

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON
AGREGASININ DOLGU MALZEMESİ OLARAK KULLANIMININ
DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

ARALIK, 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON
AGREGASININ DOLGU MALZEMESİ OLARAK KULLANIMININ
DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Merve AKBAŞ
(501161327)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

ARALIK, 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161327 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Merve AKBAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGASININ DOLGU MALZEMESİ OLARAK KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Recep İYİSAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Aykut ŞENOL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şükrü ÖZÇOBAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Kasım 2019
Savunma Tarihi : 6 Aralık 2019





Aileme,



ÖNSÖZ

Dünyada ve ülkemizde artan nüfus ile beraber kısıtlı doğal kaynakların kullanımı ve oluşan katı atık miktarı artmaktadır. Kentsel ve endüstriyel atıkların doğal kaynak tüketiminin en fazla olduğu sektörlerden biri olan inşaat endüstrisinde kullanımı sürdürülebilirlik için büyük bir önem taşımaktadır. Yol dolguları yüksek miktarda doğal agrega tüketimine sebep olan mühendislik uygulamalarından biridir. Bu amaçla bu çalışmada endüstriyel atıklar içerisinde önemli bir paya sahip olan inşaat yapım yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının yol dolgularında kullanım uygunluğu geoteknik mühendisliği açısından incelenmiştir.

Yol alt temel ve temel tabakasında kullanılacak agregaların sağlaması gereken mühendislik özellikler her ülkede farklı şartnameler tarafından belirlenmiştir. Ülkemizde yol dolgularında kullanılacak agregaların sağlaması gereken mühendislik özellikler Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilmiştir. Bu çalışmada İstanbul Kentsel Dönüşüm Projesi kapsamında ortaya çıkan geri dönüştürülmüş beton agregalarının yol alt temel ve temel tabakasında kullanım uygunluğu Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013'e göre değerlendirilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi dane çapı dağılım sınırları dikkate alınarak hazırlanan alt temel ve temel numunelerinin İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarında kompaksiyon, mukavemet, geçirimsizlik özellikleri belirlenirken Karayolları Genel Müdürlüğü Toprak ve Stabilizasyon Şefliği Laboratuvarında esneklik özellikleri belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının soğuk iklim şartlarının hakim olduğu bölgelerde kullanıldığında donma çözülme sayısına bağlı olarak mukavemet özelliklerinde meydana gelen değişimler numuneler üzerinde yapılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile değerlendirilmiştir.

Yüksek Lisans tezimin her aşamasında her türlü yardımlarından dolayı Sayın Prof. Dr. Recep İyisan'a, Karayolları Genel Müdürlüğü Toprak ve Stabilizasyon Şefliği Laboratuvar çalışanlarına, konu hakkındaki bilgi birikimlerini tüm içtenlikleriyle paylaşan değerli öğretim üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Hatipoğlu ile Dr. Öğr. Üyesi Aslı Yalçın Dayıoğlu'na teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi hiçbir desteğini benden esirgemeyen en büyük destekçim sevgili annem ve babam ile bu süreçte bana güvenen değerli dostlarım Ecem Malgaç ve Sercan Tutkaç'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2019

Merve AKBAŞ
İnş. Müh



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	3
1.2 Kapsam.....	4
2. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE ATIK MALZEMELERİN KULLANIMI	5
2.1 Kentsel Atıklar	6
2.1.1 Kâğıt.....	7
2.1.2 Plastik.....	8
2.1.3 Cam	11
2.2 Endüstriyel Atıklar	13
2.2.1 Kömür santral atıkları	13
2.2.1.1 Uçucu kül	16
2.2.1.2 Taban külü.....	18
2.2.2 İnşaat yapım yıkım atıkları	21
2.2.2.1 Geri dönüştürülmüş asfalt agregası.....	28
2.2.2.2 Geri dönüştürülmüş beton agregası.....	31
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	37
3.1 Malzeme	38
3.1.1 Endeks ve sıkıştırma özellikleri	39
3.1.2 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerleri ve geçirimsizlik özellikleri.....	40
3.2 Alt Temel ve Temel Hazırlama Yöntemi	42
3.3 Deney Yöntemi.....	47
3.3.1 Kompaksiyon deneyleri	47
3.3.2 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve permeabilite deneyleri	48
3.3.3 Esneklik Modülü deneyleri	52
3.3.4 Donma çözülme çevrimleri uygulama ve sonrası inceleme yöntemi.....	59
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	63
4.1 Deney Sonuçları	64
4.1.1 Kompaksiyon deney sonuçları	65
4.1.2 CBR deney sonuçları	67
4.1.3 Permeabilite deney sonuçları	68
4.1.4 Esneklik Modülü deney sonuçları.....	69

4.1.5 Donma çözölme sonrası CBR deney sonuçları	86
4.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	88
4.2.1 Kompaksiyon özelliklerinin değerlendirilmesi	89
4.2.2 CBR değerlerinin ve geçirimlilik özelliklerinin değerlendirilmesi.....	91
4.2.3 Esneklik özelliklerinin değerlendirilmesi.....	93
4.2.4 Donma çözölme etkisinin değerlendirilmesi.....	95
4.3 Genel Değerlendirme.....	96
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR.....	105



KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
AB	: Avrupa Birliği
ACAA	: American Coal Ash Association
ACI	: American Concrete Institute
ACRR	: Association of Cities and Regions for Recycling
ASCE	: American Society of Civil Engineers
CBR	: Californian Bearing Ratio
ÇEVKO	: Çevre Koruma ve Ambalaj Atıkları Değerlendirme Vakfı
EPA	: U.S. Environmental Protection Agency
Eurostat	: European Statistics
FAA	: Federal Aviation Administration
FHWA	: Federal Highway Administration
GDA	: Geri Dönüştürölmüş Asfalt Agregası
GDBA	: Geri Dönüştürölmüş Beton Agregası
GDTA	: Geri Dönüştürölmüş Tuğla Agregası
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KSA	: Kömür Santral Atıkları
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
MEPDG	: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
NCEAS	: National Center for Ecological Analysis and Synthesis
NRMCA	: National Ready Mixed Concrete Association
UEPG	: European Aggregates Association
UNESCAP	: United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific
SAWIC	: South African Waste Information Centre
SM	: Siltli Kum
SoWR	: South African State of Waste Report
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
WARR	: Waste Avoidance and Resource Recover



SEMBOLLER

M_R	: Esneklik modülü
θ	: Toplam gerilme
τ_{oct}	: Orthogonal kesme gerilmesi
P_a	: Atmosfer basıncı
k_1, k_2, k_3	: Regresyon katsayıları
i	: Hidrolik Eğim
σ_3	: Çevre basıncı
R^2	: Korelasyon katsayısının karesi
$\gamma_{k,maks}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
ε	: Elastik birim deformasyon
σ_d	: Deviatör gerilme



