

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GERİ KAZANILMIŞ GEOFOAM BLOK DOLGULAR İÇİN ESNEK
ÜST YAPI İMALATLARINDA GERİ KAZANILMIŞ ASFALT
AGREGASININ KULLANIMININ PROTOTİP MODELLER İLE
İNCELENMESİ**

FURKAN AKYOL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULLAH TOLGA ÖZER

HAZİRAN 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜST EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GERİ KAZANILMIŞ GEOFOAM BLOK DOLGULAR İÇİN ESNEK
ÜST YAPI İMALATLARINDA GERİ KAZANILMIŞ ASFALT
AGREGASININ KULLANIMININ PROTOTİP MODELLER İLE
İNCELENMESİ**

FURKAN AKYOL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULLAH TOLGA ÖZER

HAZİRAN 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF FLEXIBLE PAVEMENT CONFIGURATION
FOR GEOFOAM BLOCK EMBANKMENTS COMPOSED OF RE-
USED GEOFOAM BLOCKS AND RE-USED ASPHALT PAVEMENT
AGGREGATES BY PROTOTYPE MODELS**

FURKAN AKYOL

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING
PROGRAM**

ADVISOR: PROF. DR. ABDULLAH TOLGA ÖZER

JUNE 2024



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 10/06/2024 tarih ve 2024/31 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14/06/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Furkan AKYOL'un tez çalışması İnşaat Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Abdullah Tolga ÖZER

ÜYE

: Doç. Dr. Onur AKAY

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Saeid ZARDARİ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.



*Eşime
ve
biricik kızıma*

ÖZET

Geri dönüştürülmüş malzemeler hayatımızın birçok noktasına nüfuz etmiş bulunmaktadır. Gittikçe artan çevre sorunlarının azaltılmasına yönelik geri dönüşüm çözümleri inşaat mühendisliği uygulamalarında da gündeme gelmektedir. Bu kapsamda, karayolu projelerinde yenilenebilir malzemelerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Ülkemizde karayolları esnek üst yapı uygulamaları hem uluslararası hem de Karayolları Genel Müdürlüğüne (KGM) yayınlanan yönetmelik ve şartnameler ışığında inşa edilmektedir. Geleneksel esnek üst yapılar bitümlü sıcak kaplama, BSK, (Aşınma+ Binder + Bitümlü temel), plentmiks temel (PMT) ve plentmiks alttemel (PMAT) katmanlarından oluşmaktadır. Geleneksel üstyapı modellerinin dışında geri dönüştürülebilir/kazanabilir malzemeler kullanılarak yenilikçi esnek üst yapı konfigürasyonlarının tasarlanması döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik açısından önem teşkil etmektedir. Geofom blokların yol dolgusu olarak geri kazanılma potansiyeli olması sebebiyle çevre sorunlarının azaltılmasına hem de iş gücünün ekonomik kullanımına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, İstanbul Büyükşehir Belediyesince (İBB) Beylikdüzü'ndeki bir kavşak düzenlemesi için inşa edilen servis yolunun bir kısmında geleneksel yol esnek üstyapı modeli ile alternatif üst yapı modeli performansları karşılaştırılarak incelenmiştir.

Gebze Teknik Üniversitesinde (GTÜ) yürütülen bir TÜBİTAK projesi kapsamında geofom blok yol dolguları için farklı esnek üstyapıların performansları prototip modellerle incelenmiştir. GTÜ'de yürütülen çalışmada gerçek dinamik ve tekrarlı trafik yüklerinin uygulanarak yaklaşık 21.000 ESAL geçişi yapılan esnek üst yapı ve geofom bloklar sökülerek geri kazanılmıştır. Bu çalışmadan alınan geri kazanılmış geofom bloklar, İBB Yol Bakım ve Onarım Müdürlüğü şantiye sahasından temin edilen kazınmış asfalt kaplama (RAP) agregası ve plentmiks temel tabakası (PMT) ile oluşturulan iki farklı esnek üstyapı konfigürasyonu, Beylikdüzü projesi kapsamında imal edilen servis yolunda 8'er metre uzunluğunda ve üç metre genişliğinde inşa edilmiştir. PMT katmanının içerisinde ağırlıkça optimum kullanılacak RAP agregası yüzdesi laboratuvarında fiziksel, kompaksiyon ve mekanik özellik deneyleri ışığında belirlenmiştir.

İlk prototip esnek üst yapı konfigürasyonu BSK ve ağırlıkça yaklaşık %20 oranında RAP ile karıştırılmış PMT tabakasından oluşturulmuştur. İkinci konfigürasyonda ise, geleneksel esnek üstyapıları temsil etmesi için, BSK ve PMT kullanılmıştır. BSK imalatları öncesinde esnek üst yapının deformasyon modülleri Plaka Yükleme Testleri (PLT) ile belirlenmiştir. İki esnek üst yapı modelinin servis yükleri altındaki performansı incelemek amacı ile servis yolu trafiğe açılmadan önce yüzey kot bilgileri alınmış ve trafik yükleri altında tekerlek izi oluşumu yükleme sonunda alınan kotlar ışığında kaydedilmiştir. Ayrıca taşıt geçiş sayısı, geçiş hızları ve tipleri pnömatik trafik sayım hortumları kullanılarak bir veri günlükleyicisi tarafından kayıt altına alınmış ve analiz edilmiştir.

Elde edilen veriler ışığında hem geri kazanılmış geofom blokların hem de RAP ile karıştırılan PMT'den oluşan esnek üst yapı konfigürasyonunun servis yollarının inşasında kullanılabilirliği ve gerçek dinamik ve tekrarlı trafik yüklerinin altında performansı kayıt altına alınarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geofom Blok, Geri Kazanılmış Geofom Blok, Servis Yolu, Kazınmış Asfalt Kaplaması (RAP) Agregası, Plaka Yükleme Deneyi (PLT), Prototip Model

ABSTRACT

Recycled materials have permeated many aspects of our lives. Recycling solutions aimed at reducing increasingly severe environmental issues are also being introduced in civil engineering applications. In this context, the use of renewable materials in highway projects is increasing day by day. In our country, flexible pavement applications for highways are constructed in light of both international regulations and the specifications published by the General Directorate of Highways (KGM). Traditional flexible pavements consist of layers such as hot mix asphalt (HMA) (wearing + binder + bituminous base), plant-mix base (PMT), and plant-mix subbase (PMAT). Designing innovative flexible pavement configurations using recyclable/reusable materials outside traditional pavement models is significant for a circular economy and sustainability. Due to the potential of geofoam blocks to be re-used as road embankment material, it is thought that they can contribute to reducing environmental problems and the economic use of labor.

In this study, the performances of the traditional flexible pavement model and the alternative pavement model were compared and examined for a section of a service road constructed as part of an intersection arrangement in Beylikdüzü by the Istanbul Metropolitan Municipality (IMM).

Within the scope of a TÜBİTAK project conducted at Gebze Technical University (GTU), the performances of different flexible pavements for geofoam block road embankments were examined using prototype models. In the study carried out at GTU, the flexible pavement and geofoam blocks, which underwent approximately 21.000 ESAL passes by applying real dynamic and repeated traffic loads, were dismantled. Geofoam blocks from this study, and reclaimed asphalt pavement (RAP) and plant-mix base (PMT) layers obtained from the IMM Road Maintenance and Repair Department construction site were used to create two different flexible pavement configurations, each built 8 meters long and 3 meters wide, within the scope of the Beylikdüzü project. The optimal percentage of RAP aggregates to be used by weight within the PMT layer was determined through laboratory tests on physical, compaction, and mechanical properties.

The first prototype flexible pavement configuration consisted of HMA and a PMT layer mixed with approximately 20% RAP by weight. In the second configuration, HMA and PMT were used to represent traditional flexible pavements. Before the HMA installations, the deformation moduli of the flexible pavement were determined with Plate Load Tests (PLT). To examine the performance of the two flexible pavement models under service loads, surface elevation data were taken before the service road was opened to traffic, and the rutting formation under traffic loads was recorded in light of the final elevations taken after loading. Additionally, the number of vehicle passes, their speeds, and types were recorded and analyzed by a data logger using pneumatic traffic counting hoses.

In light of the obtained data, the usability and performance of both re-used geofoam blocks and the flexible pavement configuration consisting of PMT mixed with RAP aggregates in the construction of service roads were recorded and evaluated under real dynamic and repeated traffic loads.

Keywords: Geofoam Block, Re-used Geofoam Blocks, Service Road, Re-used Asphalt Pavement (RAP) Aggregates, Plate Loading Tests (PLT)

TEŞEKKÜR

Bu tez Gebze Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında bilgi, tecrübe ve zamanını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Abdullah Tolga Özer'e teşekkürü özellikle borç bilirim.

Tezimin jürisinde bulunan değerli hocalarım Doç. Dr. Onur AKAY ve Dr. Öğr. Üyesi Saeid ZARDARI'ye teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Altyapı Hizmetleri Şube Müdürlüğüne sunmuş olduğu imkân ve malzemelerden ötürü teşekkür ederim.

Yüksek Lisans programı ve bu tez çalışması boyunca hep yanımda olan meslektaşım iş arkadaşım ve dostum Alper TÜFEKCİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Yasin PEKYÜREK'e teşekkür ederim.

Trafik sayım sistemi kurulumundaki katkılarından dolayı İnş. Yük. Müh. Yasin BÜYÜLASLAN'a teşekkür ederim.

Prof. Dr. Hande Işık ÖZTÜRK hocama desteklerinden ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmaları süresince bana destek olan eşim Aslı AKYOL'a, ihmal ettiğim kızım Zeynep AKYOL'a ve tezi tamamlamam için beni teşvik eden ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen annem Sevim AKYOL ve babam Prof. Dr. Nurettin AKYOL'a en içten sevgi, saygı ve minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xvi

1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1. Karayollarında Kullanılan Üstyapı Tipleri	5
2.1.1. Rijit Üstyapı	7
2.1.2. Esnek Üstyapı	7
2.1.2.1. Alttemel Tabakası	8
2.1.2.2. Temel Tabakası	8
2.1.2.2.1. Plentmiks Temel Tabakası	9
2.1.2.3. Bitümlü Temel Tabakası	10
2.1.2.4. Binder Tabakası	10
2.1.2.5. Aşınma Tabakası	11
2.2. Genleştirilmiş Polistiren Blok	11
2.2.1. Geofam Blok Üretimi	12
2.2.2. Geofam Blokların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	14
2.2.2.1. Yoğunluk	15
2.2.2.2. Mukavemet	16
2.2.2.3. Yüzerlilik	22
2.2.2.4. Arayüz Kayma Dayanımı	22
2.2.3. Geofam Blokların Kullanım Alanları	24
2.2.3.1. Yol Dolgusunda Kullanımı	26
2.2.3.2. Köprü Yaklaşım Dolgularında Kullanımı	28
2.2.3.3. İstinat Duvarlarında Kullanımı	30
2.2.3.4. Şev Duraylılığı Uygulamaları	31
2.2.3.5. Geri Dolgu Olarak Kullanımı	31
2.2.3.6. Diğer Uygulama Alanları	33
2.3. Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama (RAP)	34
2.3.1. Asfalt Geri Dönüşümünün Önemi	34
2.3.2. Asfalt Geri Dönüşüm Yöntemleri	37
2.3.2.1. Soğuk Geri Dönüşüm (CR)	38
2.3.2.2.1. Yerinde Soğuk Geri Dönüşüm (CIR)	38
2.3.2.2.2. Plentte Soğuk Geri Dönüşüm (CCPR)	39
2.3.3. Karayollarında Geri Dönüşüm Yönteminin Belirlenmesi	41
2.3.4. Dünyada ve Türkiye’de RAP Kullanımı	43
2.3.5. RAP Malzemesinin Temel Tabakasında Kullanımı	47

2.4. Plaka Yükleme Deneyi (PLT)	49
2.5. Trafik İzleme Sistemi	52
3. MALZEME VE YÖNTEM	54
3.1. Kullanılan Malzemeler	54
3.1.1. RAP	54
3.1.2. Geri Kazanılmış Geofoam Blok	55
3.1.3. PMT	57
3.1.4. Bitümlü Sıcak Karışım	57
3.2. Prototip Esnek Üstyapı Modelleri	58
3.2.1. PMT-RAP Karışım Oranının Belirlenmesi	58
3.2.2. Prototip Esnek Üstyapı Kesitlerinin Tasarımı	62
4. SAHA ÇALIŞMALARI	69
4.1 Prototip Kesitlerin İnşası	70
4.2 PLT Deneyinin Yapılması	74
4.3 Asfalt Kaplama Tabakasının Oluşturulması	86
4.4 Trafik Sayım Sistemi Kurulması ve Yolun Hizmete Alınması	89
5. SONUÇLAR	95
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	106
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	107
EKLER	108

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

c_a	: Ara yüzey adezyon mukavemeti
E	: Young Modülü
E_{ti}	: Başlangıç tanjant modülü
σ_e	: Elastik sınır gerilmesi
σ_n	: Ara yüze etkiyen normal gerilme
σ_1	: %1 birim boy kısaltmada basınç mukavemeti
σ_5	: %5 birim boy kısaltmada basınç mukavemeti
σ_{10}	: %10 birim boy kısaltmada basınç mukavemeti
ρ	: Malzeme yoğunluğu
δ	: Ara yüzey sürtünme açısı
τ	: Ara yüzey kayma dayanımı
μ	: Sürtünme açısı
AASHTO	: Amerikan Eyalet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği
ARRA	: Asfalt Geri Dönüşüm ve İyileştirme Birliği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BSK	: Bitümlü sıcak karışım
CBR	: California taşıma oranı
cm	: Santimetre
DIN	: Alman Standartları Enstitüsü
EAPA	: Avrupa Asfalt Kaplama Birliği
EN	: Avrupa Standartı
EPS	: Genleştirilmiş polistren blok
EPS12	: ASTM 6817'e göre anma yoğunluğu minimum 11.2 kg /m ³ olan geofoam blok
EPS15	: ASTM 6817'e göre anma yoğunluğu minimum 14.4 kg /m ³ olan geofoam blok
EPS19	: ASTM 6817'e göre anma yoğunluğu minimum 18.4 kg /m ³ olan geofoam blok
EPS22	: ASTM 6817'e göre anma yoğunluğu minimum 21.6 kg /m ³ olan geofoam blok
EPS29	: ASTM 6817'e göre anma yoğunluğu minimum 28.2 kg /m ³ olan geofoam blok
EPS39	: ASTM 6817'e göre anma yoğunluğu minimum 38.4 kg /m ³ olan geofoam blok
EPS46	: ASTM 6817'e göre anma yoğunluğu minimum 45.7 kg /m ³ olan geofoam blok
ESAL	: Eşdeğer teker dingil yükü
FHWA	: Federal Karayolu İdaresi
GS	: Güvenlik Sayısı
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
kN	: KiloNewton
kPa	: KiloPaskal
LR	: deformasyon oranı (%/min)

m	: Metre
M _R	: Esneklik Modülü (Resilient Modulus) (psi)
NPRA	: Norveç Karayolları İdaresi
NCHRP	: Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Yol Araştırma Program Birliği
PMT	: Plent-miks temel
RAP	: Geri kazanılmış asfalt agrega
R	: Güvenilirlik (%)
REP	: Azaltılmış toprak basıncı
SN	: Üstyapı sayısı (structural number)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
T _{8,2}	: Toplam standart dingil yükü (8,2 ton) tekrerrür sayısı
TEF	: Taşıt eşdeğerlik faktörü
ZEP	: Sıfır toprak basıncı



ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Beylikdüzü proje sahası uydu fotoğrafı.	3
Şekil 1.2: Servis yolu güzergahı.	3
Şekil 2.1: Karayolu tip enkesiti.	5
Şekil 2.2: Üstyapıyı oluşturan tabakalar ve türleri.	6
Şekil 2.3: Esnek üstyapı kesiti.	8
Şekil 2.4: Esnek üstyapı tabakaları ve CBR limit değerleri [URL-1].	11
Şekil 2.5: EPS blok üretim aşamaları (a-b) hammadde (c) ön şişirme işlemi (d) ön şişirilme sonrası kalıplama aşaması (e) kalıplama sonrası stok sahasına alınan bloklar [Özer, 2020]	14
Şekil 2.6: 20 kg /m ³ yoğunluklu bir EPS numunesi üzerinde ASTM D1621 standardına göre yapılan monotonik yükleme deneyi ile belirlenmiş olan eksenel deformasyon- basınç mukavemeti ilişkisi ve davranış bölgeleri [Özer, 2020]	17
Şekil 2.7: 14 kg /m ³ ila 30 kg /m ³ yoğunluklu bir EPS numuneleri üzerinde yapılan monotonik yükleme deneyleri [Özer, 2020].	18
Şekil 2.8: Geofoam blok yol dolgusu uygulaması (a) tesviye kumu serilmesi (b) geofoam blok yerleşimi (c) şevde geomembran uygulaması (ç) betonarme yük yayma platform imalatı (d) yol üst yapı imalatı (e) tamamlanmış imalat [Özer, 2020].	27
Şekil 2.9: Prekast panel montajı (a) prekast panel montaj detayı (b) prekast panel montajı [Özer, 2020].	28
Şekil 2.10: Geofoam blok köprü yaklaşım dolgusu, Boğazköy Köprüsü, Kayseri [Özer,2020].	29
Şekil 2.11: İstinat duvarı geofoam blok geri dolgu imalatı, Kayaşehir, İstanbul [Özer, 2020]	30
Şekil 2.12: Menfez üzeri geofoam blok demiryolu dolgusu, Draper, UT, USA [Bartlett vd., 2015]	32
Şekil 2.13: İsale hatları üzerine inşa edilen geofoam blok yol dolgusu, Acıbadem, İstanbul [Özer, 2020].	33
Şekil 2.14: Geri dönüşüm yöntemlerinin sınıflandırılması.	38
Şekil 2.15: Yerinde soğuk geri dönüşüm uygulaması.	39
Şekil 2.16: Soğuk geri dönüşüm plenti ve uygulaması.	41
Şekil 2.17: Plaka yükleme deneyi düzeneği, Beylikdüzü, İstanbul.	50
Şekil 2.18: Plaka yükleme deneyi için örnek gerilme-deplasman grafiği.	51
Şekil 2.19: Trafik sayım sistemi [URL-2].	53
Şekil 3.1: a) Asfalt kazıma çalışmaları, b) Kazılmış asfaltın kamyonlara yüklenmesi, c) Kazımı tamamlanmış asfalt, d) RAP depo alanı.	55
Şekil 3.2: a) Geofoam blokların sökümü, b) Blokların servis yolunda bu çalışma kapsamında kullanılmak üzere taşıta yüklenmesi.	56
Şekil 3.3: a) PMT, b) RAP	58
Şekil 3.4: PMT elek analizi sonucu [Pekyürek vd., 2023].	59
Şekil 3.5: RAP ve PMT-RAP karışım elek analizi sonucu [Pekyürek vd., 2023].	60
Şekil 3.6: Modiye protor deneyi kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkileri [Pekyürek vd., 2023].	61
Şekil 3.7: RAP içeriğinin CBR değerine etkisi [Thakur ve Han, 2015].	62

Şekil 3.8:	Prototip üstyapı enkesiti Tip 1 (PMT tabakalı).	67
Şekil 3.9:	Prototip üstyapı enkesiti Tip 2 (PMT+RAP tabakalı).	68
Şekil 4.1:	Eski ve yeni dönel kavşak.	69
Şekil 4.2:	Prototip kesitlerin yerleşim planı.	70
Şekil 4.3:	Tesviye kumu imalatı.	70
Şekil 4.4:	Geleneksel geofoam blok yerleşimi [Özer, 2020].	71
Şekil 4.5:	Geofoam blok yerleşim planı.	72
Şekil 4.6:	Geofoam blok imatları.	73
Şekil 4.7:	PMT tabakası imatları.	74
Şekil 4.8:	PLT deneyi.	75
Şekil 4.9:	PLT deneyi vaziyet planı.	75
Şekil 4.10:	PMT-RAP (karışım) prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri.	76
Şekil 4.11:	PMT-RAP karışım) prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri ve DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#1).	77
Şekil 4.12:	PMT-RAP karışım) prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri ve DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#2)	78
Şekil 4.13:	PMT-RAP karışım) prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri ve DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#7)	79
Şekil 4.14:	PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri.	80
Şekil 4.15:	PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri ve DIN 18134 – 300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#3).	81
Şekil 4.16:	PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri ve DIN 18134 – 300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#4).	82
Şekil 4.17:	PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri ve DIN 18134 – 300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#8).	83
Şekil 4.18:	a) Geofoam blokların döşenmesi, b) Temel tabakası imalatı, c) BSK imalatı, d) APT uygulaması, e) Geofoam blok sökümü [Büyükaslan, 2024].	85
Şekil 4.19:	Asfalt tabakaları imalatı.	86
Şekil 4.20:	Üç adet asfalt numunesi (yaklaşık 20 cm kalınlığında).	87
Şekil 4.21:	Binder tabakası elek analizi sonuçları.	88
Şekil 4.22:	Bitümlü temel tabakası elek analizi sonuçları.	88
Şekil 4.23:	Trafik izleme sistemi kurulumu.	90
Şekil 4.24:	Geçici servis yolunun hizmete alınması.	91
Şekil 4.25:	Günlere göre saptanan toplam taşıt sayısı.	92
Şekil 4.26:	10.07.2023-31.08.2023 arası servis yolu kullanımı ve hız dağılım tablosu.	93

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: PMT tabakası gradasyon limitleri [KTŞ, 2023].	9
Tablo 2.2: PMT tabakası minimum sıkışma oranları [KTŞ, 2023].	10
Tablo 2.3: Çeşitli geofoam blok yoğunluk standartları [Güven, 2020].	16
Tablo 2.4: Mukavemet değerlerini belirlemede kullanılan ampirik korelasyonlar.	19
Tablo 2.5: ASTM D6817'ye göre minimum dayanım özellikleri.	21
Tablo 2.6: TS EN 14933'e göre minimum %10 birim deformasyondaki dayanım seviyeleri.	21
Tablo 2.7: Geofoam blok dolgu sistemindeki ara yüzler mukavemetleri.	24
Tablo 2.8: Asfalt geri dönüşüm yöntemlerinin kaplama bakım ve rehabilitasyon yöntemi olarak kullanımı [ARRA, 2015].	42
Tablo 2.9: Bozulma tiplerine göre geri dönüşüm yöntemi seçimi [ARRA, 2015].	43
Tablo 2.10: Yıllara göre geri dönüştürülmüş asfalt miktarları(ton/yıl) [EAPA, 2020].	44
Tablo 2.11: 2020 yılındaki geri kazanılmış asfalt miktarları ve kullanım alanları [EAPA, 2020].	46
Tablo 2.12: 2022 yılındaki geri kazanılmış asfalt miktarları ve kullanım alanları [EAPA, 2022].	47
Tablo 2.13: RAP karışım oranları.	48
Tablo 3.1: Aşınma tabakası (TİP-1) için gradasyon limitleri [KTŞ, 2023].	54
Tablo 3.2: Çalışmada kullanılan yükleme yapılmamış geofoam blokların fiziksel ve mekanik özellikleri [Büyükaslan, 2024]	56
Tablo 3.3: Bitümlü Temel ve Binder tabakaları için gradasyon limitleri [KTŞ, 2023].	57
Tablo 3.4: Asfalt Dizayn Kriterleri [KTŞ, 2023].	58
Tablo 3.5: Temel dane özellikleri, proktor ve CBR deney sonuçları [Pekyürek vd., 2023].	61
Tablo 3.6: Güvenilirlik değeri %75'e göre tasarım değerleri [KGM, 2008].	66
Tablo 4.1: PMT-RAP karışımlı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#1).	77
Tablo 4.2: PMT-RAP karışımlı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#2).	78
Tablo 4.3: PMT-RAP karışımlı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#7).	79
Tablo 4.4: PMT-RAP karışımlı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#3).	81
Tablo 4.5: PMT-RAP karışımlı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#4).	82

Tablo 4.6:	PMT-RAP karışımli prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#8).	83
Tablo 4.7:	Plaka yükleme deneyi test sonuçları.	84
Tablo 4.8:	Asfalt tabakaları KTŞ 2023 ile karşılaştırılmalı deney sonuçları.	89
Tablo 4.9:	Taşıt cinsine göre araç veri tablosu.	92
Tablo 4.10:	Taşıt eşdeğerlik faktörleri (TEF) (KGM, 2008).	93
Tablo 4.11:	Şerit dağıtma faktörü (η) (KGM, 2008).	94
Tablo 4.12:	51 günlük $T_{8,2}$ hesabı.	94



1. GİRİŞ

Çağımızda enerji ve doğal kaynak korunumu, atıkların azaltılması ve güç tasarrufu için geri dönüştürülebilen malzemeler kullanarak üretim ve imalat yapılması üzerine dikkat çekilmesi gereken en önemli alanlardan biridir. İnşaat sektöründe oluşan yapısal atıklar çevre sorunları arasında önemli yer tutmaktadır. Ülkemizde ve dünyada inşaat atıklarının doğru değerlendirilmemesinin ekonomiye verdiği zararın büyük olacağı açıktır. 1970’li yıllardan itibaren inşaat atıkların oluşumunu önlemek ve azaltmayla beraber geri kazanım veya geri dönüşüm yoluyla yeniden kullanma ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. İnşaat imalatlarında ortaya çıkan yapı malzemeleri çeşitli yöntemler ile geri kazanılıp yeniden kullanılabilirdiği gibi, geri kazanılması mümkün değil ise geri dönüşüm yöntemleriyle, başka malzemelerin üretiminde bir bileşen olarak yer alabilmektedir. Geri kazanılmış ve geri dönüştürülmüş bu yapı malzemeleri kullanıldıkları yapıya hem ekolojik değer katmanın hem de ekonomik yarar da sağlamanın yanı sıra çevresel ve yapısal sürdürülebilirliği de etkilemektedir. Doğal kaynakların sınırsız olmadığı ve zaman ile tükenebileceği düşünüldüğünde, kaynak israfını önlemek ve enerji krizine yol açmamak adına, ekonomik değeri olan malzemelerin geri dönüşümü ve geri kazanımı için çeşitli yöntemler geliştirilerek, ekonomik kazanç ve enerji tasarrufu sağlamak hedeflenmektedir [Salta, 2010; İpekçi vd., 2017; Şahan vd., 2021; Fırat ve Akbaş, 2015].

Zaman içinde değişen ve gelişen teknolojiyle beraber inşaat sektöründe de yeni ihtiyaçlar ve yeni uygulamalar ortaya çıkmaktadır. Özellikle geri dönüştürülebilen malzemelerin kullanım alanının genişlemesi ile inşaat sektöründe geleneksel yöntemin dışında farklı tip uygulamaların önü açılmıştır. Gelişen teknoloji ile yenilikçi birçok ürün inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat sektöründe ortaya çıkan yapısal atıkların çevreye ve ekonomiye olan olumsuz etkileri düşünüldüğünde, yenilikçi ürünlerin sürdürülebilir olması için geri dönüşümünün veya geri kazanımının kapsamıca araştırılması gerekmektedir.

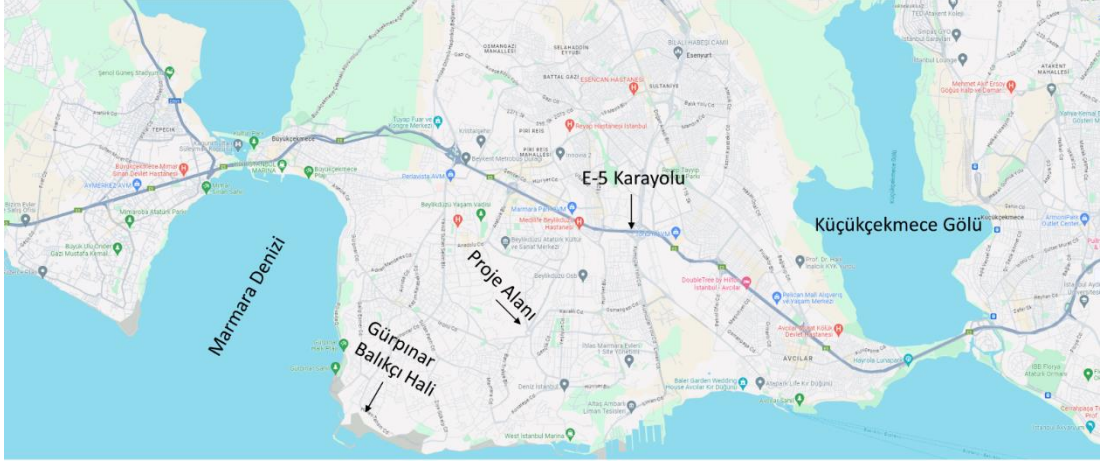
Genleştirilmiş polistiren (EPS) blok (geofom blok) geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan, hafif ve kapalı gözenekli bir geosentetik ürün olarak tanımlanmıştır [Özer, 2020]. İnşaat sektöründe genellikle ısı yalıtım amacıyla levha

formunda kullanılan EPS, fiziksel ve mekanik avantajlarından ötürü (**ASTM D6817**) çeşitli geoteknik mühendisliği uygulamalarında geleneksel yöntemlere alternatif bir geoteknoloji olarak 1972 yılından beri kullanılmaktadır [**Aaobφe, 2018**]. Son yıllarda EPS Geofoam blokların otoyol ve köprü yaklaşım dolgularında kullanımı ülkemizde de artmaktadır [**Özer, 2020; Özer ve Akınay, 2022; 2024**]. Bu kullanım artışı ile geofoam blok geoteknolojisi, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından kullanılan teknolojilerin uygulama kataloğu olan Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) Aralık 2023'te yapılan son güncellemede (**KTŞ, 2023**) yerini almıştır. İlgili güncelleme Kısım 225 Genleştirilmiş Polistiren Blok (Geofoam) ile Dolgu Yapılması bahsinde kapsamlıca ele alınmıştır [**KTŞ, 2023**].

Asfalt betonu, belirli gradasyondaki agrega ve filler ile bitümlü bağlayıcının belirli şartlardaki karışımında meydana gelen bir sıcak karışımdır [**KTŞ, 2023**]. Kazınmış asfalt kaplaması (RAP), karayollarında kullanılan, faydalı ömrünü tamamlamış binder ve aşınma tabakalarının soğuk kazıma makineleri ile sökülmesinden elde edilmektedir. Elde edilen agrega atık malzeme depolarında toplanmaktadır. Açık istifler formunda depolanan kazılmış asfalt kaplaması, iklim şartlarına bağlı olarak çözünmekte ve içerisinde bulunan bitüm yer altı sularına karışabilmektedir. Çevresel ve ekonomik etkileri düşünüldüğünde kazılmış asfalt agreganın işlemlerden geçirilerek geri dönüştürülmüş hammadde veya geri kazanılmış malzeme olarak kullanılması önem arz etmektedir [**Şahan ve Canpolat, 2021**].

Bu çalışmada inşaat sektöründe ortaya çıkan atıklarının geri kazanılması kapsamında, geri kazanılmış geofoam bloklar ve RAP, sırasıyla, yol dolgusu ve üstyapı konfigürasyonunda bileşen olarak kullanılarak mekanik ve fiziksel performansı değerlendirilmiştir.

İstanbul İli Beylikdüzü İlçesi Batı Trakya Bulvarı, Kavaklı Caddesi ve Mustafa Kemal Caddesi kesişimi üzerinde bulunan dönel kavşak, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Fen İşleri Başkanlığınca yürütülen Beylikdüzü projesi kapsamında yenilenerek, 120 metre çapında yeniden inşa edilecektir (**Şekil 1.1**).



Şekil 1.1: Beylikdüzü proje sahası uydu fotoğrafı.

Bu imalatlar sırasında T1 kolunda mevcut trafiğin yönlendirilmesi için geçici bir servis yolu inşa edilmiştir. (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2: Servis yolu güzergahı.

GTÜ kampüsünde geofoam blok yol dolguları için alternatif esnek üst yapı modellerinin incelendiği bir çalışmada yaklaşık 21.000 ESAL trafik yüklemesi yapılan geofoam bloklar [Büyükaslan, 2024], İBB Beylikdüzü projesi kapsamında (Şekil 1.1) inşa edilen geçici servis yolunun bir kısmında geri kazanılmış yol dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Dolgu üzerine KTŞ'ye uygun esnek üstyapı modeli ile RAP kullanılarak oluşturulan alternatif prototip esnek üst yapı modelinin geçici servis yolundaki performansı incelenmiştir. Geofoam blokların, geri kazanılarak yeniden kullanılabilmesi bu çalışmanın ana amaçlarından birisidir. Ayrıca RAP kullanılarak oluşturulan esnek üst yapı konfigürasyonu ile geri kazanılmış EPS geofoam blok dolgulardan oluşan kesitte servis yükleri altında performansı belirlenerek hem

yenilikçi malzemelerin hem de atık inşaat malzemelerinin sürdürülebilirliği araştırılmıştır.

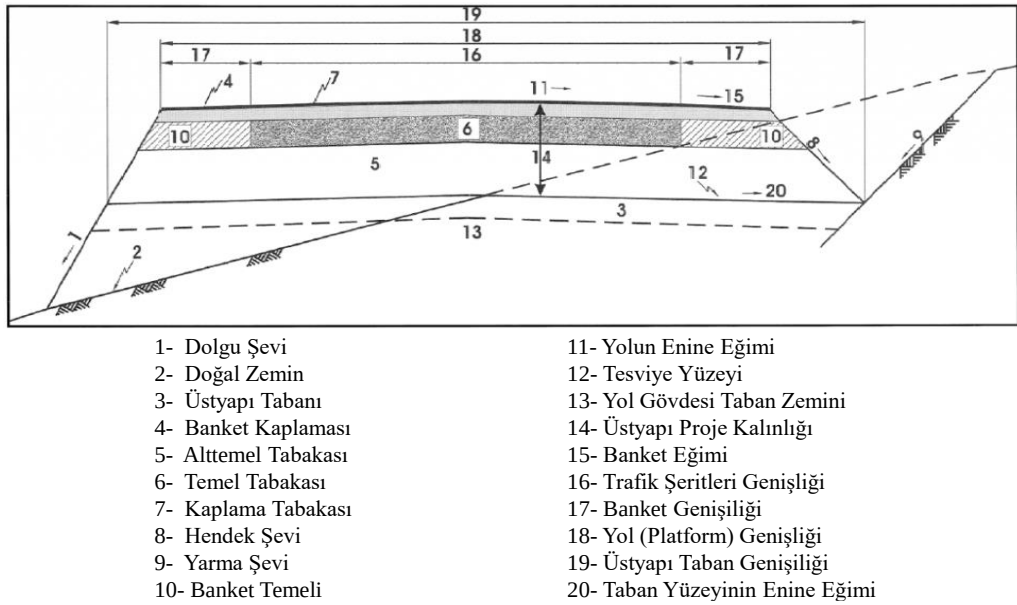
BSK katmanının imalatından önce plaka yükleme deneyleri (PLT) ile esnek üst yapıların deformasyon karakteristikleri ölçülmüştür. BSK imalatını takiben, geçici servis yolu trafiğe açılmadan önce, yol yüzey kotları alınarak trafik yüklemesi sonrasında oluşan tekerlek izi derinliği kayıt altına alınmıştır. Böylece gerçek sınır koşulları altında iki farklı esnek üst yapı modelinin performansları belirlenmiştir. Ayrıca, yol trafiğe açılmadan önce kurulan trafik izleme sistemi vasıtasıyla taşıt geçiş sayısı, geçiş hızları ve tipleri pnömatik trafik sayım hortumları kullanılarak bir veri günlükleyicisi tarafından kayıt altına alınmıştır.

Tezin içeriğinde öncelikle Bölüm II’de geofoam blokların yol inşaatlarında kullanımı, RAP ve esnek üst yapı sistemlerinin performanslarının belirlenmesi için yapılan yol testleri hakkında tekniğin bilinen durumu özetlenmiş ve proje sahasında yapılan prototip imalatlara dair detaylı bilgiler ise Bölüm III’de kapsamlıca ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelere ait karakterizasyon testlerinin ve arazi deneyinin sonuçları Bölüm IV’te ve verilmiştir. Çalışmanın sonuçları ise Bölüm V’te özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Karayollarında Kullanılan Üstyapı Tipleri

Karayolu, kamunun yararlanması için kamuya açık arazilerde hizmet veren trafik akışına imkân sağlamak üzere arazi şeritleri, köprüler, tüneller, her türlü sanat yapıları, koruma yapıları ve diğer alanlar olarak tanımlanır. Karayolu yürürlükteki şartnameler uyarınca belirlenen tasarım kriterlerine göre (proje hızı, güvenilirlik, ilk ve son servis kabiliyeti vb.) proje güzergahı boyunca istenilen kot seviyesinde ve taşıtların konforlu ve güven içinde seyahat etmesi amacı ile inşa edilen yapılardır [Ünlü, 2019]. Şekil 2.1’de karayollarında uygulanan tipik bir en kesit şematik olarak gösterilmiştir.

