapma ile yansıtılan değişkenlik, yüzey koşullarına olan duyarlılığına bağlanabilmektedir.

LWD ve SC sonuçları tablosundan, $F = 22.542$, $p = 0.000$ (anlamli), yine varyanslar önemli ölçüde farklıdır, ancak t-değerleri her iki varsayım için de aynı olduğundan, yorumlama tutarlı kalmaktadır. LWD ve SC için sonuçlar LWD ve NDG için olanlarla benzer önemdedir. P-değeri ($p < 0,001$) sıkıştırma ölçümlerindeki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu doğrulamaktadır. Ortalama fark (47.13) LWD değerlerinin önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu da LWD'nin yüzey sertliğini ölçerken SC yönteminin yerinde yoğunluğa odaklandığı fikrini güçlendirmekte ve sonuçlardaki farkı açıklamaktadır.

T-testleri, LWD ile hem NDG hem de Kum Konisi arasındaki sıkıştırma ölçümlerinde, her iki karşılaştırmada da 0.05'in altındaki p değerlerinin gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar ortaya koymaktadır.

LWD ölçümlerindeki daha yüksek standart sapma, potansiyel olarak test koşulları veya malzeme özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak daha fazla değişkenliğe işaret etmektedir.

3.2.4 Güvenilirlik İstatistikleri (Cronbach's Alpha)

Tablo 23. Yüzeyde LWD ve NDG Arasında Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik İstatistikleri	
Cronbach'ın Alfası	Ürün Sayısı
-0.082	2

Tablo 24. 5 cm derinlikte LWD ve NDG arasında Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik İstatistikleri	
Cronbach'ın Alfası	Ürün Sayısı
0.001	2

Tablo 25. 10 cm derinlikte LWD ve NDG arasında Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik İstatistikleri	
Cronbach'ın Alfası	Ürün Sayısı
-0.008	2

Tablo 26. 15 cm derinlikte LWD ve NDG arasında Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik İstatistikleri	
Cronbach'ın Alfası	Ürün Sayısı
0.043	2

Tablo 27. LWD ve Kum Konisi Arasında Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik İstatistikleri	
Cronbach'ın Alfası	Ürün Sayısı
0.051	2

0 cm derinlikte, negatif Cronbach alfa değeri ($\alpha = -0.082$), LWD Emod ve NDG sıkıştırma yüzdesi arasında zayıf bir tutarlılığa işaret ederek ters bir ilişkiye veya ortak ölçüm özelliklerinin eksikliğine işaret etmektedir. Bu, LWD'nin yüzey sertliği okumalarının yüzeyde NDG tarafından değerlendirilen yoğunluğa dayalı sıkıştırma ile uyumlu olmadığını ortaya koymaktadır. 5 cm'de alfa değeri ($\alpha = 0.001$) neredeyse sıfırdır, bu da bu derinlikte LWD ve NDG sonuçları arasında anlamlı bir ilişki

olmadığını gösterir ve iki yöntemin sıkışmanın farklı yönlerini ölçtüğünü daha da vurgular. 10 cm'de, hafif negatif alfa ($\alpha = -0.008$), 0 cm'deki sonuca benzer şekilde minimum veya ters korelasyonu yansıtmakta ve LWD'nin daha derin NDG sıkıştırma verilerini temsil etmede daha da az etkili olduğunu göstermektedir. 15 cm'ye gelindiğinde, alfa değeri ($\alpha = 0.043$) pozitif olsa da sıfıra yakın kalmakta ve zayıf iç tutarlılığı vurgulamaktadır. Bu durum, LWD'nin NDG sıkıştırma yüzdeleri tahmin etme kabiliyetinin sınırlı olduğunu ve derinlikle birlikte azaldığını pekiştirmekte ve yüzey altı yoğunluk ölçümünden ziyade yüzey sertliği değerlendirmesi için bir araç olarak birincil rolünün altını çizmektedir.

LWD Emod ve SC sıkıştırma yüzdesi arasındaki Cronbach alfa değeri ($\alpha = 0.051$) iki yöntem arasında çok zayıf bir tutarlılık olduğunu göstermektedir. Kum Konisi yöntemi gerçek sıkıştırma yoğunluğunu ölçerken, LWD yüzey sertliğini değerlendirdiği için bu beklenen bir durumdur. Zayıf ilişki, her bir yöntemin değerlendirmesindeki temel farklılığı vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, LWD ölçümlerinin SC yönteminden elde edilen sıkıştırma verileriyle yakından uyumlu olmadığını göstermekte ve iki yöntemin sıkıştırma kalitesine ilişkin tamamlayıcı ancak farklı bilgiler sağladığını vurgulamaktadır.

Cronbach's Alpha analizi, LWD'nin NDG ve Kum Konisi yöntemleriyle iç tutarlılıktan yoksun olduğunu ortaya koymaktadır; bu da her bir yöntemin ölçtüğü şeydeki temel farklılıkları göstermektedir. LWD yüzey sertliğini değerlendirmede etkili olsa da yüzey altı sıkışması hakkında güvenilir bilgi sağlamamaktadır. Bu bulgular, karayolu alttemel yapımında sıkıştırma kalitesinin daha doğru ve bütünsel bir değerlendirmesini elde etmek için geleneksel yöntemlerin yanı sıra LWD'nin kullanılmamasının önemini vurgulamaktadır.

3.2.5 Faktör analizi

Tablo 28. KMO ve Bartlett's Testi

KMO ve Bartlett's Testi		
Kaiser-Meyer-Olkin Örneklem Yeterliliğinin Ölçüsü.		0.528
	Yaklaşık. Ki-Kare	35.755
Bartlett'in Küresellik Testi	df	15
	Sig	0.002

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Örneklem Yeterliliği Ölçümü 0.528 olup, genel kabul gören 0.6 eşliğinin altındadır ve örneklem faktör analizi için ideal olmayabileceğini ancak yine de marjinal olarak kabul edilebilir olduğunu

göstermektedir. Bu da değişkenler (LWD, NDG ve SC) arasındaki korelasyonların bir miktar zayıf olduğunu göstermektedir. Ancak, Bartlett'in Küresellik Testi (Ki-Kare = 35.755, df = 15, p = 0.002) istatistiksel olarak anlamlıdır ve değişkenler arasında önemli korelasyonlar olduğunu göstererek faktör analizini uygun hale getirmektedir. Bu sonuçlar, veri yapısının sağlam faktör analizi için optimal olmasa da devam etmek için yeterli olduğunu ve LWD, NDG ve SC sıkıştırma ölçümlerinin sıkıştırma kontrolünün farklı ancak birbiriyle ilişkili yönlerini yakaladığını göstermektedir.