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : ABD, 2013 KSA üretim ve kullanım miktarları ile 2033 yılında beklenen miktarlar (ACAA, 2015).	14
Çizelge 2.2 : Türkiye’de büyük ölçekli termik santrallerde kullanılan kömür ve oluşan kül miktarları (Başar ve diğ, 2016).	16
Çizelge 3.1 : GDBA Standart ve Modifiye Proctor deney sonuçları.	40
Çizelge 3.2 : GDBA’nın farklı hidrolik eğimlerde permeabilite katsayısı ve filtre hızı.	42
Çizelge 3.3 : Alt temel tabakası dane çapı dağılımı için KTŞ’de belirtilen sınırlar.	43
Çizelge 3.4 : Temel tabakası dane çapı dağılımı için KTŞ’de belirtilen sınırlar.	44
Çizelge 3.5 : Alt temel ve temel tabakaları dane çapı dağılımları.	45
Çizelge 3.6 : Esneklik Modülü deneyinde Tip-1 numunelere ait yükleme tablosu.	57
Çizelge 4.1 : Numuneler üzerinde yapılan kompaksiyon deney sonuçları.	65
Çizelge 4.2 : CBR deney sonuçları.	68
Çizelge 4.3 : Sabit seviyeli permeabilite deney sonuçları.	69
Çizelge 4.4 : Esneklik Modülü deneyinde temel numunesi verileri.	72
Çizelge 4.5 : Esneklik Modülü deneyinde alt temel numunesi verileri.	77
Çizelge 4.6 : Esneklik Modülü deneyinde tesis numunesi verileri.	77
Çizelge 4.7 : Temel numunesi Toplam Gerilme Modele göre esneklik modülleri.	79
Çizelge 4.8 : Alt temel numunesi Toplam Gerilme Modele göre esneklik modülleri.	80
Çizelge 4.9 : Tesis numunesi Toplam Gerilme Model’e göre esneklik modülleri.	80
Çizelge 4.10 : Toplam Gerilme Modelindeki parametreler ve $M_{R,proje}$ değerleri.	81
Çizelge 4.11 : Temel numunesi MEPD’ye göre esneklik modülleri.	82
Çizelge 4.12 : Alt Temel numunesi MEPD’ye göre esneklik modülleri.	83
Çizelge 4.13 : Tesis numunesi MEPD’ye göre esneklik modülleri.	83
Çizelge 4.14 : MEPD dizayn parametreleri ile $M_{R,proje}$ değerleri.	85
Çizelge 4.15 : Temel numunesi dane çapı dağılımının KTŞ,2013’e uygunluğu.	97
Çizelge 4.16 : Temel numunesi geoteknik özelliklerinin KTŞ,2013’e uygunluğu.	98
Çizelge 4.17 : Alt temel numunesi dane çapı dağılımının KTŞ,2013’e uygunluğu.	98
Çizelge 4.18 : Alt temel numunesi geoteknik özelliklerinin KTŞ,2013’e uygunluğu.	99



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Katı atıkların sınıflandırılması (EPA).	5
Şekil 2.2 : Çeşitli ülkelerde oluşan inşaat yıkım atık miktarları (Hindistan Hükümeti Yapı Malzemeleri ve Teknolojileri Geliştirme Konseyi Konut ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).	25
Şekil 3.1 : Dane boyutlarına göre depolanan GDBA (Göktürk, İstanbul).	38
Şekil 3.2 : GDBA dane çapı dağılım eğrisi.	39
Şekil 3.3 : GDBA numunesi için Proctor eğrileri.	40
Şekil 3.4 : GDBA numunesi CBR deney sonuçları.	41
Şekil 3.5 : Yol üstyapısı enkesiti (Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, 2008).	43
Şekil 3.6 : Farklı çap aralığında depolanan GDBA.	45
Şekil 3.7 : Tip A ve B'ye göre hazırlanan alt temel dane çapı dağılım eğrisi.	46
Şekil 3.8 : Tip A ve B'ye göre hazırlanan temel dane çapı dağılım eğrisi.	46
Şekil 3.9 : 24 Saat suda bekletilen CBR numunesi.	49
Şekil 3.10 : Sabit seviyeli permeabilite deneyinde kullanılan kalıp.	50
Şekil 3.11 : Hazırlanan numuneye yapılan vakum uygulaması.	51
Şekil 3.12 : Farklı hidrolik eğimde tekrarlanan permeabilite deneyi.	51
Şekil 3.13 : Esneklik Modülü deneyinde kullanılan cihaz sistemi.	53
Şekil 3.14 : Sıkıştırma işlemi için hazırlanan kalıp.	54
Şekil 3.15 : Sıkıştırma işlemi için hazırlanan tabakalar.	55
Şekil 3.16 : Tesis numunesinin sıkıştırılması.	55
Şekil 3.17 : Deneye başlamadan önce yapılan hava kaçağı kontrolü.	56
Şekil 3.18 : Esneklik modülü deneyinde yükün uygulama formu.	57
Şekil 3.19 : Esneklik modülü deneyinin laboratuvarında uygulanması.	58
Şekil 3.20 : Sıkıştırılacak her temel tabakasının ayrı ayrı hazırlanması.	59
Şekil 3.21 : Optimum su içeriğinin eklenip karıştırıldığı temel tabakaları.	59
Şekil 3.22 : Donma çözülme çevrimleri için kullanılan plastik kalıplar.	60
Şekil 3.23 : Kullanılan titreşimli sıkıştırma aleti.	61
Şekil 3.24 : Çözülme sürecine henüz geçirilen temel ve alt temel numunesi.	61
Şekil 4.1 : Alt Temel, temel ve tesis numunesine ait Modifiye Proctor eğrileri.	66
Şekil 4.2 : Alt temel, temel ve tesis numunesine ait Standart Proctor eğrileri.	66

Şekil 4.3: Kuru CBR deneylerinde elde edilen yük-penetrasyon eğrileri.	67
Şekil 4.4 : Islak CBR deneylerinde elde edilen yük-penetrasyon eğrileri.	68
Şekil 4.5 : Üstyapı malzemelerinin tekrarlı yükler altındaki davranışı.	69
Şekil 4.6 : Esneklik Modülü deneyinde numuneye uygulanan gerilmeler.	71
Şekil 4.7 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemdeki deviatör yükler.	73
Şekil 4.8 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemdeki deformasyonlar.	74
Şekil 4.9 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemdeki son 5 deviatör gerilme ile birim deformasyon değerleri.	75
Şekil 4.10 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemdeki son 5 esneklik modülü değerleri.	76
Şekil 4.11 : Numunelerin farklı toplam gerilmelerdeki esneklik modülleri	78
Şekil 4.12 : Numunelerin Toplam Gerilme Modelinde hesaplanan esneklik modülleri ile deney verilerine göre hesaplanan esneklik modüllerinin karşılaştırılması.	81
Şekil 4.13 : Numunelerin değişen toplam gerilme değerlerinde deney verilerine göre hesaplanan esneklik modülleri..	84
Şekil 4.14 : Numunelerin değişen toplam gerilme değerinde MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülleri.	84
Şekil 4.15 : Numunelerin MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülleri ile deney verilerine göre hesaplanan esneklik modüllerinin karşılaştırılması.	85
Şekil 4.16 : Donma çözülme çevrimleri sonrası temel tabakası normalize edilmiş CBR değerleri.	86
Şekil 4.17 : Donma çözülme çevrimleri sonrası alt temel tabakası normalize edilmiş CBR değerleri.	87
Şekil 4.18 : Temel ve alt temel numunelerinde çevrim sayısı ile normalize edilmiş CBR değerlerinin değişimi.	87

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGASININ DOLGU MALZEMESİ OLARAK KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Katı atıklar içerisinde yer alan kentsel, endüstriyel ve inşaat yıkım atık miktarı her yıl endişe verici bir oranda artmaktadır. Üretilen inşaat kaynaklı katı atık miktarı dünya ülkelerinde gelişmişlik düzeyine ve nüfusuna bağlı olarak değişmektedir. İnşaat yapım yıkım atıkları Çin Halk Cumhuriyeti'nde her yıl toplam katı atığın %30-40'ını oluştururken, 2016'da İngiltere'de üretilen toplam katı atıkların %61'ini oluşturmuştur. 2015 yılında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Çevre Koruma Ajansı (EPA) ABD'de üretilen inşaat yapım ve yıkım atık miktarının, üretilen belediye katı atıklarının iki katından fazlasına karşılık geldiğini ve bu miktarın yaklaşık 548 milyon ton olduğunu belirtmiştir. Ülkemizde ise başlayan kentsel dönüşüm projeleri ile her yıl yüksek miktarlarda inşaat atığı olduğu tahmin edilmektedir. 2012 yılında başlayan, eski ve sismik hasara duyarlı yapıların yıkılmasını içeren kentsel dönüşüm projesine rağmen geri dönüştürülmüş beton agregası üretim miktarı ve çeşitli uygulamalarda kullanım oranı tam olarak belirlenememiştir. Bununla birlikte, artan çevre bilinci ve kurulu tesisler ile geri dönüştürülmüş agregaların kullanım oranının artması beklenmektedir.