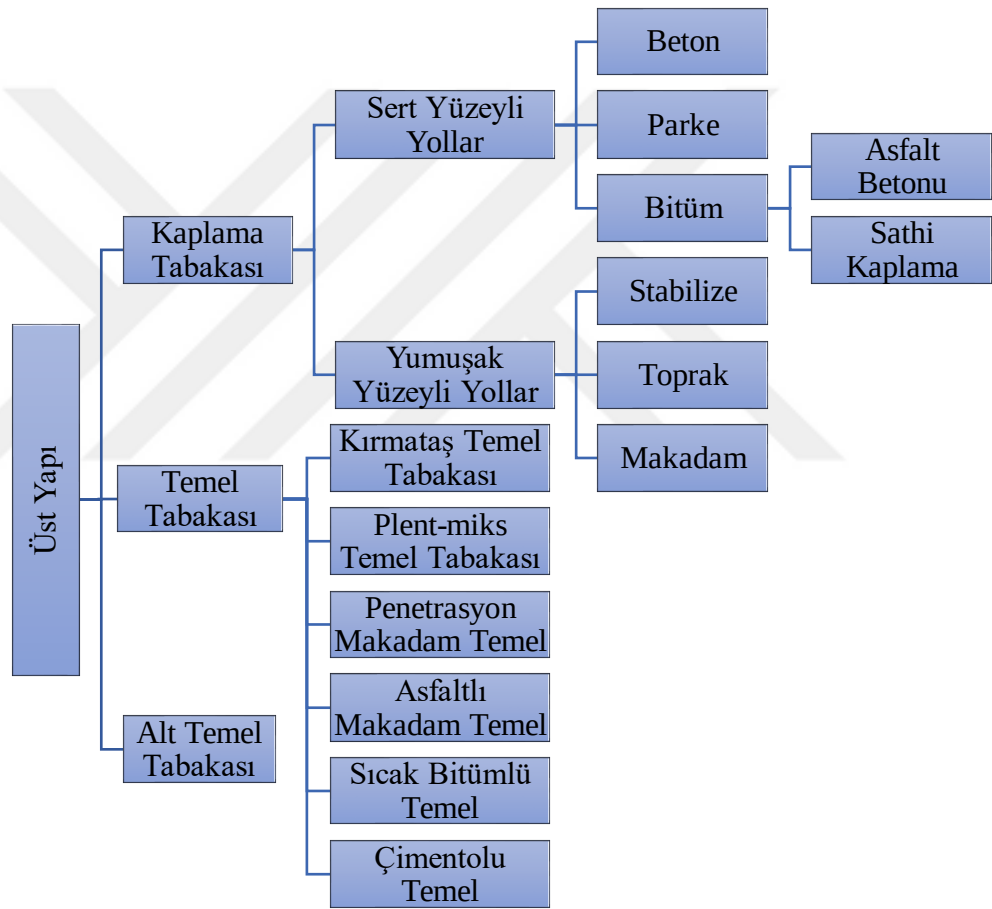


Şekil 2.1: Karayolu tip enkesiti.

Karayolu yol altyapısı ve yol üstyapısı olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Yol altyapısı, yol üstyapısının inşa edileceği yarma, dolgu, köprü, viyadük, tünel, menfez gibi sanat yapılarını da içeren bölümdür. Yol altyapısı dolgu kesitinde malzeme ocağından getirilmiş dolgu ile oluşturulmuş bir toprak gövdedir. Yarma kesitinde ise doğal zemindir. Projesince belirlenen yol üstyapı taban kotuna yüzey teşkil etmek, üstyapıdan gelen yükleri daha geniş alana yayarak taşıma gücüne katkıda

bulunmak ve yolu dış etkenlerden korumak yol altyapısının görevidir [Mazlum, 2014].

Yol üstyapısı yolu çevre ve iklim şartlarına göre korumak, trafik için güvenli ve konforlu bir yüzey oluşturmak, trafik yüklerini taban yüzeyine dağıtarak zemin taşıma günü aşmayacak şekilde taşımak için alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşturulan kısımdır. Yol üstyapısı kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin cinslerine, fiziksel ve mekanik özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit üstyapı ve esnek üstyapı olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadırlar (Şekil 2.2).



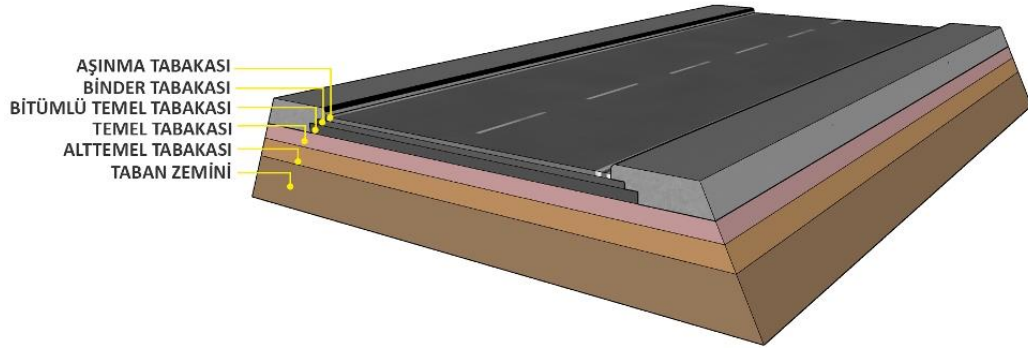
Şekil 2.2: Üstyapıyı oluşturan tabakalar ve türleri.

2.1.1. Rijit Üstyapı

Rijit üstyapı, yol altyapı tabakası üzerine inşa edilen temel tabakası ve bu tabakanın üzerine yapılan beton kaplamadan meydana gelmektedir. Bu tip üstyapılarda yükün büyük bir kısmı beton plak tarafından karşılanır ve geri kalan kısım ise temel aracılığı ile zemine aktarılır. Beton kaplamanın davranışı, inşa edilen beton tabakalarının özellikleriyle beraber temel, alt temel ve taban zemininin özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu sebeple imalat öncesi proje aşamasında üstyapı tabakalarının ve betonu oluşturan kum, çakıl, kırmataş, çimento ve betonarme demiri gibi bileşenlerin tasarlanması gerekmektedir. Betonarme plaklar donatısız, sürekli veya kısmen donatılı ve öngerme donatılı olarak yapılabilirler. Betonarme plaklar 20-25 m² alana enine ve boyuna derzler ile birbirinden ayrılmış olarak inşa edilirler. Beton plağın rijitliğinin çok yüksek olması sebebiyle rijit üstyapı ağır taşıt trafiğinin bulunduğu yerlerde tercih edilmektedir. Rijit kaplama, büyük yolcu uçaklarının yıllık 5000'den fazla kalkış yaptığı havaalanlarında zorunlu olarak uygulanır [Ertaş, 2019; Mazlum, 2014].

2.1.2. Esnek Üstyapı

Esnek üstyapı, yola etkiyen dinamik ve statik yüklerin büyük bir bölümünün üstyapıyı oluşturan bitümlü bağlayıcı ya da bağlayıcısız tabakalar tarafından karşılandığı, üstyapı tipidir. Taşıyıcılığı veya stabilitesi tabakaları meydana getiren agregaların birbirlerine kenetlenmesine, sürtünmesine ve bitümlü bağlayıcıların sağladığı adezyona bağlıdır [Ertaş, 2019]. Esnek üstyapı alt temel tabakası, temel tabakası ve asfalt kaplama (aşınma tabakası, binder tabakası ve bitümlü temel tabakası) tabakasından oluşmaktadır (Şekil 2.3). Asfalt kaplama tabakası yol üstyapısının en üst katmanını olması sebebi ile trafik yüklerine doğrudan maruz kalır. Basınç ve çekme gerilemeleri bu tabakada en yüksek değerlerine ulaşmakta olup, bu gerilmelere direnç gösterebilmesi için diğer tabakalara göre daha stabil ve daha elastik olması gerekir. Kaplama kalınlığı ile yolun yüklere karşı direnci arasında doğrusal bir bağıntı vardır. Kaplama kalınlığının artırılması ile tabana etkiyen kayma ve basınç gerilmeleri azalır. Ayrıca kaplama tabakaları suya karşı geçirimsiz bir yüzey oluşturarak diğer tabakaları korur. Asfalt kaplama yapısı itibari ile çevresel ve iklimsel etkilerden oluşabilecek olumsuzlukları (toz, çamur vb.) engelleyerek yol hattının düzgünlüğünü ve sürüş konforunu muhafaza eder [Ünlü, 2019].



Şekil 2.3: Esnek üstyapı kesiti.

2.1.2.1. Alt Temel Tabakası

Esnek üstyapıların en alt tabakasını alt temel tabakası oluşturur. Yol üstyapı temel tabakasını taşımak üzere taban zeminine üzerine imal edilen, belirli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip granüler malzemeden oluşmuş üstyapı tabakasıdır. Yol taban zeminin taşıma günü aşabilecek yükleri önlemesinin yanı sıra iklimsel şartlardan oluşan don etkisinin yol üstyapı tabakalarına ulaşmasını da engeller. Alt temel tabakası kum, çakıl, teras çakılı, ayrılmış bozuşmuş kaya, cüruf, kırmataş, kazınmış asfalt ve benzeri malzemelerden tek tip veya kazınmış asfalt malzemesi kullanılması durumunda (maksimum %25) iki veya daha fazla malzeme karışımından dizayn edilir [KTŞ, 2023].

2.1.2.2. Temel Tabakası

Kaplama tabakası ile ince tesviye yüzeyi veya alttemel tabakası arasında bağlantıyı, yük dağılımını ve düzgünlüğünü sağlayan, yola gelen yükleri taşıyan ve alttemel veya yol tabanına aktaran tabakadır. Temel tabakası kaplama tabakasının altında bulunarak trafik yüklerinden oluşan kayma gerilmelerine karşı koyar ve üstyapının yük taşıma kapasitesini artırır (Şekil 2.3). Ayrıca don etkisini azaltmak ve drenaj sağlamak gibi fonksiyonları bulunmaktadır.

2.1.2.2.1. Plent-Miks Temel Tabakası

PMT tabakası kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak **Tablo 2.1**'de verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda su ile plentte karıştırılması ile hazırlanmaktadır.

Tablo 2.1: PMT tabakası gradasyon limitleri [KTŞ, 2023].

Elek Açıklığı		% Geçen	
mm	in	TİP - I	TİP - II
37,5	1½	100	
25	1	72 - 100	100
19	¾	60 - 92	80 - 100
9,5	¾	40 - 75	50 - 82
4,75	No.4	30 - 60	35 - 65
2,00	No.10	20 - 45	23 - 50
0,425	No.40	8 - 25	12 - 30
0,075	No.200	0 - 10	2 - 12

PMT tabaka kalınlığının 15 cm ve üzerinde tasarlandığı projelerde Tip-1, 15 cm aşağısında tasarlanan projelerde ise Tip-1 veya Tip-2 kullanılmaktadır [KTŞ, 2023]. PMT tasarımı **Tablo 2.1**'de verilen gradasyon limitleri içerisinde kalarak, 4,75 mm elek üzerinde kalan malzemenin tamamının, iki veya daha fazla yüzü kırılmış agregadan oluşturularak yapılmalıdır. Karışımda kullanılacak olan su miktarı optimum su içeriğinden $W_{opt} \pm 1,0$ aralığında olmalıdır. Dizayn gradasyonuna uygun olarak hazırlanan ve Modifiye Proctor Deneyi (**TS 1900-1, AASHTO T 180**) yöntemi ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığının % 100'üne sıkıştırılmış numunelerin yaş CBR (**TS1900-2, AASHTO T 193**) değerleri % 120'den az olmamalıdır.

Tasarım gradasyonuna uygun olarak plentte hazırlanan karışım finişerler ile tabakalar halinde serilir ve silindire sıkıştırılır. Sıkıştırılmış tabaka kalınlığı 20 cm'den fazla olmamalıdır. Yağışlı, don ve karlı havalarda serim yapılmamalı, sıcak havalarda ise yüzeydeki suyun buharlaşmasına engel olunmalı ve gerektiğinde nemlendirilmelidir. Serilen tabakanın bozulmasına mahal vermeden üzerinin kapatılması esastır.

Yeterli sıkışma ile erişilmesi istenen minimum sıkışma yüzdeleri **Tablo 2.2**'de verilmiştir.

Tablo 2.2: PMT tabakası minimum sıkıştırma oranları [KTŞ, 2023].

Minimum Sıkıştırma %	100	Modifiye Proctor TS 1900-1 AASHTO T 180
	97	Titreşimli Tokmak TS 1900-1 BS 1377
Optimum Su İçeriği %	$W_{(opt-1)} - W_{opt}$ $W_{opt} \pm 0,5$	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

2.1.2.3. Bitümlü Temel Tabakası

Bağlayıcılı ve bağlayıcısız bir temel tabakası üzerine inşa edilen bitümlü bağlayıcılı sıcak karışım tabakasıdır. Temel tabakası ile asfalt betonu binder tabakasının arasına serilir. Bitümlü temel tabakası, mineral agrega, kaba agrega, ince agrega ve mineral filleri içeren en az üç ayrı dane çapını içeren düzgün derecelendirme ve karışım tasarımının uygun bitümlü bağlayıcı ekleyerek karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Diğer asfalt kaplama tabakalarına göre karışımında bulunana bitüm oranı daha düşük, agrega boyutları ise daha büyüktür.

2.1.2.4. Binder Tabakası

Aşınma tabakası ile bitümlü temel veya temel tabakası arasında serilen bitümlü sıcak karışım tabakasıdır. Bir üst tabakadan gelen yüklerin etkisini azaltır ve daha geniş zemine yayarak bir alt tabakaya iletir. Tekrarlı trafik yükleri etkisi ile oluşabilecek çatlama ve deformasyonları karşı mukavemet gösterir ve kaplamayı daha stabil hale getirir. Ayrıca aşınma tabakası imalatı için uygun kotu ve düzgün yüzeyi oluşturur. Binder tabakasında bulunan bitüm oranı aşınma tabakasında kullanılan bitüm oranına göre daha düşük olmakla birlikte, karışımı oluşturan agrega boyutları aşınma tabakasına göre daha büyüktür [Arapoğlu, 2015].

2.1.2.5. Aşınma Tabakası

Binder tabakası üzerine gelen ve üstyapının en üst tabakasını oluşturan bitümlü sıcak karışım tabakasıdır. Trafik yüklerinin doğrudan bu tabakaya etkimesi sebebi ile yüklerin diğer tabakalara iletimini sağlayan ilk tabakadır. Yol yüzeyini oluşturduğundan güvenli bir sürtünme yüzeyi sağlaması, trafik izi gibi trafik etkilerine karşı stabil olması, suya karşı geçirimsiz bir yüzey oluşturarak altyapıyı koruması ve yüzey düzgünlüğüne sahip olması gerekmektedir. Aşınma tabakası tasarımında ince ve filler agrega diğer tabakalara nazaran daha yüksek oranda kullanılmaktadır. Ayrıca aşınma asfaltı karışımındaki bitüm oranı diğer sıcak karışımlara oranla daha fazla olup, bu sayede trafik yükleri altında deformasyon ve tekerlek izi oluşumu azalmakta ve asfalt kaplamanın ömrünü uzatmaktadır. Birçok ülke aşınma asfaltı sıcak karışımında modifiye bitümü tercih etmektedir. Modifiye bitüm ve bitüm oranının fazla olması, ince ve filler agreganın daha yoğun kullanılması aşınma tabakası maliyetini diğer tabakalara kıyasla artırmaktadır [Arapoğlu, 2015; Ünlü, 2019].

Şekil 2.4'te karayollarında uygulanan esnek üstyapı tabakalarına ait sıkışma ve CBR limit değerleri gösterilmiştir.

Ü S T Y A P I A L T Y A P I	Sıkışma _{tek} >97	Aşınma	Sıkışma _{ort} =98-100
		Binder	Sıkışma _{ort} =98-100
		Bitümlü Temel	Sıkışma _{ort} >98
	Granüler Sıkışma > 98	Temel	Granüler CBR > 100
	Plentmiks Sıkışma > 100		Plentmiks CBR > 120
	Tip –A Sıkışma > 95	Altemel	Tip –A CBR > 30
	Tip –B Sıkışma > 95		Tip –B CBR > 50
	80 cm de	Üstyapı Tabanı	CBR > 10
	Sıkışma >100		CBR > 8
	Sıkışma >95	Dolgu	CBR > 3
TABİİ ZEMİN			

Şekil 2.4: Esnek üstyapı tabakaları ve CBR limit değerleri [URL-1].

2.2. Genleştirilmiş Polistiren Blok

Genleştirilmiş polistiren (EPS) stiren monomerin polimerizasyonu ile petrolden elde edilen bir malzemedir. EPS bloklar, dane çapları 0,2-0,5 mm arasında değişen

polistiren granüler boncukların sırası ile ön şişirme, dinlendirme, kalıplama ve şekillendirme aşamaları sonucunda üretilir [Aliyazıcıoğlu, 2016; Özer vd., 2017].

İnşaat mühendisliği alanında kullanılan EPS bloklar, geofoam (Geofoam blok) adını alırlar. Geofoam blok geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan, hafif ve kapalı gözenekli bir geosentetik ürün olarak tanımlanmıştır [ASTM D4439, 2018]. 11,2 (kg/m³) (EPS12) ile 45,7 (kg/m³) (EPS46) arasında değişen yoğunluklarda üretilen, yüksek mukavemet/yoğunluk oranına sahip bir malzemedir [ASTM D6817, 2021]. Üreticilerin kullandıkları kalıplama makinelerinin boyutlarına bağlı olmakla birlikte, geofoam bloklar ülkemizde genellikle 100-120 cm genişliğinde, 200-500 cm uzunluğunda, 50-60 cm yüksekliğinde prizmatik bloklar şeklinde üretilmektedir [Özer, 2020].

İnşaat mühendisliği uygulamalarında tercih edilmesinin sebepleri, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, mekanik özelliklerinin (basınç dayanımı, Young modülü ve eğilme mukavemeti) blok yoğunluğu attıkça iyileşmesi, geri dönüşüm ve geri kazanıma uygun olması, doğada çözünmemesi, kanıtlanmış ve ideal kontrollü teknolojisinin varlığı ve çevre dostu bir ürün olması olarak sıralanabilir. Kapalı gözenek yapıları sebebiyle geofoam blokların su emme kapasiteleri çok düşüktür. Hafif yapıları sayesinde inşaat sahasında kolay taşınırlar ve imalatı hızlı ve kolaydır. Nakliye, döşeme ve sıkıştırma için gereken yakıt miktarı ve süresi geleneksel dolgu malzemelerine göre kıyasla oldukça azdır. Ayrıca geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerine göre ilk yatırım maliyetleri düşüktür [Duškov ve Waarts, 2011; Özer vd., 2012].

Bu fiziksel, mekanik ve ekonomik avantajlarından ötürü geofoam bloklar, çeşitli geoteknik mühendisliği uygulamalarında geleneksel yöntemlere alternatif bir geoteknoloji olarak 1972 yılından beri kullanılmaktadır. İmalat süresinin çok kısa ve uygulamanın kolay olması, ağır işçilik gerektirmemesi, geleneksel yöntemlere göre hızlı ve ekonomik çözümler üretmesi nedeniyle kullanım alanları her geçen gün artmaktadır [Özer, 2020].

2.2.1. Geofoam Blok Üretimi

Geofoam bloklar ön şişirme, dinlendirme ve şişirme, kalıplama ve şekillendirme aşamalarından geçirilerek üretilmektedir (Şekil 2.5).

1. Ön Şişirme: Polisten granüler ham madde (**Şekil 2.5a-b**) buhara maruz bırakılarak 80-100 °C sıcaklıkta pentan gazı ile her biri birbiri ile bağlantılı olmayan hücreler serisinden oluşan daha büyük tanecikler oluşturmak üzere serbest bir şekilde genişletirilir. Tedarik edilen ham madde, ham madde tankında depolanır ve buradan borular aracılığıyla silolara taşınır. Kullanılacak polisten granüler bloğun yoğunluğunu ve miktarını belirlemek amacı ile ince ve orta taneli ham maddeler silolarda şişirme makinasına dökülür. Ön şişirme sonunda hammadde EPS boncuk formuna dönüştürülmüş olur (**Şekil 2.5c**).
2. Dinlendirme: EPS boncuklar, ön şişirme sonrasında az miktarda olsa da pentan gazı ve yoğunlaşan buhar içerirler. Taneciklerin soğumasıyla birlikte gözenekli yapı oluşur. Bu gözenekli yapıda hava, pentan gazının yerini almaya başlar.
3. Kalıplama: Kalıplama (**Şekil 2.5d**) aşamasında köpük şekli muhafaza edilir. Genişlemeyi devam ettirmek ve taneciklerin birbiriyle kaynaşmasını sağlamak için tekrar buhar kullanılır. Kalıplama işlemiyle beraber EPS boncuklar EPS bloklar haline getirilir (**Şekil 2.5e**).
4. Şekillendirme: Muhtelif yoğunluklarda üretilen bloklar depo alanında boyutsal kararlılığa erişene kadar dinlendirilir (**Şekil 2.5e**). Sıcak tel kesme makinesi ile yüzeylerinde oluşan pürüzler düzeltilir. Ambalaj ve etiketlenme işlemleri ile imalatları tamamlanmış olur [**Koç, 2015**].



Şekil 2.5: EPS blok üretim aşamaları (a-b) hammadde (c) ön şişirme işlemi (d) ön şişirilme sonrası kalıplama aşaması (e) kalıplama sonrası stok sahasına alınan bloklar [Özer, 2020].

2.2.2. Geofoam Blokların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

EPS malzemesi ile ilgili olarak Amerika’da **ASTM D6817** “Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam” ve **ASTM D7180** “Standard Guide for Use of Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam in Geotechnical Projects” standartları kullanılmaktadır. Ülkemizde **TS EN 14933** “Isı yalıtım mamulleri ve hafif dolgular - İnşaat mühendisliği uygulamaları için – Genleştirilmiş polistirenden (EPS) fabrikasyon mamuller – Özellikler” kullanılmaktadır.

2.2.2.1. Yoğunluk

Genişletilmiş polistiren % 98 oranında kuru havadan oluşması sebebiyle çok düşük yoğunluğa sahip bir malzemedir. Geleneksel dolgu malzemelerinin yaklaşık %1'i kadar yoğunluğa sahiptir. Yoğunluğu ile basınç mukavemeti de artmakta olup, basınç mukavemeti/yoğunluk oranı diğer hafif dolgu malzemelerine göre daha yüksektir. EPS yoğunluğu, üretiminin ilk aşamasında boncuk genişlemesinin bağıl miktarı ile kontrol edilebilmektedir (**Şekil 2.5**). Sonuç olarak farklı yoğunluklarda bloklar üretilebilmektedir. EPS'nin geoteknik mühendisliğinde kullanılmasında yoğunluk bir indeks özelliğidir [**Horvath, 1994**].

Genleşmiş polistirenin mühendislik özellikleri yoğunluklarının bir fonksiyonudur. Blokların basınç dayanımı, Young Modülü ve bloğun içsel kayma dayanımı yoğunlukları ile artmaktadır. Geofoam blokların yoğunlukları 11,2 kg/m³ ile 45,7 kg/m³ arasında çeşitlilik göstermektedir [**ASTM D6817, 2021**]. Sonuç olarak projeye özel servis yükleri göze alındığında uygun yoğunluğa sahip bir geofoam bloğu kullanmak önemlidir. Bu nedenle, 45,7 kg /m³ yoğunluklara ulaşılabilmesine rağmen, tipik olarak üstyapı yapımında 16 kg /m³ ila 32 kg /m³ yoğunlukta EPS blokları kullanılmaktadır [**Mohajerani vd, 2017**]. Yoğunluklara göre geofoam sınıfları **Tablo 2.3**'te verilmiştir.

ASTM D1622'ye göre geofoam bloğun yoğunluğu aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır Denk.(2.1).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

burada; ρ = malzeme yoğunluğu, kg /m³

m = malzeme kütlesi, kg

V = malzeme hacmi, m³

Tablo 2.3: Çeşitli geofoam blok yoğunluk standartları [Güven, 2020].

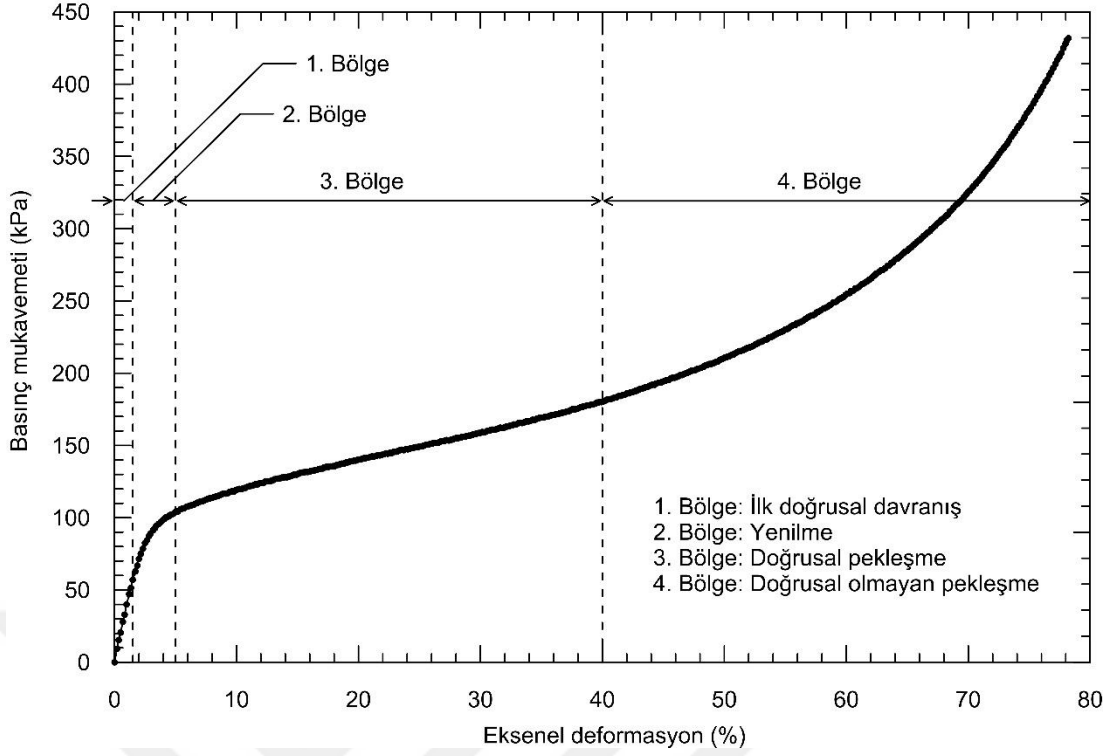
ASTM C578	Tip	XI	I	VIII	II	IX
	Yoğunluk (kg /m ³)	12	15	18	22	29
Japonya EPS tipleri	Tip	D-12	D-16	D-20	D-25	D-30
	Yoğunluk (kg /m ³)	12	16	20	25	30
Birleşik Krallık EPS tipleri	Tip	SD*	HD*	EHD*	UHD*	-
	Yoğunluk (kg /m ³)	12	16	20	25	-
	SD* Standard Duty HD* Heavy Duty EHD* Extra Heavy Duty UHD* Ultra Heavy Duty					

2.2.2.2 Mukavemet

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında EPS geofoam blok genellikle basınç yüklerine maruz kalmaktadır. Bu bakımdan deformasyon düzeyi ve tasarım yükleri göz önünde bulundurularak geofoam blok tipi belirlenir [Güven, 2020].

EPS’de yenilme sonrasında geleneksel malzemelerde olduğu gibi bir göçme meydana gelmemekte olup malzeme çok yüksek deformasyon düzeyine kadar sıkışmaktadır. Bu nedenle, EPS için basınç mukavemeti, herhangi bir deformasyon düzeyine karşılık gelen basma direnci olarak tanımlanmaktadır [Özer, 2020].

EPS malzemenin yükleme deneyi için deney koşullarını belirleyen standartlardan biri dünya genelinde kabul gören **ASTM D1621** standardıdır. Bu standarda göre yükleme deneyi 50 mm x 50mm x 50 mm boyutlarında küp numunelerinin %10 eksenel deformasyon/dakika hız ile yüklemesi ile yapılmaktadır. 20 kg/m³ yoğunluğunda EPS deney numunesi üzerinde **ASTM D1621** standardına uyularak gerçekleştirilen yükleme deneyinden elde edilen eksenel deformasyon – basınç mukavemeti ilişkisi **Şekil 2.6**’da verilmiştir.

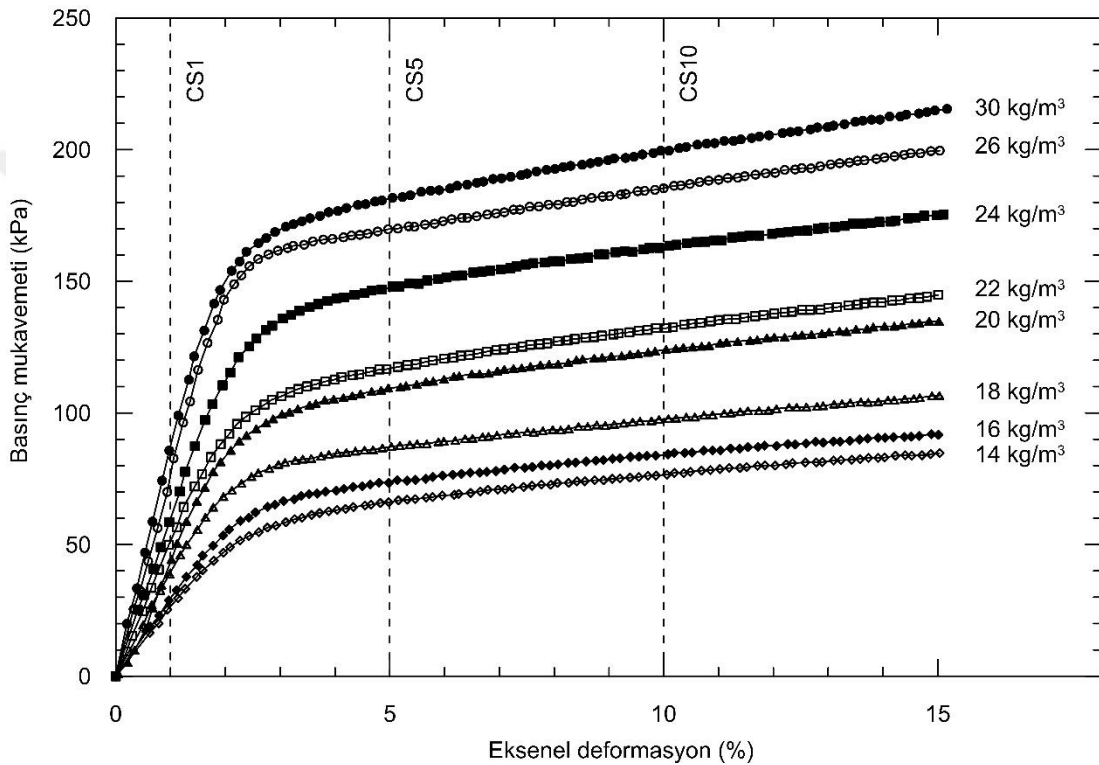


Şekil 2.6: 20 kg /m³ yoğunluklu bir EPS numunesi üzerinde ASTM D1621 standardına göre yapılan monotonik yükleme deneyi ile belirlenmiş olan eksenel deformasyon- basınç mukavemeti ilişkisi ve davranış bölgeleri [Özer, 2020]

Şekil 2.6’da ilk doğrusal gerilme-deformasyonu 1. Bölgede oluşmakta olup birim boy kısalma %1-1,5 arasındadır. Tasarım Şartnamelerinde, 1 Bölge sınırının %1 deformasyon, gerilme-şekil değiştirme davranışının ise doğrusal elastik olduğu kabul edilmektedir [Stark vd.,2004a;2004b]. %1 deformasyona karşılık gelen basınç gerilmesi “elastik sınır gerilmesi (σ_e)” Hovarth, (1995), gerilme-deformasyon eğrisinde orijin ile %1 deformasyon arasında yer alan doğrusal parçanın eğimi ise “başlangıç tanjant modülü (E_{ti})” olarak adlandırılmaktadır. 2.Bölge yenilmenin meydana geldiği bölgedir. Deformasyon sınırı %3-%5 arasındadır. Yenilmeden sonra, 3. Bölgede gerilme-deformasyon davranışı doğrusal formdadır. Bu sebeple 2. Bölge iki doğrusal bölge arasında dirsek yapan bir geçiş bölgesidir. Yenilme sonrası gerilme-deformasyon davranışının doğrusal olduğu ve doğrusal pekleşmenin meydana geldiği bölge 3. Bölgedir. Deformasyon sınırı %30-%40 arasındadır. 4. Bölge pekleşmenin devam ettiği ancak gerilme-deformasyon davranışının doğrusal olmadığı bölge olup, deformasyon eşliğinin %30-%40 eşliğinin aşması ile birlikte, numune içindeki boşluk hacminin küçülmesi nedeniyle, takip eden deformasyon artışlarına tepki olarak

gerilmelerde doğrusal olmayan artışlar meydana gelmektedir. Bu bölgede gerilme-deformasyon eğrisi yukarı doğru iç bükey bir şekil almaktadır [Özer, 2020].

Herhangi bir deformasyon düzeyinde EPS basma direnci EPS yoğunluğunun bir fonksiyonudur ve EPS yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Şekil 2.7’de 14 kg /m³ ila 30 kg /m³ yoğunluklu EPS numuneleri üzerinde ASTM D1621 standardına uyarak gerçekleştirilen yükleme deneylerinden elde edilen eksenel deformasyon-basınç mukavemet ilişkileri verilmiştir [Özer, 2020].



Şekil 2.7: 14 kg /m³ ila 30 kg /m³ yoğunluklu bir EPS numuneleri üzerinde yapılan monotonik yükleme deneyleri [Özer, 2020].

EPS yoğunluğu ile başlangıç tanjant modülü (E_{ti}) arasında $y = ax + b$ şeklinde tanımlanan doğrusal bir ampirik ilişki vardır. Bu ilişki denklem 2.2 verilmiştir. %1 eksenel deformasyonda basma direnci (elastik sınır gerilmesi) ile yoğunluk arasındaki denklem Hook Kanunu ile genişletilerek belirlenmiştir (Denklem 2.3).

$$E_{ti}(kPa) = 450\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) - 3000 \quad (2.2)$$

$$\sigma_e(kPa) = \left(450\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) - 3000\right) \times 0.01 = 4.5\rho - 30 \quad (2.3)$$

burada; E_{ti} = başlangıç tanjant modülü, kPa

ρ = malzeme yoğunluğu, kg/m^3

σ_e = elastik sınır gerilmesi, kPa

EPS blokların yoğunluk, numune boyutu ve yükleme değerine bağlı olarak farklılık gösteren gerilme-şekil değiştirme davranışı, birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalarda çoğunluğu kübik muhtelif ebatlarda EPS numunelerin basınç dayanımının malzeme yoğunluğuyla ilişkisi araştırılmıştır. Malzemenin yoğunluğuyla basınç dayanımının arttığı araştırmacılar tarafından tespit edilmiş olup, mukavemet değerlerini belirlemede kullanılan ampirik korelasyonlar **Tablo 2.4'**da verilmiştir [Güven,2020].

Tablo 2.4: Mukavemet değerlerini belirlemede kullanılan ampirik korelasyonlar.

Referanslar	Ampirik Korelasyon	Numune Boyutu
TS EN 14933	$\sigma_{10} = 10\rho - 81,0$	
Sun (1997)	$\sigma_5 = 6,52\rho - 0,62\sigma_3 - 26,8$	Küp Numune 50mm*50mm*50mm
Elragi (2000)	$\sigma_{10} = 7,3LR^{0,045} - 35,1$	Küp Numune 50mm*50mm*50mm 600mm*600mm*600mm
	$\sigma_5 = 6,6LR^{0,04} - 35,0$	
	$\sigma_1 = 3,5LR^{0,01} - 22,0$	
Anasthas (2001)	$\sigma_{10} = 0,01\rho\sigma_3 + 0,064\rho^2 + 1,84\rho + 0,186 - 0,521\sigma_3 - 0,0002\sigma_3^2$	Silindir Numune Ø=76 mm H=915 mm
	$\sigma_5 = 0,01\rho\sigma_3 + 0,065\rho^2 + 4,144\rho + 0,418 - 1,085\sigma_3 - 0,002\sigma_3^2$	
	$\sigma_1 = 0,009\rho\sigma_3 + 0,078\rho^2 + 4,128 + 0,426 - 0,949\sigma_3 - 0,001\sigma_3^2$	

Tablo 2.4: Devamı.

Referanslar	Ampirik Korelasyon	Numune Boyutu
Gnip et.al. (2004)	$\sigma_{10} = 8,4\rho - 54,6$	Küp ve Prizma numuneleri 100mm*100mm*50mm 100mm*100mm*100mm 100mm*100mm*150mm
Athanasopoulos and Xenaki (2011)	$\sigma_{10} = 7,68\rho - 48,3$	Silindir Numune AR=2
	$\frac{\sigma_{10}(\sigma_3)}{\sigma_{10}(\sigma_3=0)} = 1.0 - \frac{(\sigma_{10})}{(\sigma_3)}$	
Birhan (2014)	$\sigma_{10} = 8,6839\rho - 61,228$	Küp ve Silindir Numune 50mm*50mm*50mm Ø=64 mm H=127 mm Ø=102 mm H=203 mm
NCHRP (2004)	$\sigma_{10} = 8,82\rho - 61,7$	Prizma Numune 50mm*50mm*100mm
ASTM D6817 (2013)	$\sigma_{10} = 8,8\rho - 60,8$	Küp Numune 50mm*50mm*50mm
Negussey (2007)	$\sigma_{10} = 8,29\rho - 43,04$	Küp Numune 50mm*50mm*50mm
	$\sigma_{10} = 7,49\rho - 41,30$	
	$\sigma_{10} = 3,58\rho - 21,52$	

burada; $\sigma_{1,5,10}$ = %1, %5 ve %10 birim boy kısaltmada basınç mukavemeti *kPa*

ρ = malzeme yoğunluğu, kg /m³

σ_3 = Hücre basıncı

LR = deformasyon oranı (%/min)

EPS malzemenin yük altındaki deformasyon davranışını belirleyen standartlar çeşitlilik göstermektedir. Geofoam teknolojisinin ortaya çıktığı ülke olan Norveç'te %5, ASTM dahil dünyadaki birçok standart organizasyonu tarafından %10 deformasyona karşılık gelen basma direnci “EPS basınç mukavemeti” olarak kabul edilmektedir. **ASTM D6817** standardı, **ASTM D1621** standardına göre yapılan EPS yükleme deneylerinden elde edilen %1, %5 ve %10 eksenel deformasyondaki basınç mukavemetleri için asgari şartları sunan bir belgedir (**Tablo 2.5**).