Tablo 29. Açıklanan Toplam Varyans

Açıklanan Toplam Varyans									
Bileşen	İlk Özdeğerler			Karesel Yüklemelerin Çıkarma Toplamları			Karesel Yüklemelerin Dönme Toplamları		
	Toplam	Varyans %'si	Kümülatif %	Toplam	Varyans %'si	Kümülatif %	Toplam	Varyans %'si	Kümülatif %
1	2.70	45.08	45.08	2.70	45.08	45.08	2.65	44.17	44.17
2	1.42	23.75	68.83	1.42	23.75	68.83	1.48	24.65	68.8
3	0.8	13.32	82.15	—	—	—	—	—	—
4	0.67	11.16	93.30	—	—	—	—	—	—
5	0.34	5.74	99.04	—	—	—	—	—	—
6	0.06	0.95	100.00	—	—	—	—	—	—
Ekstraksiyon Yöntemi: Temel Bileşen Analizi.									

Faktör analizi sonuçları, özdeğerleri 1'den büyük olan ve sıkıştırma ölçümlerindeki toplam varyansın %68.83'ünü toplu olarak açıklayan iki temel bileşen ortaya koymuştur. Birinci bileşen varyansın %45.08'ini açıklarken, ikinci bileşen %23.75'lik bir ek katkı sağlamaktadır. Bu, iki bileşenin verilerdeki değişkenliğin çoğunu etkili bir şekilde yakaladığını göstermektedir. Özellikle, rotasyon sonuçları daha dengeli bir dağılım göstermektedir; Bileşen 1 varyansın %44.18'ini ve Bileşen 2 varyansın %24.66'sını açıklamaktadır. Bu bulgular, LWD, NDG ve SC yöntemlerinin sıkışmanın farklı ancak tamamlayıcı yönlerini ölçtüğünü göstermektedir. Açıklanan varyansın yüksek yüzdesi, sıkıştırma kontrolünü etkileyen temel faktörlerin bu bileşenler tarafından iyi temsil edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, ölçümlerdeki farklılık, LWD'nin daha çok yüzey sertliğine odaklandığını, NDG ve SC'nin ise öncelikle yoğunluğa dayalı sıkıştırmayı değerlendirdiğini vurgulamaktadır. Bu durum, LWD'nin değerli bilgiler sağlamasına rağmen, sıkıştırma güvenilirliği ve doğruluğunun kapsamlı bir değerlendirmesi için diğer yöntemlerle birlikte kullanılması gerektiği fikrini güçlendirmektedir.

Tablo 30. Döndürülmüş Bileşen Matrisi

Döndürülmüş Bileşen Matrisi		
	Bileşen	
	1	2
LWD Elastik modülü	0.193	0.897
NDG % sıkışma (0cm)	0.415	-0.721
NDG % sıkışma (5cm)	0.886	-0.173
NDG % sıkışma (10cm)	0.909	-0.189
NDG % sıkışma (15cm)	0.656	0.004
Kum konisi sıkışma	0.633	0.300
Ekstraksiyon Yöntemi: Temel Bileşen Analizi. Döndürme Yöntemi: Kaiser Normalleştirilmeli Varimax. (Döndürme 3 yinelemede birleşti.)		

Döndürülmüş bileşen matrisi, iki farklı bileşeni vurgulayarak sıkıştırma ölçüm yöntemlerinin altında yatan yapı hakkında fikir vermektedir. LWD Emod, 0.897 değeriyle Bileşen 2'ye güçlü bir şekilde yüklenmektedir; bu da LWD'nin yoğunluktan ziyade yüzey sertliğiyle ilgili farklı bir sıkıştırma boyutunu ölçtüğünü göstermektedir. Buna karşılık, farklı derinliklerdeki NDG sıkıştırma yüzdeleri, 5 cm'de 0.886 ve 10 cm'de 0.909 gibi değerlerle Bileşen 1 üzerinde yüksek yükler göstermekte, bu da NDG'nin derinlikler arasında daha tutarlı, yoğunluk odaklı bir sıkıştırma ölçüsü yakaladığını düşündürmektedir. SC sıkıştırma yüzdesi de öncelikle Bileşen 1'e (0.633) yüklenerek sıkıştırma yoğunluğunu ölçmede NDG ile uyumunu güçlendirmektedir. İlginç bir şekilde, NDG için 0 cm'de (-0.721) Bileşen 2 üzerindeki negatif yükler, daha derin ölçümlere kıyasla yüzeyde bir miktar farklılaşmaya işaret etmektedir. Bu farklılaşma, LWD ve NDG'nin sıkışmanın farklı yönlerini değerlendirdiğini daha da doğrulamaktadır. SC'nin her iki bileşen üzerindeki orta düzeydeki yükü hem yüzey hem de yoğunlukla ilgili özellikleri yakalamadaki aracı rolünü yansıtmaktadır. Genel olarak, sonuçlar LWD'nin NDG ve SC'ne kıyasla farklılığını vurgulamakta ve LWD'nin güvenilirliğinin iç yoğunluktan ziyade yüzey sertliğini ölçme kabiliyetinde yattığı sonucunu pekiştirmektedir. Bu farklılaşma, sıkıştırma kalitesinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak için birden fazla sıkıştırma ölçüm yönteminin entegre edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Tablo 31. Topluluklar Tablosu

Topluluklar		
	İlk	Ekstraksiyon
LWD Elastik modülü	1.000	0.841
NDG % sıkışma (0cm)	1.000	0.692
NDG % sıkışma (5cm)	1.000	0.815
NDG % sıkışma (10cm)	1.000	0.861
NDG % sıkışma (15cm)	1.000	0.430
Kum konisi sıkışma	1.000	0.491
Ekstraksiyon Yöntemi: Temel Bileşen Analizi.		