Depolanan inşaat yapım ve yıkım atık miktarındaki artış ve doğal kaynakların hızlı bir şekilde azalması nedeniyle, inşaat mühendisliği uygulamalarında atık malzemelerin kullanılması özellikle son on yılda büyük önem kazanmıştır. İnşaat atıklarından elde edilen, çoğunlukla geri dönüştürülmüş beton agregası olarak adlandırılan beton atıklarının yeniden kullanılmasının doğal kaynak kullanımını azaltacağı ve atık depolama sorununa bir çözüm sağlayacağı yaygın olarak kabul edilmektedir. Sürdürülebilirliğe katkı sağlamak amacıyla geri dönüştürülmüş beton agregaları özellikle yüksek miktarda doğal kaynak tüketimine sebep olan yol dolgusu uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

Mühendislik uygulamalarında kullanılacak geri dönüştürülmüş beton agregalarının mühendislik özelliklerini doğru bir şekilde değerlendirmek önemli olup, bu malzemelerin mühendislik özellikleri elde edilen kaynağa bağlı olarak değişmektedir. Ülkemizde oluşan geri dönüştürülmüş beton agregalarının mühendislik özellikleri hakkında literatürde sınırlı sayıda bilgi yer almaktadır. Bununla beraber farklı kaynaklardan temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanılmadan önce esas alınan şartnamede belirtilen geoteknik özellikleri ile diğer mühendislik özellikleri belirlenmeli ve kullanım uygunluğu tespit edilmelidir. Bu çalışmada İstanbul'daki Kentsel Dönüşüm Projelerinden elde edilen ve Göktürk'te geri dönüşüm tesisinde depolanan beton atıkları kullanılmış, yol alt temel ve temel malzemesi olarak kullanım uygunluğu geoteknik açıdan ele alınmıştır. Bu amaçla tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregası üzerinde laboratuvarda standart zemin mekanığı deneyleri yapılmıştır.

Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregası üzerinde ilk olarak ASTM D-422'ye göre elek ile hidrometre analizleri yapılmış ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre malzeme Siltli Kum (SM) olarak belirlenmiştir. Ülkemizde yol dolguları alt temel ve temel tabakasında kullanılacak malzemelerinin sağlaması gereken geoteknik özellikler Karayolu Teknik Şartnamesinde (KTŞ, 2013) belirtilmiş olup, tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregasının dane çapı dağılımının KTŞ'de alt temel ve temel malzemeleri için belirtilen dane çapı dağılım sınırlarının dışında kaldığı tespit edilmiştir. KTŞ'de alt temel ve temel tabakası dane çapı dağılımı için belirtilen üst ve alt limitler göz önüne alınarak farklı dane çapı dağılımına sahip alt temel ve temel numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan alt temel ve temel numuneleri üzerinde yapılan deneyler dane çapı dağılımı şartname limitleri dışında kalmasına rağmen tesis numunesi üzerinde de yapılmıştır. Numunelerin kompaksiyon özelliklerini belirlemek için Standart ve Modifiye Proctor, Islak ve Kuru California Taşıma Oranı (CBR) değerleri ile geçirimsizlik özelliklerini belirlemek için Kuru ve Yaş CBR ile Sabit Seviyeli Permeabilite ve esneklik özelliklerini belirlemek için Esneklik Modülü deneyleri yapılmıştır.

Geri dönüştürülmüş beton agregalarının kullanım uygunluğu belirlenirken bölgedeki iklim koşulları da büyük önem taşımaktadır. Geoteknik mühendisliğinin inceleme konuları arasında ayrı olarak ele alınan donma çözülme olayı ülkemizin iklim koşulları göz önünde bulundurulduğunda yol dolgularında kullanılacak geri dönüştürülmüş beton agregaları için de ele alması gereken bir problem haline gelmiştir. Donma çözülme olaylarının sık görüldüğü yerlerde geri dönüştürülmüş beton agregaların mukavemet özellikleri değişmektedir. Donma çözülme çevrimleri sonrası mukavemet özelliklerindeki değişimi belirlemek amacıyla hazırlanan alt temel ve temel numuneleri farklı sayılarda donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmış ve donma çözülme sonrası mukavemet özelliklerindeki değişim CBR değerlerindeki değişim ele alınarak belirlenmiştir.

Geoteknik deneylerde bulunan değerler Karayolu Teknik Şartnamesinde (KTŞ, 2013) alt temel ve temel malzemesi için istenen sınır değerler ile karşılaştırılmış ve geoteknik açıdan şartname limitlerini sağladığı belirlenmiştir. Donma çözülme sonrası elde edilen CBR değerlerinin ise şartnamede belirtilen sınır değerleri sağlamamasından dolayı don olaylarının görüldüğü bölgelerde bu malzemelerin doğal agrega ile karıştırılarak, katkı maddesi eklenerek veya geosentetik kullanarak mukavemet özelliklerinin iyileştirilip kullanılması önerilmektedir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE USAGE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE AS A FILLING MATERIAL IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

SUMMARY

The amount of annually produced municipal, industrial and construction solid waste has been increasing at an alarming rate. In particular, large amount construction and demolition (C&D) waste deposited in landfills worldwide. It is a well-known fact that development level and movement to urban areas are linked to the generation of construction and demolition waste. C&D waste accounts almost for 30-40% of the total solid waste in the People's Republic of China every year, C&D waste accounted for 61% of total generated solid wastes in the United Kingdom (UK) in 2016. The Environmental Protection Agency (EPA) stated that the amount of C&D waste produced in the United States (US) was 548 million tons, corresponding to more than twice the amount of municipal solid waste generated in US which emphasizes the need to find alternative ways of utilizing them. Due to dramatic increase in the stockpiled amount of construction and demolition waste and rapid diminishment of natural resources, using waste materials in civil engineering applications has come into importance particularly in the last decade. Highway constructions may be deemed as a suitable application since large volumes of materials might be utilized. The satisfactory mechanical properties of recycled concrete aggregate (RCA) enables using it as a pavement base or subbase material. Several countries have been using recycled C&D materials as a high-value construction material in civil engineering applications. It is widely accepted that the reuse of concrete wastes, mostly referred as Recycled Concrete Aggregate (RCA), obtained from C&D waste will reduce the use of natural resources and will provide a solution to the problem of waste storage.

Turkey is a country where the urban transformation project was initiated in 2012, however, concrete aggregates derived from construction waste in Turkey was not used up to now as a subbase or base materials in the pavement. Despite the urban transformation project that started in 2012 and includes demolishing of the old and seismic damage-susceptible structures, neither the generation amount of RCA nor utilization rate in various applications has been fully determined. However, the utilization ratio is expected to increase with increasing environmental awareness and installed facilities, and in this case, it is important to correctly assess the characteristics of the RCA materials to be used. In addition, there is very little information about the geotechnical properties of these materials. The results of the research studies carried out in recent decades made it possible to utilize RCA as subbase and base materials of the pavement. However, the results of the previous research studies have shown that the both engineering properties of RCA are strictly dependent on the origin. Therefore, in this thesis utilization of RCA from Istanbul, as subbase or base layer in the highways was evaluated through a series of geotechnical laboratory tests. In this study, RCA obtained from C&D wastes in Istanbul were utilized. The RCA material was collected from a plant in Istanbul Gokturk region and sorted with respect to its particle size.

In order to determine the physical properties of the RCA, grain size distributions were determined and then Proctor, California Bearing Ratio (CBR), Constant Head and Resilient Modulus (RMT) Tests were performed respectively. In addition to, when determining the suitability of use of recycled concrete aggregates, the climatic conditions in the region have great importance. Strength properties of recycled concrete aggregates where frost events are common should be reevaluated by taking these conditions. It should be noted that recycled concrete aggregates designated as usable for the subbase and base layer can lose their suitability after freeze-thaw. Therefore, strength losses were determined by using CBR test on prepared subbase and base samples that completed the freeze-thaw cycle.