TS EN 14933'te aynı zamanda %2, %5 ve %10 deformasyona karşılık gelen basınç mukavemeti değerleri çeşitli yoğunluklardaki EPS bloklar için belirlenmiş olup **Tablo 2.6**'da %10 birim deformasyondaki dayanım seviyeleri verilmiştir.

Tablo 2.5: ASTM D6817'ye göre minimum dayanım özellikleri.

Malzeme Tanımı ASTM (D6817)	Yoğunluk kg/m³	%1 Birim Boy Kısaltmada Basınç Mukavemeti (kPa)	%5 Birim Boy Kısaltmada Basınç Mukavemeti (kPa)	%10 Birim Boy Kısaltmada Basınç Mukavemeti (kPa)
EPS12	11,2	15	35	40
EPS15	14,4	25	55	70
EPS19	18,4	40	90	110
EPS22	21,6	50	115	135
EPS29	28,8	75	170	200
EPS39	38,4	103	241	276
EPS46	45,7	128	300	345

Tablo 2.6: TS EN 14933'e göre minimum %10 birim deformasyondaki dayanım seviyeleri.

Malzeme Tanımı TS EN 14933	%10 Birim Boy Kısaltmada Basınç Mukavemeti (kPa)	Malzeme Tanımı TS EN 14933	%10 Birim Boy Kısaltmada Basınç Mukavemeti (kPa)
CS(10)40	40	CS(10)150	150
CS(10)50	50	CS(10)200	200
CS(10)60	60	CS(10)250	250
CS(10)70	70	CS(10)300	300
CS(10)80	80	CS(10)350	350
CS(10)90	90	CS(10)400	400
CS(10)100	100	CS(10)450	450
CS(10)120	120	CS(10)500	500

2.2.2.3. Yüzerlilik

EPS, kapalı gözeneklerden oluşan yapısı ve hafifliği (**Tablo 2.5**) sebebiyle bünyesine çok az miktarda su almakta olup, yüzer niteliktedir. Geofom uygulaması için tasarım yapılırken hem yer altı su seviyesi durumu hem de bölgenin yağış rejimi dikkate alınır. Yeraltı suyun, potansiyel kaldırma kuvvetini azaltmak amacıyla geofom dolguyla zemin arasına drenaj sistemleri (geofom blokların altına drenaj özelliği olan zemin malzemesi ile dolgu yapılması ve dolgunun her iki yanında drenaj kanalları imal edilmesi) inşa edilir. Ayrıca, bölgenin yağış rejiminin taşkın riskini beraberinde getirdiği ve su seviyesinin aşırı yükseldiği koşullarda oluşabilmektedir. Bu koşullarda, suyun geofom blokların iki tarafında yükseldiği durumlarda kaldırma kuvvetine, tek tarafında yükseldiği durumlarda ise öteleme kuvvetine karşı duraylılık analizlerinin yapılması gerekmektedir. **Stark vd. (2004a; 2004b)** farklı dolgu genişlikleri ve yükseklikleri, farklı şev eğimleri ve ötelemeye karşı duraylılık analizleri için, farklı ara yüzey sürtünme açıları dikkate alarak suyun kaldırma ve öteleme kuvvetlerine karşı $GS = 1.2$ güvenliği sağlayacak asgari ölü yük değerinin alınabileceği tasarım abakları önermişlerdir. Ölü yükün artırılması veya geofom blok dolgunun ankraj uygulaması ile zemine sabitlenmesiyle, su kaldırma kuvvetine karşı pasif direnç sağlanabilmektedir. [**Özer, 2020; Buzkan 2022**].

2.2.2.4. Arayüz Kayma Dayanımı

EPS blokların yatay yüzleri boyunca yer alan ara yüzlerinin deprem, rüzgâr ve zemin suyu gibi yatay yüklere karşı duraylı olması gerekmektedir. Projelendirmede, EPS blokların ara yüz kayma gerilmelerinin oluşturacağı yatay tasarım yüklerinin değerlendirilmesi için yapılan testler önem arz etmektedir. Geofom dolgusunda üç çeşit ara yüzden bahsedilebilir. İlk ara yüz üst yapı – EPS arasında (Mod I), ikincisi EPS – EPS ara yüzeyi (Mod II) ve üçüncüsü ise EPS – temel zemin (Mod III) ara yüzeyidir. İki EPS bloğu ya da EPS bloğunun diğer yapı malzemeleri ile arasındaki kayma dayanımını klasik Coulomb (kuru) sürtünme denklemi 2.4. ile tanımlanabilmektedir.

$$\tau = \sigma_n \times (\mu) = \sigma_n \times (\tan\delta) \quad (2.4)$$

burada; τ = ara yüz kayma dayanımı,

σ_n = ara yüze etkiyen normal gerilme,

μ = sürtünme katsayısı,

δ = ara yüzey sürtünme açısı,

EPS – EPS ara yüzey dayanımı tamamen sürtünmesel olup (Denklem 2.4), mukavemet açısı birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Standart bir test metodunun olmaması sebebiyle çalışmalar değişiklik göstermektedir. EPS yoğunluğundan bağımsız olarak, EPS bloklar arası ara yüz sürtünme açısının 40°'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Hovarth, 1994 yılındaki çalışmasında bu değeri 27° ve 32° arasında ölçmüştür. **Stark vd. (2004a; 2004b)** duraylılık analizlerinde EPS – EPS ara yüz sürtünme açısının 30° alınmasını önermektedir. EPS bloklar arasındaki ara yüz kayma direnci üzerindeki en büyük etki blokların ara yüz yüzeylelerinin düzgünlüğü ve pürüzsüzlüğüdür. Düzgünlük arttıkça kayma direnci azalmaktadır. EPS – EPS ara yüzey mukavemetinin yeterli olmaması durumunda, geofoam ara yüzeylerinde mekanik bağlantı elemanları kullanılarak **Barrett ve Valsangkar (2009); Taneichi vd. (2019a; 2019b)**, projeye özel şaşırtmalı blok yerleşim planları uygulanarak (Bartlett ve Lawton,2008), poliüretan yapıştırıcılar (**Barrett ve Valsangkar,2009; Amini, 2014**), kilitli blok yerleşim planları (**Özer vd.,2015; Özer ve Akay,2016; Özer vd., 2016; Özer,2019; Özer ve Ekincioglu,2019**) uygulanarak EPS – EPS ara yüzey mukavemeti artırılabilir.

Farklı katsayıları kullanılarak, ara yüzlerde harekete karşı güvenlik sayısının alınabileceği tasarım abakları üretilmiştir [**Stark vd., 2004a; 2004b**]. Abaklardan güvenlik katsayılarının alınabilmesi için öncelikle üst yapı – EPS ve EPS – temel ara yüzey dayanımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Üst yapı ile geofoam blok ara yüzeyleri kırma taş, kum ve yerinde dökme beton gibi farklı malzemeye oluşturulabilmektedir. **Stark vd. (2004a; 2004b)** kırma taş/kum – EPS ara yüzey sürtünme açısının 30°, yerinde dökme beton – EPS ara yüzey sürtünme açısının 66°, EPS – kil ara yüzey sürtünme açısının 27° ve EPS – geotekstil ara yüzey sürtünme açısının 25°, olarak alınmasını önermiştir. **Tablo 2.7**'de EPS ve ara yüzey tiplerine göre yapılan çalışmalara ait ara yüzey sürtünme açısı değerleri özetlenmiştir [**Özer, 2020; Buzkan 2022**].

Tablo 2.7: Geofoam blok dolgu sistemindeki ara yüzler mukavemetleri [Özer,2020].

Ara yüzey	EPS Tipi	Referans	Ara yüzey mukavemet parametreleri	
			Adezyon c_a (kPa)	Ara yüzey sürtünme açısı, δ (derece)
EPS-EPS	EPS19	Özer ve Akay (2016)	0	38,2
	EPS29		0	44,0
	EPS19	Sheeley (2000)	0	40,4
	EPS29		0	40,4
	EPS19	Negussey vd. (2001)	0	48,5
	EPS19	Atmatzidis vd. (2001)	0	40,0
EPS-Kum	EPS29		0	43,0
	EPS29	Barrett ve Valsangkar (2009)	0	41,0 -46,7
	EPS19	Ateş (2016)	0	38,8
	EPS29		0	39,0
EPS-Kum	EPS19	Atmatzidis vd. (2001)	0	38,5
	EPS15 ve EPS20	Negussey vd. (2001)	0	40,0
	EPS20	Xenaki ve Athanasopoulos (2001)	0	32,0
EPS-Beton	EPS19	Özer vd. (2017)	31,5	24,1
	EPS29		50,5	37,2
	EPS19	Sheeley ve Negussey (2000)	70,0	67,0

2.2.3. Geofoam Blok Kullanım Alanları

Geofoam teknolojisi dünyada ilk kez 1972 yılında Norveç Karayolları İdaresi (NPRA) tarafından bir yol dolgusu inşasında toplam oturmaları önlemek amacıyla kullanılmıştır [Aabøe, 2011]. Bu uygulamadan günümüze kadar geçen süre zarfında geofoam teknolojisi inşaat uygulamalarının muhtelif kollarında kullanılmıştır. Geofoam blokların dolgu malzemesi olarak inşaat mühendisliğinde en yaygın kullanımı otoyol inşaatlarıdır [Thompsett vd., 1995; Beinbrech ve Hillmann, 1997; Bartlett vd., 2000; Bartlett vd., 2001; Aabøe, 2011; Kubota, 2011; Özer ve Akınay, 2024].

Geofoam bloklar Japonya’da ilk kez 1985 yılında Sapporo şehrinde uygulanmıştır **[Tsukamoto, 2011]**. Bu tarihten sonra Japonya’da EPS blokların inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımları ivme kazanmış ve 1985–2010 yılları arasında toplam 5,3 milyon m³ EPS blok inşaat projelerinde kullanılmıştır **[Kubota, 2011]**.

Amerika Birleşik Devletleri’nde geofoam bloklar ilk defa 1989 yılında Colorado Eyaleti 160 No.lu Otoyolda kullanılmıştır. Utah Eyaleti I-15 Otoyolunda 1998 – 2001 yılları arasında gerçekleştirilen otoyol genişletme ve yeniden inşa projesinde kullanılmıştır **[Bartlett vd., 2000]**.

Yunanistan’da geofoam teknolojisi ilk defa Atina – Selanik E75 Otoyolunun Thermopylae (Lamia – Orta Yunanistan) bölgesinden geçen 1 km’lik kesiminde otoyol ve köprü yaklaşımı dolgularının inşaatında kullanılmıştır **[Papacharalampous ve Sotiropoulos, 2011]**.

Ülkemizde bilinen ilk geofoam blok dolgu uygulaması 2012 yılında Bağcılar/İstanbul’da inşa edilen Medipol Mega Hastaneler Kompleksi inşaatı otoparkında yapılmıştır **[Aliyazıcıoğlu ve Özer, 2015; 2016, Aliyazıcıoğlu, 2016]**. Geofoam bloklar halihazırdaki otopark taşıyıcı sistemine ilave yükler getirmeden, 0,6 – 1,5 m yüksekliğinde dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu dolgu hem hareketli yüklere hizmet vermek hem de içerisinde barındırdığı yansıma havuzu ve peyzaj alanları ile bir yeşil çatı fonksiyonunda uygulamadır. 2012 yılında gerçekleştirilen ilk uygulamadan sonra, 2014 – 2017 yılları arasında geofoam bloklar ülkemizde çeşitli bina projelerde bina içi ve avlularında, düz ve teras çatılarda yapısal ve yapısal olmayan çeşitli dolgu işlerinde kullanılmıştır **[Özer, 2020]**.

Geofoam teknolojisi farkındalığı ve eğitim faaliyetleri ile Nisan 2017’de ülkemizin ilk geofoam yol dolgusu hizmete açılmıştır **[Özer vd., 2017; Özer ve Akınay, 2017; 2019]**. İstanbul Çevre Yolu’nun Uzunçayır çıkışının Harem istikameti trafiğinin bir kısmını Acıbadem Mahallesi’ne yönlendirmek amacıyla projelendirilen yol dolgusu, geofoam blok kullanılarak imal edilmiştir **[Özer vd., 2017; Özer ve Akınay, 2017;2019]**. Bu projede, dolgunun inşa edileceği bölgenin yaklaşık 3,80–5,60 m altından geçen ve 2,20 m çapında olan ana isale hatlarına geleneksel sıkıştırılmış toprak dolgu nedeni ile aktarılacak ilave gerilmeleri önlemek adına yol dolgusu inşaatında geofoam bloklar tercih edilmiştir **[Özer, 2020]**. İlk geofoam blok istinat duvarı geri dolgusunun inşaatı ise Kasım 2017’de tamamlanmıştır **[Özer vd., 2018]**.

2.2.3.1. Yol Dolgusunda Kullanımı

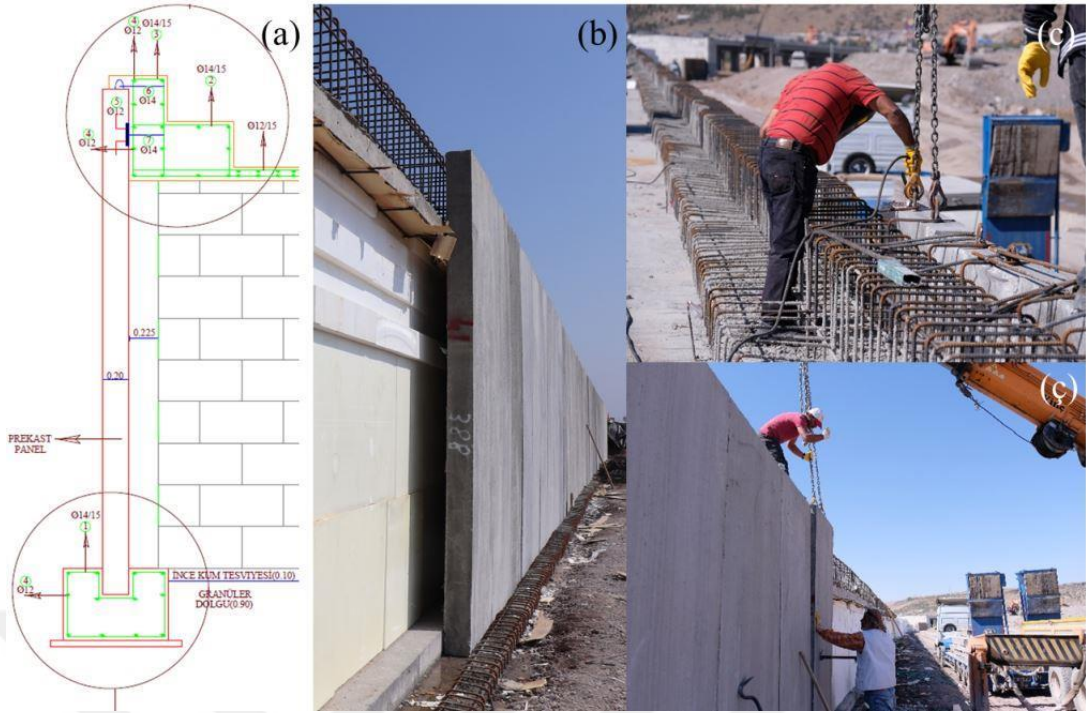
Geofoam bloklar yol inşaatı projelerinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yumuşak killi zeminler üzerine inşa edilecek olan karayolu dolguları özel geoteknik çözümler gerektirmektedir. Bu gibi sahalarda zemin taşıma gücünün aşılmasına ve oturmalara karşı zemin iyileştirme çalışmalarının tamamlanmasının ardından geleneksel sıkıştırılmış toprak dolgusu inşası gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yöneteme alternatif olarak, toprak dolgudan 100 kata kadar hafif olan geofoam bloklar, herhangi bir zemin iyileştirmesine gerek duyulmadan yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler. Blokların hafif olması ve istenilen şekillerde kesilip şekillendirilmesi uygulama hızını artırmaktadır. Ayrıca geleneksel toprak dolgu uygulamalarında proje süresini etkileyen faktörlerden biri de dolgu malzemesinin konsolidasyonu olup, bu süre yıllar alabilmektedir. Geofoam blokların oturma probleminin olmadığı göz önünde bulundurulduğunda inşaat imalat süresinin önemli miktarda kısalmasına yardımcı olmaktadır. Geofoam bloklar, kontrollü imalat tekniği ile üretildikleri için, serme-sıkıştırma tekniği ile imal edilen geleneksel toprak dolgu malzemelerine göre fiziksel ve mekanik özelliklerinin üretilen tüm bloklarda benzer davranış gösterirler [Yetiz, 2018; Özer, 2020; Buzkan 2022].

Geofoam blok yol dolgu uygulaması, sahanın hazırlanması (temizlik, hafriyat ve tesviye), taban tesviye kum tabakasının serimi, geofoam blokların blok yerleşim planına yerleştirilmesi, betonarme yük yayma platformunun imalatı, geofoam blok dolgu şevlerinin geomembran ve ardından toprak örtü ile kapatılması ve alt temel, plent-miks temel ve sıcak kaplamanın imalatı şeklinde sıralanmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Geof foam blok yol dolgusu uygulaması (a) tesviye kumu serilmesi (b) geof foam blok yerleşimi (c) şevde geomembran uygulaması (ç) betonarme yük yayma platform imalatı (d) yol üst yapı imalatı (e) tamamlanmış imalat [Özer, 2020].

Geof foam dolgular yol inşaatlarında hem trapez kesit hem de 90° dik olarak inşa edilebilirler (**Şekil 2.8**). Eğer geof foam dolgular ile yapılan yol dolguları kamulaştırma problemlerinden dolayı 90° dik inşa edilmesi durumunda, düşey cepheleri kapatacak olan prekast paneller bir beton temel üzerine yerleştirilerek betonarme yük yayma platformuna ankre edilirler [Özer, 2020].



Şekil 2.9: Prekast panel montajı (a) prekast panel montaj detayı (b) prekast panel montajı [Özer, 2020].

Yol şerit genişletme imalatlarında yol dolgusu olarak kullanılabilen geofoam bloklar, hafif olması sebebiyle hem mevcut güzergâh hem de ilave edilen dolgudaki toplam oturmaları ve bununla birlikte ilave edilen dolgu boyunca farklı oturmaları engellemektedir. Japonya’da 1985 – 2010 yılları arasında inşa edilen geofoam blok dolgunun %47,5’i şerit genişletilme projelerinde kullanılmıştır [Kubota, 2011]. Yol dolgularında kullanıldığı gibi şerit genişletme imalatlarında da geofoam bloklar hem trapez kesitli (Şekil 2.8) hem de yatay ile doksan derece eğimli olarak inşa edilebilir (Şekil 2.9).

2.2.3.2. Köprü Yaklaşım Dolgularında Kullanımı

Köprü kenar ayakları genellikle toplam oturmaların önlenmesi ve duraylılığın sağlanması amacıyla kazıklı temeller üzerine inşa edilirler. Böyle bir durumda, yaklaşım dolgusunun inşa edileceği bölgede zemin iyileştirme çalışmasının yapılmaması halinde, köprü kenar ayağı ile yaklaşım dolgusu arasında farklı oturmalar meydana gelebilmektedir. Bu farklı oturmalar bakım maliyetini artırmakla birlikte hem dolgunun hem de köprü kenar ayağının duraylılığını tehlikeye atabilmektedir. Yaklaşım rampalarında geofoam blokların kullanılmasıyla beraber farklı oturma ve

duraylılık problemleri aşılabilmektedir. Yüksek basınç direnci sebebiyle geofoam bloklar, herhangi bir zemin iyileştirmesine ihtiyaç duyulmadan karayolu yüklemesini güvenli bir şekilde desteklemektedir. Geleneksel dolgu malzemeleriyle karşılaştırıldığında geofoam bloklar, köprü kenar ayak perdesine etkiyen yanal basınçları göz ardı edebilecek düzeylere indirerek proje maliyetinde fayda sağlamaktadır. **Şekil 2.10'**da geofoam blok ile inşa edilen köprü yaklaşım dolgu kesiti gösterilmiştir [Özer, 2020].



Şekil 2.10: Geofoam blok köprü yaklaşım dolgusu, Boğazköy Köprüsü,Kayseri [Özer,2020].

2.2.3.3. İstinat Duvarlarında Kullanımı

Geofoam bloklar istinat duvarlarının geri dolgusu olarak kullanılabilir. İstinat duvarına etki eden yatay basınç, geri dolgunun yüksekliği ile doğru orantılı olduğundan, yoğunluğu geleneksel dolgu malzemelerine nazaran çok daha az olan geofoam blokların geri dolgu malzemesi olarak kullanılması, yanal basıncı önemli miktarda azaltarak daha ekonomik istinat yapısının ihtiyaç duyulmasına sebebiyet verecektir. İstinat duvarı geri dolgu inşası için iki farklı geofoam blok uygulama konsepti tanımlanmıştır [Hovath, 2004; 2010]. Bunlardan ilki sıfır toprak basıncı (Zero Earth Pressure, ZEP) konsepti, ikincisi ise azaltılmış toprak basıncı (Reduced Earth Pressure, REP) konseptidir.

Sıfır toprak basıncına göre, istinat duvarının geri dolgusu bütünü ile geofoam bloklar kullanılarak inşa edilmekte ve istinat duvarına etkiyen yanal yükler göz ardı edilebilir düzeye gelmektedir. Eğer duvarın inşa edileceği yamaç stabil ise, bu istinat duvarının inşa edilmesine gerek kalmayacak hem yatırım maliyeti hem de imalat süresi açısından avantaj sağlayabilmektedir.

Mevcut zemin kazı yapılarak şev eğimi güvenli bir değere getirilebilir veya şev duraylılığı mekanik iyileştirme yardımıyla (kalıcı pasif ankraj veya öngermeli ankraj) sağlanabilir. Zemin şevinin duraylı hale getirilmesinden sonra, istinat duvarı geofoam bloklar ile yatay ile doksan derece eğimli olarak inşa edilecek ve dolgunun önüne koruma amaçlı prekast cephe kaplaması yapılacaktır. **Şekil 2.11**'de ZEP konseptine göre geofoam blok ile inşa edilen istinat duvarı verilmiştir.



Şekil 2.11: İstinat duvarı geofoam blok geri dolgu imalatı, Kayaşehir, İstanbul [Özer, 2020].

Komşu zemin şevinde yanal hareketin kalıcı olarak önlenemediği durumlarda azaltılmış toprak basıncı konseptine göre tasarım yapılarak istinat duvarları inşa edilebilmektedir. Bu konseptte rijit istinat duvarı ile geleneksel sıkıştırılmış toprak geri dolgu arasına, belirli kalınlıkta, sıkışabilirliği yüksek geofoam bloklar yerleştirilmektedir.

2.2.3.4. Şev Duraylılığı Uygulamaları

Doğal şevlerin veya mühendislik şevlerinin duraylılığı şev eğimi, zemin kayma mukavemeti, depremler, sızma kuvveti gibi birçok parametreye bağlıdır. Şev duraylılığını iyileştirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Hafif geofoam bloklarda stabil olmayan şevlerde, duyarlılığı iyileştirmek için kullanılabilir. Şev hareketine neden olan zeminin bir kısmı kaldırılarak, geofoam bloklarla ikame edilerek şev duraylılığı sağlanabilmektedir. Bu yöntemle, kaymaya karşı istenen güvenlik faktörünü elde etmek için tüm kayma kütesinin kazılması ve değiştirilmesi gerekmekte olup bu da önemli ölçüde zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilmektedir [Buzkan, 2022].

2.2.3.5 Geri Dolgu Olarak Kullanılması

Karayolu ve demiryolunda bulunan betonarme menfez yapı üzeri dolgular geofoam blok marifetiyle inşa edilebilmektedir. Geleneksel toprak dolguların yerine çok daha hafif geofoam blok dolguların kullanıldığı betonarme menfezlerde daha ekonomik kesitler tasarlanabilmektedir. Ayrıca mevcut menfezlerin üzerine dolgu inşa edilmesinin gerektiği durumlarda, geofoam blok çözümü olası yapısal hasarın önüne geçilmesini sağlamaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Menfez üzeri geof foam blok demiryolu dolgusu, Draper, UT, USA
[Bartlett vd., 2015].

Geofoam bloklar kentsel altyapı (ishale hattı, atık su hattı, elektrik, doğalgaz ve iletişim hatları) için inşa edilen gömülü boru hatlarının korunması için de kullanılabilmektedir. Geofoam bloklar korunacak altyapının üstünde ve çevresinde konumlandırılarak ölü yükler minimuma indirilmekte, yük dağılımının daha uniform olması sağlanmakta ve geofoam blokların kendi deformasyonları ile gömülü boru hatlarının deformasyonu engellenmektedir. Boru hatlarına gelen yüklerin azaltılmasıyla, boru kesit optimizasyonu yapılarak daha ekonomik veya statik güvenliği daha yüksek çözümler üretilebilmektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13: İsale hatları üzerine inşa edilen geofoam blok yol dolgusu, Acıbadem, İstanbul [Özer, 2020].

2.2.3.6 Diğer Uygulama Alanları

Yukarıda bahsedilen uygulama alanlarının dışında geofoam bloklar inşaat mühendisliği uygulamalarında muhtelif alanlarda kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarından bazıları;

- Demiryolu ve hafif raylı sistem dolguları
- Don derinliği yüksek olan yerlerde temel derinliğinin azaltılması uygulamaları
- Havaalanı dolguları
- Yeşil düz çatı ve peyzaj uygulamaları
- Kot yükseltme ve basamak dolgu uygulamaları
- Kaya düşmesine karşı koruma dolguları.
- Sismik izolasyon ve titreşim sönümlleme uygulamaları
- Yüzen ada inşası
- Ses ve gürültü bariyerleri

2.3. Geri Kazanılmış Asfalt (RAP)

Mevcut yol üst yapısını oluşturan karayolu kaplama tabakaları, trafik yükü ve çevre koşulları gibi nedenlerle belirli bir kullanım süresinden sonra hizmet ömrünü tamamlar. Asfalt kaplamalar hizmet ömrünü tamamlaması sebebiyle veya kaplama profilinin düzeltilmesi, kot düzenleme ve uygun bir sürüş yüzeyi elde edilmesi için, kaplandığı yerden sökülür. Elde edilen bu bitümlü malzeme geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) olarak adlandırılır. RAP malzemesi belirli işlemlerden geçirilerek hem soğuk hem de sıcak karışım olarak kullanılabilir. RAP malzemeleri doğal agrega ve onun etrafını saran yaşlanmış haldeki bitüm tabakasından oluşmaktadır. Bazı çalışmalarda RAP agregası üzerindeki bitüm birtakım yöntemlerle çıkartılarak yalnızca RAP agregaları kullanılmaktadır [Seferoğlu, 2017].

2.3.1 Asfalt Geri Dönüşümünün Önemi

20. Yüzyılda yaşanan ekonomik gelişmeler ve nüfus artışları dünyada ve ülkemizde asfalt kaplama yollara olan ihtiyacı artırmıştır. Ülkemizde artan bölünmüş yol imalatı ile asfalt kaplama içeriğinde bulunan agrega rezervleri hızla tükenmiş ve petrol kaynakları sınırlı olan ülkemiz için ekonomik değeri yüksek olan bitüme duyulan ihtiyaç artmıştır. Yıllar içerisinde servis yükleri altında hizmet ömrünü tamamlayan yolların bakım ve onarım faaliyetleri milli gelirden ayrılan bütçe ile gerçekleştirilmiştir. Hem milli kaynakların korunması hem de ekonomik kazanım elde edilmesi için atık malzemelerin geri dönüştürülmesinde yenilikçi yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır [KGM, 2023].

Bu sebeple, yıpranmış ve ömrünü tamamlanmış karayolu asfalt tabakalarının kazılarak, geri kazanılan malzemenin değerlendirilmesi kaynaklarımızın hem teknik hem de ekonomik anlamda daha verimli kullanılması açısından önemlidir. Her geçen gün genişleyen ülkemiz karayolu ağı düşünüldüğünde, bakım ve onarım faaliyetleriyle birlikte geri kazanılmış ve geri dönüştürülmüş asfalt tabakasının içerisinde bulunan ekonomik değeri yüksek bitümlü bağlayıcı ve agreganın belirli işlemlerden geçirildikten sonra, muhtelif inşaat alanlarında kullanılması yeni malzeme ihtiyacını azaltmakta, doğal kaynakların korunması ve atık sahalarının oluşmaması açısından çevrenin korunmasını sağlamaktadır. Ayrıca karayollarından kazınan asfalt doğaya

bırakıldığında, içeriğindeki petrol yer altı sularına karışarak doğada yaşayan bitki ve hayvanlara geçerek tüm canlılara zarar vermektedir **[Arapoğlu, 2015; Ertaş, 2019]**.

Çevresel ve ekonomik etkiler göz önünde bulundurulduğunda, ömrünü tamamlamış asfalt kaplamanın geri dönüşümünün bilinçli ve sistemli bir şekilde yapılması önemlidir. Kaynakların yeniden ve efektif kullanılması hususu Birleşmiş Milletlerin 2015 yılı toplantısında ele alınmış ve 2030 yılı Sürdürülebilir Gelişim Hedefleri doğrultusunda geri dönüşümün sürdürülebilir bir gelecek için önemine değinilmiştir. Aynı şekilde sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik önlemlerin alınması gerektiği 2019 yılında Avrupa Birliği tarafından Avrupa Yeşil Mutabakatında ele alınmıştır. Tüm dünyada ulaştırma sektöründeki faaliyetlerin ve hareketliliğin artışı ile beraber, bu sektörden kaynaklanan emisyonların sera gazı emisyonları içerisindeki payı giderek artmıştır. Bu açıdan bakıldığında asfalt geri dönüşümünün önemi ve getireceği kazanımlar ön plana çıkmıştır. Bu sebepler ile birçok ülke meydana gelebilecek enerji krizine hazırlanmak ve sürdürülebilir yol yöntemi geliştirilmesi amacı ile asfalt geri dönüşüm uygulamalarını hızlandırmış ve bazı projelerde kullanımını zorunlu hale getirmiştir **[KGM, 2023]**.

Ulaşım sektörü kaynaklı emisyonların 2050 yılına kadar %90 oranında azaltılması ülkemiz hedefleri arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda açıklanan yeşil mutabakat planı ile akıllı, rekabetçi, çevre dostu, ekonomik, emniyetli ve erişilebilir bir ulaşım sistemi oluşturulması planlanmaktadır. Hem oluşan karbon emisyonun azaltılması hem de enerji tasarrufunun sağlanabilmesi için mevcut yol üstyapısının bozulan kesimlerinde yapılan kaplama çalışmalarının da uygun asfalt geri dönüşüm yöntemi seçilerek malzemelerin geri kazanılması büyük önem arz etmektedir. Bitümlü sıcak kaplamaların içeriğinde bulunan ve tasarım ömrünü tamamlamış agrega ve bitümün yeniden kazanılarak, karışımlarda kullanılması kaynaklarımızın sürdürülebilirliğini sağladığı gibi, birçok çevresel kazanımı da beraberinde getirerek gelecek nesillere aktaracaktır **[KGM, 2023]**.

Geri kazanılmış asfalt kaplama teknikleri Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa ülkelerinde özellikle Almanya ve Fransa'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Çağımızda geliştirilen teknik ve uygulama yöntemleri sayesinde, ömrünü tamamlamış bitümlü sıcak kaplamaların kazılması ile elde edilen geri kazanım malzemelerinin yeni inşa edilecek yol kaplama tabakalarında kullanım oranı %80'e çıkabilmektedir. **[Kaya, 2011]**. Ülkemizdeki nüfus artışına bağlı olarak atık malzeme popülasyonu da

artış göstermiştir. Bununla beraber hem vatandaşlık bilinci hem de ileriki nesillere daha yaşanabilir bir dünya mirası bırakma adına oluşan çevre duyarlılığı, geri dönüşümü sosyal ve ekonomik bir değer haline getirmiştir. 1991 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan bir yönetmelikle geri dönüşüm yasal zorunluluk haline gelmiştir. **[Gürer vd., 2004]**. Asfalt tabakasında geri dönüşüm ise daha yeni yeni yaygınlaşmaktadır. Ülkemiz gibi petrol ürünlerinin çok pahalı olduğu ve şehir içi yol kaplamalarının büyük çoğunluğu asfalt kaplama olan ülkelerdeki yerel yönetimler RAP malzemesinin geri dönüşüm projelerini hızla hayata geçirmelidirler.

RAP malzemesinin geri dönüşüm ve geri kazanımda kullanım avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir **[Arapoğlu, 2015; Seferoğlu, 2017]**.

- Kazılan asfalt tabakasının tekrar kullanılması ile taş ocaklarından temin edilen agregaya talebi azaltarak doğal ve milli kaynaklar korunur ve ekonomik kazanım elde edilir.
- Yeni doğal agrega malzemesinin üretim, kırma ve işletme maliyetinin azaltılması ile enerji tasarrufu sağlanır.
- Geri dönüşüm, yeni malzeme ihtiyacını azaltarak doğal kaynakların korunması ve atık sahalarının oluşmaması açısından çevrenin korunmasına katkı sağlanır.
- Doğal agregaların nakliyesinden kaynaklanan trafik rahatsızlığı azalarak sera gazı salınımını düşürülür **[Carswell vd., 2005]**.
- Eski ve cilalanmış asfalt kaplamanın yüzeyden kazınması ile, yeni kaplamayla daha iyi aderans sağlayacak kaba dokulu bir yüzey elde edilir.
- Bozulan yol yüzeyi üzerine yeni bir kaplama serilmediği için özellikle şehir içi yol kesimlerinde kaldırım yükseklikleri, drenaj kanalı girişleri ve rögar kapaklarındaki kot düzensizlikleri ortadan kaldırılır. Aynı zamanda özellikle köprü ve menfez gibi sanat yapılarına gelen zati yüklerin artması engellenebilir.
- RAP malzemesinin kazılmasından sonra hizmet ömrünü tamamlamış asfalt tabakası kaldırılarak yol çatlakları giderilerek yolun sürüş emniyeti ve konforu artırılır.
- Mevcut kaplamanın üzerine yeni kaplama yapılması halinde yansıma çatlaklarının önlenememesi sorunu eski kaplamanın kazınması ile giderilebilir.

2.3.2 Asfalt Geri Dönüşüm Yöntemleri

Kaplamalardaki bozulma türleri ve yapısal gereksinimler için çeşitli geri dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır. RAP malzemesinin kazınması esnasında ısı kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak sıcak geri dönüşüm ve soğuk geri dönüşüm olarak iki ana başlıkta toplanabilir. Bunlar da kendi içlerinde plentte dönüşüm ve yerinde dönüşüm olmak üzere iki türde uygulanabilmektedir. Eski kaplamanın, söküldüğü inşaat sahasından uzak merkezi bir plentte iyileştirilmesine plentte geri dönüşüm, koşullar uygun olduğunda kaplamanın yerinde iyileştirilmesine ise yerinde geri dönüşüm adı verilir [Salta, 2010].

Sökülen kaplamaların derinliğine bağlı olarak sınıflandırılacak yüzeysel geri dönüşüm ve tam derinlikli geri dönüşüm olmak üzere iki ana başlık daha bulunmaktadır. Kaplamanın üst tabakaları hizmet ömrünü tamamladığında, bu tabakaların sökülüp yeniden serilmesi yöntemi, yüzeysel geri dönüşüm olarak adlandırılır. Ancak aşınma ve bozulmalar taban tabakalarına kadar inmişse, tabanın üzerinde bulunan tüm tabakalar kaldırılıp tekrar serilir. Bu işleme de tam derinlikli geri dönüşüm adı verilmektedir [Aravind vd., 2007].

Asfalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Birliği (ARRA) beş farklı geri dönüşüm tekniği tanımlamaktadır: Soğuk Düzeltme (Cold Planing), Sıcak Geri Dönüşüm (Hot Recycling), Sıcak Yerinde Geri Dönüşüm (Hot In-Place Recycling), Soğuk Geri Dönüşüm (Cold Recycling), Tam Derinlikli Geri Dönüşüm (Full Depth Reclamation) [ARRA, 2001]. Sınıflandırma Şekil 2.14’de gösterilmiştir.



Şekil 2.14: Geri dönüşüm yöntemlerinin sınıflandırılması.

2.3.2.1 Soğuk Geri Dönüşüm (CR)

Soğuk geri dönüşüm (Cold Recycling) hizmet ömrünü tamamlamış asfalt kaplamanın herhangi bir ısı uygulama yapılmadan kazınıp katkı ilave edilmesi, karıştırılması ve sıkıştırılması şeklinde uygulanmaktadır. Maddenin ısıtılmasına gerek duyulmaması sebebiyle ekonomik yöntemdir. Soğuk dönüşüm uygulamaları iki alt sınıfa ayrılmaktadır.