Topluluklar tablosu, her bir değişkendeki varyansın ne kadarının çıkarılan bileşenler tarafından açıklandığını vurgulamaktadır. LWD Emod 0.841 gibi yüksek bir ekstraksiyon değeri göstererek varyansının %84.1'inin iyi temsil edildiğini ve yüzey sertliği ölçümleriyle güçlü uyumunu teyit etmektedir. NDG sıkıştırma yüzdeleri 10 cm (0.861) ve 5 cm'de (0.815) yüksek ortaklıklar sergilemekte, bu da bu derinliklerdeki sıkıştırmanın faktörler tarafından iyi bir şekilde yakalandığını göstermektedir. Ancak 0 cm (0.692) ve özellikle 15 cm'de (0.430) açıklanan varyans azalmakta, bu da özellikle daha derin katmanlarda daha zayıf bir temsile işaret etmektedir. SC'nin sıkıştırma yüzdesi 0.491 ile daha düşük bir ekstraksiyon değerine sahiptir ve varyansının yarısından daha azının açıklandığını göstererek yoğunluğa dayalı sıkıştırmaya farklı bir şekilde odaklandığını yansıtmaktadır.

3.3 Bulguların Literatürle Kıyaslanması

Bu çalışmanın bulguları, karayolu alttemel tabakalarında sıkıştırma kontrolü için LWD güvenilirliği, uygunluğu ve doğruluğu hakkında kritik bilgiler sağlamaktadır. Sonuçlar, LWD'nin NDG ve SC yöntemleriyle değerlendirilen yoğunluğa dayalı sıkıştırmadan temelde farklı olan yüzey sertliğini ölçtüğünü tutarlı bir şekilde göstermektedir. LWD hız, taşınabilirlik ve kullanım kolaylığı gibi önemli operasyonel avantajlar sunarken, sıkıştırma kontrolü için bağımsız bir araç olarak faydası, yoğunluğa dayalı yöntemlerle güçlü korelasyon eksikliği nedeniyle sınırlıdır. Bu durum, yol yapım projelerinde kapsamlı kalite kontrolü sağlamak için çok yöntemli bir yaklaşıma duyulan ihtiyaı vurgulamaktadır. Ayrıca Innovation and creativity (2008)'de belirtildiği gibi, tek bir sapma sensörü kullanan katmanlı yapılar için LWDmod'dan geriye doğru hesaplanan sonuçlar, güvenilirlik ve tutarlılık konusunda önemli endişelere yol açmaktadır. LWD modülü değerleri ile DCP lmleri arasında korelasyon bulunmuş ve FWD ölçümlerinden elde edilen modüllere kıyasla LWD modülü değerlerinin nispeten daha geniş bir dağılımı gözlemlenmiştir. Ayrıca anlamlı bir sonuç elde edilmemiştir. Alt temel malzemeleri için LWD ve FWD modülleri arasında bağlantılar tanımlanmış olup, alt temel katmanları için yalnızca çok zayıf bir ilişki kaydedilmiştir. İlginç bir şekilde, LWD modül değerleri, diğer çalışmalardan elde edilen bulgularla çelişerek, FWD'den biraz daha yüksek olma eğiliminde olmuştur. iki katmanlı yapılar için daha güvenilir olmasına karşın, sonuçların hesaplamalarda kullanılan başlangıç çekirdek değerlerine oldukça duyarlı olduğu üç veya daha fazla katman için doğruluğu azalır. Bulgular, özellikle karmaşık katmanlı yapılara uygulandığında LWDmod sonuçlarının dikkatli yorumlanması ihtiyaını vurgulamaktadır.

Sahada sıkıştırmanın kontrol edilmesi için LWD'nin kullanımına yönelik artan ilgiye rağmen, bazı önemli konular hala cevaplanmamıştır. İlk olarak, sıkıştırma seviyeleri ile LWD modülleri arasında zayıf bir korelasyon rapor edilmiştir. Agregat temel tabakaları ve alt zemin toprağı için sıkıştırma kalite kontrolü için LWD'nin potansiyelini değerlendirdi. İki tür LWD kullanıldı: (1) LOADMAN LWD ve (2) PRIMA 100 LWD. LWD modülleri ile sıkıştırma seviyeleri arasındaki korelasyonun genel olarak zayıf olduğu bildirildi (R^2 , 0.1 ile 0.5 arasında değişmektedir)

LWD modülleri ve FWD modülleri arasında benzersiz bir ilişki yoktur (Livneh ve Goldberg, 2001). (Fleming vd., 2007), LWD sertlik modüllerinin konum, kaplama kalınlığı, toprak tipi, derecelenme ve nem içeriğı gibi faktörlere bağılı olarak değişen derecelerde farklılık gösterdiğini bildirmiştir. (Fleming vd., 2007), LWD ve FWD arasındaki oranın 0.8 ile 1.21 arasında değişmesi ve R^2 'nin 0.5 ile 0.9 arasında değişmesi nedeniyle FWD ve LWD tarafından belirlenen sertlik modülleri arasında benzersiz bir ilişki bulamamıştır. Geleneksel FWD modüllerinin LWD modüllerinden 2.5 ila 3.3 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur (Livneh ve Goldberg, 2001). Araştırmacılar tarafından sunulan nedenler arasında FWD'lerde ve LWD'lerde kullanılan farklı yükleme seviyesi/hızı yer almaktadır.

Bu sınırlamalara rağmen LWD, hızı ve kullanım kolaylığı nedeniyle sertlik ölçümü için yaygın olarak kullanılan bir cihaz olmaya devam etmektedir. Modern inşaatlarda, özellikle sıkıştırma kalitesinin hızlı değerlendirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak çalışma, kısmen üreticiler arasındaki LWD cihaz spesifikasyonlarındaki farklılıklara atfedilebilecek sonuçlardaki tutarsızlıkların altını çizmektedir. Bu standardizasyon eksikliği, LWD sonuçlarının sahada tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği konusunda endişelere yol açmaktadır.