Sieve and hydrometer analyses were performed on the as-received material according to ASTM D-422. The material was classified as Silty Sand (SM) using the Unified Soil Classification System (USCS). Once the particle size distribution characteristics of the as-received material have been determined, the suitability of utilization in as-received condition was investigated. However, when Turkey's General Directorate of Highways (KGM) Highway Technical Specification (KTS), which show upper and lower limits for grain diameter distribution of subbase and base material are investigated, it is seen that as-received RCA grain size distribution is out of these limits. Thus, two different grain size distributions were prepared for subbase and base materials considering Highway Technical Specification (KTS) upper and lower limits.

Standard and modified compaction tests were performed in accordance with ASTM D-698 and ASTM D-1557, respectively. The results of the standard compaction test on the as-received material yielded an optimum moisture content (w_{opt}) of 13% and a maximum dry unit weight ($\gamma_{dry,max}$) of 19.3 kN/m³, whereas the optimum moisture content and the maximum dry unit weight obtained by applying modified compaction energy to the same material was 9% and 19.7 kN/m³. Since the material remaining on the 19.0 mm sieve was less than 10% in both the subbase and base layer grain size distributions, Method C was used for Standard and Modified Proctor Test. The samples were compacted as 3 layers in a 152.4 mm diameter mold with 24.5 N rammer and, the rammer was dropped 56 times from 305 mm for Standard Proctor Test. For the Modified Proctor Test, the material was compacted as 5 layers using a 152.4 mm diameter mold and the rammer was dropped 56 times, respectively. The standard compaction test results for subbase materials show that maximum dry unit weight is 19.40 kN/m³ and optimum water content is 11%. Due to increasing energy in the modified compaction Test, the maximum dry unit weight was found to be 19.80 kN/m³ and the optimum water content was obtained as 8%. Similarly, for base composition, the maximum dry unit weight and optimum moisture content under standard compaction effort was 20.10 kN/m³ and 10%, respectively, whereas when modified compaction test was performed, the optimum moisture content decreased to 7% and maximum dry unit volume weight increased to 20.50 kN/m³. The higher dry unit weight and lower optimum moisture content of base material under both standard and modified compaction energies compared with subbase material can be attributed to coarser particle size distribution of the base material.

CBR test is used to determine the materials CBR value and to evaluate their suitability as subbase and base course material. Standard or modified compressed samples are used to determine the CBR value in the laboratory and, it is aimed to evaluate the strength of the material having a particle size of smaller than 3/4 inches (19 mm). The subbase and base samples were compacted in a CBR mold (7-inch high and 6-inch diameter) at maximum dry unit weight obtained from the modified compaction test.

The test was performed in both dry and wet conditions to evaluate the strength properties under drought and heavy precipitation. In dry condition, the sample was subjected to CBR test immediately after compaction whereas for wet condition, the sample was kept soaked for 3 days and the vertical deformation was measured constantly via a dial gauge. The sample was subjected to loading once the vertical displacement was stabilized. In order to perform the test, the tests were performed at a strain rate of 1.27 mm/min using a loading frame with a maximum loading capacity of 45 kN. The dry CBR value at the optimum water content of the as-received material was 76% and the wet CBR value was 79%. The dry and wet CBR values of the base layer were found as 133% and 121%, respectively. On the other hand; the dry and wet CBR values of the subbase layer obtained %109 and %106. In all cases, the CBR value is significantly higher than 50, a generally accepted global limit for base materials. The higher CBR values for wet condition can be attributed to the potential reaction of anhydrate cement in the concrete aggregate when exposed to water. It is thought that the higher CBR value of the base layer both in wet and dry conditions is caused by a better packing of the sample and minimization of voids. With increasing percentage of coarse material, the amount of load to be applied for 5 mm and 2.5 mm penetration increased significantly. The required CBR value for the subbase layers for the KTS in Turkey is minimum 30 for Type A and the CBR value (wet CBR = 121%) of the sample prepared considering Type A boundary grain size distribution is significantly higher. This fact once again emphasizes the need to perform tests when using RCA since the wide range of index and strength properties exhibited by the materials heavily depend on the origin. The hydraulic conductivity is one of the most complicated and important properties of soils, since it is heavily affected by other factors, however, it needs to be determined in particular for materials to be used in road pavements, bases or subbases. The constant-head test method is used to determine the hydraulic conductivity for the laminar flow of water through granular soils in embankments or base courses under pavements. In order to determine the hydraulic conductivity, RCA samples for subbase and base were prepared in accordance with ASTM D-2434. The test was triplicated for each sample and was repeated on different hydraulic gradients. The results indicate that the hydraulic conductivities of all materials are within the same order of magnitude. The average hydraulic conductivity of as-received material was found to be 8.86×10^{-5} cm/s. The prepared subbase and base samples have a slightly lower permeability than the as-received sample. This result can be explained by the fact that the prepared sample has a better gradation and a packing, hence a lower void ratio.

Resilient Modulus test (RMT) is used to determine of resilient modulus (M_R) under conditions representing the stress states of base/subbase materials beneath flexible pavements subjected to moving wheel loads. According to AASHTO T-307 as-received, base and subbase samples were subjected to resilient modulus test. Prior to loading, the type of material is determined based on the grain size distribution. Since the passing material through the sieves No.10 (2.00 mm) and No.200 (0.075 mm) is less than 70% and 20% respectively, both subbase and base RCA were classified as Type-1. Thus, all materials were compacted in six layers at their optimum moisture contents and maximum dry unit weights based on modified compaction test results. The test was conducted via external linear variable displacement transducers (LVDTs) with a measurement capacity of 50.8 mm, a Geocomp LoadTrac-II loading frame and associated with hydraulic power unit system. The conditioning stage was performed on the specimens under the same confining and axial stress of 103 kPa for 500 repetitions.

Once proceeded to the actual loading stage, the confining stress was varied between 20.7 and 138 kPa during loading stages with 100 repetitions applied at each stage. Resilient modulus 6.0 software was used to keep track of the loading. The last five repetitions of each stage were used to calculate the resilient modulus of each corresponding stage. The value of resilient modulus is a measure of the elastic modulus of base and subbase materials having certain nonlinear characteristics. For calculation of the resilient modulus, Bulk Stress Model and Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) were used. The resilient modulus test (RMT) results showed that there is a linear relationship between the bulk stress and the M_R as reported in previous studies. When the MEPD Model Parameters are analyzed, it is seen that there is not much difference between the regression coefficients (k_1 , k_2 , k_3) of all samples, but the correlation coefficient is close to 1 for all square values. Using regression coefficients for the as-received sample, under the 34.5 kPa (5 psi) confining stress and 103.4 kPa deviator stress, resilient modulus was calculated as 143.8 MPa according to the MEPD Model, and for the base and subbase samples this value was found to be 154.3 MPa and 128.7 MPa respectively.

In the last part of the laboratory study, the subbase and base samples, whose geotechnical properties were determined by taking into consideration the KTS, were subjected to freeze-thaw cycles. The freeze-thaw cycle numbers were chosen 1-3-5-10 and 20. When preparing samples for freeze-thaw cycles, special plastic mold (same dimensions with CBR mold) and vibratory compression device was used. In order to observe the changes in CBR values after freeze and thaw cycles, subbase and base samples were prepared at the maximum dry unit volume weight obtained in the Modified Proctor experiment. The samples were compressed in 5 layers with an energy equivalent to the modified proctor compression energy during the vibration time determined before the experiment. The samples were compacted in molds made in CBR mold sizes in order to minimize the shaking of the samples during carriage during freeze-thaw cycles. To make comparison, CBR experiments were performed on subbase and base samples which was not subjected to freeze-thaw cycle and prepared by vibration device in plastic mold. CBR values before and after freeze thaw cycles were determined and the suitability of use was re-evaluated considering the effect of freeze thaw on CBR value. CBR values after 1-3-5-20-20 freeze and thaw cycles were determined to be below the limit values specified for the aggregates to be used in the subbase and foundation layer of the Highways Technical Specification. After the freezing and thawing cycles, the change in CBR values was determined and the suitability of use in the regions where the climatic conditions were variable and frost events were discussed separately in terms of strength properties. In order to meet the limits of the CBR values falling after the freezing and thawing cycles, it is recommended to mix the natural aggregate or using geosynthetics.