- Soğuk Yerde Geri Dönüşüm (CIR)
- Soğuk Plentte Geri Dönüşüm (CCPR)

2.3.2.1.1 Yerde Soğuk Geri Dönüşüm (CIR)

Trafik yükünden kaynaklanmayan blok tipi ve enine çatlakların rehabilitasyonunda ve yüzey kaplamalarının onarımda Yerde Soğuk Geri Dönüşüm (CIR) yöntemi kullanılır. Bu uygulamada yollardan geri kazanılan RAP malzemelerinin tamamı yeniden kullanılmaktadır. CIR yöntemiyle elde edilen karışımlar yüksek oranda hava boşluğu içermektedir. Bu sebeple kaplama yüzeyi olarak düşük trafik hacimli yollarda sathi kaplama, tek ve çift katlı bitümlü harç tipi kaplamalar ile kullanılır. Yüksek trafik

yüküne maruz kalan yollarda ise ince takviye tabakası ile kullanılmalıdır. Viskoziteyi düşürmek ve penetrasyonu artırmak için bitüm emülsiyonu ve köpük bitüm gibi geri dönüşüm katkıları karışımlarda kullanılır.

Soğuk yerinde geri dönüşüm yöntemi birbirini takip eden su ve bitüm tankerleri, asfalt kazıyıcı, kırma ve eleme üniteleri, karıştırıcı mobil plant, serim makineleri ve silindir gibi çok sayıda ekipmanın birlikte kullanıldığı kombine sistemlerdir. Uygulama esnasında tüm bu ekipmanlar birbirine yakın mesafede seyretmesi sebebiyle, tüm makine ekipman için *tren* tabiri kullanılmaktadır [Salta, 2010]. Bu sistem mevcut asfalt kaplamanın ufalanması, sökülen malzemenin boyutlandırılması, geri dönüşüm katkısının uygulanması, karıştırma, serme ve sıkıştırma aşamalarından oluşmaktadır. Onarım derinliği 75 mm'den 100 mm'ye kadar değişmektedir. İyi durumdaki temel ve alt temel tabakaları üzerine 50 mm kalınlıkta uygulanabilmektedir.

CIR'ın Katkı malzemeleri dışında genellikle dışarıdan hiçbir malzeme taşınmaması sebebiyle nakliye maliyeti son derece düşüktür. Seyahat konforunu artırması, çoğu kaplama bozulmalarını onarması ve önemli bir yapısal iyileştirmeyi içermesi CIR'ın avantajları olarak belirtilebilir.



Şekil 2.15: Yerinde soğuk geri dönüşüm uygulaması.

2.3.2.1.2 Plentte Soğuk Geri Dönüşüm (CCPR)

Kazınan asfalt tabakasının sabit bir soğuk karışım tesisinde sıcaklığa tabi tutulmadan katkı malzemesi ilave edilerek ve karıştırılarak geri dönüştürüldüğü yönteme soğuk plentte geri dönüşüm adı verilir. Plentte geri dönüşüm yöntemiyle elde edilen karışımın, üretimin hemen sonrasında yol yapımında kullanılabildiği gibi, bakım ve

onarım uygulamaları için sonradan kullanılmak üzere stok yapılarak saklanabilmektedir.

Asfalt kazıyıcıların kullanıldığı soğuk düzeltme uygulaması veya asfalt kaplama tabakasının farklı yöntemlerle yerinden sökülüp kırıcıda elenmesiyle geri dönüşümde kullanılacak asfalt kaplama malzemesi elde edilir ve plent sahasında depolanır. Plentte soğuk geri dönüşüm uygulamasında katkı malzemesi olarak bitüm emülsiyonu veya emülsiyon haldeki geri dönüşüm katkıları kullanılır. Karışımdaki katkı malzemesinin tipi, sınıfı ve katkı oranı geri dönüştürülen asfalt kaplama malzemesinin ve karışım tasarımının birlikte değerlendirilmesiyle belirlenir [ARRA, 2001]. Karıştırma sırasında en önemli parametrelerden biri karıştırma süresidir. Belirli bir sürenin altında karıştırma agreganın yetersiz kaplanmasına sebebiyet vereceği gibi fazla karıştırma ise emülsiyonun erken kesilmesine neden olmaktadır [Mallick, 2005].

CCPR yöntemiyle elde edilen karışım stok sahalarında depolanıp sonradan kullanılacağı gibi kamyonlar vasıtası ile direkt olarak yol imalatlarında kullanılmak üzere inşaat alanına nakledilebilir. Plentte geri dönüştürülmüş soğuk karışım hem asfalt kaplama inşasında kullanılan asfalt sericiler ile hem de tecrübeli bir operatörün kullandığı greyder ile serilebilir. Karışımın homojen bir yapıda kalması için operatörün malzemeyi uygun olarak harmanlaması imalatın kalitesi açısından önem arz etmektedir. Homojen yapıda serilen soğuk karışım geniş tabanlı lastik tekerlekli silindir ve vibrasyonlu demir bandajlı silindirler ile sıkıştırılır. Sıkışmış soğuk karışım üzeri bitümlü sıcak karışım tabakası ile kaplanır. Düşük trafik yoğunluklu yollarda nadirde olsa tek veya çift kat bitüm emülsiyonu esaslı harç tipi kaplamalar kullanılabilir [ARRA, 2001].

Soğuk yerinde dönüşüm yöntemine nazaran plentte soğuk geri dönüşüm yönteminde hava koşullarının önemi yoktur. Agregası gerekli durumlarda karışımdan önce ısıtılıp kurutulabilir. Bu işlem yerinde dönüşüme göre çok daha hızlı sonuçlanır. Bu yöntemde karışımın homojenliği, malzeme oranı ve karıştırma süresinin çok daha iyi biçimde kontrol edilebilmesi sebebiyle sağlanabilmektedir.



Şekil 2.16: Soğuk geri dönüşüm plenti ve uygulaması.

2.3.3 Karayollarında Geri Dönüşüm Yönteminin Belirlenmesi

Karayolunda hizmet ömrünün tamamlayan esnek üstyapı tabakları bakım-onarım, rehabilitasyon ve yeniden yapım stratejileri ile iyileştirilmekte veya tamamıyla yeniden inşa edilmektedir.

Geleneksel asfalt bakım, onarım ve iyileştirme faaliyetlerine nazaran asfalt geri kazanım ve geri dönüşüm yöntemleri hem çevre dostu hem de daha uygun maliyetlidir. Kaplamaların erken yaşlanmasını önlemek ve servis kabiliyetlerini korumak için soğuk düzeltme ve yerinde sıcak geri dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır. Takviye tabakası ile kullanıldığında yerinde sıcak geri dönüşüm ve soğuk geri dönüşüm yöntemleri kaplamanın yapısal dayanımını artırabilmektedir. Sıcak geri dönüşüm yöntemiyle plentte elde edilen geri dönüştürülmüş malzeme, stokların yeterli olduğu ve ekonomik avantajın sağlandığı şartlarda birçok imalat (yama tamiri, rutin bakım faaliyetleri vb.) kullanılabilir. Sıcak geri dönüşüm yöntemi karayolunun trafiğe ivedilikle açılmasının gerektiği acil bakım uygulamalarında tercih edilmemektedir. Tam derinlikte geri kazanım yöntemi yeniden yapıma alternatif olarak kullanılabilir gibi genellikle ağır rehabilitasyon ihtiyacı olan karayollarında uygulanmaktadır [KGM, 2023]. **Tablo 2.8**'de Asfalt geri dönüşüm yöntemlerinin hangi amaçlarla kullanılabilirliği gösterilmiştir.

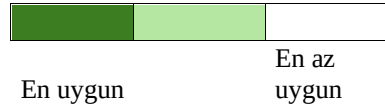
Tablo 2.8: Asfalt geri dönüşüm yöntemlerinin kaplama bakım ve rehabilitasyon yöntemi olarak kullanımı [ARRA, 2015].

Kategori	Seçilen Strateji	Asfalt Geri Dönüşüm Yöntemleri				
		Soğuk Düzletme	Sıcak Geri Dönüşüm	Yerinde Sıcak Geri Dönüşüm	Soğuk Geri Dönüşüm	Tam Derinlikte Geri Kazanım
Yol Yapımı	Yeniden Yol Yapımı		X			
	Yeniden Yapım	X	X			X
Rehabilitasyon	Büyük (Ağır)	X	X	X*	X*	X
	Küçük (Hafif)	X	X	X	X	
Bakım-Onarım	Koruyucu Bakım	X	X	X	X	
	Düzeltilici Bakım	X	X	X	X	
	Rutin Bakım	X	X			
	Acil Bakım	X				
* Takviye Tabakası ile birlikte uygulanırsa						

Karayollarındaki bozulmalar karşısında uygulanacak bakım, onarım ve rehabilitasyon tekniklerinden en uygunun seçilmesi önem arz etmektedir. Geleneksel rehabilitasyon yöntemleri ile kıyaslandığında farklı geri dönüşüm yöntemleri bazı avantajlar sunmaktadır. Mevcut yol yüzeyindeki bozulmaların yoğunluğu, tipi ve şiddeti geri dönüşüm yönteminin seçilmesinde etkili olmaktadır. Çünkü farklı bozulma tiplerini onarma ve rehabilite etmek için her geri dönüşüm yöntemi etkili değildir. Bu sebep ile geri dönüşüm ve geri kazanım yöntemine karar verilmeden önce mevcut yolun performansının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. ARRA tarafından bozulma türleri yüzey kusurları, deformasyonlar, yüklenmeye bağlı çatlaklar, yüke bağlı olmayan çatlamlar temel/alt temel problemleri, seyahat konforu/düzgünsüzlük olarak sıralanmaktadır. Bu bozulma türlerine göre alternatif geri kazanım yöntemlerini en uygundan en az uyguna **Tablo 2.9**'daki gibi sıralanmıştır [KGM, 2023].

Tablo 2.9: Bozulma tiplerine göre geri dönüşüm yöntemi seçimi [ARRA, 2015].

Kaplama Bozulma Tipi		Soğuk Düzletme	Yerinde Sıcak Geri Dönüşüm	Sıcak Geri Dönüşüm	Yerinde Soğuk Geri Dönüşüm	Plente Soğuk Geri Dönüşüm	Tam Derinlikte Geri Kazanım
Yüzey Kusurları	Sökülme						
	Çukur						
	Asfalt Kusması						
	Kayma Direnci						
	Tekerlek İzi-Sığ						
Kalıcı Deformasyon	Tekerlek İzi-Farklı Katmanları İçeren						
	Tekerlek İzi-Derin						
	Ondülasyon ve Ötelenme						
	Timsah Sırtı-Yukarıdan Aşağıya						
	Timsah Sırtı-Aşağıdan Yukarıya						
Yüklenmeye Bağlı Çatlaklar	Kaplama Kenarı Çatlakları						
	Kayma Çatlağı						
	Biok Tipi Çatlak						
	Enine Çatlak						
	Boyuna Çatlak						
Yüklenmeye Bağlı Olmayan Çatlaklar	Yansıma Çatlağı						
	Temel/Alt Temel Problemleri						
	Seyahat Konforu/Düzensizlik						



2.3.4 Dünyada ve Türkiye’de RAP Kullanımı

Dünyada her yıl 1,425 milyar ton agrega ve 75 milyon bitümden 1,5 milyar ton asfalt betonu üretilmektedir. Karayollarında asfalt betonu trafik yükleri, iklim koşulları,

yolun ilk yapım kalitesi, yetersiz bakım onarım hizmetleri ve temel zemin tipi ve nem içerisine bağlı olarak zamanla bozulmaktadır. Bu bozulmalar yolun hizmet kalitesini düşürmekte olup, ilerleyen bozulmalarda tabakaların tamamen kullanılmaz hale gelmesi ve yenilenmesi gerekmektedir. İçindeki bileşenlerin maliyeti düşünüldüğünde asfalt kaplamaların geri kazanılması ve dönüştürülmesi ülkelerin ekonomisi açısından fayda sağlamaktadır. Dünyada asfalt geri dönüşümü, petrol krizinin yaşandığı 1970’li yıllara kadar durağan bir seyrinde ilerlerken, krizin etkileri ve geri dönüşüm teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ışığında önemi ve kullanımı katlanarak artmıştır [Fenerci vd., 2023; KGM, 2023].

Federal Karayolu İdaresine (FHWA) göre asfalt betonu dünya çapında en çok geri dönüştürülen malzemedir. Ulusal Asfalt Kaplama Birliği (NAPA) geri kazanılmış asfaltın ya tekrar kullanıldığı ya da geri dönüştürüldüğünü belirterek asfalt malzemeyi en çok geri dönüştürülen malzeme olarak tanımlamıştır. 2019 yılında asfalt tabakalarında yaklaşık olarak 140 milyon ton RAP kullanılmıştır. 2020 yılında ise bu 130 milyon ton olarak tespit edilmiştir. **Tablo 2.10**’da 2015-2020 yılları arasında ülkelere göre geri dönüştürülmüş asfalt miktarları verilmiştir.

Tablo 2.10: Yıllara göre geri dönüştürülmüş asfalt miktarları(ton/yıl) [EAPA, 2020].

Ülke	2015	2016	2017	2018	2019	2020
A.B.D	69.700.000	74.200.000	72.500.000	91.700.000	88.000.000	85.000.000
Almanya	11.000.000	12.000.000	13.000.000	13.000.000	13.400.000	11.600.000
Avusturya	1.350.000	1.400.000	1.650.000	1.900.000	1.800.000	1.260.000
Belçika	1.553.994	1.240.000	1.030	1.687.000	1.637.000	1.981.500
Çekya	2.000.000	1.800.000	2.600.000	2.700.000	2.800.000	2.500.000
Danimarka	1.300.000	1.150.000	1.165.000	1.185.000	1.255.000	1.160.000
Finlandiya	1.160.000	1.150.000	1.200.000	1.300.000	1.500.000	Veri yok
Fransa	7.000.000	6.370.000	6.400.000	7.817.000	8.074.000	6.042.000
Hırvatistan	Veri yok	80.000	Veri yok	200.000	210.000	240.000
İngiltere	3.500.000	3.250.000	3.400.000	6.100.000	6.050.000	4.973.106
İspanya	410.000	490.000	494.000	1.165.000	1.486.000	1.900.000
İsviçre	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	1.650.000	Veri yok
İtalya	9.000.000	9.000.000	9.000.000	9.000.000	9.500.000	9.500.000
Macaristan	180.000	109.000	120.000	200.000	105.000	140.000
Norveç	932.049	1.112.000	Veri yok	1.004.000	1.173.000	840.000
Romanya	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	612.500	Veri yok
Slovenya	37.000	56.000	84.000	106.200	150.000	170.000
Slovakya	75.000	54.000	50.000	150.966	165.600	135.846
Türkiye	1.520.000	3.551.167	2.570.589	1.965.000	1.038.000	2.143.354
TOPLAM	110.718.043	117.012.167	114.234.619	141.180.166	140.606.100	129.585.806

Sadece Amerika Birleşik Devletleri’nde yıllık geri kazanılan malzeme (RAP) miktarı 90 milyon tona ulaşırken, bu malzemelerin %93’ü yeni karışımlarda kullanılmakta ve senelik yaklaşık 3,3 milyar dolarlık bir kazanım sağlamaktadır. Avrupa’da ise 2020

yılı raporlarına göre yaklaşık 26 milyon ton asfalt malzemesi geri kazanılmış, bu malzemelerin yeni karışımlarda kullanım oranı ise %63 seviyelerinde kalmıştır. Bu durumun geri kazanılan malzemenin efektif olmayan bir şekilde yol yapım ve genişletme çalışmalarında zemin dolgu malzemesi olarak kullanılmasından kaynaklandığı ve geri dönüşümden alınabilecek ekonomik kazancı azalttığı görülmektedir. EAPA (European Asphalt Pavement Association) verilerine göre İtalya ve Fransa yol yapımında geri dönüştürülmüş asfalt kullanımı en üst seviyede olan ülkeler olup, bunları Almanya takip etmektedir. Özellikle Finlandiya ve İrlanda'nın 2020 yılında geri kazanılan malzemeyi (RAP) yüksek kaliteli asfaltta %100 oranında yeniden kullanması dikkat çekicidir. Türkiye'de ise 2020 yılında geri dönüştürülmüş asfalt miktarı 2.143.345 ton 2022 yılında ise 1.728.360 ton olmuştur. Fakat 2020 yılında bunun sadece %2'lik kısmı sıcak karışımda değerlendirilmiştir. Geri kalan %98'lik kısım bağlayıcısız yol katmanlarında kullanılmıştır. 2022 yılında ise sıcak dönüşüm yöntemi ile geri dönüştürülen asfalt oranı %12'ye yükselmiştir. Yine 2022 yılında plentte soğuk geri dönüştürülen asfalt miktarı %7 olurken, %81 gibi yüksek bir oranda bağlayıcısız yol katmanlarında kullanılmıştır. Bu veriler ışığında ülkemizde geri kazanılan asfaltın sıcak geri dönüşümde kullanım oranının az da olsa artış gösterdiği görülmektedir. Geri kazanılmış asfalt agreganın hem daha hem daha efektif kullanılması hem de ekonomiye katkısının daha fazla olabilmesi için sıcak karışım asfalt yapımındaki kullanım yüzdesinin dahada artırılması hedeflenmelidir **[Fenerci vd., 2023; KGM, 2023]**. **Tablo 2.11** ve **Tablo 2.12**'de 2020 ve 2022 yılına ait ülkelere geri dönüştürülmüş asfalt kullanım alanları verileri gösterilmiştir.

Tablo 2.11: 2020 yılındaki geri kazanılmış asfalt miktarları ve kullanım alanları [EAPA, 2020].

Ülke	2020 Yılında Elde Edilen Geri Kazanılmış Asfalt (TON)	2020 Yılında Asfalt Endüstrisi Tarafından Kullanılabilecek Geri Kazanılmış Asfalt Miktarı (TON)	Geri Dönüştürülmüş Agrega Kullanım Yüzdeleri (%)						
			Sıcak Karışım Asfalt Yapımı	Yarı Sıcak Karışım Asfalt Yapımı	Yerinde Soğuk geri Dönüşüm	Plentte Soğuk Geri Dönüşüm	Bağlayıcısız Yol Katmanları	Diğer İnşaat Mühendisliği Uygulamaları	Döküm Sahası ve Diğer Uygulamalar
A.B.D	87.000.000	85.000.000	93	0	0	0.4	6.2	0.3	0
Almanya	13.800.000	11.600.000	84	0	0	0	16	0	0
Avusturya	1.800.000	1.260.000	70	30					0
Belçika	Veri yok	1.981.500	47	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
Çekya	2.700.000	2.500.000	15	Veri yok	25	Veri yok	25	7	28
Danimarka	1.410.000	1.160.000	85	Veri yok	Veri yok	Veri yok	15	Veri yok	Veri yok
Finlandiya	1.600.000	1.600.000	100	0	0	0	0	0	0
Fransa	8.056.000	6.042.000	76	10	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
Hırvatistan	280.000	240.000	33	0	0	2	Veri yok	Veri yok	Veri yok
İngiltere	5.525.673	4.973.106	37	0	10	0	0	63	Veri yok
İrlanda	500.000	220.000	100	0	0	0	0	0	0
İspanya	2.400.000	1.900.000	72.7	0.2	0.2	0	24	3	0
İtalya	Veri yok	9.500.000	25	75					0
Macaristan	200.000	140.000	95	0	0	3	2	0	0
Norveç	1.300.000	840.000	35	0	0	0	65	0	0
Romanya	10.425	10.425	0	0	0	100	0	0	0
Slovenya	Veri yok	170.000	29	0	10	1	25	10	25
Slovakya	Veri yok	135.846	53	0	30	0	17	0	0
Türkiye	Veri yok	2.143.354	2	0	0	0	98	0	0

Tablo 2.12: 2022 yılındaki geri kazanılmış asfalt miktarları ve kullanım alanları [EAPA, 2022].

Ülke	2022 Yılında Elde Edilen Geri Kazanılmış Asfalt (TON)	2022 Yılında Asfalt Endüstrisi Tarafından Kullanılabilecek Geri Kazanılmış Asfalt Miktarı (TON)	Geri Dönüştürülmüş Agrega Kullanım Yüzdeleri (%)						
			Sıcak Karşım Asfalt Yapımı	Yarı Sıcak Karışım Asfalt Yapımı	Yerinde Soğuk geri Dönüşüm	Plentte Soğuk Geri Dönüşüm	Bağlayıcısız Yol Katmanları	Diğer İnşaat Mühendisliği Uygulamaları	Döküm Sahası ve Diğer Uygulamalar
Almanya	14.800.000	12.876.000	87	0	0	0	13	0	0
Avusturya	1.900.000	800.000	85	0	5	0	10	0	Veri yok
Belçika	1.684.000	1.025.000	100	0	0	0	0	0	0
Çekya	2.800.000	2.500.000	30	0	15	0	15	10	30
Danimarka	1.306.000	1.106.000	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	4	Veri yok	Veri yok
Fransa	Veri yok	7.340.000	45	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
Hırvatistan	270.000	240.000	42	0	2	19	Veri yok	Veri yok	2022
İngiltere	5.814.442	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
İrlanda	500	500	45	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
İspanya	1.900.000	2.000.000	66	0	7	0	24	0	3
İtalya	11.000.000	9.200.000	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
Macaristan	150.000	180.000	10	0	10	74	3	3	0
Norveç	>1600000	1.600.000	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
Romanya	34.000	34.000	0	0	95	0	5	0	0
Slovenya	305.000	51.000	58	0	9	0	14	9	10
Türkiye	1.920.400	1.728.360	12	0	0	7	81	0	0

2.3.5 RAP Malzemesinin Temel Tabakasında Kullanımı

Bağlayıcısız temel tabakalarında RAP kullanım oranları ile ilgili kriterler ülkemizde henüz belirlenmemekle birlikte granüler temel tabakası için çeşitli araştırmacıların ve kurumların tespit ettikleri ve standart olarak kabul ettikleri RAP karışım oranları **Tablo 2.13**'te gösterilmiştir.

Tablo 2.13: RAP karışım oranları.

Kaynak	Granüler Temel Tabakası RAP Karışım Oranı	Açıklamalar
Taha vd. (1999)	%10 (maksimum)	Alttemel tabakasında kullanımının %60 ile sınırlandırılması gerektiği sonucuna varmıştır.
Bennert ve Maher (2005)	%50 (maksimum)	-
McGarrah (2007)	%25 (maksimum)	-
Schaefer vd. (2008)	%20-%50	-
Copeland (2011)	%29 (maksimum)	-
Cosentino vd. (2012),	%25 (maksimum)	-
Bleakley ve Cosentino (2013),	%25 (maksimum)	%50 oranında RAP kullanımının ancak çimento gibi bir bağlayıcı katkı malzemesi ile mümkün olabileceği belirtilmiştir.
Dong ve Huang (2014),	-	RAP malzemesinin kalıcı deformasyonunun fazla olması sebebiyle, bağlayıcısız granüler temel tabakasında tek başına RAP kullanımının sakıncalı olacağı sonucuna varılmıştır.
Seferoğlu (2017),	-	%100 RAP kullanımının ancak çimento takviyesi ile gerçekleştirilebileceğini ve PMT-RAP karışımının ekonomik fayda sağlayacağı sonucuna varmıştır.
Salifou (2018),	%30	-
Florida Karayolları (FDOT, 2013)	-	RAP malzemesinin banketlerde ve bisiklet yollarında %100 oranında kullanımına izin vermekte olup, temel tabakalarında kullanımına izin vermemektedir.

Tablo 2.13: Devamı.

Kaynak	Granüler Temel Tabakası RAP Karışım Oranı	Açıklamalar
Colorado Karayolları (CDOT, 2013)	-	RAP malzemesinin doğal agrega malzemesiyle benzer özellikler gösterdiğini ve bu sebeple temel tabakalarında doğal agregaya alternatif bir malzeme olabileceğini belirtmektedir. Şartnameye göre, RAP malzemesi agrega temel tabakası ile ilgili şartnamedeki müsaade edilebilir gradasyon aralıkları ve sıkıştırma ile ilgili sınırları sağlaması durumunda %100 oranında kullanılabilmektedir
Hawaii Karayolları (Hawaii DOT, 2015)	%10	-
Washington Karayolları (WDOT, 2012)	%20	-

2.4. Plaka Yükleme Deneyi (PLT)

Plaka yükleme deneyi (PLT), doğal veya sıkıştırılmış zeminlerin mühendislik uygulamalarında gerilme-şekil değiştirme karakteristiğini belirlemek için yapılır. Çapları 30-100 cm arasında değişen daire veya 30,5 cm kenarlı kare şeklinde olan rijit plakaların belirli yükleme adımlarıyla ve her bir adımda gerçekleşen oturma miktarının kaydedilmesi şeklinde yapılır [Kaya, 2011]. Plaka yükleme deneyi ile yük-oturma arasındaki ilişki tespit edilirken, deformasyon modülü (E_v) ve yatak katsayısı da (k_s) ölçülür.

PLT prosedürü ilgili standartlarda **DIN 18134 (2012)**; **ASTM D1196/D1196M-21 (2021)** tanımlanmıştır. **Şekil 2.17**'de plaka yükleme deney düzeneği gösterilmiştir. Düzenek (1) dağıtma kirişi, (2) rijit plaka (3) hidrolik kriko ve (4) üç adet komparatör

saatinden oluşmaktadır (**Şekil 2.17**). Yükler hidrolik kriko aracılığıyla kademeli olarak uygulanır ve yüklerin şiddeti pompaya bağlı manometre ile ölçülür. Rijit plakalar yükleri zemine iletir ve oluşan oturmalar birbirine göre 120° açıyla yerleştirilmiş üç adet komparatör ile ölçülür. Komparatörler 0.01 mm hassasiyetli olmalı ve dağıtma kirişine sabitlenmelidir.

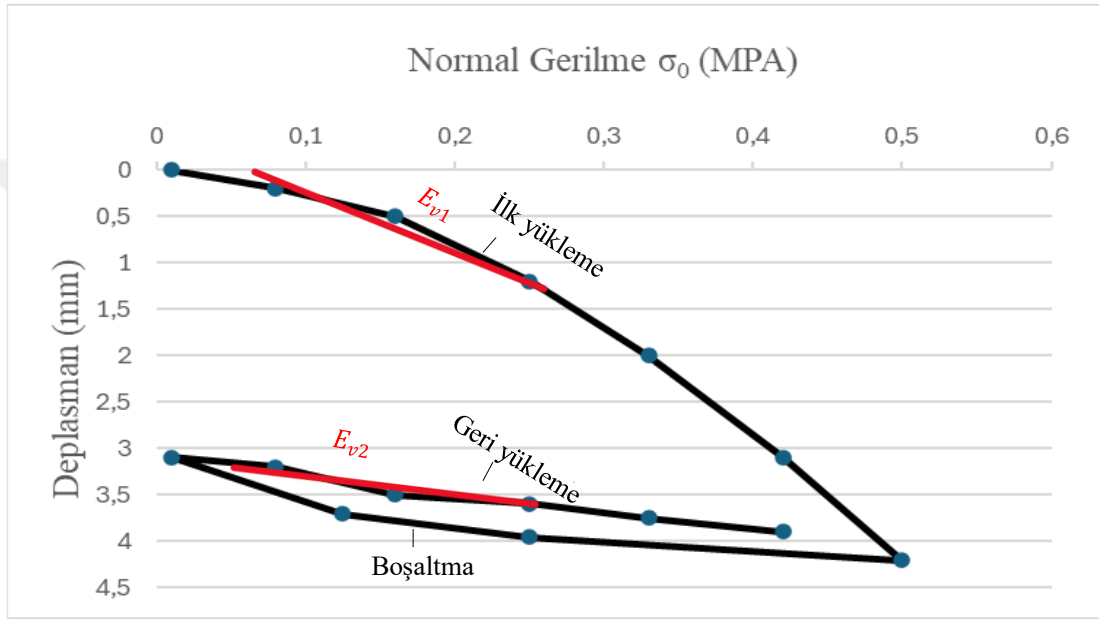


Şekil 2.17: Plaka yükleme deneyi düzeneği, Beylikdüzü, İstanbul.

PLT uygulamalarında, plakalar yerleştirilmeden önce zemin yüzeyi sıkıştırılır, plakalar pürüzsüz zemine teraziye alınır ve zeminle teması uygun olacak şekilde yerleştirilir. Eğer zemin pürüzlü ise plaka ile teması tam sağlanamıyorsa zemin yüzeyine ince bir kum tabakası serilerek tesviye edilir. Plakanın altına, farkına varılmayan iri bir blok veya taş denk gelmişse, bu, deney sırasında plakanın olması gerekenden az veya dengesiz oturmasına sebep olacaktır. Fark edildiği anda deney sonlandırılmalı ve farklı bir yerde deney yapılmalıdır.

Plakalar zemine düzgün yerleştirdikten sonra hidrolik krikoyla yük aktarımı yapılır. Krikoya yük aktarmak amacıyla arazide en az 30 ton ağırlığında ve krikonun yaslanarak reaksiyon almasına izin veren kamyon kullanılır (**Şekil 2.17**). Yükleme dengeli yapılabilmesi için kriko kamyon dingilinin ağırlık merkezine yakın bir yere yerleştirilmelidir. Aksi takdirde, büyük yük kademelerinde kamyonun yerinden oynamasına ve yükleme eksantrik hale gelmesine neden olabilecektir. Yükler uygulanmadan önce **DIN 18134** standartlarına göre 30 sn süre ile 0.01 MPa gerilmeye

karşılı gelecek bir önyüklemeye öngörülmektedir [Dipova, 2013]. Yükleme maksimum gerilme değerine ulaşıncaya kadar yaklaşık eşit aralıklı yük artışlarıyla en az altı noktada uygulanır. Boşaltma işlemi ise en az üç aşamada tamamlanır. İkinci döngüde ise yükleme ilk döngünün sondan bir önceki aşamasına kadar yükseltilir. Yükleme ve boşaltma aşamalarında komparatörden kaydedilen deplasman değerlerinden gerilme/deplasman grafiği oluşturulur [DIN 18134, 2012]. Şekil 2.18’de plaka yükleme testi için örnek gerilme-deplasman grafiği verilmiştir.



Şekil 2.18: Plaka yükleme deneyi için örnek gerilme-deplasman grafiği.

Yükleme aşamalarındaki deformasyon modüllerini hesaplamak için, her bir yükleme aşamasının gerilme-deplasman eğrisi ikinci dereceden bir polinom olacak şekilde teşkil edilir (E_{v1} ve E_{v2} sırasıyla birinci ve ikinci aşamanın deformasyon modülleridir). Bu nedenle, her yükleme aşamasının eğrileri için ikinci dereceden uygun denklem, aşağıdaki 2.5 numaralı denklem formundadır.

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2 \quad (2.5)$$

burada; s = rijit plakanın deplasmanı, mm

σ_0 = rijit plaka altındaki ortalama gerilme, MN/m²

a_0 = ikinci derece polinom sabiti, mm

a_1 = ikinci derece polinom sabiti, mm/(MN/m²)

a_2 = ikinci derece polinom sabiti, mm/(MN²/m⁴)

Polinom sabitlerinin tespit edilmesinin ardından, deformasyon modülü 2.6'daki denkleme göre hesaplanır.

$$E_v = 1.5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0max}} \quad (2.6)$$

burada; E_v = deformasyon modülü, MN/m²

r = rijit plakanın yarı çapı, mm

σ_{0max} = ilk yükleme döngüsündeki maksimum gerilme MN/m²

Yatak katsayısı k_s (MN/m³), 1.25 mm (s^* burada metredir) oturmaya karşılık gelen normal gerilme değerinden hesaplanır (denklem 2.7).

$$k_s = \frac{\sigma_0}{s^*} = \frac{\sigma_0}{0.00125} \quad (2.7)$$

2.5. Trafik İzleme Sistemi

Esnek üstyapı projelendirilmesinde, üstyapı kalınlıklarını belirleyen faktörlerin en önemlilerinden biri trafik yükleridir. Projelendirme amacıyla, karayolları üzerinden geçen dingil yükleri 8.2 ton eşdeğer standart dingil tekerrür sayısına çevrilerek trafik yükleri bulunur. Üstyapı projelendirmesinde, proje süresi boyunca hesap şeridinden geçen toplam eşdeğer standart dingil sayısı bilinmelidir [KGM, 2008].

Lodometre çalışması, taşıt dingillerinin tiplerini, sayılarını ve ağırlıklarını belirlemek için yapılan çalışma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19: Trafik sayım sistemi [URL-2].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında geofoam blok yol dolgularında kullanılan betonarme yük yayma platformu içeren geleneksel esnek üst yapı kesitine alternatif iki farklı prototip esnek üst yapı modeli tasarlanarak geçici servis yolunda uygulanmıştır. Prototip esnek üst yapı modelleri geri kazanılmış geofoam bloklar, PMT tabakası, RAP-PMT karışım tabakası ve bitümlü sıcak karışım tabakası kullanılarak inşa edilmişlerdir. Kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri, tabakaların kalınlıkları, karışım oranları ve prototip kesit detayları bu bölümde kapsamlı olarak incelenecektir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. RAP

Bu çalışmada İBB Yol Bakım ve Onarım Şube Müdürlüğünce asfalt kazıma makineleri ile asfalt betonu aşınma tabakasından geri kazanılan asfalt agrega, ileride detaylıca açıklanan oranda PMT ile karıştırılarak kullanılmıştır. Geri kazanılan asfalt agrega **KTŞ (2023)** Kısım 407 standartlarına göre üretilen Tip-1 Asfalt betonu aşınma tabakasından elde edilmektedir. **Tablo 3.1**'de aşınma tabakasına ait gradasyon limitleri verilmiştir.

Tablo 3.1: Aşınma tabakası (TİP-1) için gradasyon limitleri [**KTŞ, 2023**].

Elekt Açıklığı		% Geçen
mm.	in.	TİP - I
19	3/4	100
12,5	1/2	88-100
9,5	3/8	72-90
6	1/4	-
4,75	No.4	42-52
2,00	No.10	25-35
0,425	No.40	10-20
0,180	No.80	7-14
0,075	No.200	3-8

RAP malzemesinin kazınması, kamyonu yüklenmesi ve depolanması **Şekil 3.1'** de gösterilmiş ve İSFALT (İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret) A.Ş tarafından yapılan gradasyon ve bitüm oranı emsal test sonuçları ise EK-A'da verilmiştir.



Şekil 3.1: a) Asfalt kazıma çalışmaları, b) Kazılmış asfaltın kamyonlara yüklenmesi, c) Kazımı tamamlanmış asfalt, d) RAP depo alanı.

3.1.2. Geri Kazanılmış Geofoam Blok

GTÜ kampüsünde geofoam blok yol dolguları için alternatif esnek üst yapı modellerinin incelendiği bir çalışmada yaklaşık 21.000 ESAL trafik yüklemesi yapılan geofoam bloklar (EPS29) bu çalışma kapsamında esnek üstyapı katmanında kullanılmıştır [Büyükaslan, 2024]. 40 cm x 62,5 cm x 100 cm ve 20 cm x 100 cm x 125 cm olmak üzere iki farklı boyutta geofoam bloklar kullanılmıştır. **Tablo 3.2'**de bakir geofoam blokların fiziksel ve mekanik özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 3.2: Çalışmada kullanılan yükleme yapılmamış geofoam blokların fiziksel ve mekanik özellikleri [Büyükaslan, 2024]

Özellik	Birim	Blokların Test Sonuçları	ASTM D6817 Açıklaması	ASTM D6817'ye göre minimum değerler
Yoğunluk	γ (kg/m ³)	29,0-29,2	EPS 29	28,8
%1 birim boy kısaltmada basınç mukavemeti	σ_1 (kPa)	80,0-84,0		75,0
%5 birim boy kısaltmada basınç mukavemeti	σ_5 (kPa)	181,0-187,0		170,0
%10 birim boy kısaltmada basınç mukavemeti	σ_{10} (kPa)	200,0-206,0		200,0
Elastiste Modülü	E_i (MPa)	8,0-8,4		-

Geri kazanılmış geofoam blokların sökümüne ait fotoğraflar Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: a) Geofoam blokların sökümü, b) Blokların servis yolunda bu çalışma kapsamında kullanılmak üzere taşıta yüklenmesi.

3.1.3. PMT

Bu tez çalışması kapsamında taş ocağından temin edilen doğal agrega malzemesi üç farklı gradasyon (0-7 mm, 7-19 mm, 19-38 mm) karışımından elde edilmektedir. RAP malzemesinin de 0-25mm dane boyutunda olduğu ve oluşturulacak tabaka kalınlığının 15 cm'den büyük olacağı göz önüne alınarak, II. Bölüm **Tablo 2.1**'de bahsedilen PMT Tip-1 tabakası prototip modellerde kullanılmak üzere olarak seçilmiştir. İSFALT tarafından düzenlenen PMT karışımına ait rapor EK-B'de verilmiştir.

3.1.4. Bitümlü Sıcak Karışımı

Bitümlü sıcak karışım olarak esnek üstyapı modellerine 12 cm kalınlığında bitümlü temel ve 8 cm kalınlığında asfalt betonu binder tabakası kullanılacaktır. Asfalt tabakalarına ait Karayolları Genel Müdürlüğü uygulamalarında kullanılan gradasyon limitleri ve asfalt tasarım kriterleri ile ilgili standartlar **Tablo 3.3** ve **Tablo 3.4**'te verilmiştir.