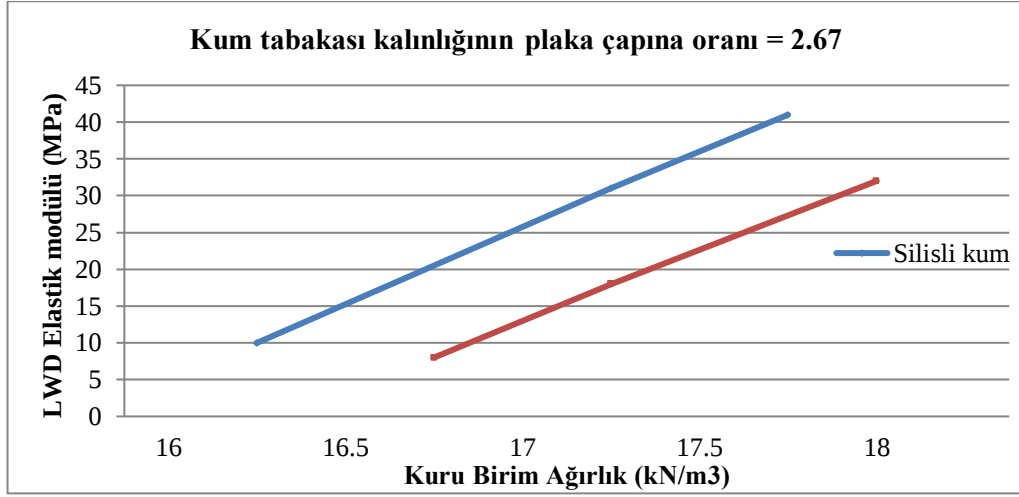
Neil vd. (2010) yapılan çalışmanın sonuçları, LWD'nin tutarlı ölçümlerdeki güvenilirliğini doğrulayan yüksek tekrarlanabilirlik değerleri olduğunu göstermiştir. Nükleer yoğunluk ölçerden farklı olarak LWD, çakıllı ve taşlı topraklarda etkili bir şekilde kullanılabilir ve zorlu toprak koşullarında uygulanabilirliğini genişletebilmektedir. Plaka çapının 1.5 ila 2 katı arasında değişen etki derinliği ile LWD, daha derin toprak bölgeleri hakkında değerli bilgiler sağlar ve bu da onu özellikle yeraltı katmanlarının değerlendirilmesinde faydalı kılmaktadır. Ek olarak, dinamik modül (Evd) ile saha bazında kuru yoğunluk arasındaki korelasyon, kalite kontrol testleri için yeterli kabul edilebilir ve daha muntazam topraklarda daha güçlü korelasyonlar gözlemlenebilmektedir. Bu özellikler, LWD'nin çeşitli toprak

koşullarında sıkıştırma kontrolü için çok yönlü ve pratik bir araç olarak potansiyelini vurgulamaktadır.

3.3.1 Yüzey Sertliği ve Sıkıştırma Yoğunluğu

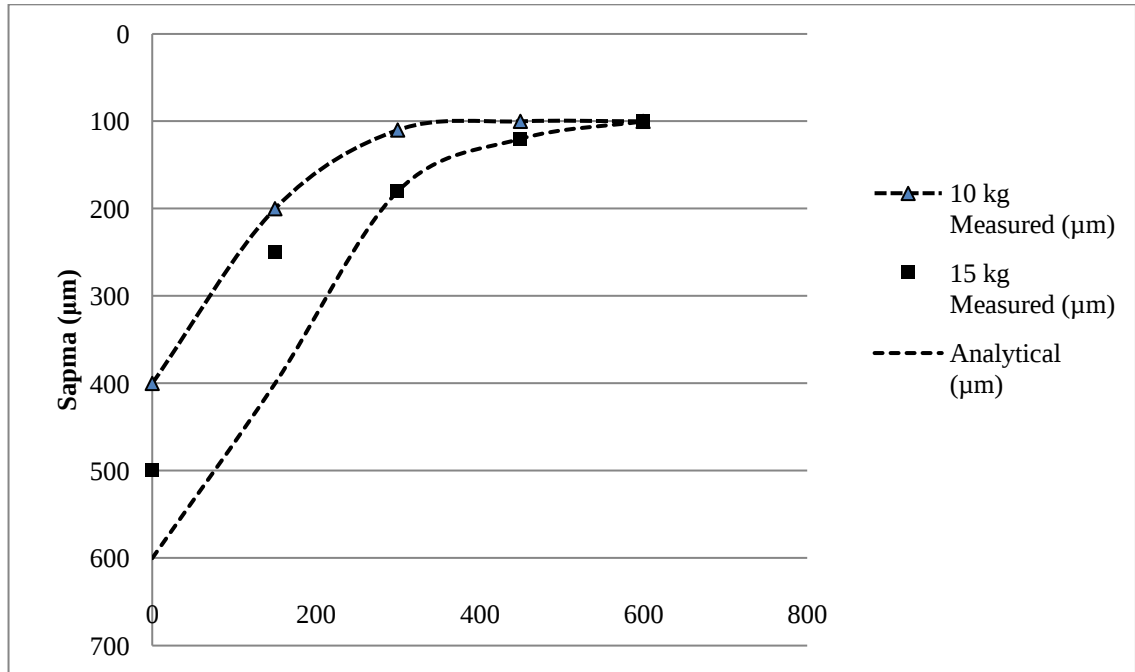
LWD ile ölçülen yüzey sertliği ile NDG ve SC ile ölçülen iç sıkıştırma yoğunluğu arasındaki belirgin farktır. Veriler, LWD Emod değerleri ile NDG sıkıştırma yüzdesi arasındaki korelasyonun analiz edilen tüm derinliklerde (0 cm, 5 cm, 10 cm ve 15 cm) zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. Bu zayıf ilişki, LWD'nin öncelikle yüzey sertliğini değerlendirdiği, NDG ve SC'nin ise sıkıştırılmış katmanların yoğunluğunu değerlendirdiği gerçeğinin altını çizmektedir. Yüzeyde, LWD ve NDG arasındaki uyumsuzluk belirgin olup, 10 cm ve 15 cm gibi daha derinlerde bu uyumsuzluk daha da belirginleşmektedir. Bu bulgular, LWD'nin iç sıkışma yoğunluğunu tahmin etmede veya yansıtmada etkili olmadığını vurgulamakta ve sıkışma kontrol sürecinde farklı bir amaca hizmet ettiğini pekiştirmektedir. Ayrıca test alanı, yük plakasının düz bir yüzeye yerleştirilebilmesi için düzleştirilmelidir. Yüzeydeki gevşek parçacıklar giderilmeli ve yük plakası test edilen malzemeye temas halinde olmalıdır. Test alanının çapı plaka çapından en az 1.5 kat daha büyük olmalıdır.