In conclusion, the use of recycled concrete aggregate obtained from the plant in the prepared subbase and base layer is suitable in terms of geotechnics. However, other engineering features should be determined before being used by the relevant civil engineering applications and their conformity with the values specified in the Technical Specifications of the Highways should be indicate.

1. GİRİŞ

Kentsel, endüstriyel ve inşaat atığı gibi katı atıkların miktarını azaltmak ve bu atık malzemelerden yararlanmak için yapılan çalışmalar her geçen yıl artış göstermesine rağmen üretilen katı atık miktarı sürekli artmaktadır. 2012 yılında dünya çapında üretilen kentsel ve endüstriyel katı atık miktarı 1.3 milyar ton iken bu miktarın yaklaşık 350 milyon tonu depolama sahalarına gönderilmiş, yalnızca 150 milyon tonu geri dönüştürülmüştür. 2025 yılı için yapılan analizlerde ise üretilen kentsel ve endüstriyel katı atık miktarının her yıl artışını sürdürerek 2.2 milyar tona ulaşması beklenmektedir (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012).

Geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik kavramlarının önem kazanmasıyla beraber atık malzemelerden yararlanma amacıyla yapılan çalışmalar artmış ve literatürde geniş bir yer bulmuştur. Katı atıklar konut, ticari veya endüstriyel alandaki insan faaliyetlerinin sonucu olarak ortaya çıkan istenmeyen ve faydasız ürünler olarak tanımlanabilmektedir. Oluşan katı atıkların inşaat, çevre, kimya ve malzeme gibi çeşitli mühendislik dalları uygulamalarında kullanılarak geri kazanımı arttırmak hedeflenmektedir. Özellikle inşaat mühendisliği alanında sürdürülebilirliği arttırmak, doğal kaynak kullanımını azaltmak gibi amaçlarla yüksek miktarda doğal malzeme gerektiren uygulamalarda geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılmaktadır.

İnşaat yapım yıkım atıklarından elde edilen beton, asfalt, tuğla gibi agregalar, hayvansal atıklar, cüruf ve uçucu kül gibi katı atıklar inşaat mühendisliği uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Safiuddin ve diğ. (2010) uçucu kül ve taban külü, çelik cürufu, lastik kauçuğu, organik lif, taş ocağı atıkları, yapım yıkım atıkları, cam atıkları, cüruf gibi katı atıkların inşaat uygulamalarında kullanılarak geri kazanılabileceğini özetlemiştir. Bolden ve diğ. (2013) katı atıklar içerisinde yer alan asfalt kaplama malzemesi, beton agregası, lastik kauçuk, cam, plastik, çimento fırın tozu, şingıl, silika tozu, uçucu kül, cüruf, domuz gübresi, hayvan yağı, pirinç çeltiği külü gibi atık malzemelerin çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımını ele almıştır.

İnşaat mühendisliğinde çeşitli uygulamalarda kullanılan katı atıklar içerisinde inşaat yapım yıkım atıkları yüksek bir orana sahiptir. Avrupa İstatistik Ofisi (Eurostat) 2016 yılında 28 Avrupa ülkesinde üretilen katı atık miktarı içerisinde en yüksek payın %36 ile inşaat yapım yıkım atıklarında olduğunu, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Çevre Koruma Kurumu (EPA) ise ABD’de üretilen inşaat yapım yıkım atıklarının 2015 yılında 548 milyon ton olduğunu belirtmiştir. Ülkemizdeki durum incelendiğinde, 1960'larda yılda 3-4 milyon ton üretilen kentsel atık miktarının 2004 yılı veri tabanında yaklaşık 25 milyon ton olarak belirtildiği görülmektedir (Turan ve diğ., 2009). Genel olarak inşaat sektöründen kaynaklanan atık üretimiyle ilgili detaylı ve sağlıklı istatistikî bilgiler bulunmamakla beraber 2012 yılında uygulamaya konan ve yaklaşık 20 yıl sürmesi planlanan Kentsel Dönüşüm Projesi kapsamında her yıl 5 milyon tondan fazla inşaat ve yıkım atığı üretilmektedir. Önümüzdeki 20 yıl boyunca birinci derece deprem bölgesinde bulunan şehirlerimizdeki riskli ilan edilen alanların ve yapıların dönüşümünü tamamlaması ile beraber 2 milyar tona yakın inşaat atığı ortaya çıkacağı tahmin edilmektedir (Kadiroğlu ve diğ., 2017).

İnşaat yıkım atıkları ayrı olarak ele alındığında, inşaat yıkım atıklarının ayrışması sonrasında oluşan malzemeleri beton, asfalt, ahşap, asfalt şingili, alçıpan ve sıva, tuğla ve kiremit, çelik diye sınıflandırmak mümkündür. ABD’de 2015 yılında oluşan inşaat yıkım atıklarının %70’ini beton agregaları oluşturmakta ve oluşan geri dönüştürülmüş beton atıkları yol dolgularında temel ve alt temel malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Cackler, 2018; ABD Çevre Koruma Kurumu (EPA), 2018). Avrupa ülkeleri incelendiğinde ise inşaat yapım yıkım atıklarından oluşan geri dönüştürülmüş beton agregalarının %40’ının yapı malzemesi olarak tekrar kullanıldığı, %25’inin beton üretiminde %20’sinin taşıt yolu, yağmur yolu, su yolu üretiminde, %10’unun ise asfalt üretiminde kullanıldığı görülmektedir (Avrupa Agregalar Birliği (UEPG), 2018). Ülkemizde ise geri dönüştürülmüş beton agregası üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda yaygınlaşmıştır. İnşaat atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının dolgu malzemesi olarak doğal agrega yerine kullanılabileceği belirtilmiştir (Dilbas ve diğ., 2014; Esin ve Cosgun, 2007). Geoteknik Mühendisliği alanında incelendiğinde geri dönüştürülmüş beton agregalarının en çok dolgu malzemesi olarak yollarda alt temel ve temel tabakasında kullanıldığı görülmektedir (Cardoso ve diğ., 2016).

Bu çalışma kapsamında Geoteknik Mühendisliği alanında inşaat yıkım atıklarından elde edilen beton agregalarını tekrar kullanılarak geri dönüştürülmüş agregalar üzerinde yapılan çalışmalara katkı sağlamak amaçlanmıştır. İstanbul Kentsel Dönüşüm Projesinde ortaya çıkan inşaat yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının geoteknik özellikleri laboratuvarda belirlenmiş ve yol dolguları için kullanım uygunluğu Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ, 2013) esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu tür dolguların donma çözülme etkisine maruz kaldığı durumda mukavemet özelliklerindeki değişimlerin kullanım uygunluğuna etkisi ayrı olarak ele alınmıştır.