Tablo 3.3: Bitümlü Temel ve Binder tabakaları için gradasyon limitleri [KTS, 2023].

Elek Açıklığı Boy mm (in, No)	% Geçen	
	Bitümlü Temel (TİP A)	Binder
37.5(1 1/2")	100	100
25(1")	72-100	100
19(3/4")	60-90	80-100
12.5(1/2")	50-78	58-80
9.5(3/8")	43-70	48-70
4.75(No.4)	30-55	30-52
2.00(No.10)	18-42	20-40
0.425(No.40)	6-21	8-22
0.18(No.80)	2-13	5-14
0.075(No.200)	0-7	2-7

Tablo 3.4: Asfalt Dizayn Kriterleri [KTŞ, 2023].

Özellikler	Bitümlü Temel Tip A		Binder	
	min.	maks.	min.	maks.
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75	
Marshall Stabilitesi, kg	600	-	750	-
Boşluk, %	4	6	4	6
Asfaltla Dolu Boşluk, %	55	75	60	75
Agrefalar Arası Boşluk, (VMA) %	12	14,5	13	15
Akma, mm (10^{-2} in)	2	5	2(8)	4(16)
Filler/Bitüm Oranı	-	-	-	1,4
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3	5,5	3,5	6,5

3.2. Prototip Esnek Üstyapı Modelinin Belirlenmesi

3.2.1. PMT-RAP Oranın Belirlenmesi

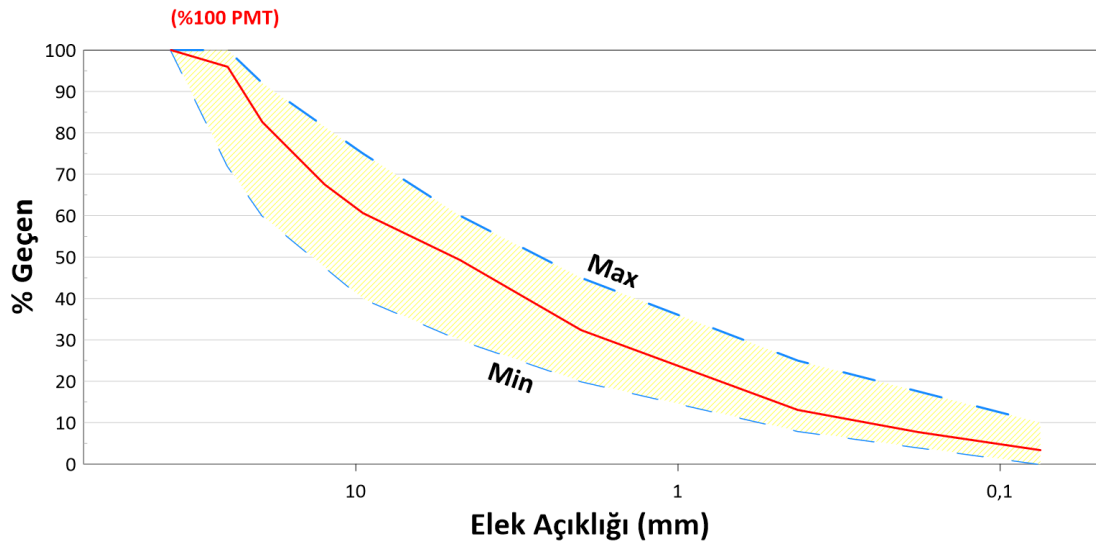
KTŞ (2023), standartlarında yeniden yapılacak bitümlü sıcak karışım imalatlarında RAP kullanımını ağırlıkça %25 ile sınırlandırmıştır. Fakat ülkemizde RAP'ın alt temel ve temel tabakalarında kullanım oranları ile ilgili herhangi bir standart henüz oluşmamıştır. Literatürde önerilen sınırının (Tablo 2.13) üzerinde (%30) ve önerilen sınırlar dahilinde (%10 ve %20) oranında RAP ihtiva eden karışımlar elde hazırlanarak, prototip esnek üstyapı katmanında izin verilebilir RAP oranı tayin edilmiştir.



Şekil 3.3: a) PMT, b) RAP.

Ağırlıkça %90 PMT- %10 RAP, %80 PMT - %20 RAP ve %70 PMT - %30 RAP ihtiva eden karışımlar laboratuvar ortamında kürekle karıştırılarak homojenize edilerek hazırlanmıştır. Deneyler için numuneler hazırlanan karışımlardan ASTM C 33'e uygun olarak çeyreklemeye tekniği ile alınmıştır. PMT, RAP ve üç farklı karışımın fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla elek analizi, özgül ağırlık, proktor ve kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri gerçekleştirilmiştir. ASTM C136'ya uygun olarak PMT, RAP ve üç ayrı karışım malzemesi için elek analizleri yapılmıştır. RAP malzemesi elek analizinden geçirilmeden önce **ASTM D6307**'ye uygun olarak yakma yöntemi ile bitümlü bağlayıcı oranı belirlenmiştir. PMT malzemesine RAP malzemesinin farklı oranlarda katılmasının özgül ağırlığa etkisini saptayabilmek adına PMT, RAP ve üç ayrı karışıma **ASTM D2041**'e uygun olarak test edilmiştir. Malzemelerin ve karışımların optimum su muhtevalarının ve maksimum birim hacim ağırlıklarının hesaplanması amacıyla **ASTM D1557**'ye uygun olarak modifiye proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Optimum su muhtevaları baz alınarak sıkıştırılan PMT, RAP ve karışım malzemelerine **ASTM D1883**'e uygun olarak kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi yapılmıştır [Pekyürek vd., 2023].

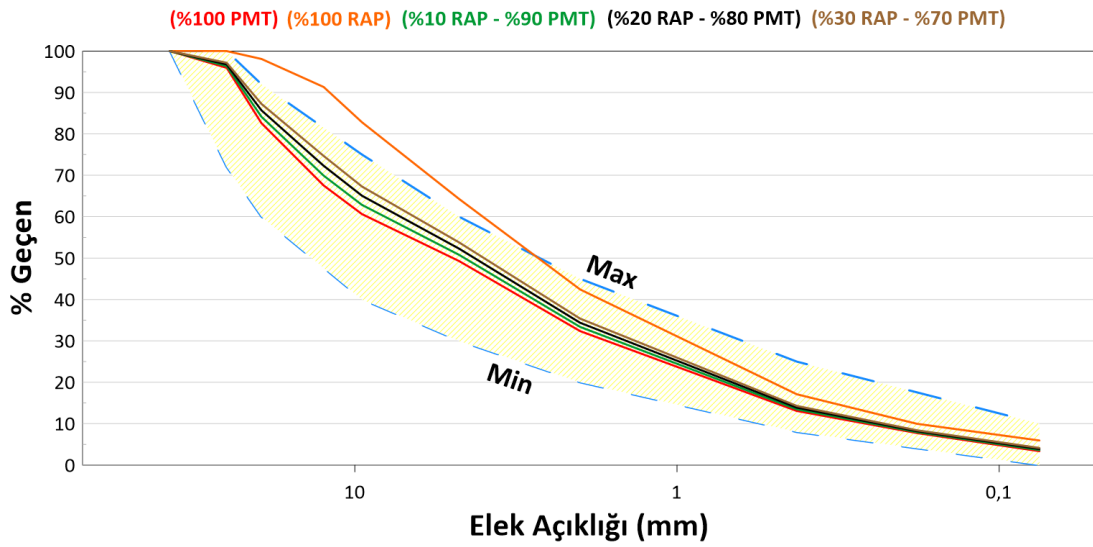
Yapılan elek analizleri sonucunda PMT malzemesinin **KTŞ (2023)** uygun dane çapı dağılımına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4: PMT elek analizi sonucu [Pekyürek vd., 2023].

Ağırlıkça %4,65 oranında bitümlü bağlayıcı ihtiva eden RAP malzemesinin kazındıktan sonra dane çapı dağılımının bazı bölgelerde KTŞ sınır şartlarını

sağlamadığı tespit edilmiştir (**Şekil 3.5**). Çalışmanın laboratuvar ortamında saha şartlarını yansıtması için RAP malzemesi tekrar kırılmayarak, temin edildiği gibi kullanılmıştır. Buna göre karışımındaki RAP oranının artmasıyla KTŞ'nin granülometrik sınırlarına yaklaşıldığı, daha az miktarlarda kullanıldığı zaman ise istenilen aralığın sağlandığı görülmüştür (**Şekil 3.5**). Buradan hareketle RAP malzemesinin tek başına esnek üst yapılarında alt temel ve temel tabakası olarak kullanımının sakıncalı olduğu, ancak belirli yüzdelerdeki karışımlarla PMT ile kullanımının uygun olacağı söylenebilir.

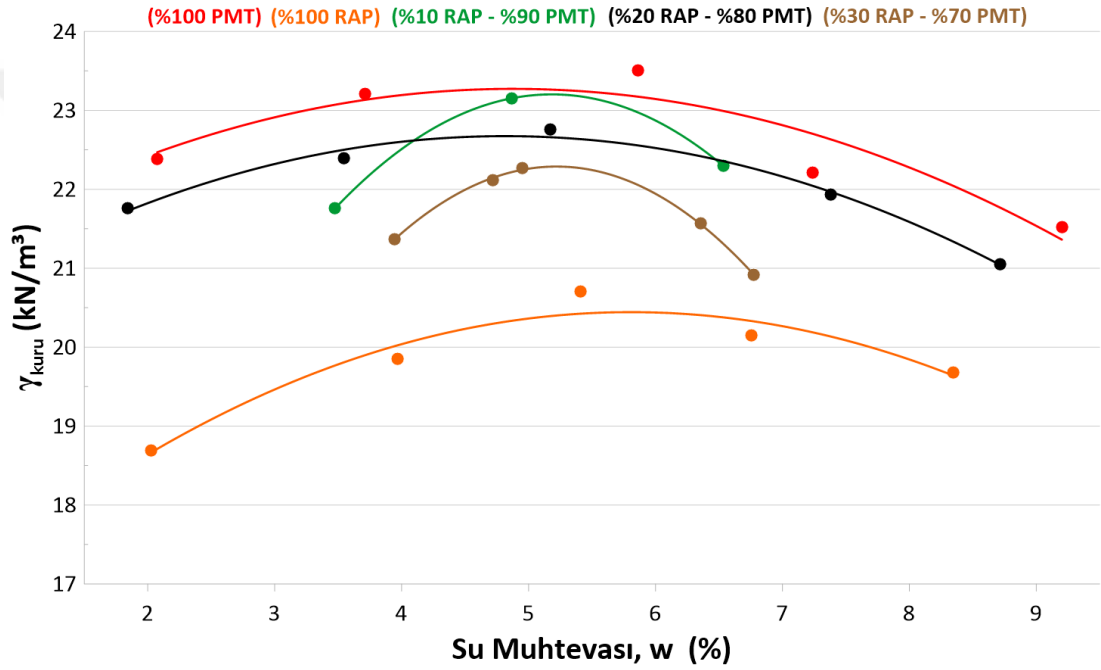


Şekil 3.5: RAP ve PMT-RAP karışım elek analizi sonucu [Pekyürek vd., 2023].

PMT, RAP ve üç farklı PMT-RAP karışımının test sonuçları **Tablo 3.5**'te, modifiye proktor kompaksiyon eğrileri sonuçları ise **Şekil 3.6**'da sunulmuştur. %100 PMT içeriğinin bulunduğu deneyde kuru birim hacim ağırlığı 23,40 kN/m³ olarak saptanmıştır. %100 RAP içeriğinin bulunduğu deneylerde ise bu değer 20,70 kN/m³ olarak belirlenmiştir (**Şekil 3.6**). RAP yüzdesinin artırılması modifiye proktor deneylerinde kuru birim hacim ağırlığında azalmaya sebep olmuştur. Optimum su muhtevası değeri %100 PMT için %4,6 olarak belirlenmiştir. RAP yüzdesinin artması bu değeri %5-5,5 aralığına yükseltmiştir (**Şekil 3.6**). PMT malzemesinin düşük yüzdelerde RAP ile kullanmanın maksimum kuru birim hacim ağırlığında büyük değişikliklere sebep olmadığı görülmüştür. CBR değerinin ise karışımda RAP kullanım oranı arttıkça düştüğü gözlemlenmiştir (**Tablo 3.5, Şekil 3.7**).

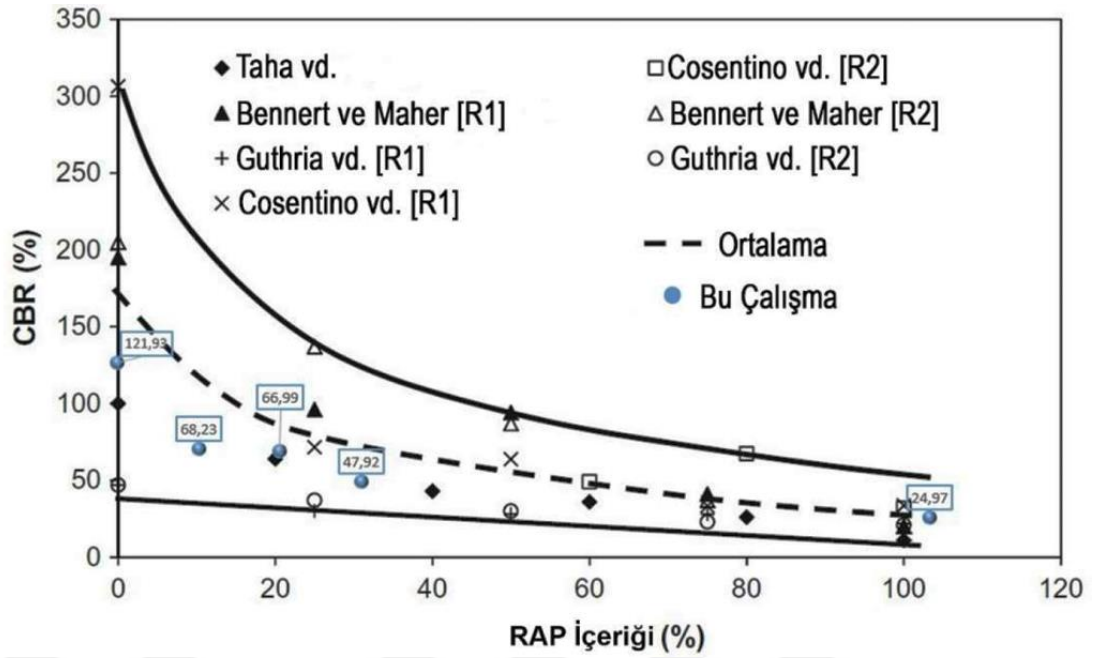
Tablo 3.5: Temel dane özellikleri, proktor ve CBR deney sonuçları [Pekyürek vd., 2023].

PMT (%)	RAP (%)	Maks. Dane Çapı (D _{max}) (mm)	D ₅₀ (mm)	Üniformluk Katsayısı, C _u	Derecelenme Katsayısı, C _c	Özgül Ağırlık, G _s	Modifiye P. $\gamma_{kuru, maks}$ (kN/m ³)	Modifiye P. w_{opt} (%)	CBR (%)
100	0	37,5	4,8	30,16	1,21	2,665	23,4	4,6	122
0	100	25	3,5	25	1,24	2,562	20,7	5,5	24
90	10	37,5	4,75	29,84	1,15	2,655	23,2	5,15	69
80	20	37,5	4,85	29,52	1,11	2,645	22,58	5,2	66
70	30	37,5	4,9	28,75	1,04	2,634	22,27	5,35	48



Şekil 3.6: Modifiye proktor deneyi kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkileri [Pekyürek vd., 2023].

Şekil 3.7’de çeşitli araştırmacıların RAP içerikli karışımlarda CBR etkisi gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalardaki bulgulara, literatür çalışmalarıyla uyumludur (Şekil 3.7). KTŞ’de alt temel tabakasında kullanılacak malzemeler için min %50 CBR sınırı bulunmaktadır. Bu kritere göre, oluşturulacak prototip esnek üstyapı kesiti temel tabakasında PMT ile %20 oranında karıştırılmış RAP kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.7: RAP içeriğinin CBR değerine etkisi [Thakur ve Han, 2015].

3.2.2. Prototip Esnek Üstyapı Kesitlerinin Tasarımı

Yol üstyapı tabakaları, yol dolgusu üzerine çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip seçilmiş malzemeler kullanılarak oluşturulur. Yol üstyapı tabakaları trafik yüklerini taşıyarak, bir alt katmana iletir ve bunları dağıtarak hizmet yüklerinin zemin taşıma kapasitesini aşmamasını sağlar. Hem yol dolguları hem de yol tabakaları tasarım standartlarına uygun olarak inşa edilmelidirler. Esnek üstyapı tasarımı yapılırken önemli parametrelerden biri yol altyapı dolgusunun taşıma kapasitesidir. Yol yapımında taşıma kapasitesini elde etmek için CBR testi kullanılır.

Genel olarak ülkemizdeki karayolları yol dolguları üzerine sırasıyla bağlayıcısız agregadan oluşan alt temel ve temel ve bağlayıcılı bitümlü sıcak karışım tabakalarının uygulanmasıyla inşa edilir. Bu çalışma kapsamında İBB Altyapı Hizmetleri Şube Müdürlüğüne inşa edilen geçici servis yolunda, yol dolgusu olarak geri kazanılmış geofoam bloklar kullanılmıştır. Bloklar üzerine iki farklı tip esnek üstyapı inşa edilmiştir. Temel tabakası olarak birinci kesitte doğal agregadan oluşmuş PMT, ikinci kesitte ise RAP ile belirli oranda karıştırılmış PMT kullanılmıştır. Bitümlü sıcak tabaka her iki kesitte de 12 cm bitümlü temel ve 8 cm binder tabakasından oluşmuştur (Şekil 3.8).

Geofoam bloklar yol dolgularında diğer dolgu malzemelerine nazaran daha düşük CBR değerine sahiptir. Geofoam blokların CBR değeri %2 - %4 aralığındadır **[Stark vd., 2004b]**. Dolayısıyla, geofoam blokların kullanıldığı yol dolgularında, esnek üstyapı tabakalarının özel olarak tasarlanması gerekmektedir.

Esnek üst yapı tabakalarının rijitliği, E katmanının elastite modülü ve D katman kalınlığı olmak üzere ExD^3 ile tanımlanır **[Stark vd., 2004b]**. Dolayısı ile, katman kalınlığının rijitlik performansı üzerinde malzemenin elastite modülünden daha büyük etkisi vardır. Katman kalınlığı artırılarak temel tabakasının rijitliği önemli ölçüde iyileştirilebilir. Ayrıca, geleneksel granüler temel malzemesinin elastite modülünden büyük olan bir malzeme kullanılarak hem katman kalınlığı düşürülebilir hem de temel tabakasının rijitliği toplam kalınlığı artırılmadan yükseltilebilir. Geofoam blok dolguları ele alındığında, ilk yöntem ile (granüler temel kalınlığının artırılması), geofoam blok dolgusu üzerindeki ölü yükleri artırarak dolgunun iç stabilitesi açısından kullanılacak olan geofoam bloğun rijitliğinin artmasına sebebiyet verir. Blok dolgularının üzerindeki ölü yükün azaltılması için genellikle yüksek elastisite modülüne sahip katman kullanımı tercih edilmektedir. Bu yöntemde, uygulama standardı haline gelmiş bir yaklaşım olarak, tabakaların rijitliği geofoam blok dolgusu ve granüler temel katmanı arasına donatılı beton platform inşa edilerek arttırılır. Yük yayama platformu olarak da adlandırılan betonarme plak, ilk kez 1975 yılında bir geofoam blok otoyol dolgu inşasında uygulanmıştır **[NRRL, 1987]**. 10 cm kalınlığındaki betonarme yük dağıtma plağının rijitliği, yaklaşık 30 cm kalınlığındaki granüler malzeme katmanının rijitliğine eşdeğerdir **[Aabøe, 1987; Refsdal, 1987]**. Bununla birlikte betonarme plak uygulamasının dezavantajlarından birisi üzerine granüler katmanlar inşa edilmeden önce tasarım mukavemetine erişmesi için beklenmesi gereken kür süresi olup, proje süresinin uzamasına sebebiyet vermesidir. Bu çalışmada servis yollarının hizmet açılabilme sürelerinin kısaltılması için betonarme esnek üst yapı sistemlerinde platform kullanılması yerine granüler temel kalınlığının artırılması prensibi ile üst yapılar tasarlanmıştır.

Geofoam blok dolguların kullanıldığı yol inşaatlarında, trafik yüklerine ve yol katmanlarının servis ömrü kriterlerine bağlı olarak, ayrıca blok dolguların hizmet ettiği süre zarfında donma-çözünme döngüsünün olumsuz etkilerini önlemek amacı ile toplam esnek üstyapı tabakalarının en az 61 cm kalınlığında uygulanması tavsiye edilmektedir **[Stark vd., 2004a]**.

AASHTO (1993) tasarım yöntemi ile zemin taşıma kapasitesi, trafik yükü, bölgesel iklim koşulları ve kaplama katman özellikleri dikkate alınarak servis kabiliyeti-davranış ilişkisi doğrultusunda kaplama katman kalınlığı değerlendirilir. Servis kabiliyeti, üstyapının belirli bir gözlem anında yeterli bir taşıma ve sürüş kalitesi sağlama kabiliyetidir. Üstyapının servis kabiliyeti ile dingil yükleri tekerrür sayıları ve üstyapıyı teslim eden üstyapı sayısı (SN) arasında kurulan bir bağıntı üstyapının boyutlandırılmasını mümkün kılmaktadır **[KGM, 2008]**. Üstyapı tabaka kalınlıklarının tasarım kriterleri **AASHTO (1993)** rehberinde beş ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar;

- 1.Performans kriterleri: İlk servis kabiliyeti (P_0) ve son servis kabiliyeti (P_t).
- 2.Tasarım değişkenleri: Yolun hizmet süresi, trafik dingil yükü ve tekerrürleri, güvenilirlik ve çevre ve iklim şartları.
- 3.Tasarım için malzeme özellikleri: M_R (esneklik modülü), yol tabakaları için malzeme özellikleri ve katman katsayıları.
- 4.Tabakaların yapısal özellikleri: Drenaj koşulları.
- 5.Tabakaların güçlendirilmesi.

Kriterler belirlendikten sonra tabaka kalınlıkları iki aşamalı olarak hesaplanır. Öncelikle esnek üstyapı tabaka kalınlıklarını belirlemek için trafik analizleri, servis kabiliyetleri, zemin ve altyapı koşullarına bağlı olarak üstyapı sayısı (SN) denklem 3.1 kullanılarak elde edilir. Daha sonra denklem 3.2 kullanılarak tabaka kalınlıkları hesaplanır.

$$\log_{10} T_{8.2} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10} M_R - 8.07 \quad (3.1)$$

burada; $T_{8.2} = P_t$ 'ye erişinceye kadar tekerrür edecek standart dingil (8.2 ton) sayısı

Z_R = standart normal sapma

S_0 = toplam standart sapma

ΔPSI = servis kabiliyetindeki azalma miktarı ($P_0 - P_t$)

SN = üstyapı sayısı (inç)

M_R = esneklik modülü (psi)

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (3.2)$$

burada; a_1, a_2, a_3 = sırasıyla kaplama, temel, alt temel tabakalarının izafi mukavemet katsayıları

D_1, D_2, D_3 = inch cinsinden sırasıyla kaplama, temel alt temel tabaka kalınlıkları

m_j = granüler tabakaların drenaj katsayısı

Temel, alt temel ve taban zemini malzemelerinin izafi mukavemet katsayısı söz konusu üstyapı tabakasının esneklik modülüne bağlı olarak aşağıdaki formülden bulunabilir [KGM, 2008].

$$a_i = 0.0045 \cdot \sqrt[3]{M_{R_i}} \quad (3.3)$$

burada; a_i = söz konusu granüler tabakanın izafi mukavemet sayısı

M_{R_i} = söz konusu granüler tabakanın esneklik modülü, psi

Bu çalışmada prototip esnek üstyapı tasarımında **KGM (2008)** ve **NCHRP 529** raporundaki tasarım değerleri kullanılmıştır. Şehir içi yollardaki **KGM (2008)** standartlarına göre güvenilirlik değeri (R%) %75, $S_0 = 0.40$ ve $P_t = 2,0$ olarak seçilmiştir. Ayrıca **NCHRP 529** raporunda EPS(29) için belirtilen $M_R = 1160$ psi değeri tasarımda kullanılmıştır. **Tablo 3.6**'da tasarımda kullanılan değerler verilmiştir.

Tablo 3.6: Güvenilirlik değeri %75'e göre tasarım değerleri [KGM, 2008].

Tasarım Kriterleri	Değerler
Toplam standart dingil yükü (8.2 ton) tekerrür sayısı ($T_{8.2}$)	1.000.000
İlk servis kabiliyeti (P_0)	4,2
Son servis kabiliyeti (P_t)	2,0
Güvenilirlik değeri ($R\%$)	75
Normal Standart Sapma (Z_R)	- 0,674
Toplam Standart Sapma (S_0)	0,49
EPS(29) Esneklik Modülü (M_R) (psi) (NCHRP 529 Raporuna Göre)	1.160
Bitümlü Temel Tabaka Katsayısı	0,36
Binder Tabaka Katsayısı	0,40
PMT Tabaka Katsayısı	0,15
Alt Temel Tabaka Katsayısı	0,13

Uygulanacak prototip esnek üstyapının şehir içinde geçici servis yolunda imal edileceği düşünüldüğünde toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}$) 1.000.000 olarak tasarım yapılmıştır. $T_{8.2}$ lodometre çalışmaları sonucunda tespit edilen farklı dingil yüklü taşıt sayılarının, şartnamelerde belirtilen sabitlerle 8.2 ton eşdeğer standart dingil tekerrür sayısına çevrilmesi ile bulunur.

Tablo 3.6'deki tasarım değerleri baz alındığında Denklem 3.1 ile üstyapı katsayısı (SN) 5,62 inç bulunmuştur. Denklem 3.2'ye temel tabakasında sadece PMT kullanılacak prototip model tabaka kalınlıkları;

$$8 \text{ cm Asfalt Betonlu Binder} = 3,15 \times 0,40 = 1,26$$

$$12 \text{ cm Bitümlü Temel} = 4,72 \times 0,36 = 1,70$$

$$62 \text{ cm Plent – miks Temel} = 24,41 \times 0,15 = 3,66$$

$$\text{SN} = \mathbf{6,62} \text{ tespit edilmiştir.}$$

$T_{8.2} = 1.000.000$ olarak tasarım yapılan ve geri kazanılmış EPS29 geofoam blokların dolgu tabakasında kullanıldığı ilk prototip esnek üstyapı modeli SN 6,62>5,62 olarak belirlenerek $T_{8.2} = 1.000.000$ için uygun esnek üstyapı kesiti olarak değerlendirilmiştir.

İkinci prototip modelde temel tabakasında PMT+RAP karışımı kullanılacaktır. PMT+RAP karışımı ile tabaka kalınlığı katsayısı ilgili şartnamelerde herhangi bir veri bulunmamaktadır. Gerek **KGM (2008)** gerek ise **KTŞ (2023)** göz önüne alındığında,

alt temel tabaka katsayısının 0,13 ve minimum CBR değerinin %50 olduğu görülmektedir. Bu çalışmada **Tablo 3.5**'te sunulduğu üzere PMT ve %20 RAP karışımının CBR değeri %66 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak PMT-RAP karışımının tabaka katsayısının 0,13 olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür. İkinci prototip model tabaka kalınlıkları;

$$8 \text{ cm Asfalt Betonu Binder} = 3,15 \times 0,40 = 1,26$$

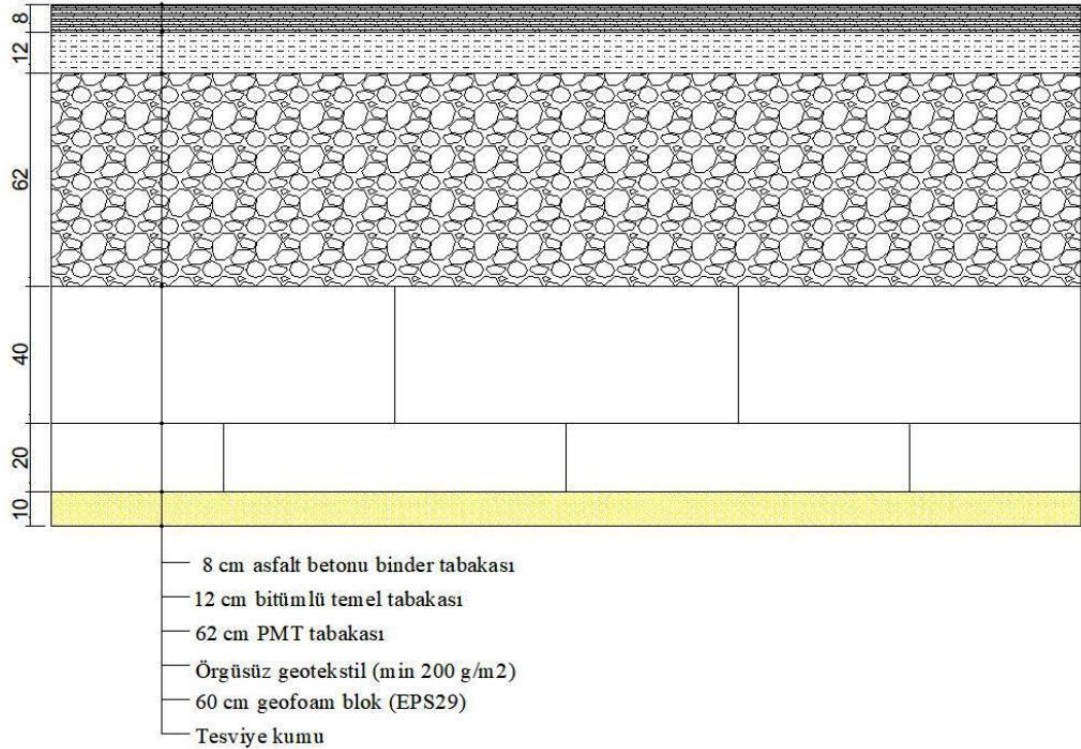
$$12 \text{ cm Bitümlü Temel} = 4,72 \times 0,36 = 1,70$$

$$5 \text{ cm Plent – miks Temel} = 1,97 \times 0,15 = 0,30$$

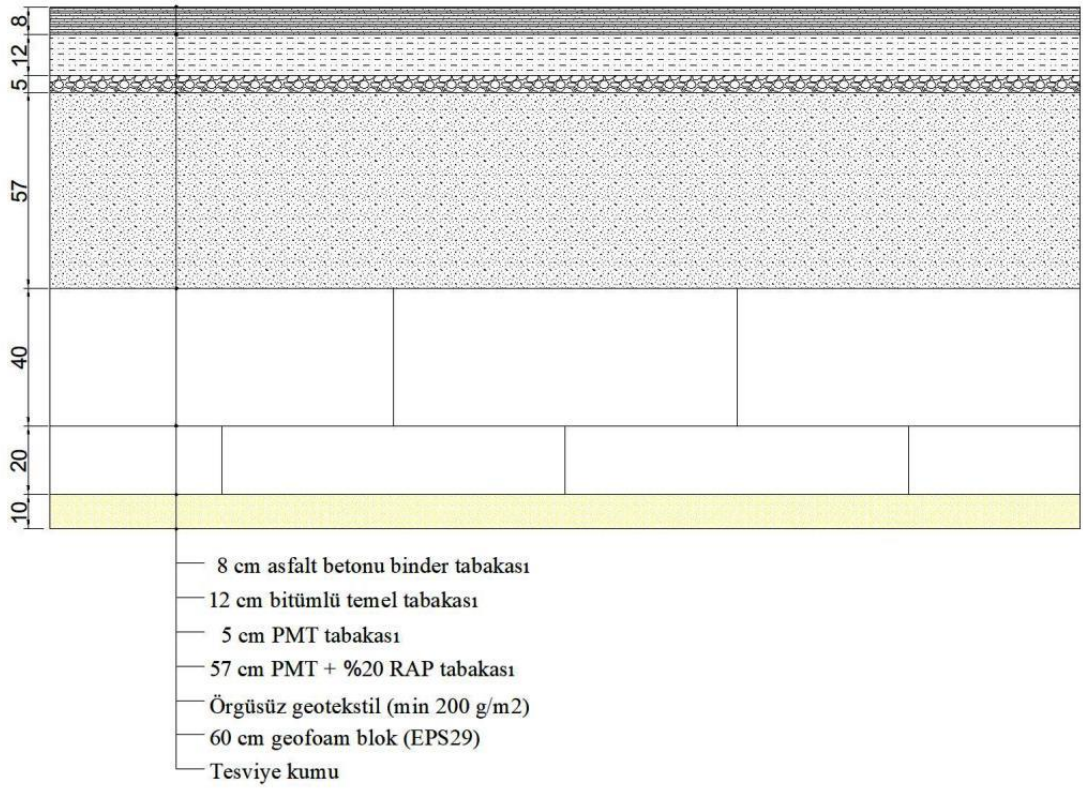
$$57 \text{ cm PMT+RAP} = 22,44 \times 0,13 = 2,92$$

SN = 6,18 tespit edilmiştir.

İkinci prototip esnek üstyapı modeli SN 6,18>5,62 olarak belirlenerek $T_{8,2} = 1.000.000$ için uygun esnek üstyapı kesiti olarak değerlendirilmiştir. Prototip modeller ait en kesitler **Şekil 3.8** ve **Şekil 3.9**'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Prototip üstyapı enkesiti Tip 1 (PMT tabakalı).



Şekil 3.9: Prototip üstyapı enkesiti Tip 2 (PMT+RAP tabakalı).

4. SAHA ÇALIŞMALARI

İBB Altyapı Hizmetleri Şube Müdürlüğü tarafından yapılacak kavşak düzenlemesinde Batı Trakya Caddesi, Kavaklı Dere Caddesi, Mustafa Kemal Caddesi ve Eğitim Vakfı Bulvarı kesişiminde bulunan dönel ada genişletilecektir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Eski ve yeni dönel kavşak.

Bu çalışmada bahse konu proje kapsamında Batı Trakya Caddesi güzergahında yapılacak olan geçici servis yolunun bir bölümünde 60 cm kalınlığında geri kazanılmış geofoam bloklar üzerine 8 metre uzunluğunda ve 3 metre genişliğinde iki farklı prototip esnek üstyapı uygulaması yapılmıştır. İlk modelde temel tabakası olarak PMT+RAP karışımı kullanılırken (Şekil 3.8), ikinci modelde temel tabakası olarak PMT (Şekil 3.9) kullanılmıştır. Kaplama tabakası olarak İBB'nin geçici servis yollarında standart olarak uyguladığı 8 cm binder ve 12 cm bitümlü temel sıcak asfalt kullanılmıştır.



Şekil 4.2: Prototip kesitlerin yerleşim planı.

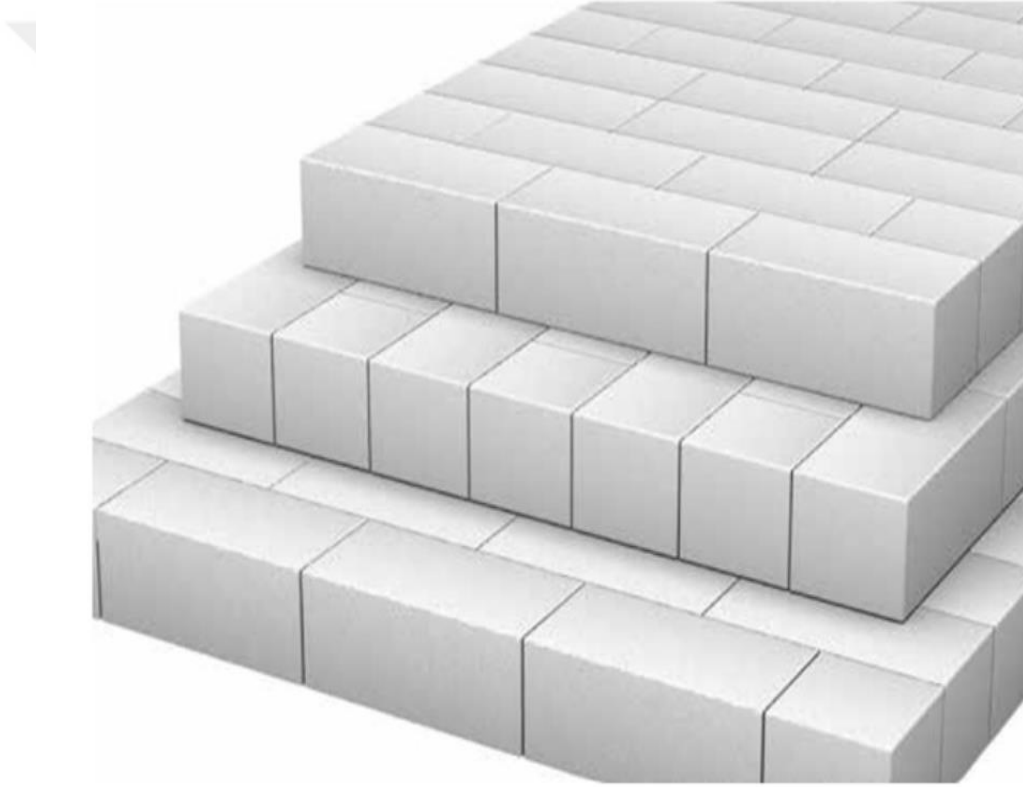
4.1. Prototip Kesitlerin İnşası

Prototip modellerin ilk katmanı tesviye kumundan oluşmaktadır. Kazıcı-yükleyici ile yapılan kazı çalışmaları ile proje taban kotuna ulaşıldıktan sonra 10 cm kalınlığında tesviye kumu erbap usta tarafından titiz bir şekilde her 3 m’de 1 cm tolerans kriterine uyacak şekilde serilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Tesviye kumu imalatı.