Amr vd., (2013)'te yaptıkları çalışmada, LWD etkinliğinin, alt zeminin nem içeriği de dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilendiğini belirtmişlerdir. Daha kuru koşullarda, LWD, toprak deformasyonunun azalması nedeniyle daha yüksek sertlik değerleri üretebilirken, daha ıslak koşullarda artan nem, toprak yapışmasını zayıflatabilir ve bu da daha düşük sertlik okumalarına neden olabilmektedir. Ek olarak toprak tipi, sıkışma seviyesi ve etki derinliği de LWD ölçümlerinin güvenilirliğinin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu bağımlılıklar, LWD sonuçlarını yorumlarken sahaya özgü koşulları dikkate almanın önemini vurgulamaktadır.

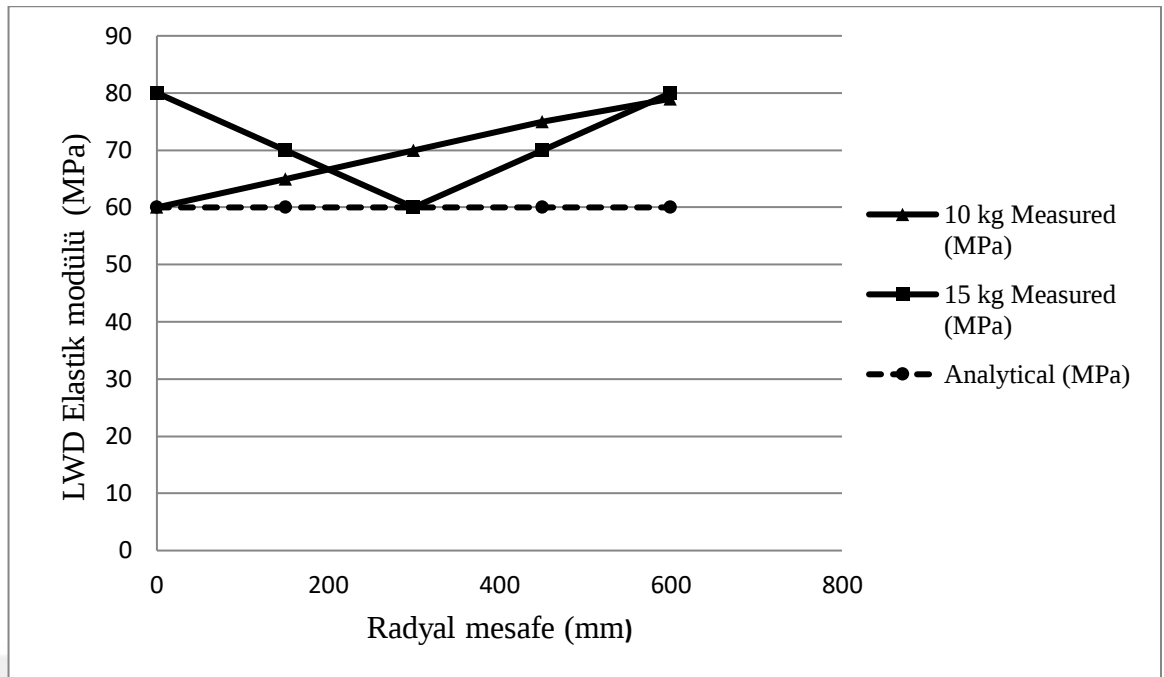


Şekil 13. Kum birim ağırlığının LWD modülü (ELWD) üzerindeki etkisi (Amr vd., 2013).

Şekil 13, test edilen her iki kum için LWD modülü ile kuru kum yoğunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sonuçlar, hem kireçli hem de silisli kumlarda birim ağırlıktaki her 1 kN/m³ artış için LWD modülünün ortalama yaklaşık 21 MPa oranında arttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, aynı birim ağırlık için silisli kumun LWD modülü, kalkerli kumunkinden yaklaşık 10 MPa daha yüksektir. Bu bulgular Alshibli vd. (2005)'nin gözlemleriyle uyumludur. LWD modülünün (ELFWD) kötü derecelendirilmiş kırılmış kireçtaşı, kötü derecelendirilmiş kum ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama dahil olmak üzere çeşitli malzemelerde kuru birim ağırlıkla arttığını bildirmiştir. (Amr vd. 2013)



Şekil 14. (a) 10 kg ve 15 kg için radyal mesafelerde TB1-1 modülleri (Sapma) (Senseney ve Mooney, 2010)



Şekil 14. (b) 10 kg ve 15 kg için radyal mesafelerde TB1–1 modülleri (Emod) (Senseney ve Mooney, 2010)

Senseney ve Mooney (2010) tarafından, orta sertlikteki granüler zemin üzerinde yapılan LWD testi, 750 mm'lik radyal sensör aralığına (r) kadar uzanan ölçülebilir bir sapma çanağını ortaya çıkarmıştır. Her iki test yatağı için de, radyal sensör aralığının artmasıyla dikey sapmalar azalmış ve bozulma oranı toprak modülü ve katmanlamadan etkilenmiştir. Her iki test yatağı için de 1. ve 2. Noktalarda neredeyse aynı sapma ölçümleri gözlemlenmiş, bu nedenle yalnızca TB1–1 ve TB2–1 sonuçları sunulmaktadır. Şekil 14a, TB1-1'in homojen SW-SM profili için 10 kg ve 15 kg yükleme altında 0, 300 ve 600 mm radyal mesafelerde ölçülen sapmaları göstermektedir. TB1-1 için sapma sonuçları, radyal mesafenin artmasıyla birlikte kademeli bir bozulma oranı gösterdi. (Senseney ve Mooney, 2010).