1.1 Amaç

Yapılan çalışmada inşaat sektöründe sürdürülebilirlik kavramına katkı sağlamak amacıyla geri dönüştürülmüş beton atıklarının yol dolgularında alt temel ve temel tabakasında kullanılarak tekrar kazanımı ile geoteknik mühendisliği açısından elverişsiz durumlar dahil olmak üzere kullanım uygunluğunun KTŞ'ye göre belirlenmesi amaçlanmıştır. Kentsel dönüşüm projeleri kapsamında İstanbul'un çeşitli bölgelerinden elde edilen yıkım atıkları diğer malzemelerden arandıktan sonra çeşitli dane boyutlarında depolanan geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanılmıştır. Beton atıkları 50 mm'den 0.075 mm'ye kadar 6 farklı elekten (1.5", 3/4", 3/8", No.4[#], 40[#] ve 200[#]) elenmiştir. Elde edilen iri ve ince dane boyutlarındaki malzemelerden KTŞ'de alt temel ve temel tabakası için verilen dane çapı dağılım sınırlarına uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan alt temel, temel ve tesis numunelerinin geoteknik özelliklerini belirlemeye yönelik standart laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda numunelerin geoteknik özelliklerini belirlemek için dane çapı dağılımı, kıvam limitleri, standart ve modifiye Proctor, ıslak ve kuru Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), sabit seviyeli permeabilite ve esneklik modülü deneyleri yapılmıştır.

Hazırlanan alt temel ve temel numunelerin elverişsiz iklim koşullarına maruz kaldığında mukavemet özelliklerindeki değişimlerin kullanım uygunluğu üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla sırasıyla 1-3-5-10 ve 20 donma çözülme çevrimine maruz kalan numuneler üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme sonrası CBR deneyinden elde edilen sonuçlar KTŞ'de belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılmış ve kullanım uygunluğu tekrar değerlendirilmiştir.

1.2 Kapsam

Laboratuvarda deneysel olarak yapılan çalışmada hazırlanan alt temel ve temel numunelerinin geoteknik mühendisliği açısından kullanım uygunluğu yapılan geoteknik deneylerle ele alınmış ve donma çözülme olayına maruz kalan geri dönüştürülmüş beton agregalarının mukavemet değişimlerinin kullanım uygunluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

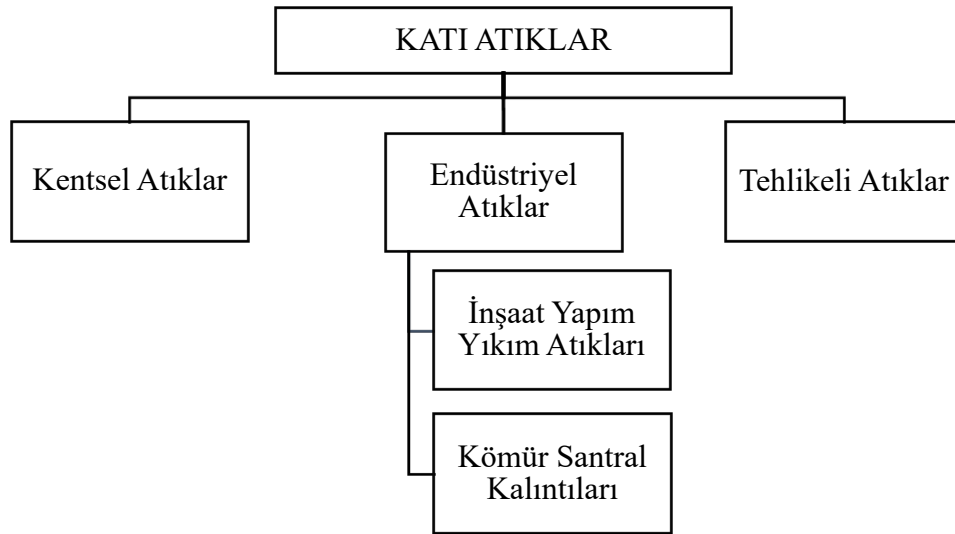
Tez kapsamında ilk bölümde yapılan çalışmanın amacı ve kapsamı özetlenirken, çalışmanın ikinci bölümünde inşaat sektöründe katı atık kullanımı kentsel ve endüstriyel katı atıklar olarak ele alınmıştır. İnşaat sektöründe en çok kullanılan atık malzemelerin literatürde belirtilen özellikleri ve kullanım alanları özetlenmiş, bu konuda yapılan çeşitli çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Kentsel atıklar kâğıt, plastik ve cam olarak incelenirken, endüstriyel atıklar öncelikle kömür santral atıkları ve inşaat yapım yıkım atıkları olarak ikiye ayrılmıştır. Kömür santral atıkları da uçucu kül ve taban külü olarak, inşaat yapım yıkım atıkları ise geri dönüştürülmüş asfalt ve beton agregası olarak alt başlıklara ayrılıp bu alanda yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bu atıkların çeşitli ülkelerdeki ve ülkemizdeki üretim miktarları ile dönüşüm oranları ile gelecek yıllar için belirlenen geri dönüşüm hedef ve politikalarına değinilmiştir.

Deneylerde kullanılan geri dönüştürülmüş beton agregasının özelliklerine ve deneylerde kullanılan numunelerin hazırlanma yöntemleri ile deney yöntemlerine 3. bölümde yer verilmiştir. Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregası numunesinin geoteknik özellikleri belirlenmiş ve Karayolları Teknik Şartnamesi için belirtilen dane çapı dağılım sınırlarının dışında kaldığı tespit edilmiştir. Sınır değerler dikkate alınarak alt temel ve temel numunelerinin hazırlanışı ve deney yöntemleri bu bölümde açıklanmıştır.

Deneysel çalışmaların sonucu olarak hazırlanan alt temel ve temel tabakası ile tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregası için belirlenen geoteknik özellikler 4. bölümde özetlenmiştir. Yine bu bölümde numuneler üzerinde yapılan geoteknik deneylerin sonuçları Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen sınır değerler dikkate alınarak değerlendirilmiş, geçmişte yapılan çalışmalardaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar özetlenip, gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE ATIK MALZEMELERİN KULLANIMI

İnsan faaliyetlerinin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan, kullanılmayan ve işlevini yitirmiş madde olarak tanımlanabilen atık bileşenlerine ayrıştırılıp, oluşan malzemelerin tekrar kullanılmasıyla beraber değer kazanır. Atığı oluşturan maddeler çok çeşitli şekilde sınıflandırılabilir. Atıkları fiziksel özelliklerine, kullanım yerlerine ve tehlike durumlarına göre veya kaynağına göre sınıflandırılmak mümkündür. Temel olarak katı atıklar evsel atıklar, endüstriyel atıklar, ticari atıkları kapsayan kentsel atıklar, hafriyat ve inşaat yapım-yıkıntı atıkları ile özel atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. Avrupa İstatistik Ofisi (Eurostat) katı atıkları maden ve taş ocağı atıkları, üretim atıkları, enerji atıkları, yapım yıkım atıkları, diğer ekonomik aktivitelerden elde edilen atıklar ve ev atıkları olarak sınıflandırmıştır. Fakat Birleşmiş Milletler Asya ve Pasifik Ekonomik Komisyonu (UNESCAP) atıkları belediye atıkları, endüstriyel atıklar, tarımsal atıklar ve kalıntıları, tehlikeli atıklar olarak sınıflandırırken inşaat yıkım atıklarını belediye atıkları içerisinde kabul etmiştir. Bu çalışma kapsamında Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Kurumu (EPA) tarafından yapılan katı atık sınıflandırılması kabul edilmiş olup, EPA'nın katı atıkları sınıflandırılması Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1: Katı atıkların sınıflandırılması (EPA).

2.1 Kentsel Atıklar

Çöp olarak da bilinen kentsel atıklar insan faaliyetlerinin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan atıklar olarak tanımlanabilir. Kentsel atıkların kaynakları arasında konutlar, işletmeler, okullar ve hastaneler gibi özel, ticari ve kurumsal yerler sayılabilir. ABD Çevre Koruma Ajansının (EPA) kentsel atık tanımı, endüstriyel, tehlikeli ve inşaat yapım yıkım atıklarını içermemektedir. Kentsel atıklar ürün ambalajı, kâğıt, bahçe süsleri, mobilyalar, giysiler, şişeler ve kutular, yiyecek, gazete, ev aletleri, elektronik piller gibi günlük olarak kullanılan birçok maddeyi içermektedir.