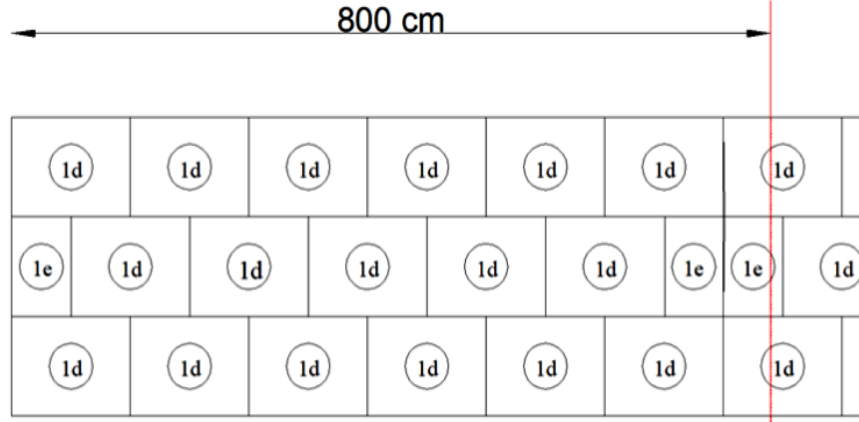
İkinci katman yol dolgu tabakası olup geri kazanılmış geofoam bloklardan teşkil edilecektir. Geofoam blokların uygun bir yerleşim planına göre yerleştirilmesi gerekmektedir. Blokların yerleşim planı uyarınca uzun eksenleri bir alt ve üst blokların uzun eksenine dik olacak şekilde hazırlanmalıdır [Özer 2020; 2021]. Ayrıca geofoam blokların düşeyde derzleri üst üste gelmeyecek şekilde şaşırtmalı olarak yerleştirilmelidirler (Şekil 4.4) [Özer, 2020;2021; Özer and Akay, 2016; 2022a; Özer vd., 2017; Özer and Ekincioglu 2019; Özer and Akınay, 2019; 2022]. Son sırada bulunan geofoam blokların uzun eksen, yol eksenine dik olarak yerleştirilmelidir [Özer 2020; 2021].



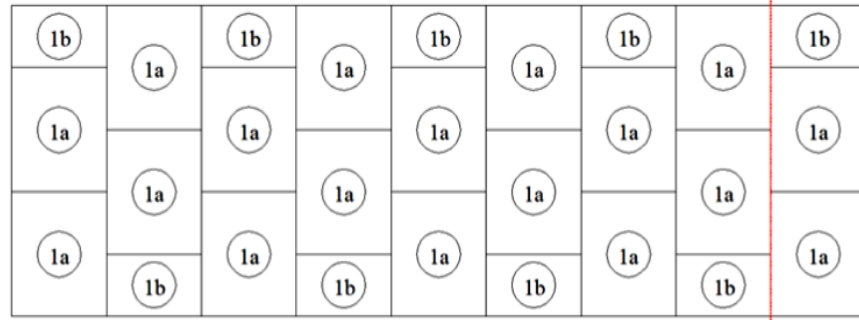
Şekil 4.4: Geleneksel geofoam blok yerleşimi [Özer, 2020].

Bu projede toplam 60 cm kalınlığında geri kazanılmış geofoam blok uygulanmıştır. Tesviye kumu üzerine ilk sıra 20 cm ve ilk sıra üzerine ise 40 cm kalınlığında geofoam bloklar döşenmiştir. İlk sırada 20 cm x 100 cm x 125 cm, ikinci sırada 40 cm x 100 cm x 125 cm ve 40 cm x 62.5 cm x 125 cm boyutlarında bloklar kullanılmıştır (Şekil

4.5). Temel tabakası ve ikinci sıra geofoam bloklar arasında örgüsüz geotekstil (200g/m² ağırlığında) serilmiştir. Uygulamaya ait resimler **Şekil 4.6**'da gösterilmiştir.



Alt sıra geofoam blok yerleşim planı



Üst sıra geofoam blok yerleşim planı

Şekil 4.5: Geofoam blok yerleşim planı.



Şekil 4.6: Geofoam blok imalatları.

Prototip esnek üstyapı modellerindeki farklılık temel tabakası katmanlarında olacaktır. İlk prototip modelde 62 cm kalınlığında PMT tabakası serilip sıkıştırılmıştır. İkinci prototip modelde ise İBB Avrupa Yakası Yol Bakım ve Onarım Müdürlüğüne hizmet ömrünü tamamlanmış asfalt betonundan kazınarak temin edilen ve belediye depo alanından şantiye sahasına getirilen geri kazılmış asfalt agrega, kazıcı-yükleyici marifetiyle beşte bir oranında (%20) PMT ile karıştırılarak karışım hazırlanmıştır. Elde edilen karışım, 2 farklı katmanda olmak üzere, 57 cm kalınlığında serilip sıkıştırılmıştır. RAP-PMT katmanının üzerine kesitin geri kalan son 5cm'lik kısmında PMT finisher vasıta ile serilerek sıkıştırılarak temel tabakası imalatı tamamlanmıştır (Şekil 4.7).



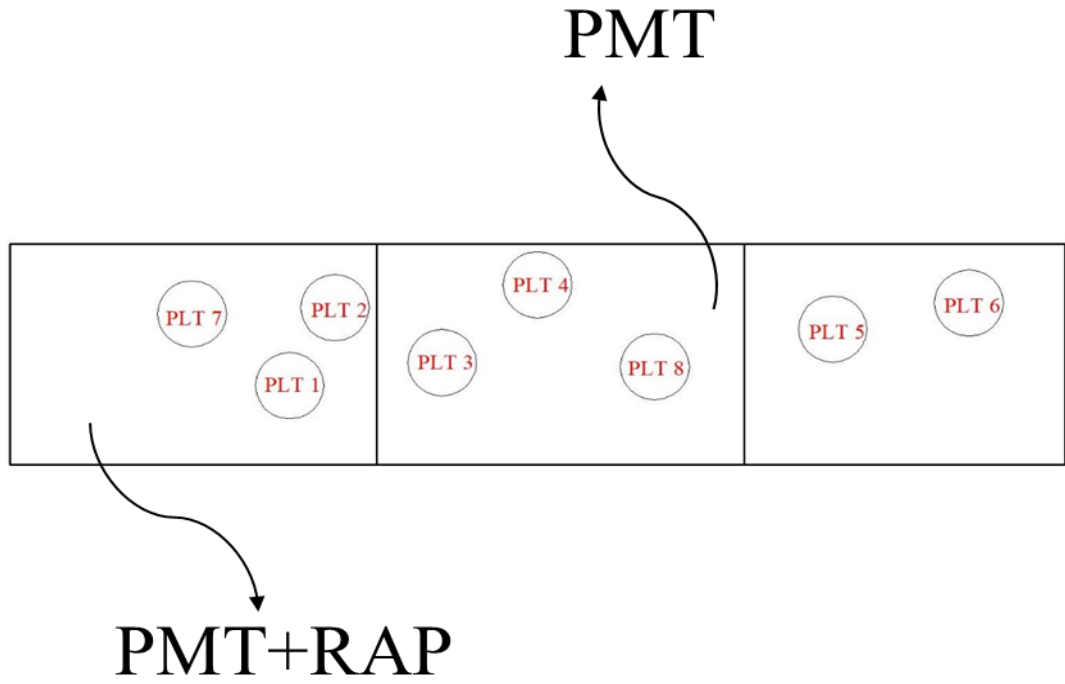
Şekil 4.7: PMT tabakası imalatları.

4.2. PLT Deneyinin Yapılması

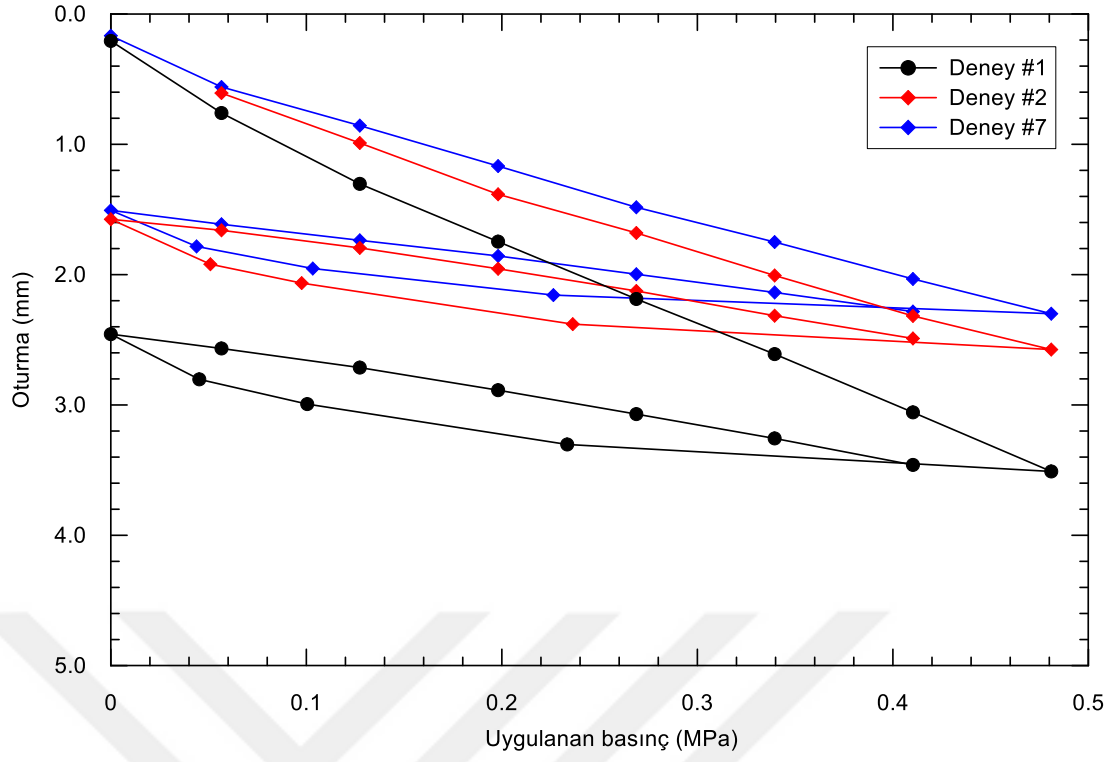
Sıkıştırılmış temel tabakasının tamamlanmasından sonra gerilme/deplasman davranışını belirlemek üzere **DIN-18134 (2012)** standartları uyarınca PLT deneyi yapılmıştır. Test ile deformasyon modülü (E_{v2}) hesaplanarak zemin sıkışma eforu (E_{v2}/E_{v1}) kontrol edilmiştir. Testlerde 30 cm çapında ve 2,5 cm yüksekliğinde rijit plaka kullanılmıştır. Yükler plakalara hidrolik kriko aracılığıyla iki döngüde yüklenmiştir. Hidrolik kriko tarafından yüklerin zemine aktarılması için dağıtma kirişi olarak kamyonun arka aksı kullanılmıştır (**Şekil 4.8**). İlk yükleme-boşaltma döngüsünde, 1 kN, 2 kN, 4 kN, 6 kN, 8 kN, 10 kN, 12 kN, 14 kN, 16 kN, 18 kN, 20 kN, 16 kN, 12 kN, 8 kN, 4 kN ve 0 kN düşey yükler etkiltilmiş ve zemindeki deformasyonlar ölçülmüştür. İlk döngüden sonra ikincil düşey yükler 4 kN, 8 kN, 12 kN ve 16 kN zemine etkiltilmiştir. Bu işlem üç farklı noktada altı defa tekrarlanmıştır (**Şekil 4.9**). Rijit plaka üzerine 120° açıyla yerleştirilmiş üç adet komparatör ile düşey oturmalar ölçülmüştür. Üç komparatördeki değerlerin ortalamaları kayıta geçirilmiştir. Yükler uygulanmadan önce **DIN-18134 (2012)** standartlarına göre 30 sn süre ile 1kN önyüklemesi yapılmıştır. Yükleme sonucu oluşan gerilme/deplasman eğrileri ve deformasyon modülleri **Şekil 4.10-Şekil 4.17** arasında gösterilmiştir.



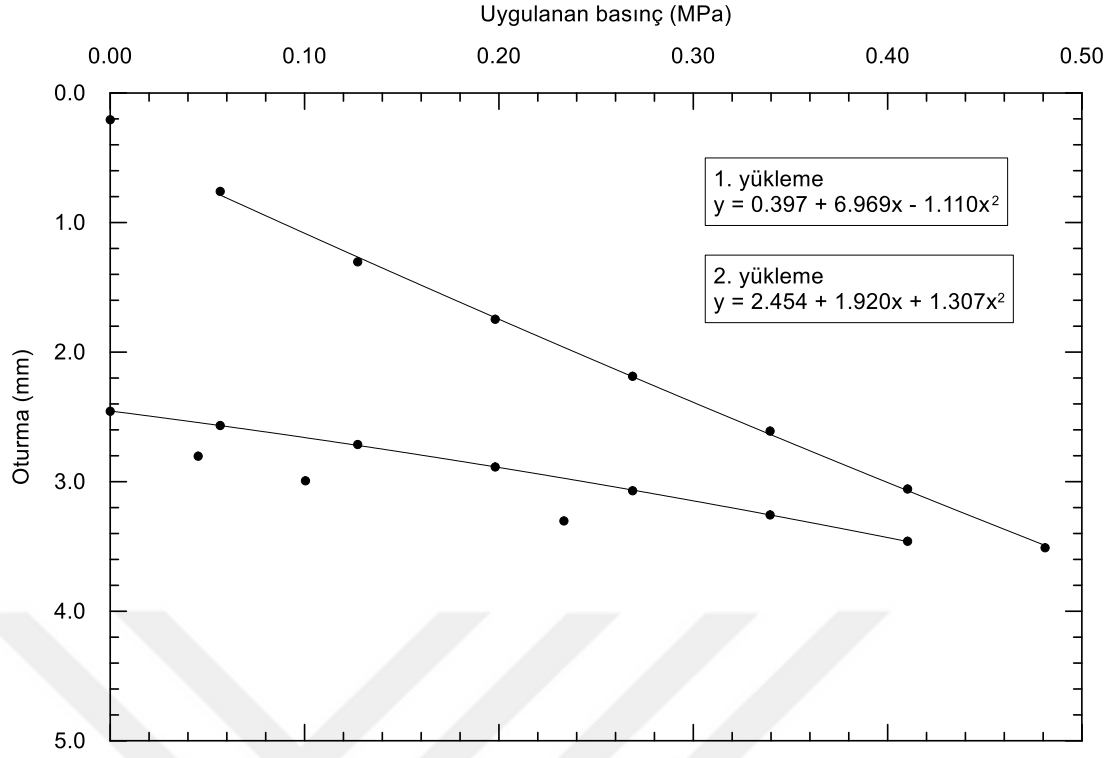
Şekil 4.8: PLT deneyi.



Şekil 4.9: PLT deneyi vaziyet planı.



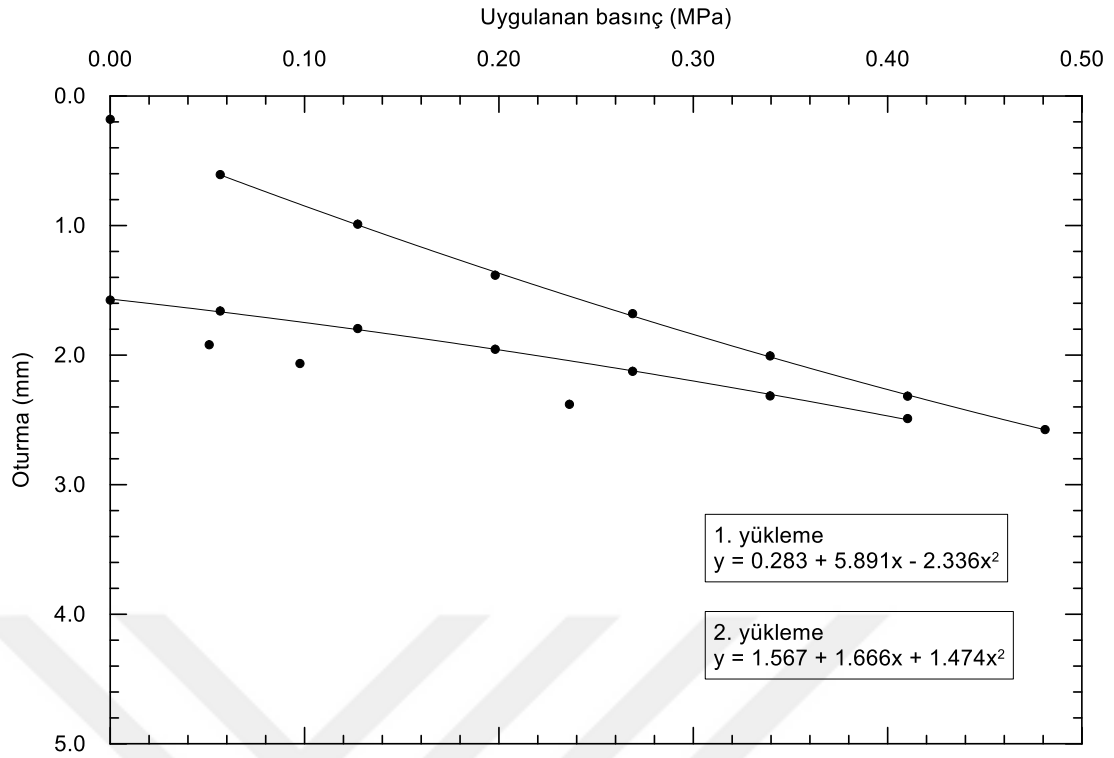
Şekil 4.10: PMT-RAP (karışıklı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri).



Şekil 4.11: PMT-RAP karışıklı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri (Deney#1).

Tablo 4.1: PMT-RAP karışıklı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#1).

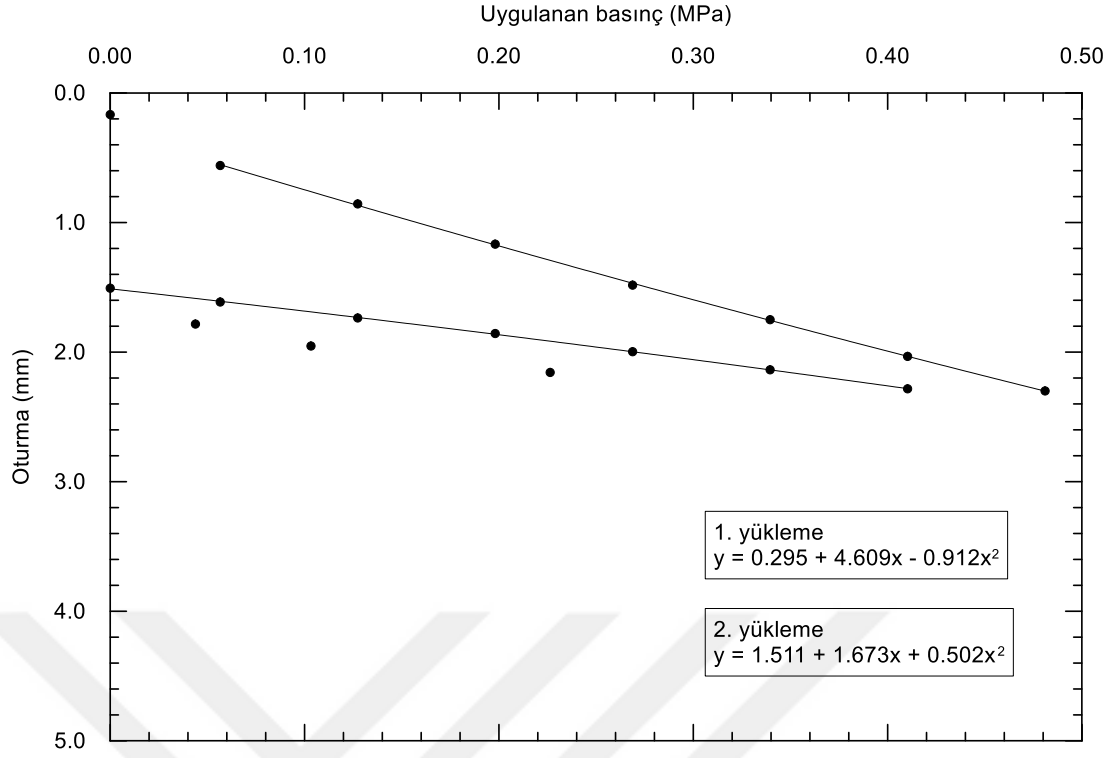
Parametre	Birim	1. yükleme	2. yükleme
σ_{0max}	MN/m ²	0,48	0,41
a_0	mm	0,397	2,454
a_1	mm/MN/m ²	6,969	1,920
a_2	mm/MN ² /m ⁴	-1,110	1,307
$E_v = \frac{1.5 \times r}{(a_1 + a_2 \times \sigma_{0max})}$	MN/m ²	35,0	91,6
$\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$	-	2,62	



Şekil 4.12: PMT-RAP karışıklı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri (Deney#2).

Tablo 4.2: PMT-RAP karışıklı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#2).

Parametre	Birim	1. yükleme	2. yükleme
σ_{0max}	MN/m ²	0,48	0,41
a_0	mm	0,283	1,567
a_1	mm/MN/m ²	5,891	1,666
a_2	mm/MN ² /m ⁴	-2,336	1,474
$E_v = \frac{1.5 \times r}{(a_1 + a_2 \times \sigma_{0max})}$	MN/m ²	47,2	99,1
$\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$	-	2,10	

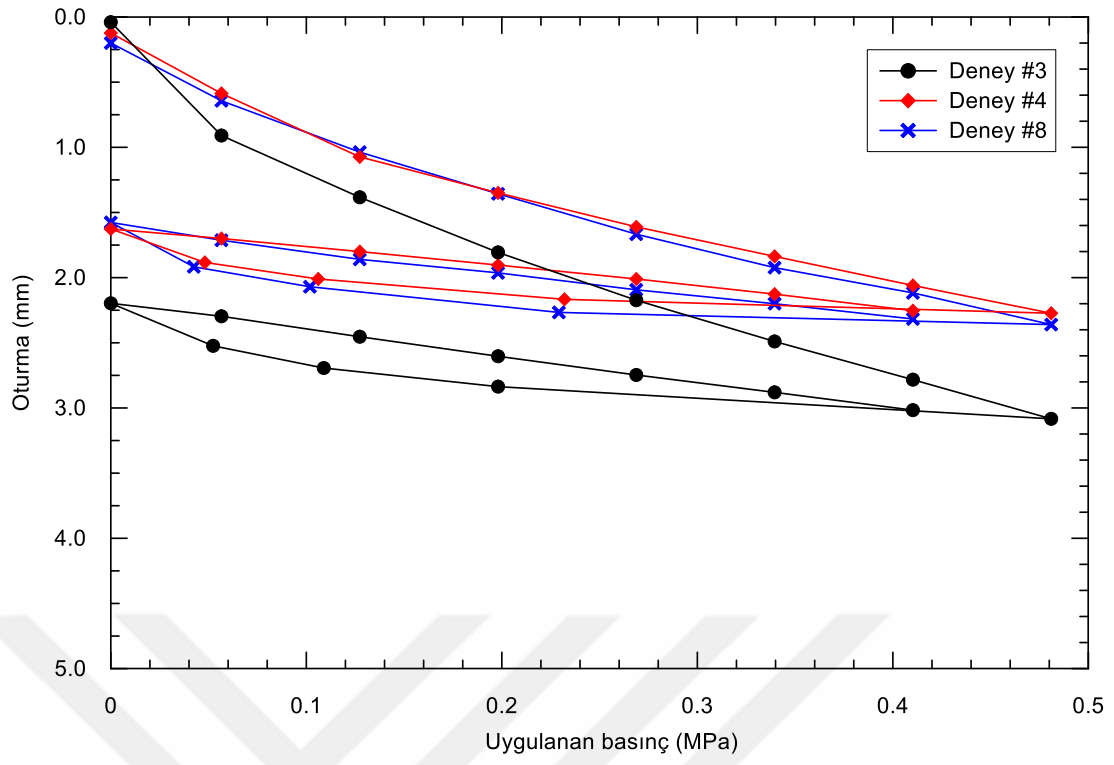


Şekil 4.13: PMT-RAP karışıklı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri (Deney#7).

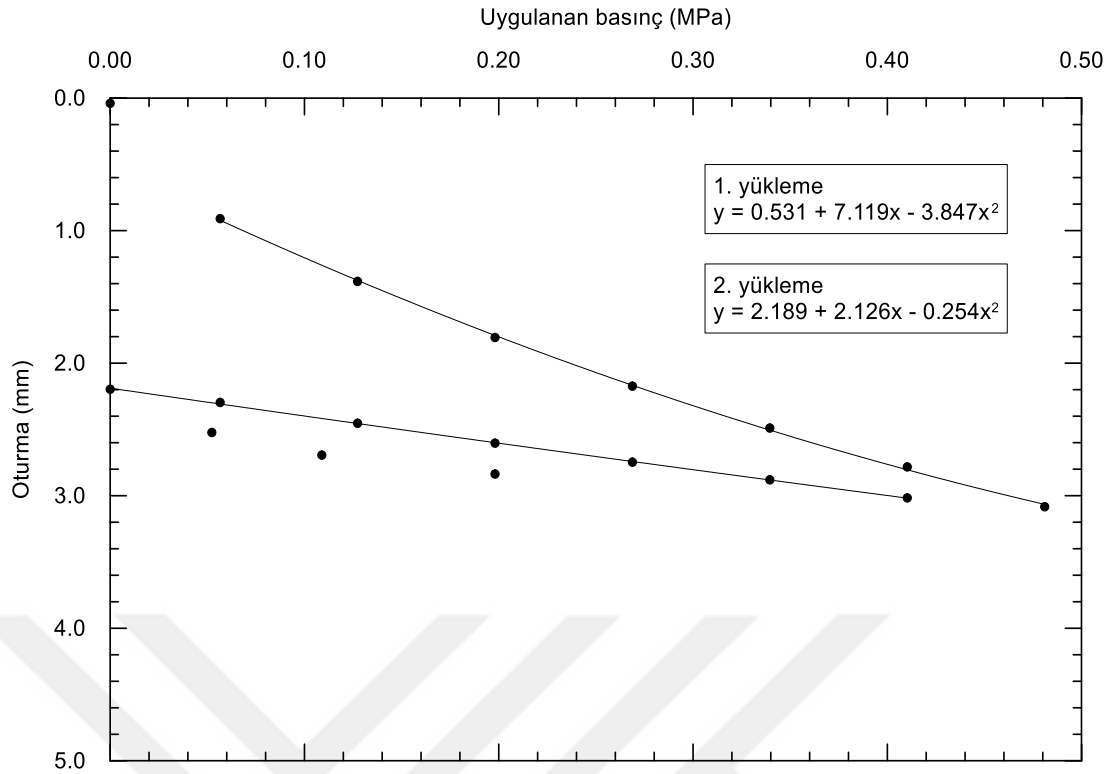
Tablo 4.3: PMT-RAP karışıklı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#7).

Parametre	Birim	1. yükleme	2. yükleme
σ_{0max}	MN/m ²	0,48	0,41
a_0	mm	0,295	1,511
a_1	mm/MN/m ²	4,609	1,673
a_2	mm/MN ² /m ⁴	-0,912	0,502
$E_v = \frac{1.5 \times r}{(a_1 + a_2 \times \sigma_{0max})}$	MN/m ²	54,0	119,8
$\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$	-	2,22	

Tablo 4.3: PMT-RAP karışıklı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#7).



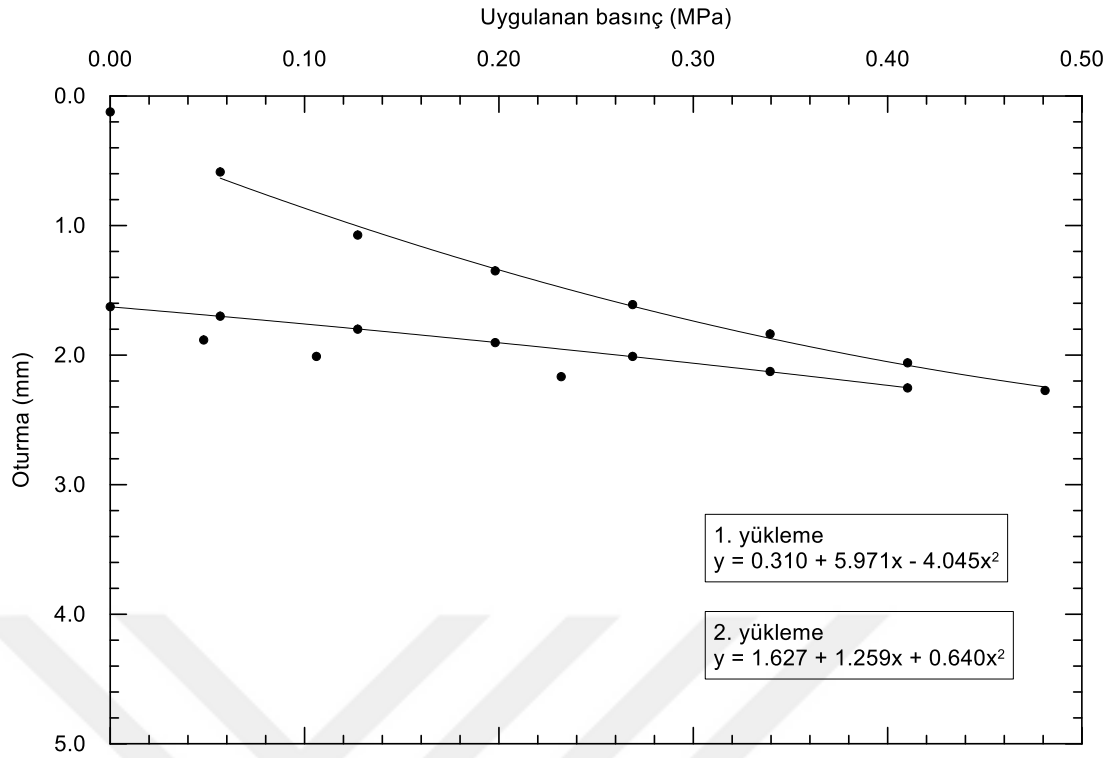
Şekil 4.14: PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri.



Şekil 4.15: PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri (Deney#3).

Tablo 4.4. PMT tabakalı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#3).

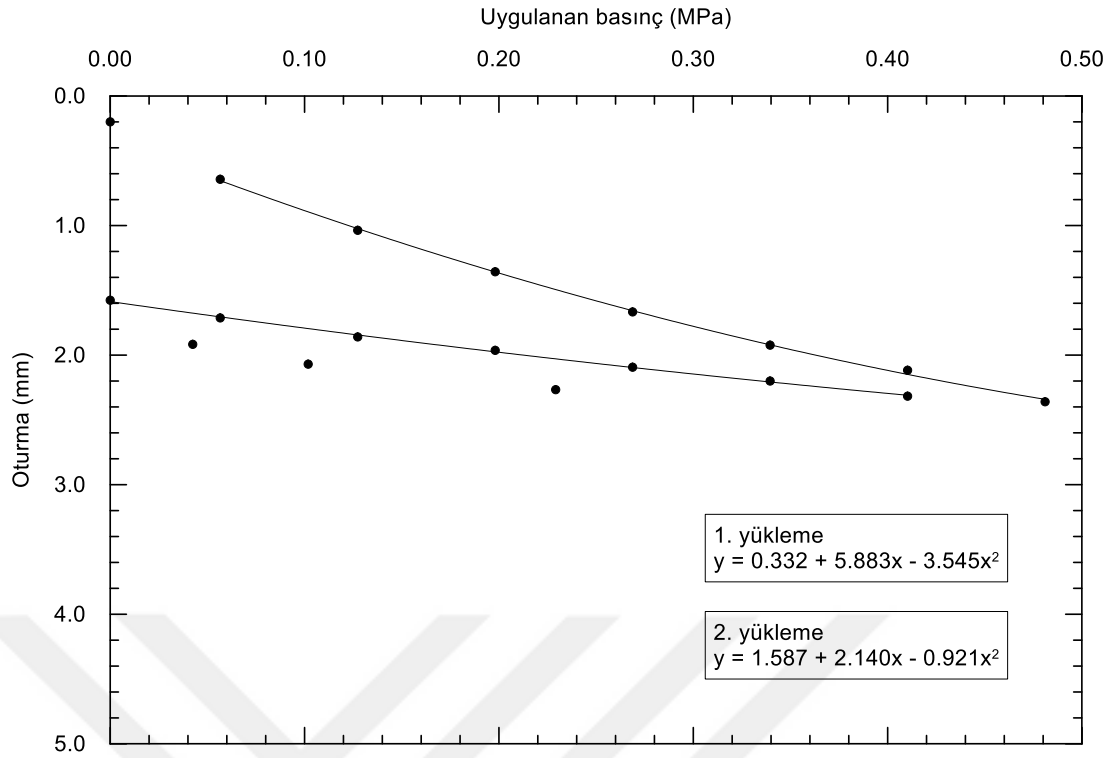
Parametre	Birim	1. yükleme	2. yükleme
σ_{0max}	MN/m ²	0,48	0,41
a_0	mm	0,531	2,189
a_1	mm/MN/m ²	7,119	2,126
a_2	mm/MN ² /m ⁴	-3,847	-0,254
$E_v = \frac{1.5 \times r}{(a_1 + a_2 \times \sigma_{0max})}$	MN/m ²	42,7	111,3
$\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$	-	2,61	



Şekil 4.16: PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri (Deney#4).

Tablo 4.5. PMT tabakalı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#4).

Parametre	Birim	1. yükleme	2. yükleme
σ_{0max}	MN/m ²	0,48	0,41
a_0	mm	0,310	1,627
a_1	mm/MN/m ²	5,971	1,259
a_2	mm/MN ² /m ⁴	-4,045	0,640
$E_v = \frac{1.5 \times r}{(a_1 + a_2 \times \sigma_{0max})}$	MN/m ²	55,9	147,8
$\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$	-	2,65	



Şekil 4.17: PMT tabakalı prototip kesite ait basınç/oturma eğrileri (Deney#8).

Tablo 4.6. PMT tabakalı prototip kesite ait DIN 18134-300 Standartına göre belirlenen deformasyon modülleri (Deney#8).

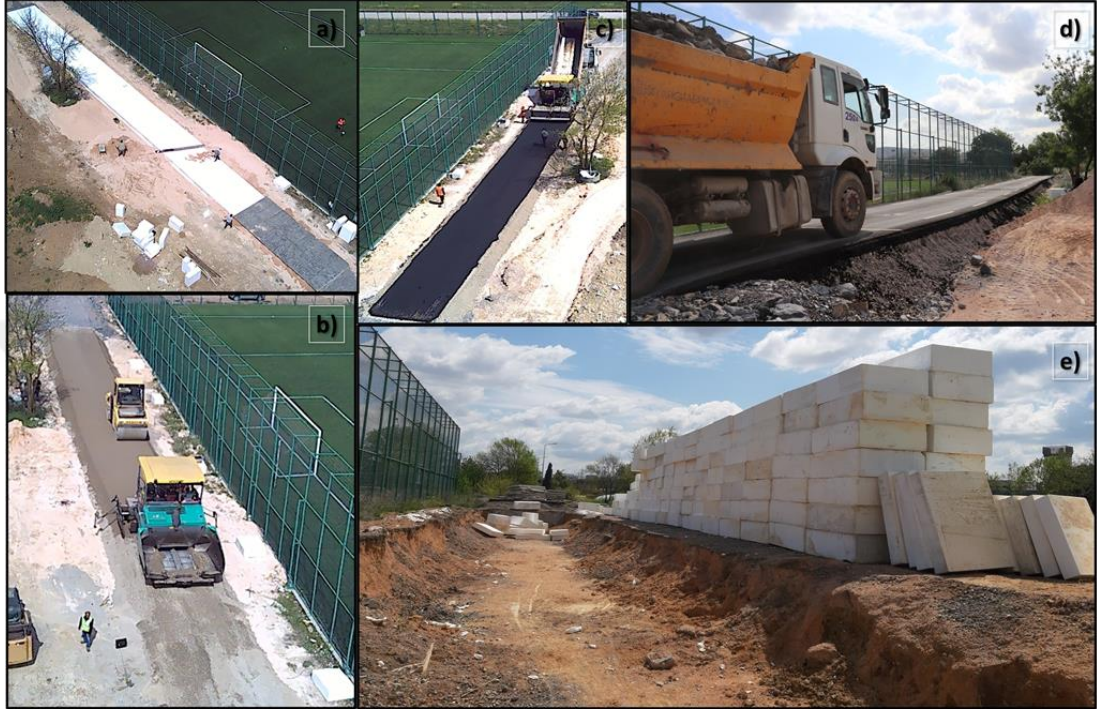
Parametre	Birim	1. yükleme	2. yükleme
σ_{0max}	MN/m ²	0,48	0,41
a_0	mm	0,332	1,587
a_1	mm/MN/m ²	5,883	2,140
a_2	mm/MN ² /m ⁴	-3,545	-0,921
$E_v = \frac{1.5 \times r}{(a_1 + a_2 \times \sigma_{0max})}$	MN/m ²	53,9	127,7
$\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$	-	2,37	

Tablo 4.7: Plaka yükleme deneyi test sonuçları.