Bu, LWD sapmalarının artan radyal mesafeyle azaldığını ve bozulma oranının toprak sertliği ve tabakalaşmadan etkilendiğini göstermektedir. Bu durum, bu tez çalışması kapsamında elde edilen LWD verilerine benzer şekilde, LWD'nin toprak davranışındaki mekansal değişkenliği yakalama yeteneğini ve yükleme koşullarına ve toprak özelliklerine duyarlılığını vurgulamaktadır. LWD testi yapılırken ağırlığın tetiklediği sensörün yüzeye temas ettiği alanda bulunan agrega dağılımının sonuçları önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

3.3.2 Derinlik Değişimleri ve Ölçüm Sınırlamaları

Yapılan analizler LWD'nin yüzey sertliğini ölçmede en etkili yöntem olduğunu ancak sıkıştırılmış tabakanın derinliği arttıkça daha az güvenilir hale geldiğini göstermektedir. 0 cm'de LWD, NDG'nin öncelik vermediği, uygulanan yüke karşı anlık yüzey tepkilerini yakalamış ancak derinlik arttıkça, özellikle 10 cm ve 15 cm'de, LWD Emod değerleri ile NDG sıkıştırma yüzdeleri arasındaki farklılık önemli ölçüde artmıştır. Bu sınırlama, LWD'nin daha derin sıkıştırma katmanlarını ölçmek için uygun olmadığını ve alt katmanlar içindeki yoğunluğun doğru bir temsilini sağlayamadığını vurgulamaktadır. Bu nedenle, LWD ölçüm sonuçları Nazzal vd., (2007) yaptığı çalışmadakine benzer şekilde, daha derin sıkıştırma kalitesinin değerlendirilmesinde NDG'ye alternatif olabilecek bir yöntem olmadığı belirlenmiştir.

3.3.3 Kum Konisi Yöntemi ile Karşılaştırma

Çalışmanın sonuçları, LWD ve SC ölçümleri arasında önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır. LWD Emod değerleri ile SC sıkıştırma yüzdeleri arasındaki zayıf korelasyon, bu yöntemlerin sıkıştırılmış katmanların farklı özelliklerini ölçtüğünü doğrulamaktadır. SC yöntemi doğru ve güvenilir yerinde yoğunluk ölçümleri sağlarken, LWD yalnızca yüzey sertliğine odaklanmaktadır. Bu ayrım, sıkıştırma spesifikasyonlarını karşılamak için hassas yoğunluk ölçümlerinin gerekli olduğu uygulamalarda LWD'nin SC yönteminin yerini alamayacağının altını çizdiği için kritiktir. Bunun yerine, LWD, özellikle inşaat sırasında anında geri bildirim gerektiğinde yüzey sertliği değerlendirmesi için yararlı ve hızlı bir araç olarak hizmet edecektir.

3.3.4 Bulguların Özeti

Özetle, bu çalışma LWD'nin yüzey sertliğini ölçmek için etkili bir araç olmasına rağmen, NDG ve Kum Konisi yöntemlerinden elde edilen yoğunluğa dayalı sıkıştırma ölçümleriyle güçlü bir korelasyon göstermediğinin altını çizmektedir. Sıkıştırma yoğunluğunu tahmin etmede zayıf korelasyonlar ve güvenilirlik eksikliği, LWD'nin sıkıştırma kontrolü için birincil bir yöntemden ziyade tamamlayıcı bir araç olarak kullanılmasının önemini vurgulamaktadır. Korelasyon ve regresyon analizlerinden elde edilen sonuçlar, sıkıştırma kalitesinin kapsamlı bir değerlendirmesini elde etmek için LWD, NDG ve Kum Konisi yöntemlerinin birlikte kullanılmasının gerekliliğini daha da vurgulamaktadır. Her yöntem kendine özgü güçlü yönler sunmaktadır: LWD hızlı yüzey sertliği değerlendirmeleri sağlarken, NDG ve Kum Konisi yoğunluk hakkında kritik

bilgiler sunar. Mühendisler bu yöntemleri entegre ederek sıkıştırmanın daha doğru, bütünsel bir şekilde değerlendirilmesini sağlayabilir ve sonuçta karayolu alttemel tabakalarının güvenilirliğini ve performansını artırabilir. Bu çalışma, sıkıştırma kontrolüne yönelik çok yönlü bir yaklaşıma duyulan ihtiyacı pekiştirerek yol yapım projelerinin yapısal bütünlüğünün ve dayanıklılığının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini ve sürdürülmesini sağlamaktadır.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, karayolu alttemel tabakalarındaki sıkıştırma kontrolü için Hafif Deflektometrenin (LWD) güvenilirliğini, fizibilitesini ve doğruluğunu, Nükleer Yoğunluk Ölçer (NDG) ve Kum Konisi (SC) yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırarak değerlendirmiştir. Korelasyon, regresyon, faktör analizi, ANOVA, T testleri ve güvenilirlik testlerini içeren SPSS analizi kullanılarak yapılan incelemeler, bu yöntemlerin güçlü ve sınırlı yönlerine dair önemli bulgular sunmuştur.

Korelasyon analizi, LWD ve NDG sonuçları arasında zayıf bir ilişki olduğunu göstermiş olup, yoğunlukla ilgili parametreler için korelasyon katsayıları -0.465 ile 0.246 arasında değişmiştir. Regresyon modelleri, LWD ile ölçülen sertlik (E modülü) ile NDG yoğunluk değerleri arasındaki ilişkinin düşük R^2 değerleriyle doğrulandığını göstermiştir. Benzer şekilde, SC sonuçlarıyla yapılan karşılaştırmalar, ihmal edilebilir düzeyde korelasyon katsayıları ortaya koyarak, LWD'nin sertlik ölçümlerinin geleneksel yöntemlerle elde edilen yoğunluk ölçümlerini doğrudan yansıtmadığını göstermiştir. LWD, değerli yüzey sertlik verileri sağlamakla birlikte, ölçümleri sıkıştırma kontrolü için gerekli olan yoğunluk ve nem verileriyle tam uyumlu değildir.