EPA verilerine göre 2015 yılında ABD’de metal atıklar hariç en yüksek miktarda kâğıt atık üretilmekte olup, onu sırası ile plastik, ahşap, tekstil ve cam takip etmektedir. Avrupa İstatistik Ofisi (Eurostat) ise Avrupa ülkelerinde kentsel atıkların çoğunun evsel atıklardan oluştuğunu ve kâğıt, karton, tekstil, plastik, cam ile metallerin bu kategoride yer aldığını belirtmiştir. Güney Afrika Atık Bilgi Merkezi (SAWIC) 2018 yılında Güney Afrika Atık Raporu (SoWR) yayınlamış ve bu raporda üretilen kentsel atıklar içerisinde kâğıt atıklarının 3 milyon ton, plastik atıkların 2 milyon ton, cam atıkların 1 milyon ton olduğunu belirtmiştir. Kâğıt atıklar %39, plastik atıklar %15 ve metal atıklar %48 oranında geri dönüştürülmektedir. Japonya’da Çevre Bakanlığı tarafından 2014 yılında yayınlanan “Japonya’da Atık Yönetiminin Tarihçesi ve Mevcut Durumu” adlı raporda üretilen kentsel atık miktarı yaklaşık 36 milyon ton ve geri dönüşüm oranı %20.4 olarak belirtilmiştir. Ülkemizde ise 2014 yılında oluşan belediye atık miktarının 27 milyon ton olup, bunun %6’sı geri kazanılmış, %64’ü düzenli depolama alanlarına gönderilmiş ve %30’u ise vahşi depolama (kontROLSÜZ, çöplük) yöntemiyle bertaraf edilmiştir. Geri kazanıma gönderilen kentsel atık miktarı 1.5 milyon ton, düzenli depolanan atık miktarı 17.5 milyon ton, vahşi depolanan atık miktarı ise yaklaşık 8 milyon tondur. Belediyelerde toplanan atıkların %40.7’sini kâğıt, %30’unu plastik, %10.9’unu cam, %9.7’sini metal, %2’sini ahşap ve %6.7’sini kompozit oluşturmaktadır (TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 2018).

Üretim ve geri dönüşüm oranı yüksek olan bu malzemelerden birçok alanda yararlanıldığı gibi inşaat mühendisliği alanında da çeşitli uygulamalarda yararlanılmaktadır. Bu bölümde genel bir bakış ile kentsel katı atıklar içerisinde önemli bir yer tutan olan kâğıt, plastik ve camın inşaat mühendisliğinde kullanım alanları özetlenmiş ve çalışmalardan elde edilen sonuçlara değinilmiştir

2.1.1 Kâğıt

Kâğıt atığı, artık kullanılmayan veya bir amaca hizmet etmiş ve bertaraf edilmesi gereken kağıtlar olarak tanımlanabilir. Ülkelerin atık depolama sahalarında atıkların bertaraf edilmesinde çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalınması sonucunda kâğıt atıkları da alternatif kullanım alanı bulmuştur. Beton endüstrisinin de sürdürülebilir kılınması için alternatif bağlayıcılar geliştirmeye ihtiyaç duyması kâğıt atıklarının inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımının önünü açmıştır. Kâğıt beton, Portland çimentosu yerine belirli oranda atık kâğıt kullanılan yeni bir kompozit malzemedir. Atık kâğıt kullanmak sadece kullanılan çimento miktarını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda çevre dostu yapı malzemesi oluşturmaktadır (Shermale ve Varma, 2015).

Literatürde atık kâğıdın inşaat mühendisliğinde kullanımı üzerine çalışmalar yer almaktadır. Arya ve Kansal (2013), atık kağıtların tuğla üretiminde kullanımını incelemiş ve kullanım uygunluğunu değerlendirmiştir. Sıkıştırma testi sırasında elde edilen sonuçlar atık kâğıt kullanılarak elde edilen tuğlaların sadece yük taşımayan duvarlar için kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada atık kâğıt içeren tuğlaların ağırlığının normal tuğlalara nazaran daha az olmasının ve ölü yükü, kirliliği, maliyeti azaltmasının da tercih edilme sebepleri arasında olduğu belirtilmiştir. Kâğıt atıkların değerlendirilmesi ile ilgili araştırmalar beton üretiminde yeni bir geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının önünü açmıştır. Beton üretiminde atık kâğıt kullanımını inceleyen Balwaik ve Raut (2011) betondaki çimentoyu ağırlıkça %5 ila %20 aralığındaki atık kâğıt ile değiştirmiştir. Üretilen betonları klasik beton ile karşılaştırmış ve %10'a kadar atık kâğıt ilavesinin basınç ve çekme dayanımlarını kademeli olarak arttırdığı, %10'dan daha fazla oranda eklenmesinin ise dayanımları kademeli olarak azalttığı sonucuna varmıştır. Atık kâğıdın tavan levhalarının üretiminde kullanılabilirliğini araştırmak ve sağlık açısından risk teşkil eden geleneksel asma tavan panellerine bir alternatif sağlamak amacıyla Okeyinka ve Idowu (2014) atık kâğıtlardan oluşan tavan panelleri tasarlamışlardır. Okeyinka (2016) ise bağlayıcı olarak çimento kullanmadan atık kâğıttan çevre dostu, hafif, yük taşımayan bir blok geliştirmeyi amaçlayıp, geri dönüştürülmüş atık kâğıtların hafif yapı malzemeleri olarak uygulanabilirliğini göstermiştir.

Ülkemizdeki durum incelendiğinde ise kâğıt ithalatının, 2017 yılında 750 bin ton seviyesine çıktığı ve bunun gelmiş geçmiş en yüksek miktar olduğu görülmektedir. Eylül 2017'den itibaren hurda karton fiyatlarında %50 fiyat düşüşü yaşanmıştır. Atık kâğıdın tekrar kâğıt imalatında kullanılması hava kirliliğini %74-94, su kirliliğini %35, su kullanımını %45 azaltmaktadır. Kâğıt geri dönüşümü ile %60 enerji tasarrufu, %80 su tasarrufu ve %95 hava kirliliği azalımı sağlanabilmektedir. 1 ton kâğıdın geri dönüştürmesiyle 0.8 m uzunluğunda 17 tane ağacı, 26.5 m³ suyu, 318 litre petrolü, 4100 kWh enerjii (ortalama bir eve 6 ay yetecek kadar enerji) korumanın mümkün olduğu düşünüldüğünde kâğıt atığının mühendislik uygulamalarında kullanılmasının ülkemize getireceği faydalar açıkça görülmektedir (TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 2018).

2.1.2 Plastik

Pek çok ürünün üretiminde kullanılan plastik çok yönlü, uzun ömürlü, hafif, esnek, neme dayanıklı, güçlü ve nispeten ucuz bir malzeme olup, bozulup yok olması çok yavaş ve güçtür. Kentsel atıklar içerisinde önemli bir paya sahip olan plastik atıkların bertaraf edilmesi adına bilinç artırılıp, çeşitli uygulamalar ile plastiklerin sebep olduğu olumsuz koşullar ortadan kaldırılmaya çalışılmasına rağmen 50 yıldan fazla bir süredir küresel plastik üretimi ve tüketimi artmaya devam etmektedir. Avrupa Birliği ülkeleri yıllık ortalama 25 milyon ton plastik atık oluşmakta ve bunların yalnızca %30'u geri dönüştürülmektedir (Avrupa Birliği Komisyonu, 2018). Şubat 2015'te Science dergisinde yayınlanan Ulusal Ekolojik Analiz ve Sentez Merkezinde (NCEAS) bir bilimsel çalışma grubu tarafından yürütülen bir çalışmada, plastik atıkların karadan okyanusa girdiğini, her yıl okyanuslarda 8 milyon ton plastik kaldığını belirtilmiştir. 2025 yılında, 8 milyon tonun yaklaşık 20 katı kadar plastik atığın okyanuslarda kalacağı öngörülmektedir (<http://plastic-pollution.org>).