Deney No/Referans	Kesit Tipi	E_{v1}	E_{v2}	Ortalama E_{v2}	$\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$
		[MPa]	[MPa]		[-]
#1	57 cm (RAP+PMT) + 5 cm PMT	35,0	91,6	103,50	2,62
#2	57cm (RAP+PMT) + 5 cm PMT	47,2	99,1		2,10
#7	57 cm (RAP+PMT) + 5 cm PMT	54,0	119,8		2,22
#3	62 cm PMT	42,7	111,3	128,93	2,61
#4	62 cm PMT	55,9	147,8		2,65
#8	62 cm PMT	53,9	127,7		2,37
Büyükaslan [2024]	62 cm PMT	34,5	113,5	113,5	3,29

Tablo 4.7'deki plaka yükleme deneyi test sonuçları incelendiğinde, deformasyon modülünün PMT tabakasında PMT+RAP karışım tabakasına oranla daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. PLT deneylerinden elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, geleneksel PMT tabaka rijitliğinin, %20 oranında RAP karışımı PMT tabaka rijitliğinden yaklaşık %25 mertebesinde yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bir başka deyişle, RAP geleneksel PMT malzemesine RAP karışımı tıpkı CBR mukavemetinde olduğu gibi deformasyon modülünü de olumsuz etkilemektedir. Ayrıca **Büyükaslan (2024)** geofoam blokları çeşitli konfigürasyonlarda esnek üstyapı modelleri ile yol dolgusu olarak kullanmış ve hızlandırılmış yol testi (APT) ile performansını incelemiştir. Segmentlerin bir tanesinin temel tabakasını bu tezle bağdaşık olarak 62 cm kalınlığında PMT olarak inşa etmiş ve bu tezdeki şartlar ile PLT deneylerini yapmıştır. APT'de tek tip araç, 37,7 ton ağırlığında yüklü 3 akslı kamyon kullanmıştır. 1299 adet geçiş sonrasında hesaplanan ESAL değeri yaklaşık olarak 21.000 olarak tespit etmiştir (**Şekil 4.18**). **Tablo 4.7'**deki veriler karşılaştırıldığında eşit kalınlıklardaki bu çalışmada yeniden kullanılan geofoam blok üzerindeki PMT tabakası E_{v2} değeri ile ESAL 21.000 değerinde trafik yüküne maruz kalmış bakir geofoam blok kullanılarak inşa edilen üzerindeki PMT tabakası E_{v2} değerinin **Büyükaslan (2024)** ile aynı mertebelerde olduğu ölçülmüştür. Geofoam blokların ESAL 21.000 trafik yükü altında şekil değiştirme davranışının Bölüm 2.2.2.2'de detaylıca bahsedilen ve **Şekil 2.6**'da belirtilen elastik sınırlar içerisinde

kaldığı (1. Bölge) belirtilmiştir [Büyükaslan, 2024]. Sonuç olarak, servis yükleri altındaki davranışı kayıt altına alınmış ve servis ömrü sonunda deformasyon karakteristiği elastik bölgede kalmış blokların yeniden kullanımında benzer deformasyon modülleri verdiği sonucuna ulaşılmıştır (Tablo 4.7).



Şekil 4.18: a) Geofoam blokların döşenmesi, b) Temel tabakası imalatı, c) BSK imalatı, d) APT uygulaması [Büyükaslan, 2024], e) Geofoam blok sökümü.

E_{v2}/E_{v1} oranı, PLT deney etki alanında kalan bölgedeki granüler temel tabakasının sıkışma oranı olarak adlandırılır [Wersäll et al., 2018; Lehman et al., 2020; Virsis et al., 2021]. E_{v2}/E_{v1} oranı 1 ile 6 arasında sonuçlar verebilir [Minažek and Mulabdic, 2014; Wersäll et al., 2018; Virsis et al., 2021]. Deney sonuçlarına bakıldığında E_{v2}/E_{v1} oranı 2,10 ile 2,65 arasında değişmekte olup ortalama 2,43 olarak tespit edilmiştir. Her iki tip kesitte de benzer bulgular saptanmıştır. Alman standartlarına göre relatif kompaksiyon değerinin 98%'den büyük olduğu durumlar için E_{v2}/E_{v1} oranının 2,5'tan küçük olması önerilmektedir [FGSV, 2009]. Sahada erişilen serme-sıkıştırma performansları bu kriteri sağlamıştır.

4.3. Asfalt Kaplama Tabakalarının Oluşturulması

Plaka yükleme deneyinin ardından İBB yüklenicisi tarafından prototip kesitler dışında kalan servis yolu tabakaları, projesi uyarınca oluşturulmaya başlanmıştır (**şekil 4.19**). Servis yolu kesiti 25 cm alt temel, 20 cm PMT, 12 cm bitümlü temel ve 8 cm binder tabakalarından oluşmaktadır.



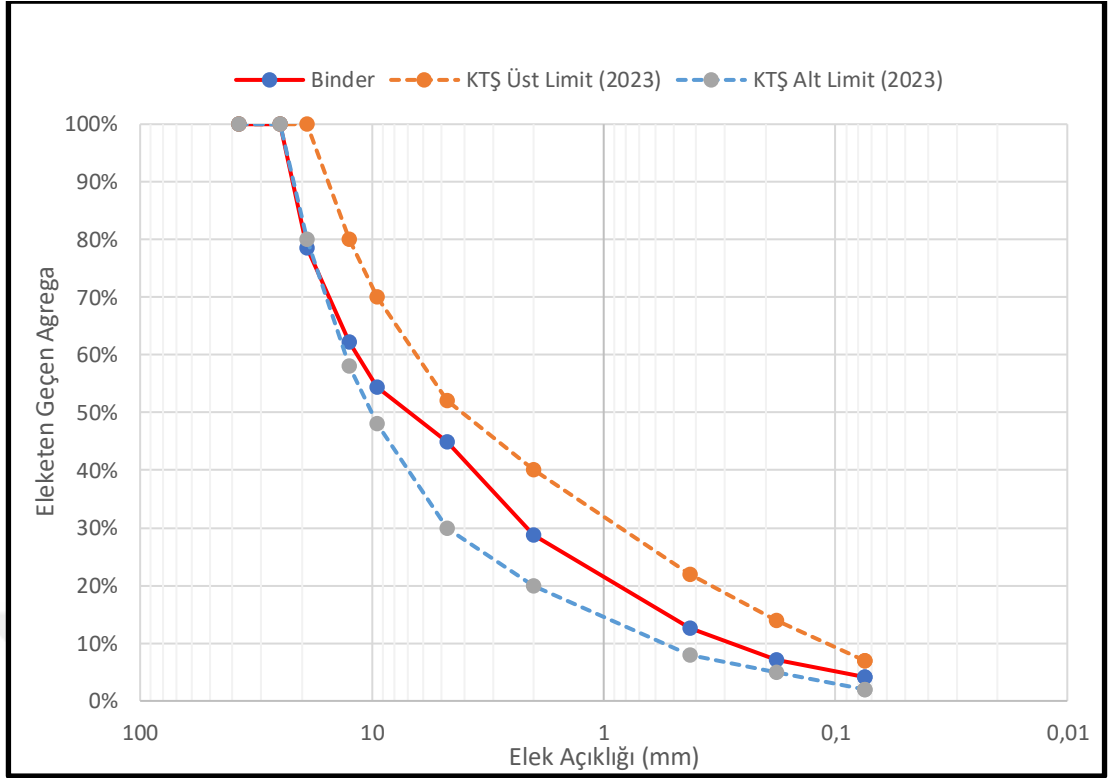
şekil 4.19: Asfalt tabakaları imalatı.

Prototip imalatın sıcak asfalt kaplamaları servis yolu projesiyle uyumlu olacak şekilde 12 cm bitümlü temel tabakası ve 8 cm binder tabakası KTş (2023) Kısım 406 ve Kısım 407'ye uygun olarak uygulanmıştır. Asfalt tabakalarından  farklı alandan alınan numuneler test için Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) ulaştırma laboratuvarına gönderilmiştir (**şekil 4.20**).

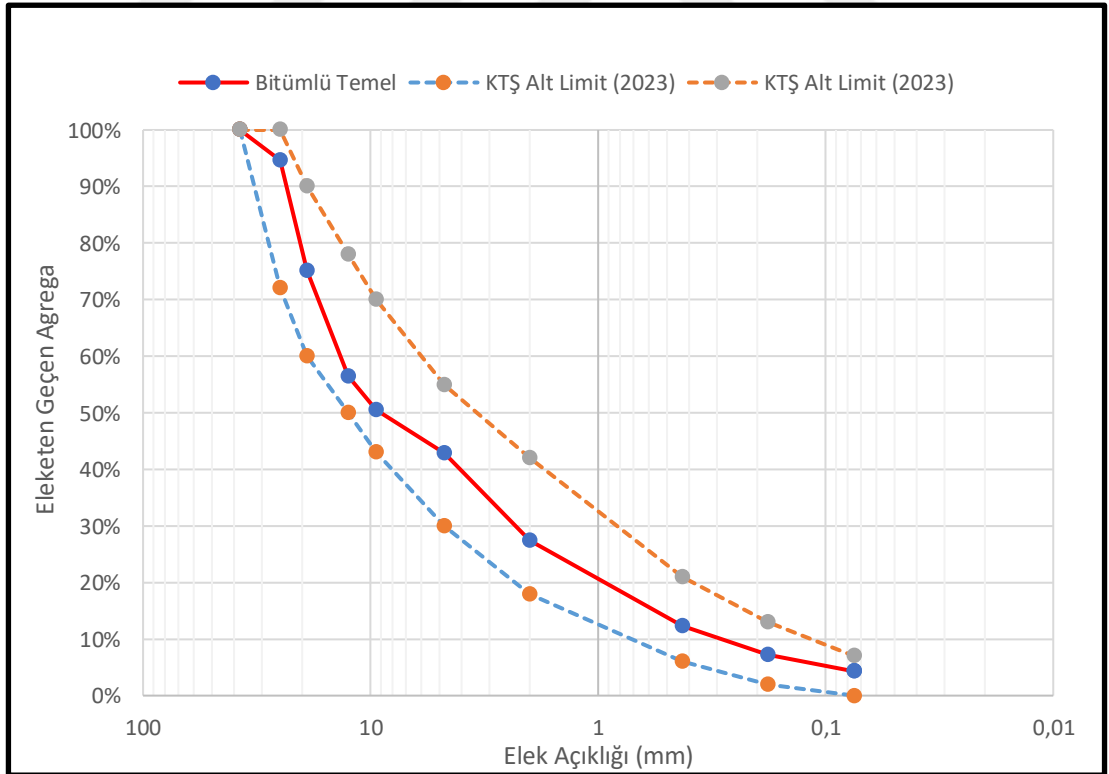


Şekil 4.20: Üç adet asfalt numunesi (yaklaşık 20 cm kalınlığında).

ODTÜ laboratuvarlarında yapılan testlerde, asfalt tabakalarının elek analizi yapılmış bitümlü temel tabakası agrega oranlarının **KTŞ (2023)** Kısım 406 ve binder tabakası agrega oranlarının **KTŞ (2023)** Kısım 407 gradasyon limitleri içerisinde kaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar **Şekil 4.21** ve **Şekil 4.22**'de gösterilmiştir. Ayrıca yapılan testler sonucunda her iki tabakanın bitüm yüzdesi, hava boşluk oranı ve Marshall stabilitesi tespit edilmiş olup, **Tablo 4.8**'de gösterilmiştir. Her iki tabaka içinde bitüm oranı, hava boşluk oranı ve Marshall stabilitesi değerlerinin standart değerleri sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.21: Binder tabakası elek analizi sonuçları.



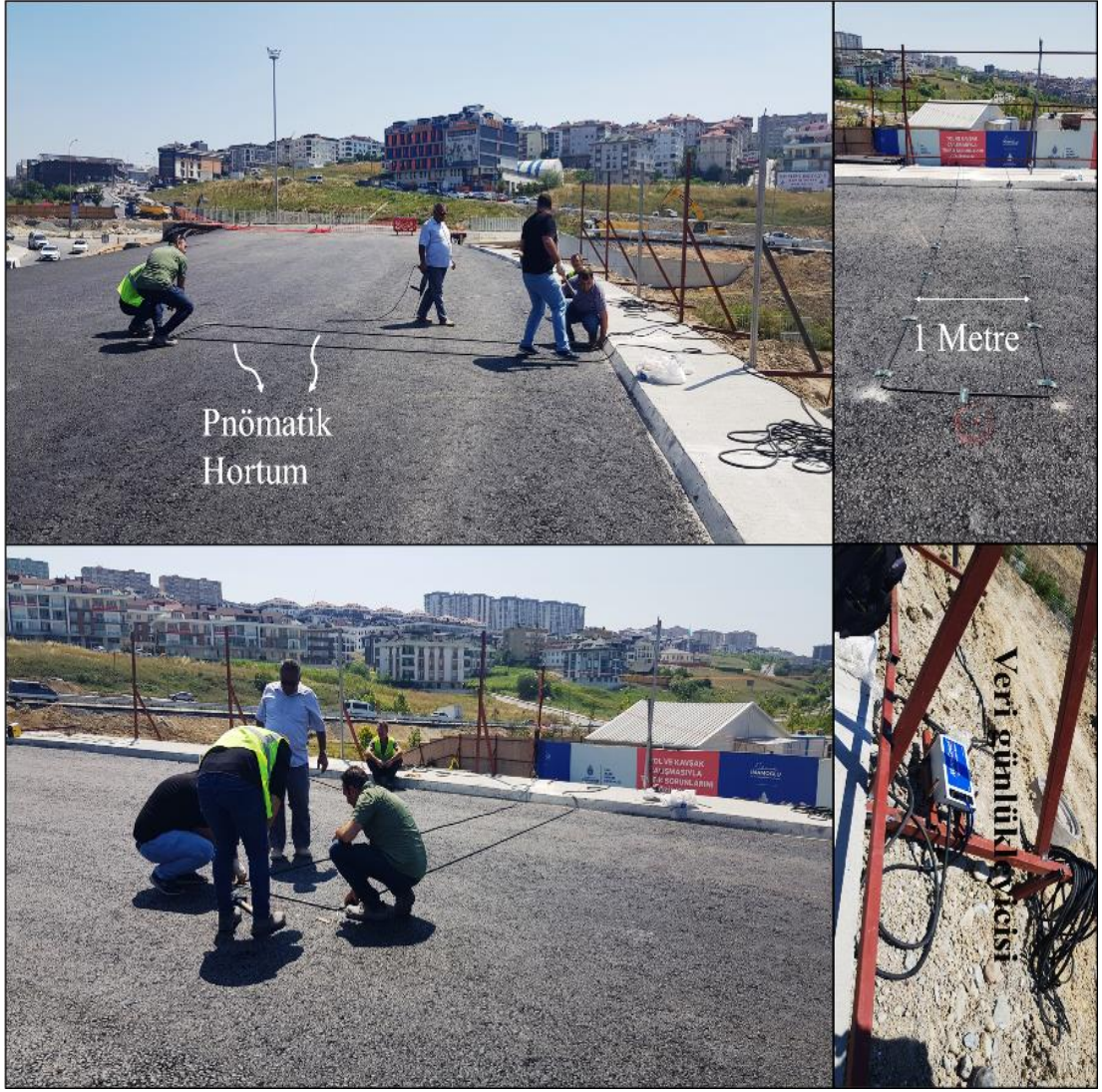
Şekil 4.22: Bitümlü temel tabakası elek analizi sonuçları.

Tablo 4.8: Asfalt tabakaları KTŞ 2023 ile karşılaştırılmalı deney sonuçları.

Özellikler	Birim	Bitümlü Temel Tabakası		Binder Tabakası	
		Bu çalışma	KTŞ 2023 Limitleri	Bu çalışma	KTŞ 2023 Limitleri
Bitüm Oranı	%	3,9	3,0-5,5	4,49	3,5-6,5
Hava Boşluk Oranı	%	4,28	4-6	5,31	4-6
Marshall Stabilesi	kg.	810,76	min 600	1410,88	min 750

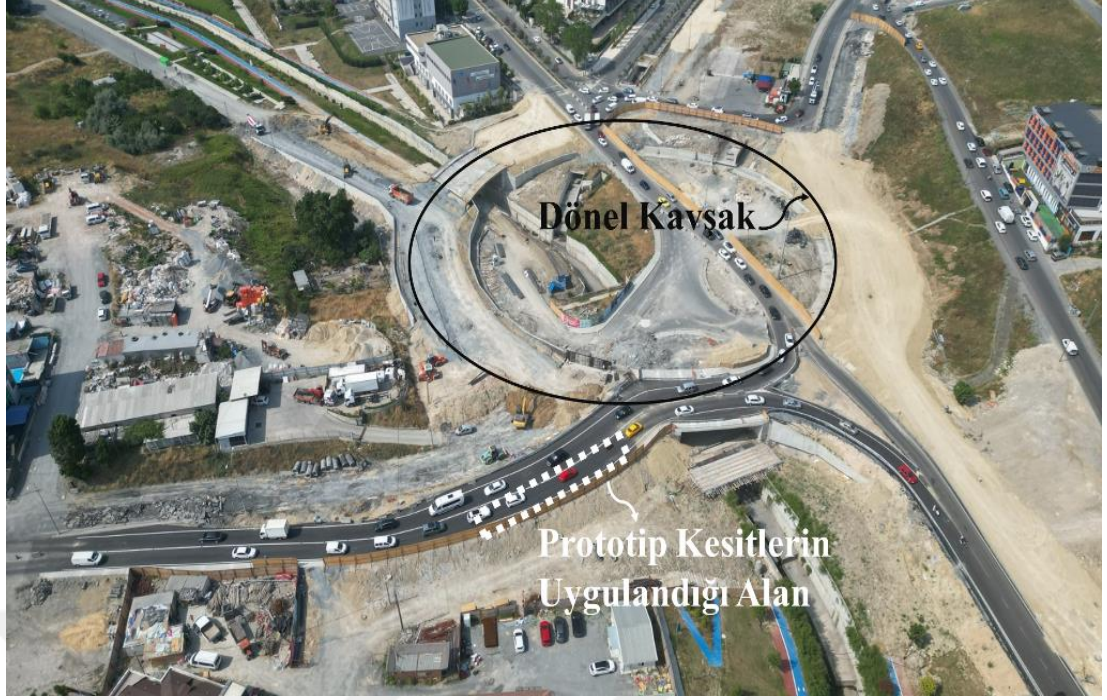
4.4. Trafik Sayım Sisteminin Kurulması ve Yolun Hizmete Açılması

Binder tabakası yüzeyine trafik geçiş sayıları, araç hızları ve araç cinslerini belirlemek amacı ile MetroCount RaodPOT VT model MC5900 araç sayıcı ve sınıflandırıcı trafik izleme sistemi kurmuştur. Bu sistemde taşıt geçişlerinden oluşacak basınç değişimlerini algılayan iki adet pnömatis hortum bulunmaktadır. Hortumlar binder tabakası üzerine bir metre aralıkla, trafik akışına dik olarak, yüzey ile arasında boşluk kalmayacak şekilde gerilerek döşenmiştir. Yüzeye sabitlemek için kablo kelepçeleri ve çivi kullanılmıştır. Hortumların binder tabakası yüzeyi ile irtibat halinde olduğu ve hiçbir boşluk kalmadığı tekrar kontrol edilerek, hortumlar veri günlükleyicisine bağlanmıştır (**Şekil 4.23**).



Şekil 4.23: Trafik izleme sistemi kurulumu.

Trafik sayım sisteminin kurulmasının akabinde, yol şerit çizgileri ve trafik uyarı levha uygulamaları tamamlanarak, geçici servis yolu hizmete alınmıştır (Şekil 4.23).



Şekil 4.24: Geçici servis yolunun hizmete alınması.

10.07.2023 tarihi itibari ile veri günlükleyicisine, trafik verileri kaydedilmeye başlamıştır. 10.07.2023 – 30.08.2023 tarihleri arasındaki 51 günlük süre içinde geçici servis yolunu kullanan taşıtların günlük verileri kaydedilmiştir. **Şekil 4.25** ve **Tablo 4.9**'daki veriler ışığında 51 günlük süre zarfında toplam 186252 adet araç servis yolunu kullanmıştır. Bu da günlük 3652 adet/güne tekabül etmektedir. Geçişlerin %90,77'si temmuz ayında (21 günlük süre içerisinde) yapılmıştır. Geçen araçların %90'luk kısmını otomobiller oluşturmuş olup araçların ortalama hızları 29,34 km/saat olarak tespit edilmiştir.



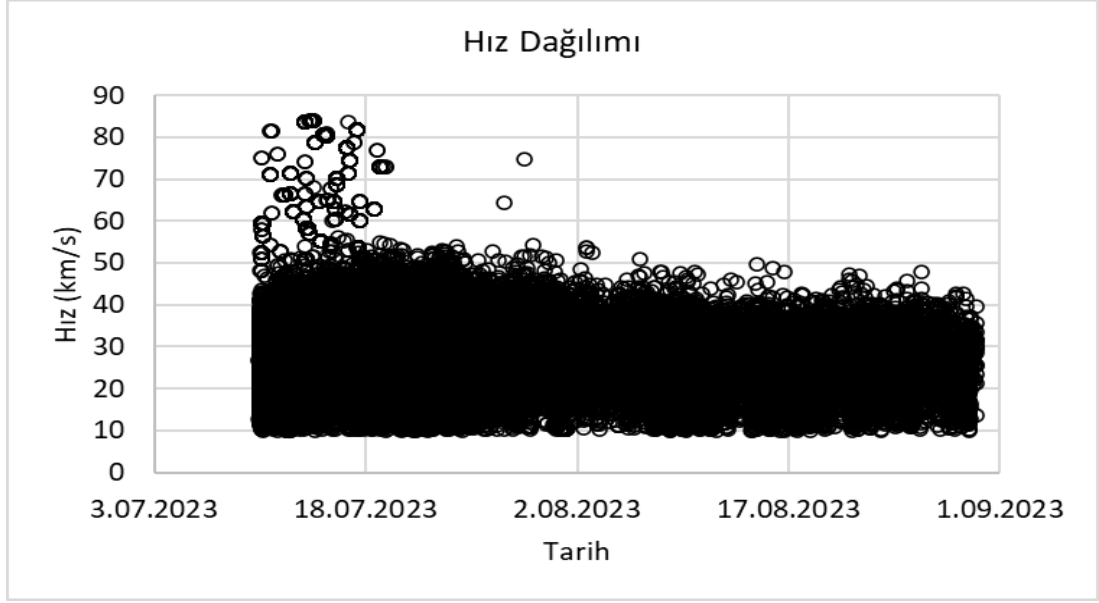
Şekil 4.25: Günlere göre saptanan toplam taşıt sayısı.

Tablo 4.9: Taşıt cinsine göre araç veri tablosu.

Taşıt Cinsi	Geçen Taşıt (Ad.)	Geçen Taşıt Yüzdesi (%)	Ortalama Hız (km/saat)
Otomobil	167794	90.09%	29.7
Kamyon	11041	5.93%	26.55
Otobüs	1103	0.59%	18.55
Pikap	4542	2.44%	27.38
Treyler	400	0.21%	25.25
>7 aks	228	0.12%	27.03
Diğer	1144	0.61%	23.44
Toplam	186252	100.00%	29,34

Günlük Ortalama Geçiş $186252/51 = 3652$ adet/gün

Şekil 4.26'daki hız dağılım grafiği incelendiğinde homojen bir dağılım karşımıza çıkmaktadır. Yolu kullanan araçların sadece %3'lük kısmı 40 km/saat hızın üzerinde seyretmiş kalan %97'lik araçların hızları dengeli bir şekilde dağılmıştır.



Şekil 4.26: 10.07.2023-31.08.2023 arası servis yolu kullanımı ve hız dağılım tablosu.

Elde edilen veriler ile toplam dingil yükü tekerrür sayısı **KGM (2008)** tarafından kullanılan denklem ile hesaplanmıştır (Denklem 4.1).

$$T_{8.2} = T_p \times TEF \times \eta / i \quad (4.1)$$

burada; T_p = yoldan geçen toplam trafik sayısı

TEF = taşıt eşdeğerlilik faktörü

η = hesap şeridi faktörü

i = trafik yönü sayısı

TEF ve η değerleri olarak **KGM (2008)**' de bulunan ve **Tablo 4.10** ve **Tablo 4.11**'de belirtilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 4.10: Taşıt eşdeğerlik faktörleri (TEF) [KGM, 2008].

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

Tablo 4.11: Şerit dağıtma faktörü (η) [KGM, 2008].

İki Yöndeki Şerit Sayısı	Şerit Dağıtma Faktörü
2	1,0
4	0,9
6 veya daha fazla	0,8

Tablo 4.9-4.11 verileri kullanılarak 51 günlük $T_{8.2}$ değeri 45.693,58 hesaplanarak **Tablo 4.12**'de gösterilmiştir.

Tablo 4.12: 51 günlük $T_{8.2}$ hesabı.

Taşıt Grubu	Geçiş Sayısı (AD.)	TEF	Trafik Yönü Sayısı (i)	Şerit Dağıtma Faktörü (η)	$T_{8.2}$ (51 GÜN)
Treyler	1772	4,10	1	1	7265,2
Kamyon	11041	2,9	1	1	32018,9
Otobüs	1103	3,2	1	1	3529,6
Orta Yüklü Ticari Taşıt	4542	0,6	1	1	2725,2
Otomobil	167794	0,0006	1	1	100,6764
TOPLAM $T_{8.2}$					45.639,58

Trafik sayımının ardından yolun yüzey deformasyonları **ASTM E1703/E1703M (2015)** uyarınca 3 m uzunluğunda alüminyum bir master yardımıyla belirlenmiştir. Bu amaçla yol üzerinde master kullanılarak kumpas yardımıyla alınan deformasyon okumaları 5 mm – 7 mm mertebelerinde okunmuştur. **KGM (2008)** tarafından izin verilen teker izinin (30 mm) çok altında değerler elde edilmiş olup, inşa edilen kesitler servis ömrü boyunca sürüş konforu ve performansını korumuştur. Geçici servis yolunun tasarımı, düşük hacimli yolları temsil etmek için, 1.000.000 $T_{8.2}$ 'ye göre yapılmakla birlikte servis süresi boyunca (51 gün) toplam $T_{8.2}$ değeri 45.639 olarak gerçekleşmiştir. Tekerlek izlerinin çok düşük olması servis yolunun servis ömrü boyunca tasarım $T_{8.2}$ değerinden çok daha küçük trafik geçişi olması ile ilişkilendirilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, geri kazanılmış geofom blok dolguların üzerine geleneksel iki farklı esnek üst yapı ile prototip esnek üst yapı modelleri uygulanmış ve servis yolu yükleri altındaki davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Geleneksel kesitte PMT, prototip kesitte ise PMT + %20 RAP karışımı aynı kalınlıkta kullanılmıştır. Her iki kesitte 8 metre uzunluğunda, 3 metre genişliğinde ve BSK kalınlığı eşit olarak inşa edilmiştir. Servis yolundan elde edilen 51 günlük veriler sonucunda, ortalama günlük araç geçişinin 3562 adet/gün olduğu tespit edilmiştir. Araç verileri göz önünde bulundurularak yapılan hesap ile yükleme sonunda 45.639 $T_{8.2}$ değerine ulaşıldığı görülmüştür.

Yukarıdaki veriler ışığında ve yapılan ölçümler neticesinde iki farklı üstyapı kesiti ile inşa edilen servis yolunda, trafiğe açık kaldığı hizmet süresi boyunca her iki kesitte de izin verilebilen sınırların çok altında benzer tekerlek izi oturmaları gözlemlenmiştir. PMT + %20 RAP karışımının servis yollarında PMT tabakasına eşdeğer davranış gösterdiği ve alternatif katman olarak kullanılabileceği görülmüştür. Servis ömrü sonunda deformasyon karakteristiği elastik bölgede kalmış geri kazanılmış geofom blokların geçici servis yollarında dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği hem hızlı hem de kolay işçilikleri sebebiyle geleneksel dolgu malzemelerine alternatif olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Ülkemizde yürürlükte bulunan şartnamelerde PMT + RAP oranıyla ilgili herhangi bir standart bulunmamaktadır. Tez kapsamında yapılan laboratuvar deneylerinde %20 oranında RAP ve PMT karışımının % 66 CBR değerine ulaştığı tespit edilmiştir. **KTŞ (2023)**, alt temel standartlarında istenen minimum %50 CBR değerini karşılaması sebebiyle ağırlıkça %20 oranında RAP karışımı başarı ile kullanılmıştır. Aynı şekilde **KGM (2008)** üstyapı projelendirme rehberinde alt temel için 0,13 olarak belirtilen izafi mukavemet katsayısı, S.N hesabında PMT + RAP karışımı içinde başarı ile kullanılmıştır.

PLT deneyinden elde edilen veriler ile ağırlıkça RAP oranının artması ile CBR değerinin düşmesine paralel olarak, tabaka rijitliğinin de azaldığı tespit edilmiştir. Deformasyon modülleri karşılaştırıldığında PMT tabaka rijitliğinin PMT + RAP tabakasına oranla %25 daha fazla olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, geri kazanılabilen ve geri dönüştürülebilen ürünlere ihtiyaç duyulan çağımızda ulaşım sektöründe de bu tip malzemelere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada geri kazanılan geofoam blokların ve geri kazanılmış asfalt agreganın uygun $T_{8.2}$ yükleri altında kent içi servis yolu altyapı ve üstyapısında bir bileşen olarak kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca ağırlıkça % 20 oranında RAP ve PMT karışımının esnek üstyapı tabakası olarak kullanılabileceği ve üstyapı hesabında izafi mukavemet katsayısının 0,13 alınabileceği tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

Aab e R., (1987), “13 Years of experience with expanded polystyrene as a lightweight fill material in road embankments”, Publication No. 61, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, Norway, 21-27.

Aab e R., Bartlett S.F., Du kov M., Frydenlund T.E., Mandal J. N., Negussey D.,  zer A. T., Tsukamoto H., Vaslestad J., (2019), “Geofoam blocks in Civil Engineering applications”, In: Arellano D.,  zer A. T., Bartlett S., Vaslestad J. (eds) Proceedings of 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications (EPS2018), Kyrenia, May 9-11, 2018, 3-38.

Aab e R., Frydenlund, T.E., (2011), “40 Years of experience with the use of EPS geofoam blocks in road construction”, Paper presented at the 4th international conference on geofoam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway, 6–8 June 2011.

AASHTO (1993), “Design of pavement structures”, Standard by American Association of State and Highway Transportation Officials.

AASHTO T 193, (2013), Standard Method of Test for The California Bearing Ratio, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

AASHTO T 180, (2017), Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

Aliyazıcıo lu H., (2016), “Eps-Blok Geofoam’un D z  atı Uygulamalarında Hafif Dolgu Sistemi Olarak Kullanılması” Yüksek Lisans Tezi, Okan Üniversitesi.

AL-AL  F. S., (2016), “Geri Kazanılmış Asfalt Betonu Malzemesinin Aşınma Tabakasında Kullanılabilirli inin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Anasthas N., (2001) “Young’s Modulus by Bending Test and Other Properties of EPS Geofoam Related to Geotechnical Applications.” Master’s Thesis, Syracuse University, Syracuse, New York, USA.

Arapo lu A.S., (2015), “Bozulmuş Asfalt Kaplamaların Geri Dönüşüm Maliyet Analizi ve Optimum Geri Kazanım Mesafesinin Ara tırılması” Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Aravind, K. and Das, A, (2007), “Bituminous pavement recycling”, Department of Civil Engineering IIT Kanpur, INDIA.

ARRA, (2001), Asphalt recycling and reclaiming association, asphalt recycling manual, USA, 269.

ARRA, (2015), Basic Asphalt Recycling Manual, 2nd Edition, USA.

ASTM International, (2008). “D1622/D1622M-14 Standard test method for apparent density of rigid cellular plastics”, West Conshohocken, PA; ASTM International.

ASTM International, (2016), “D1621-16 Standard test method for compressive properties of rigid cellular plastics”, West Conshohocken, PA; ASTM International.

ASTM International, (2019), “C578-19 Standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation”, West Conshohocken, PA; ASTM International.

ASTM International, (2020), “D4439-20 Standard terminology for geosynthetics”, West Conshohocken, PA; ASTM International, doi: <https://doi.org/10.1520/D4439-20>.

ASTM International, (2021), “D6817/D6817M-17 (2021)e1 Standard specification for rigid cellular polystyrene geofoam” West Conshohocken, PA; ASTM International.

Athanasopoulos G.A., Xenaki V.C., (2011), “Experimental investigation of the mechanical behaviour of EPS geofoam under static and dynamic/cyclic loading”. 4th international conferences on geofoam blocks in construction application, Norway.

Atmatzidis D.K., Missirlis E.G. and Chrysikos D.A. (2001), “An investigation of EPS geofoam behaviour in compression”, EPS Geofoam 3rd International Conference, Salt Lake City, Utah, USA.

Bartlett S., Negussey D., Kimble M., Sheeley M., (2000), “Use of geofoam as superlightweight fill for I-15 reconstruction”, Paper presented at the Transportation Research Record 1736. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Beinbrech G., Hillmann R., (1997), “EPS in road construction—current situation in Germany”, *Geotextiles and Geomembranes*, 15(1-3), 39-57.

Bennert, T. and Maher, A., (2005), *The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material (Final Report No: FHWA-NJ 2005-003)*. Washington, DC : Federal Highway Administration.

Birhan A. , (2014), “Effect of confinement and temperature on the behavior of EPS Geofoam”. Master’s Thesis, Syracuse University, New York.

Bleakley, A. M. and Cosentino P. J., (2013), *Improving Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications Through Blending and Chemical Stabilization*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 486, 2335, 20-28.

Buzkan E., (2022), “Geofoam - Granüler Zemin Arayüzünde Kayma Dayanım Özellikleri” Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi.

Büyükaslan A.Y., (2024) “Investigation Of Various Flexible Pavement Configurations For Geofoam Block Highway Embankments By Accelerated Pavement Testing”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

Carswell I., Nicholls J.C., Elliot R.C., Harris J. and Strickland D., (2005), “Feasibility of recycling thin surfacing back into thin surfacing systems”, Transport Research Laboratory (TRL) Report TRL645, Wokingham, U.K.

CDOT (2013), Revision of Sections 304 and 703-Aggregate Base Course (RAP), Colorado Department of Transportation, Denver.

Chun B.S., Lim H.S., Sagong M. and Kim K., (2004), “Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.” *Geotextiles and Geomembranes*, 22(4), pp. 223–237.

Copeland, A., (2011), Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice (Final Report No: FHWA-HRT-11-021). Washington, DC : Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration.

Cosentino P. J., Kalajian E. H., Bleakley A. M., Diouf B. S., Misilo T. J., Petersen A. J. and Sajjadi A. M., (2012), Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications (Final Report No: FL/DOT/BDK81 97702). Florida : Department of Transportation.

Dipova N., Cangir B., (2013) “Doğal Zeminlerin ve Yapay Dolguların Plaka Yükleme Deneyi ile İncelenmesi”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 37 (1), 49-62.

Dong, Q. and Huang, B., (2014), Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 379-383.

Duncan J.M. and Chang C.Y., (1970), “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils.” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), pp. 1629–1653.

Duskov M., Houben L. and Scarpas A., (1998), “Response Investigation and Design Guidelines for Asphalt Pavements with an EPS Geofoam Sub-base” in *Proc. Sixth International Conference on Geosynthetics*, pp. 993-998.

Duškova M. and Waarts P., (2011), “Cost comparison of construction methods for highway widening on compressible subgrade. Proceedings of the 4th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, EPS 2011, Lillestrøm, Norway.

EAPA, (2020) Asphalt in Figures 2020, Annual Report.

Elragi A.F., (2000), “Selected engineering properties and applications of EPS geofoam.” Ph.D. thesis, State University of New York College of Environmental Science and Forestry, New York, United States.

Eriksson L. and Tränk R., (1991), “Properties of expanded polystyrene – laboratory experiments.” Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden.

Ertas M.A., (2019), “Asfalt Beton Aşınma Tabakalarında Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemelerinin Yeniden Kullanım Etkinliğinin ve Performansının Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi.

Fenerci K., Erdoğan M.C. ve Abut Y., (2023), “The economic potentials of reclaimed asphalt pavements (RAP) in urban road infrastructure: a case study of Yalova city”, J. Innovative Eng. Nat. Sci., vol. 3, no. 2, pp. 205-218.

Fırat F., Akbaş F., (2015), “İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm Çalışmalarının Geliştirilmesi ve Ekonomi Üzerine Etkileri”, International Conference On Eurasian Economies SESSION 4D: Çevre ve Enerji 637-644.

Gnip I., Kersultis V., Vaitkus S., Vejelis S., (2004), “Assessment of Strength under Compression of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs”. Materials Science (MEDŽIAGOTYRA), Vol. 10, No.4., pp.326-29.

GeoTech (1999), “GeoTech Terralite” GeoTech System Corporation, VA, USA.
Guthrie, W.S., Cooley, D., Eggett, D.L., (2007), Effects Of Reclaimed Asphalt Pavement On Mechanical Properties of Base Materials, Transportation Research Record, No. 2005, p. 44–52.

Gürer, C., Akbulut, H. ve Kürklü, G., (2004), “İnşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi” 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Bildiriler Kitabı, 28-36.