Çalışma sırasında, test edilen ağırlıktan etkilenen cihazın darbe derinliğinin artmasıyla LWD'nin etkinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak bu verimlilik, zeminin türüne ve nem içeriğine büyük ölçüde bağlıdır. Daha derin nüfuz, LWD'nin zemin katmanlarına daha iyi ulaşmasını sağlayarak, özellikle kohezyonlu veya neme duyarlı zeminlerde daha temsili sertlik ölçümleri sunmaktadır. Ek olarak, LWD cihazı, sıkıştırılmış malzeme tarafından tetiklenebilen hassas bir sensör ve pime sahiptir. Bu bileşenler, test prosedürlerinde dikkate alınmalı ve ölçümlerin doğruluğu sağlanmalıdır.

LWD ölçümlerinin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmak amacıyla, NDG ve SC gibi geleneksel yöntemlerle entegrasyonu şiddetle tavsiye edilmektedir. LWD sertliği ile yoğunluğa bağlı parametreler arasındaki zayıf korelasyonlar, LWD'nin bağımsız bir değerlendirme aracı olarak kullanılmaktan ziyade tamamlayıcı bir yöntem olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. LWD'den elde edilen sertlik verilerinin, NDG veya SC ile belirlenen yoğunluk ve nem ölçümleriyle birleştirilmesi, sıkıştırma kalitesinin daha kapsamlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır.

Ayrıca, LWD ölçümlerinin doğruluğunu ve tutarlılığını artırmak için testlerin stabil ve yeterince sıkıştırılmış zeminlerde yapılması önerilmektedir. Zemin yeterince

stabilize edilmeden yapılan ölçümler, LWD cihazının hassas sensörünün yüzey değişimlerine duyarlılığı nedeniyle değişkenlik gösterebilir. Bunun önüne geçmek için, birden fazla LWD darbesi uygulanması ölçümlerin daha doğru ve tutarlı hale gelmesine katkı sağlayacaktır. Bu yaklaşım, zeminin yerleşmesini sağlayarak ilk aşamada karşılaşılan değişkenlikleri en aza indirmekte ve daha güvenilir sertlik ölçümlerinin elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

Çalışma bulgularına dayanarak, karayolu mühendisleri ve ulaşım kurumlarının, otoyol taban katmanlarında sıkıştırma kontrolü için LWD'yi etkili bir araç olarak değerlendirmesi önerilmektedir. LWD, hızlı, tahribatsız ve maliyet etkin değerlendirmeler sunarak saha uygulamaları için uygun bir yöntemdir. Güvenilirliğini artırmak amacıyla saha bazında kalibrasyon yapılması, zemin farklılıklarının dikkate alındığı test protokollerinin oluşturulması ve standart test yönergelerinin belirlenmesi tavsiye edilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, farklı zemin tipleri için eşik değerlerin tanımlanmasına odaklanmalı ve projeler arasında tutarlılığı sağlamaya katkıda bulunmalıdır.

LWD'nin otoyol inşaatında standart bir sıkıştırma kontrol yöntemi olarak benimsenmesi, kalite kontrol süreçlerini hızlandıracak ve nükleer yoğunluk ölçerler ile kum konisi testlerine olan bağımlılığı azaltacaktır. İlgili düzenleyici kurumların, LWD'nin farklı jeoteknik koşullara uyumunu destekleyecek yönergeler geliştirmesi ve aynı zamanda cihazın sensör hassasiyetini dikkate alması önem arz etmektedir.

Sonuç olarak, LWD modern inşaatта umut verici bir yöntem olmasına rağmen, güvenilirliği, fizibilitesi ve doğruluğu NDG ve SC gibi güvenilir yöntemlerle entegrasyonuna bağlıdır. Bu dengeli yaklaşım, karayolu alttemel tabakalarında sıkıştırma kontrolü için daha sağlam ve güvenilir bir sistem sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Akpınar, M. V., Seferoğlu, M. T., Seferoğlu, A. G., Doğan, İ., Erdöl, B., Sayın, A., Mete, N. ve Kılıç, N.; (2015). Sıkışma kontrolünde nükleer metoda alternatif sistemlerin araştırılması. *Geliştirme projeleri sonuç raporu*, KGM-ARGE/2012-22, 20.07.2017, KGM, Ankara.
- Alshibli, K. A., Abu-Farsakh, M. Y. ve Seyman E. (2005). Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 560-569.
- Amr, F. E., Khaled, E. ve Mohamed, I. A. (2013). The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. *HBRC Journal*, Public Works Department, Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt.
- Ashish, H. M. ve Jayeshkumar., P. (2013). A study on region wise price variation of construction raw materials using frequency analysis through Spss software. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4(7).
- ASTM E2583-7 (2007). Standard test method for measuring deflections with a light weight deflectometer (LWD). *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E2835-11 (2011). Standard Test Method for Measuring Deflections Using a Portable Impulse Plate Load Test Device. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Atasoy, M. H. (2015). *Beton basınç problemlerinin çözümlerinde Spss ve Ysa kullanılması. Yüksek lisans tezi, Ulusal Tez Merkezi, Gaziantep üniversitesi, Türkiye.*
- DIN 18134 (2012). Soil Testing procedures and testing equipment Plate load test, Plattendruckversuch Deutches Instiut fur Normung ICS 93.020.
- Duddu, S.R. ve Chennarapu, H. (2022). Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: A state-of-art. *Geo-Engineering* 13, (6), India.
- Fleming, P. R., Frost, M. W. ve Lambert, J. P. (2006). A Review of the lightweight deflectometer (LWD) for routine in situ assessment of pavement material stiffness, TRB 2007 Annual Meeting, Paper No.07-1586.
- Fleming, P. R., Frost, M. W. ve Rogers, C. D. F. (2000). A comparison of devices for measuring the insitu stiffness of highway foundation materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 141(2), 67-72.