Güven G. (2020), “An Investigation On The Mechanical Properties And Behavior Of Expanded Polystyrene (Eps) Geofoam” Yüksek Lisans Tezi, Atılım Üniversitesi.

Hoppe E. J., Lane D. S., Fitch G. M., ve Shetty S., (2015), Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use as Road Base and Subbase Material, Final Report No: VCTIR 15-R6, Virginia Center for Transportation Innovation and Research.

Hovarth J.S., (1995), Geofoam Geosynthetic. Hovarth Engineering, P.C, Scarsdale NY, USA.

İpekçi C., Coşkun N., Karadayı T., (2017), “İnşaat Sektöründe Geri Kazanılmış Malzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Açısından Önemi”, Türk Bilim ve Araştırma Vakfı Cilt:10, Sayı:2, Sayfa: 43-50.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), (2008), “Karayolu esnek üstyapılar projelendirme rehberi”, Ankara: T. C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), (2023), “Karayolu teknik şartnamesi (KTŞ) Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler”, Ankara: T. C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), (2023), “Asfalt geri dönüşüm yöntemleri ve uygulama rehberi”, Ankara: T. C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları.

Kaya B., (2011), “Bitümlü Karışımların Geri Dönüşümü, Çevresel Etkileri ve Maliyet Analizi” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Kaya A.G., (2011), “Karayolu Tabakalarında Plaka Yükleme Deneyinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Kubota T., (2011), “Case history of EDO-EPS method in Japan”, Paper Presented at the 4th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, Lillestrøm, Norway, 6–8 June 2011.

Koç Ş., (2015) “Eps Blok Geofoam Ve Kum + Eps Boncuk Karışımlarının Sızmaya Maruz Kumlu Şevlerde Kullanılmasının Laboratuvar Fiziksel Şev Modelleri İle Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Okan Üniversitesi.

Kök B.V., (2019), “Karayolu mühendisliği ve tasarımı”, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., Yayın No. 2428, Mühendislik-Teknik No. 194, ISBN: 978-605-033-039-7, Ekim 2019.

Kulhawy F.H., Duncan J.M., (1972), “Stresses and movements in Oroville dam.” Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE 98 (SM7), pp. 653–665.

Mallick, B.R., (2005), Lecture notes, a 3-day workshop on recycling and other pavement rehabilitation methods, IIT Kanpur, 8-10th February, 58-350.

Mazlum M.S., (2014), “Ekonomik Ömrünü Tamamlamış Asfalt Kaplamaların Kazınarak Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

McGarrah, E. J., (2007), Evaluation of current practices of reclaimed asphalt pavement/virgin aggregate as base course material (Final Report No: WA-RD 713.1). Washington State Department of Transportation.

Miki G., (1996), “Ten-year history of EPS method in Japan and its future challenges.” International Symposium on EPS construction method, Tokyo, Japan.

Momoi T. and Kokusyo T., (1996), “Evaluation of Bearing Properties of EPS subgrade.” in Proc. International Symposium on EPS Construction Method, pp. 94–100.

NCHRP, (2004), Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments, Transportation Research Board of the National Academies.

Negussey D. and Sun M., (1996), “Reducing lateral pressure by geofoam (EPS) substitution.” in Proc. International Symposium on EPS Construction Method, pp. 202–211.

Negussey D., (2007), “Design parameters for EPS geofoam”. Soils and Foundations, 47(1), pp. 161–170.

Neto J.A., Bueno B., (2012), “Laboratory research on EPS blocks used in geotechnical engineering”. Soils Rock 35(2), pp. 169–180.

Özer A.T., (2005), “Estimation of Consolidation and Drainage Properties for Lake Bonneville Clays”, Ph.D. Thesis, University of Utah, SLC, UT, USA.

Özer A.T., (2020), “Geofoam: İnşaat mühendisliğinde EPS blok uygulamaları”, Austrotherm Yalıtım Malzemeleri San. ve Tic. Ltd. Şti. Yayınları, İstanbul. ISBN: 978-605-69266-0-0. Özer A.T., (2021), “Geofoam: the use of geofoam blocks in civil engineering applications”, Austrotherm Yalıtım Malzemeleri San. ve Tic. Ltd. Şti. Yayınları, İstanbul, ISBN: 978-605-69266-1-7.

Özer, A. T., Akay, O. (2016). “Interface shear strength characteristics of interlocked EPS-block geofoam”, Journal of Materials in Civil Engineering, 28 (4). Özer A.T., and Akay O., (2022a), “Interface shear strength of EPS-concrete elements of various configurations”, Journal of Materials in Civil Engineering, Volume: 34, Issue: 6, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004251.

Özer A.T., and Akay O., (2022b), “Investigation of drainage function of geosynthetics for basal reinforced embankments”, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Volume: 22, No.5, 260-278, Doi: 10.1680/jphmg.21.00032.

Özer A.T., Akay O., Usturbelli E., (2017) “Geleneksel geofoam blok otoyol dolgusundaki ara yüzler ve mukavemetleri”, Yedinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, G7 2017, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Mayıs 11-12, pp. 45-56.

Özer A.T., Akınay E., (2017), “Geofoam blok yol dolgusunun kısa vade performansının aletsel gözlemler ışığında değerlendirilmesi”, 7. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Özer A.T., Akınay E., (2019), “First geofoam roadway embankment application of Turkey”, In: Arellano D., Özer A., Bartlett S., Vaslestad J. (eds) Proceedings of 5th 130 International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications (EPS2018), Kyrenia, May 9-11, 2018, pp. 71-80.

Özer A.T., Akınay E., (2024), “Construction of geofoam block embankments atop existing transportation infrastructure”, Geosynthetics International, Volume:31, No. 1, 94-112.

Özer, A. T., Akınay, E. (2022), Geofoam blok otoyol dolgularının imalatlarında sıkça sorulan sorular, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı ZMGM18, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Eylül 29-30, 385-394.

Özer A.T., Akınay E., Türer E., (2018), “Geofoam blokların istinat duvarı uygulamalarında kullanılması”, Uluslararası Katılımlı 7. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı ZMGM17, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Eylül 26-28.

Özer A.T., Danyıldız E., Akınay E., Laçın L., Alioğlu Ö.K., İnallı D., Vanlı S., Dönmez Ç., Özaydın İ.K., Çelik A., İreç U., Tuğral M.A., Marangoz D., Marangoz K., (2017), “Geofoam blokların gömülü boru hatları üzerine inşa edilecek yol dolgularının inşasında kullanılması: Bir vaka analizi”, Yedinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, G7 2017, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Mayıs 11-12, pp. 137-152.

Özer A.T., Ekincioğlu Ö., (2019), “Evaluation of interface shear strength between interlocked geofoam blocks and cast-in-place concrete”, In: Arellano D., Özer A., Bartlett S., Vaslestad J. (eds) Proceedings of 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications (EPS2018), Kyrenia, May 9-11, 2018, 207-218.

Özer A.T., Kiziroğlu S., Akyol Y., Ateş E., (2012), “Yumuşak killi zeminler üzerine inşa edilecek köprü yaklaşım dolguları için zemin iyileştirme metotlarının ekonomik analizi”, Beşinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, G5 2012, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Mayıs 24 – 25, 2012, 165 – 176.

Pamuk İ., (1986), “Bozulmuş Bitümlü Yol Kaplamalarının Yeniden Kullanılması Yönteminin Türkiye’de Uygulanabilirliği” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Papacharalampous G., Sotiropoulos E., (2011), “First time application of expanded polystyrene in highway projects in Greece”, Paper presented at the 4th international conference on geofoam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway, 6–8 June 2011.

Pekyürek Y., Büyükaslan A.Y., Tüfekcioğlu A., Akyol F., Öztürk H.I., Akınay E. ve Özer A.T., (2023), “Plentmiks temel tabakasında kazınmış asfalt kaplama (rap) kullanımının laboratuvar deneyleriyle incelenmesi”, 9. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım, İSTANBUL.

Preber T., Bang S., Chung Y. and Cho Y., (1994), “Behavior of expanded polystyrene blocks.” Transportation Research Record, 1462, pp. 36-46.

Refsdal G., (1987), “EPS – Design considerations”, Publication No. 61, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, Norway, 17-20.

Salıfou, H. L., (2018), Investigation of using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a road sub base and base course material.(Yüksek lisans tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Salta İ., (2010), “Bitümlü Karışımların Geri Dönüşüm Yöntemlerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Sanders R.L., (1996), “United Kingdom Design and Construction Experience with EPS” in Proc. EPS Tokyo Conference, pp. 247-252.

Schaefer V., Stevens L., White D. and Ceylan H., (2008), Design Guide for Improved Quality of Roadway Subgrades and Subbases (Final Report No: IHRB Project TR525). Ames : Iowa Highway Research Board, Iowa Department of Transportation.

Seferoğlu A.G., (2017), “Kazınmış Asfalt Kaplamaların (Rap) Çimento Takviyesi İle Plent-Miks Temel (Pmt) Tabakalarındaki Performanslarının Tekrarlı Yükler Altında İncelenmesi Ve Maliyet Analizi” Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Stark T.D., Arellano D., Hovarth J.S., Leshchinsky D., (2004a), Geofoam applications in the design and construction of highway embankments, NCHRP web document 65 (Project 24-11).

Stark T.D., Arellano D., Hovarth J.S., Leshchinsky D., (2004), Guideline and recommended standart for geofoam applications in highway embankments, NCHRP Report 529, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Sun M.C., (1997), “Engineering behavior of expanded polystyrene geofoam and lateral pressure reduction in substructures”. Master’s Thesis, Syracuse University, Syracuse, New York, USA.

Şahan F., Canpolat U., (2021), “Kazınmış Asfalt Malzemelerin Beton Karışımında İnce Agregaya Yerine İkame Edilmesinin Farklı Ortam Isısı Altındaki Betonların Basınç Dayanımlarına Etkisi”, Araştırma Makalesi Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 15, 307-314.

Taha, R. , Ali G., Basma A. & Al-Turk O., (1999), Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases. 7th Int. Conf. on Low Volume Roads, Transportation Research Board, 1652, 1, (s. 264-269) Washington, DC.

TSE, (2006), İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, TS 1900-1, Türk Standartları Enstitüsü.

TSE, (2006), İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, TS 1900-2, Türk Standartları Enstitüsü.

TSE, (2007), Isı yalıtım mamulleri ve hafif dolgular -İnşaat mühendisliği uygulamaları için – Genleştirilmiş polistirenden (EPS) fabrikasyon mamuller – Özellikler, TS EN 14933, Türk Standartları Enstitüsü.

TSE, (2013), Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Katbek ve inceltirilmiş bitümlü bağlayıcıların tanımlanması için - Genel esaslar, TS EN 15322, Türk Standartları Enstitüsü.

TSE, (2013), Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Katyonik bitüm emülsiyonların tanımlanması için genel esaslar- Genel esaslar, TS EN 13808, Türk Standartları Enstitüsü.

Ünlü F., (2019), “İstanbul’da Kazınmış Asfalt Kaplamaların Binder Tabakasında Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

WashingtonDOT (2012), Standard Specifications for Road, Bridge and Municipal Construction, Washington State Department of Transportation, Olympia.

Wong H. and Leo C.J., (2006), “A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam.” Geotextiles and Geomembranes, 24(5), pp. 299–310.

Yamanaka H., Onuki T., Katsurada H., Kitada I., Kashima K., Takamoto A. and Maruoka M., (1996), “Use of Vertical Wall-Type EPS Elevated Filling (H=15m) for

Bridge Abutment Backfill” in Proc. International Symposium on EPS Construction Method, pp. 223-233.

Yetiz F., (2018), “Akçakale-Ceylanpınar Karayolunda Geofoam Ve Zemin Dolgu Alternatifleri Arasındaki Stabilite Analizi Ve Maliyet Karşılaştırması” Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi.

URL-1 İSFALT <https://isfalt.istanbul/tr/hizmetler/kalite-kontrol/yol-ust-yapisi>
Erişim Tarihi: 28.06.2024

URL-2 Metrocount https://metrocount.com/sites/default/files/2023-05/MetroCount%20-%20RoadPod%20VT_0.pdf



ÖZGEÇMİŞ

Furkan AKYOL, İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Trabzon’da tamamladı. 1999 yılında Trabzon Yomra Fen Lisesinden mezun oldu. 2005 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü bitirdi. 6 aylık özel sektör tecrübesinin ardından 2006-2012 yılları arasında İBB Altyapı Hizmetleri Şube Müdürlüğünde kontrol mühendisi olarak çalıştı. 2012-2015 yılları arasında Zeytinburnu Belediye Başkanlığı Fen İşleri Müdürlüğünde ihale biriminde çalıştı. 2015-2017 yılları arasında İBB Fen İşleri Daire Başkanlığında danışman olarak görev yaptı. 2017-2020 yıllarında İBB Altyapı Hizmetleri Müdür yardımcılığı görevini yürüttü. Halen İBB bünyesinde Yol Bakım ve Onarım Müdürlüğünde çalışmaktadır.



TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Pekyürek Y., Büyükaslan A.Y., Tüfekcioğlu A., Akyol F., Öztürk H.I., Akınay E. ve Özer A.T., (2023), “Plentmiks temel tabakasında kazınmış asfalt kaplama (rap) kullanımının laboratuvar deneyleriyle incelenmesi”, 9. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım, İSTANBUL.

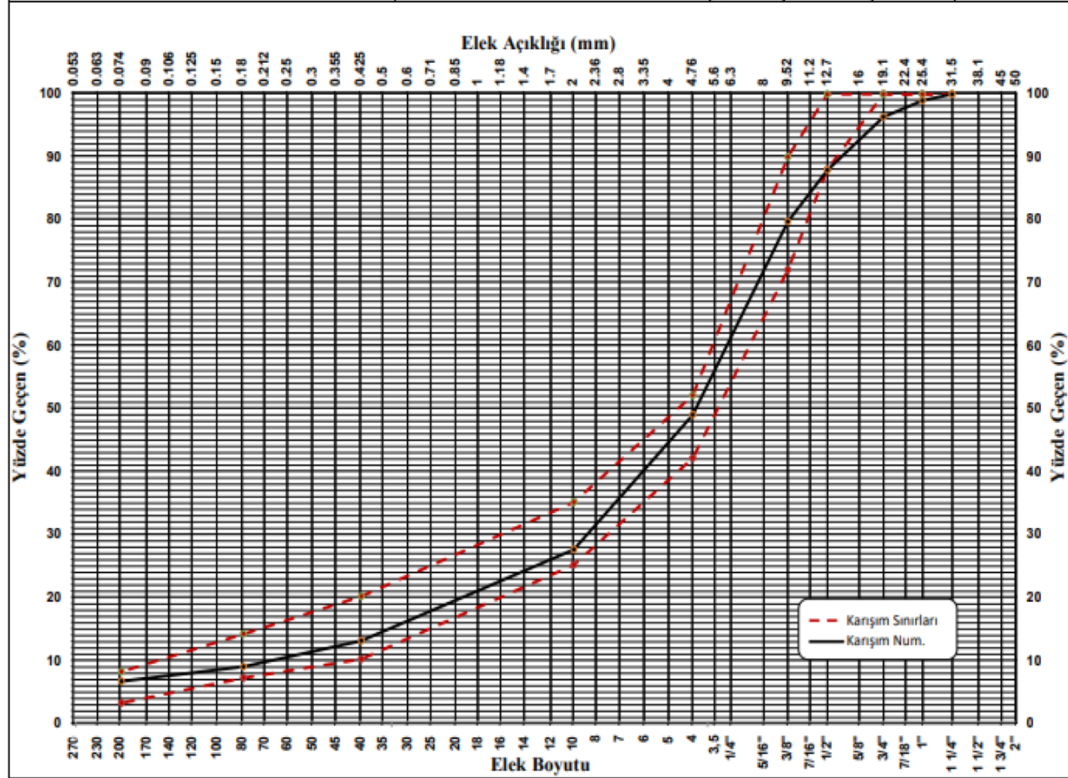
Akyol F., Özer A.T., (2024), “Asfalt Geri Dönüşüm Yöntemleri ve Türkiye’de Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kullanımı”, 8. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, 30-31 Mayıs, KOCAELİ.



EKLER

Ek-A: Asfalt Betonu Gradasyon ve Bitüm Oranı Raporu.

Laboratuvar Kalite Yönetim Sistemi						Yayın Tarihi		17.02.2010		
ASFALT BETONU RAPORU						Revizyon Tarihi		7.04.2010		
						Revizyon No		01		
						Doküman No		is - lab 182		
Analiz Tarihi		26.04.2021				Numunenin Alındığı Tarih :		20.04.2021		
Düzenleyen Birim		Kalite Yönetim ve Ar-Ge Müdürlüğü				Rapor No :		77		
Proje		AHM Esenyurt				Üretim :		Mahmutbey Asfalt Fab.		
Üretim Tipi		Aşınma tip 1				Karışım Sıcaklığı :				
Elekler	Karışım % geçen	Dizayn % geçen	Genel Şartname			Özellikler	Birim	Karışım	Dizayn	Sınır Değerleri
1 3/4"	100,0		100	100		Pratik Yoğunluk	gr/cm ³			
1 1/2"	100,0		100	100		Teorik Yoğunluk	gr/cm ³			
1"	99,0		100	100		Boşluk	%			
3/4"	96,3		100	100		Asf. Dolu Boşluk	%			
1/2"	87,9		88	100		Stabilite	kg			
3/8"	79,7		72	90		Akma	mm			
No 4	48,9		42	52		Suya Hassasiyet	%			
No 10	27,5		25	35		*Bitüm Miktarı	%	5,13		
No 40	12,9		10	20		*Bitüm Miktarı	100'e	5,41		
No 80	8,8		7	14		Agregalar Arası Boşluk%(VMA)				
No 200	6,5		3	8						
Kalıcı deformasyona karşı direnc Küçük boyutlu cihaz, Havada şartlandırma, B metodu					Tekerlek İzi Derinliği RD hava		mm			
					Tekerlek İzi Oranı PRD hava		%			
					Tekerlek İzi Eğimi WTS hava		mm/1000 yük devri			

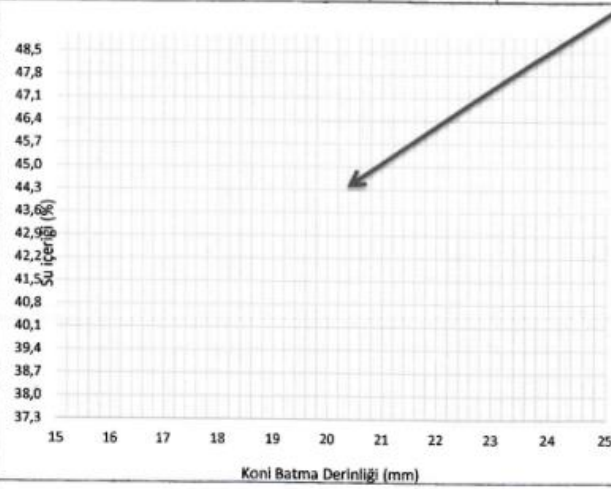


Şekil A.1: RAP malzemesine ait deney sonuçları.

Ek-B: PMT Deney Sonuçları.

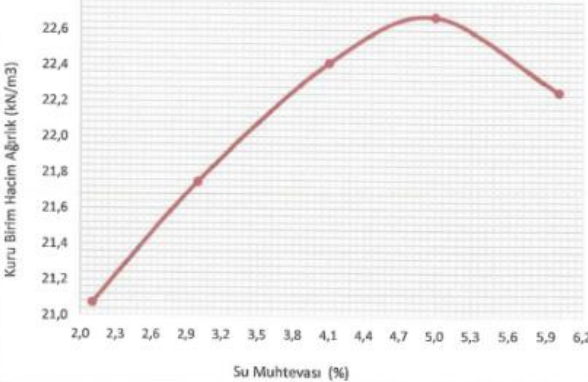
		İSTON A.Ş. AVRUPA YAKASI YAPI VE MALZEME LABORATUVARI						
Deneyi Talep Eden / Firma Adı		İSTANBUL ÜSTYAPI İNŞAAT VE TİCARET A.Ş.		KOD:RP-KGM.41/11 REV.TARİHİ:10.12.2019				
Proje Adı ve Adresi		BEYLİKDÜZÜ İLÇESİ RIFAT ILGAZ CD. YOL VE KAVAKLI CAD.BATI TRAKYA BULV-EGİTİM VADİSİ BLV KESİŞİMİ KAVŞ PROJ REVİZYONU		Sayfa No	1/5	AB-0064-T		
Yapı Denetim / Kontrolçü		İBB FEN İŞLERİ DAİRE BAŞK. ALTYAPI HİZMETLERİ MÜDÜRLÜĞÜ		Rapor Tarihi	19.01.2023	AB-00064-T		
Numunenin Cinsi		PMT(ZİRVETAŞ)		Numune Alım Tarihi	9.01.2023	NHYE2300161-62-63-64-65		
Numunenin Alındığı Yer		İNŞ.SAHASI(YIĞINDAN)				01-23		
Num. Alma Standartı / Talimatı		TS EN 932-1 / Şubat 1997 - TS EN ISO 22475-1/Temmuz 2012 - TL KGM.10						
DENEY ADI			Deney Sonuçları	Şartname Limit	DENEY ADI		Deney Sonuçları	Şartname Limiti
(*)Tane Bütünlüğü Dağılımının Belirlenmesi Deneyi TS EN ISO 17892-4	Elak Analizi % Geçen	25 mm / 1"	97	100 100	Zemin Sınıfı	Türk Zemin Sınıflandırma Sistemi		
		19 mm / 3/4"	84	80 100		TS 1500-12/2000		
		9,5 mm / 3/8"	62	50 82		(*)Standart Enerji TS 1900-1/2006		
		4,75 mm / NO:4"	52	35 65	(*)Yüksek Enerji TS 1900-1/2006	22,63	2308	
		2 mm / NO:10"	33	23 50	Optimum Su İçeriği (%)	Standart Enerji TS1900-1/2006		
		0,425 mm / NO:40"	16	12 30	Yüksek Enerji TS 1900-1/2006	5,0		
		0,075 mm / NO:200"	9	2 12	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	22,67		
					Su İçeriği (%)	5,0		
					Yaş (%)	223,8	≥120	
					Kuru (%)			
(*)Likit Limit (W _L) (%) TS 1900-1/2006					Ortalama Şişme (%)		0,0	≤3
(*)Plastik Limit (W _P) (%) TS 1900-1/2006			NP	NP	Zemin Tanelerinin Yoğunluğu(ρ _s) (Mg/m ³) TS EN 17892-3:2016-02			
Plastisite İndisi (I _p) TS 1900-1/2006					Numunelerin Görsel Tanımlanması(TS EN ISO 14688-1)			
Su İçeriğinin Belirlenmesi (Etövde Kurutma Yöntemi) (w) (%) TS EN 17892-1:2014-12					RENK TANIMI ŞARTLARI	Üçüncül Tanımlayıcı Renk	Köşellilik/ Yuvarlaklılık	
Uygunluk Değerlendirilmesi		Feragat Beyanı		İkincil Tanımlayıcı Renk		Şekil		
Numuneyi Alanlar			Y.GÜLER			Birincil Halka Tanımlayıcı Renk	Yüzey Dokusu	

Şekil B.1: PMT deney sonuçları.

		İSTON A.Ş. AVRUPA YAKASI YAPI VE MALZEME LABORATUVARI LİKİT LİMİT ve PLASTİK LİMİT TAYİNİ DENEY RAPORU		 AB-0064-T	
Deneyi Talep Eden / Firma Adı		İSTANBUL ÜSTYAPI İNŞAAT VE TİCARET A.Ş.		KOD:RP.KGM.44/05 Rev.TARİHİ:10.12.2019	
Proje Adı ve Adresi		BEYLİKDÜZÜ İLÇESİ RIFAT ILGAZ CD. YOL VE KAVAKLI CAD.BATI TRAKYA BULV. EĞİTİM VADİSİ BLV KESİŞİMİ KAVŞ PROJ REVİZYONU		Sayfa No 2/5	NHYE2300161 NHYE2300162
Yapı Denetim / Kontrollük		İBB FEN İŞLERİ DAİRE BAŞK. ALTYAPI HİZMETLERİ MÜDÜRLÜĞÜ		Rapor Tarihi 19.01.2023	01-23
Numune Cinsi		PMT(ZİRVETAŞ)		Num.Alım Tarihi	9.01.2023
Numunenin Alındığı Yer		İNŞ.SAHASI(YIĞINDAN)		Deney Tarihi	10.01.2023
Deney Standartı / Talimatı		TS EN ISO 17892-12, EN ISO 17892-1 / TL.KGM.193		Kurutma şekli	ETÜV
Deney Numunesi Laboratuvarımız Tarafından Alınmıştır.		☒		Deney Numunesi Firma Tarafından Laboratuvara Getirilmiştir.	
		☐			
		(*) Likit Limit (W_L)		(*) Plastik Limit (W_P)	
Deney No.					
Koni Batma Derinliği (mm)					
Kap No.					
Kap + Yaş Numune (g)	M_2				
Kap + Kuru Numune (g)	M_3				
Kap Ağırlığı (g)	M_1				
Su Miktarı (g)	W_1				
Kuru Numune (g)	W_2				
Su Muhtevası (%)					
		425µm'lik Elekten Geçen Numune (%)		9,0	
		Likit Limit (W_L) (%)			
		Plastik Limit (W_P) (%)		NP	
		Plastisite İndisi (I_P)			
		Ölçüm Belirsizliği (%)			
		Ölçüm Belirsizliği (%)		Likit Limit (W_L) 1,01	
				Plastik Limit (W_P) 0,11	
		Deneyde Kullanılan Cihazlar			
		Deneyde Kullanılan Cihazlar		YZL-01, YZL-687	
		Şahit Numune		ALINDI	
		Şahit Numune Bekleme Süresi		15 GÜN	
		Çevre Şartları(°C)		18 C	
		Numuneyi Alanlar		Y.GÜLER	
		Deneyi Yapanlar		AYŞE BÜYÜKOĞLU A.İzci	

Şekil B.2: PMT deney sonuçları.

		İSTON A.Ş.AVRUPA YAKASI YAPI VE MALZEME LABORATUVARI TANE BÜYÜKLÜĞÜ DAĞILIMININ BELİRLENMESİ DENEY RAPORU				 TURKAK T.C. MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI AKADEMİK BAĞLANTISI AB-0064-T						
Deneyi Talep Eden / Firma Adı:		İSTANBUL ÜSTYAPI İNŞAAT VE TİCARET A.Ş.		KOD:RP-KGM.42/06 Rev.TARİHİ:10.12.2019								
Proje Adı ve Adresi:		BEYLÜKDÜZÜ İLÇESİ RIFAT ILGAZ CD. YOL VE KAVAKLI CAD.BATI TRAKYA BULV. EĞİTİM VADİSİ BLV KESİŞİMİ KAVŞ PROJ REVİZYONU		Sayfa No	3/5	AB-0064-T						
				Rapor Tarihi	19.01.2023	NHYE2300163						
Yapı Denetim / Kontrolük		İBB FEN İŞLERİ DAİRE BAŞK. ALTYAPI HİZMETLERİ MÜDÜRLÜĞÜ		Num.Alım Tarihi	9.01.2023	91-23						
Numune Cinsi		PMT(ZİRVETAŞ)		Deney Tarihi		10.01.2023						
Numunenin Alındığı Yer		İNŞ.SAHASİ(YİĞİNDAN)		Numuneyi Alanlar		Y.GÖLER						
Deney Standartı / Talimatı		TS EN ISO 17892-4 / TL.KGM.176										
Deney Numunesi Laboratuvarımız Tarafından Alınmıştır.			☒		Deney Numunesi Firma Tarafından Laboratuvara Getirilmiştir.			☐				
(*)Tane Büyüklüğü Dağılımı												
Deney Yöntemi		Islak	☒	Kuru	☐	Alınan Kuru Numune Kütle (g) Yıkama Sonunda Kalan Kuru Numune Kütle (g)				3020,8 2754,8	Şartname Değeri	
Elek Göz Açıklığı			Elekte Kalan (g)		Kümülatif		PMT TİP 2					
(İnç/No)	(mm)	Fraksiyonlarda Kalan (Ri)	Toplam Kalan (S Ri)		Kalan (%)	Geçen (%)	Alt Sınır	Üst Sınır				
1	25	105	105,4		3	97	100	100				
3/4	19	381,9	487,2		16	84	80	100				
3/8	9,5	656,19	1143,4		38	62	50	82				
NO:4	4,75	294,68	1438,1		48	52	35	65				
NO:10	2	577,6	2015,8		67	33	23	50				
NO:40	0,425	518,0	2533,7		84	16	12	30				
NO:200	0,075	218,7	2752,5		91	9	2	12				
							0					
	Pan	0,90										
	Toplamı	2753,90										
Dane Dağılım Kriterleri												
D ₁₀ (mm)	0,10	Moloz Yüzdesi	0,0									
D ₃₀ (mm)	1,5	Çakıl Yüzdesi	67,0									
D ₅₀ (mm)	8,3	Kum Yüzdesi	24,0									
Uniformluk Katsayısı (C _u)	86,1	Silt+Kil Yüzdesi	9,0									
Süretilik Katsayısı (C _s)	2,9	Ölçüm Belirsizliği (%)	1,6									
Deneyde Kullanılan Cihazlar												
Deneyde Kullanılan Cihazlar	YZL-1033, YZL-04, YZL-1002											
Şahit Numune	ALINDI											
Şahit Numune Bekleme Süresi	15 GÜN											
Çevre Şartları(°C)	18 C											
Deneyi Yapanlar	AYŞE BÜYÜKOĞLU E.USTA											

		İSTON A.Ş. AVRUPA YAKASI YAPI VE MALZEME LABORATUVARI ZEMİNDE KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK - SU MUHTEVASI TAYİNİ DENEY RAPORU				 AB-0064-T	
Deneyi Talep Eden / Firma Adı		İSTANBUL ÜSTYAPI İNŞAAT VE TİCARET A.Ş.		KOD:RP.KGM.43/05 Rev. TARİHİ:10.12.2019		AB-0064-T	
Proje Adı ve Adresi		BEYLÜKDÜZÜ İLÇESİ RIFAT ILGAZ CD. YOL VE KAVAKLI CAD.BATI TRAKYA BULV. EĞİTİM VADİSİ BLV KESİŞİMİ KAVŞ PROJ REVİZYONU		Sayfa No	4/5	NHYE2300164	
				Rapor Tarihi	19.01.2023	01-23	
Yapı Denetim / Kontrolük		İBB FEN İŞLERİ DAİRE BAŞK. ALTYAPI HİZMETLERİ MÜDÜRLÜĞÜ		Numune Alın Tarihi		09.01.2023	
Numune Cinsi		PMT(ZİRVETAŞ)		Deney Tarihi		12.01.2023	
Numunenin Alındığı Yer		İNŞ.SAHASI(YIĞINDAN)		Uygulanan İşlem		Tek Numune	
Deney Standartı / Talimatı		TS 1900-1 Mart 2006 / TL.KGM.178		Uygulanan Metot		Numuneyi Alanlar	
Deney Numunesi Laboratuvarımız Tarafından Alınmıştır.		☒		Deney Numunesi Firma Tarafından Laboratuvara Getirilmiştir.		☐	
20mm'lik elekten geçen yüzde(%)		62		Y.GÜLER			
Tokmak :4.5 kg	☒	Düşüş:45 cm	☒	Tabaka:5	☒	Darbe:56	☒
Tokmak :2.5 kg	☐	Düşüş:30 cm	☐	Tabaka:3	☐	Darbe:25	☐
Kalıp Ø 152,4x115,5 mm							
Kalıp Ø105x115,5 mm							
(*)Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)							
No	1	2	3	4	5		
Kalıp+Sıkıştırılmış Numune, (g)	M ₂	9310,0	9500,0	9700,0	9802,0	9755,0	
Kalıp Kütlesi, (g)	M ₁	4700,0	4700,0	4700,0	4700,0	4700,0	
Sıkıştırılmış Numune, (g)	M ₃	4610	4800	5000	5102	5055	
Yaş Birim Hacim Kütle (kN/m ³)		21,465	22,350	23,281	23,766	23,537	
Kuru Birim Hacim Kütle (kN/m ³)		21,023	21,699	22,364	22,624	22,205	
Su Muhtevası (%)							
Kap No	430	431	432	433	434		
Kap+Yaş Numune,(g)	M _{W2}	390,70	390,94	390,24	390,80	390,20	
Kap+Kuru Numune,(g)	M _{W3}	384,28	381,80	377,94	375,84	372,38	
Kap Ağırlığı,(g)	M _{W1}	80,76	81,96	80,03	78,10	76,81	
Su Miktarı,(g)		6,42	9,14	12,30	14,96	17,82	
Su Muhtevası (%)		2,1	3,0	4,1	5,0	6,0	
							
Deney Sonuçları							
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (ρ _s) (kN/m ³)						22,63	
Optimum Su İçeriği (W _{opt}) (%)						5,0	
Ölçüm Belirsizliği (%)							
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (ρ _s)						1	
Optimum Su İçeriği (W _{opt})						5,42	
Deneyde Kullanılan Cihazlar							
Deneyde Kullanılan Cihazlar						YZL-698,YZL-13,YZL-03	
Şahit Numune						ALINDI	
Şahit Numune Bekleme Süresi						15 GÜN	
Çevre Şartları(°C)						18 C	
Deneyi Yapanlar						A.İZCİ AYŞE BÜYÜKOĞLU	

Şekil B.4: PMT deney sonuçları.

		İSTON A.Ş. AVRUPA YAKASI YAPI VE MALZEME LABORATUVARI TAŞIMA ORANININ TAYİNİ (CBR) DENEY RAPORU						 TÜRKAK AB-0064-T							
Deneyi Talep Eden / Firma Adı		İSTANBUL ÜSTYAPI İNŞAAT VE TİCARET A.Ş.				KOD: RP.KGM.47/04 Rev. TARİHİ: 10.12.2019		AB-00064-T							
Proje Adı ve Adresi		BEYLİKDÜZÜ İLÇESİ RIFAT ILGAZ CD. YOL VE KAVAKLI CAD.BATI TRAKYA BULV-EĞİTİM VADİSİ BLV KESİŞİMİ KAVŞ PROJ REVİZYONU				Sayfa No	5/5	NHYE2300165							
						Rapor Tarihi	19.01.2023	01-23							
Yapı Denetim / Kontrolük		İBB FEN İŞLERİ DAİRE BAŞK. ALTYAPI HİZMETLERİ MÜDÜRLÜĞÜ				Numune Alım Tarihi		9.01.2023							
Numune Cinsi		PMT(ZİRVETAŞ)				Deney Tarihi		17.01.2023							
Numunenin Alındığı Yer		İNŞ.SAHASI(YİĞİNDAN)				Numuneyi Alanlar		Y.GÜLER							
Deney Standartı / Talimatı		TS 1900-2 Mart 2006, TS EN ISO 17892-1 / TL KGM.178													
Deney Numunesi Laboratuvarımız Tarafından Alınmıştır.					Deney Numunesi Firma Tarafından Laboratuvara Getirilmiştir.										
CBR	Yaş	☒	Kullanılan Yük Ağırlığı (kg)	Tokmak Ağırlığı (kg)	Düşüş Yüksekliği (cm)	Tabaka Sayısı	Vuruş Sayısı								
	Kuru	☐		4,5	45	5	51								
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)															
Kompaksiyon Deney Sonucu		Kalıp 1		Kalıp 2		Sıkıştırma Derecesi									
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Optimum Su İçeriği (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Su içeriği (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Su içeriği (%)	Kalıp 1	Kalıp 2								
22,63	5,0	22,70	4,9	22,64	5	100,3	100,1								
Şişme Oranı (%)															
TARİH	Saat	Kalıp 1		Kalıp 2		Ortalama Şişme (%)									
		Şişme (mm)	Şişme (%)	Şişme (mm)	Şişme (%)										
13.01.2023	14:00	0		0		0,0									
17.01.2023	14:00	0	0,0	0	0,0										
(*) Laboratuvarında Taşıma Oranının Tayini (CBR)															
Penetrasyon		Standart Basınç	Standart Yük	Kalıp 1				Kalıp 2				Load Cell			
İnç	mm	kg/cm ²	kN	kN	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	%	kN	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	%	2kN	50kN
														☐	☒
0,025	0,625			376,0	19,4	38,7			565,1	29,2	43,2			Bulunan CBR %	Şartname %
0,050	1,25			1124,9	58,1	73,4			1401,5	72,4	84,1				
0,075	1,875			1719,8	88,9	102,4			2097,0	108,4	119,1				
0,100	2,50	70	13,3	2245,7	116,1	128,2	183,1	2734,7	141,3	150,6	215,1				
0,150	3,75	88	16,7	3192,2	165,0	175,2		3837,1	198,3	206,0			223,8	≥120	
0,200	5,00	105	19,9	3989,5	206,2	216,4	206,1	4756,2	245,8	253,5	241,4				
0,300	7,50	134	25,4												
0,400	10,00	162	30,8												
0,500	12,50	183	34,7												
Deneyde Kullanılan Cihazlar		Ölçüm Belirsizliği ve Çevre Şartları				Şahit Numune				Deneyi Yapanlar					
YLZ-698 , YLZ-579, 03, YLZ-07	YLZ	Ölçüm Belirsizliği %				0,11	Şahit Numune				ALINDI				
		Çevre Şartları(°C)				18 C	Şahit Numune Bekleme Süresi				15 GÜN				
											AYŞE BÜYÜKOĞLU A.İZCİ				

Şekil B.5: PMT deney sonuçları.