- Grasmick, J. G., Mooney, M. A., Senseney, C. T., Surdahl, R. W. ve Voth, M. (2015). Comparison of multiple sensor deflection data from lightweight and falling weight deflectometer tests on layered soil. *ASTM International Geotech. Test. J.*, 38(6): 851–863.
- Hariprasad, C., Umashankar, B. ve Garala, T.K. (2018). Lightweight deflectometer for compaction quality control. *Geotechnical Characterisation and Geoenvironmental Engineering*, vol 16, Singapore.
- Innovation and Creativity, (2008). *Light weight deflectometer (LWD)*. NVF/BRA Symposium Oslo Helge Mork
- Kongkitkul, W., Saisawang, T., Thitithavoranan, P., Kaewluan, P. ve Posribink T. (2014). Correlations between the surface stiffness evaluated by light-weight deflectometer and degree of compaction. *Tunneling and Underground Construction*, 65-75.
- Livneh, M. ve Goldberg, Y. (2001). Quality assessment during road formation and foundation construction: use of falling-weight deflectometer and light drop weight. *Transportation Research Record*, 1755(1), 69-77.
- Marradi, A., Pinori, U. ve Betti, G. (2012). The use of lightweight materials in road embankment construction. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 1000-1009.
- Marradi, A. ve Marvogli, M. (2007). Falling Weight Defelctometer measurements for evaluation of bearing capacity of granular unbound layers. *4th international siiv congress–Palermo 12-14 (Italy)*.
- Mazari, M., Tirado, C., Abdallah, I. ve Nazarian, S. (2016). Mechanistic estimation of lightweight deflectometer target field modulus for construction quality control. *ASTM International. Geotech. Test. J.*, 39(6), 965–976.
- Nayyar, S., (2012). Light Weight Deflectometer (LWD). *Office of Geotechnical Services*.
- Nazzal, M. D. ve Mohammad, L. N. (2010). Estimation of resilient modulus of subgrade soils using falling weight deflectometer. *Transportation Research Record*, 2186(1), 1-10.
- Nazzal, M. D., Abu-Farsakh, M. Y., Alshibli, K. A. ve Mohammad, L. (2007). Evaluating the Light Falling Weight Deflectometer Device for in Situ Measurement of Elastic Modulus of Pavement Layers. *Transportation Research Record*, 2016(1), 13-22.

- Neil, K. S., Carlos, M., Tracy, M. ve Farhat, S. (2010). Use of the Light Weight Deflectometer (LWD) at Highland Valley Copper Mine. *Klohn Crippen Berger*, Vancouver, BC, Canada. Chris Fleming, *Superintendent Site Engineering* ve Joseph Fitzpatrick, *EIT Teck Highland Valley Copper Partnership*, Logan Lake, BC, Canada.
- Productivity of Industry Using SPSS. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*. 5(5), ISSN 2319 – 4847.
- Rakesh, K., Vinod, K. A. ve Sunny, D. G. (2017). Stiffness-based quality control evaluation of modified subgrade soil using lightweight deflectometer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9).
- Senseney, C.T., Krahenbuhl, R. A. ve Mooney, M. A. (2013). Genetic algorithm to optimize layer parameters in light weight deflectometer backcalculation. *International Journal of Geomechanics*, 13(4), 473-476.
- Senseney, C. T. ve Mooney, M. A. (2010). Characterization of Two-Layer Soil System Using a Lightweight Deflectometer with Radial Sensors. *Transportation Research Record*, 2186(1), 21-28.
- Shao, C., Zhang, F., Chen, G., Ji, J., Hou, Q., Tang, J. ve Cao, X. (2013). Study of real-time LWD data visual interpretation and geo-steering technology. *Petroleum Science*, 10, 477-485.
- Siddiki, N. Z., Khan, A., Kim, D. ve Cole, T. (2008). Use of in situ tests in compaction control of a bottom ash embankment. *Transportation Research Record*, 2045(1), 10-18, Washington, D.C.
- Stamp, D. H. ve Mooney, M. A. (2013). Influence of lightweight deflectometer characteristics on deflection measurement. *Geotechnical Testing Journal*, 36(2), 216–226.
- Subramani, T. ve Rajiv, S. R. (2016), Improving construction efficiency and productivity of industry using SPSS. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 5 (5), 239-250.
- Tan, D. S., Khazanovich, L., Siekmeier, J. ve Hill, K. M. (2014). Discrete element modeling of effect of moisture and fine particles in lightweight deflectometer test. *Transportation Research Record*, 2433(1), 58-67.
- Tang, X., Palomino, A. ve Stoffels, S. (2015). Permanent deformation behaviour of reinforced flexible pavements built on soft soil subgrade. *Road Materials and Pavement Design*, 17. 1-17.

Tehrani, F. S. ve Meehan, C. L. (2012). The effect of water content on light weight deflectometer measurements. *GeoFlorida*, 930-939.

URL-1, www.epa.gov/radtown/nuclear-gauges

URL-2, zemintest.com.tr/kum-konisi-deneyi

URL-3, <https://youtu.be/FdXRlMdJUfE>.

Vânia, M., Simona F., Maria A. ve Mercedes S. (2017). Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar, *Construction and Building Materials*, 154, 1164-1172.

Xiaodong, W., Gang, C., ve Xiaomei, W. (2020). Investigation and Research on the Cognition of Traditional Village Landscape Environment Improvement Strategy Based on SPSS Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 474(6).

ÖZGEÇMİŞ

Divine IRIBAGIZA, Ruandalı. İlk, orta ve lise eğitimini 2003-2015 yılları arasında Ruanda'da tamamladı. Bir inşaat atölyesinde iki yıl çalıştıktan sonra 2017 yılında Chengdu, Çin'de, Southwest Petroleum Üniversitesi'nde lisans eğitimine başladı. Mühendislik ve Geomatik Okulu altında İnşaat Mühendisliği bölümünde okudu ve Haziran 2021'de mezun oldu. Daha sonra iki yıl boyunca Ruanda'daki Horizon İnşaat Grubu'nda çalıştı. 2022 yılında Türkiye'ye geldi, Gümüşhane Üniversitesi'nde sekiz ay Türkçe eğitimi aldı. 2023 yılında Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tez çalışmasına odaklanarak yüksek lisans eğitimine başladı.