Polietilen torbalar, şişeler, lastik lastikler vb. gibi atık malzemelerin bertaraf edilmesiyle oluşan ve bertaraf edildikten sonra çevresel tehlikelere neden olan plastiklerin çevre ile doğrudan temasını önlemek için betona çeşitli plastik formlar dâhil edilmiştir. Plastiğin bitümlü beton karışımında bitümün kısmi ikame maddesi olarak kullanımı Bansal ve diğ. (2017) tarafından ele alınmıştır. Çalışmada optimum bitüm içeriği plastik atık ve kauçuk lastik atığı ile sağlanmıştır. Bitümün plastik ile kısmi ikame edilmesi betonun mukavemet özelliklerinde iyileşmeye yol açmıştır.

Frigione (2010) yaptığı çalışmada betonda ağırlıkça %5'lik doğal kumu atık plastik şişelerden üretilen malzeme ile ikame etmiş ve farklı su/çimento oranlı numuneler üzerinde mekanik testler yapmıştır. Sonuçları doğal ince agrega içeren referans beton numuneleri ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada atık plastik içeren betonların referans beton ile benzer işlenebilirlik özellik sergilediği ve orta derecede sünek davranış gösterdiği, basınç ve çekme dayanımının referans betondan daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sule ve diğ. (2017) ise ince agrega yerine %0, %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında atık plastik ilavesinin betonun basınç dayanımı ve yoğunluğu üzerindeki etkisini, farklı w/c oranına sahip C20 beton sınıfına sahip numuneler üzerinde yaptığı deneyler ile araştırmıştır. Numuneler 150x150x150 mm ebatlarında kalıplara dökülmüş, sırasıyla 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca bekletilmiştir. Sonuçlar plastik atık yüzdesindeki artış ile betonda çökme miktarının arttığını ve basınç dayanımının azaldığını ortaya koymuştur. Çökme miktarındaki artış sebebi olarak, bazı parçacıkların köşeli ve tek biçimli olmayan şekillere sahip olması gösterilmiştir. Bulgular ayrıca betonun birim hacim ağırlığında plastik atık artışı ile beraber bir artış olduğunu göstermiştir. Bu araştırmada, atık plastiklerin betonun basınç dayanımı arttırmak için kullanılabilecek iyi malzemeler olmadığı, ancak hafif beton üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Atık plastiklerin son yıllarda kullanım alanlarından biri plastik yollardır. Plastik yollarda kullanılan plastikler, çoğunlukla inşaat çöplüğünden toplanan plastik taşıma torbaları, tek kullanımlık bardaklar ve pet şişelerdir. Plastik atıkları çimento ve kum yerine kullanarak, toplam inşaat maliyetini azaltmak hedeflenmiştir. %5 uygun değiştirici içeriğindeki betonun dayanımı sade çimento betonundan daha yüksektir. Ayrıca atık plastik eklendiğinde yağmur suyunun sızmasından kaynaklı oluşan hasarın azalacağı öngörülmektedir (Jalaluddin, 2017). Gana'da aşırı trafik ve dingil ağırlığı nedeniyle yollarda oluşan çukurların oluşumunu engellemek, belediye katı atık yönetimine katkı sağlamak amacıyla yol yapımında atık plastikten elde edilen termoplastik polimerler yani yüksek yoğunluklu polietilen ve polipropilen karışımı kullanılmıştır (Appiah ve diğ, 2017). Hindistan'da da atık plastikler yol inşaatından kullanılmıştır. Hindistan'ın Tamil Nadu eyaleti plastik kırsal yolların uygulanmasında önemli başarılarla sahip olup, Karnataka eyaleti de atık plastik kullanıldığı yolların yapımında önemli ilerleme kaydetmiştir (Hindistan Kamu Sistemlerinde Yenilikler Merkezi, 2014).

Manju ve diğ. (2017), yollarda görülen çukur, oluk, tekerlek izi vb. problemlere çözüm olması amacıyla yol inşaatında plastik atık kullanımını önermektedir. Polietilen, Polistiren, Polipropilen türünde atık plastikleri yol inşasında kullanmışlardır. Uygulamada atık plastiklerin sıcak bitüm ile karıştırıldığında agrega üzerinde yağlı bir tabaka oluşturması için plastik atıklar önce eritilip daha sonra agrega ile karıştırılmıştır. Oluşturulan karışım normal bir katran yolu gibi yol yüzeyine serilmiştir. Agregalar üzerine kaplanan polimer, boşlukları ve nem emilimini azalttığı için tekerlek izi ve çukur oluşumu gözlenmemiştir. Çalışmada plastik atıkların bitümlü karışımlarda kullanılmasının, mekanik ve mukavemet özelliklerini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Plastik atık kullanılmasının avantajları bitüm ihtiyacını %10 civarında azaltması, sadece döşemeyi güçlendirmekle kalmayıp dayanıklılığını da arttırması, ekonomik ve çevre dostu bir uygulama olması, yolların yorulma ömründe ve performansında iyileştirmesi şeklinde listelenmiştir. Dezavantaj olarak ise plastik atıklarda oluşan toksin malzeme sızıntısı ve Hidrojen Klorür (HCl) gazının serbest kalması gösterilmiştir.

Ülkemizdeki plastik atık üretimi ve yararlanılan uygulamalar incelendiğinde ise yüksek miktarda plastik atık oluştuğu ve geri dönüşüm oranının istenilen seviyenin altında seyrettiği görülmektedir. Türkiye’de yılda yaklaşık toplam 8 milyon ton plastik tüketilmekte, 2 milyon ton plastik ambalaj piyasa sürülmekte ve bunun sadece 300 bin tonu toplanmaktadır. Birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılmaya başlanan ve bertaraf edilmesinin her geçen gün önem kazandığı plastik atığın mühendislik alanında kullanımı ülkemizde yaygın olmayıp, bu konuya verilen önemin arttırılması gerekmektedir. TÜDAM Değerlendirilebilir Atık Malzemeler Sanayicileri Derneği tarafından yapılan 2018 yılındaki çalışmaya göre, 2017 yılında Türkiye’nin plastik atık ithalatı gelmiş geçmiş en yüksek miktar olan 205 bin ton seviyesine ulaşmıştır. 2018 yılının ilk iki ayında, geçen yılın neredeyse 1/3’ü kadar plastik ithalatı yapılmıştır. Son 5 yıl içerisinde sadece atık plastik özelinde dış ticaret açığı toplamımız 128 milyon Euro’ya ulaşmış ve ithal edilen karışık plastik atıkların %30-35’i geri dönüştürülebilecek nitelikte olmayıp bertaraf edilmesi gereken atık niteliğindedir. Ülkemizde plastik atıkların tek başına kentsel atıkların %30’unu oluşturduğu düşünüldüğüne bu atıkların yüksek miktarlarda ham madde getiren mühendislik uygulamalarında alternatif veya katkı malzemesi olarak kullanılmasının önemi açıkça görülmektedir (TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 2018).

2.1.3 Cam

Kum, soda ve kireçten oluşan cam ve camdan yapılmış her türlü ürün (şişe, kavanoz, pencere camları, far vb.) insan faaliyetlerinin bir yan ürünü olarak kullanım ömrünü tamamladıktan sonra atık olarak değerlendirilmektedir. Oluşan kentsel atıklar incelendiğinde cam atıklarının önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi için Şehirler ve Bölgeler Birliği (ACRR) verilerine göre, dünyadaki insanlar her yıl düzenli atık depolama sahalarına 1.5 milyon ton cam göndermektedir (Bolden ve diğ, 2013). Bu atık camların geri kazanılmasıyla %25 oranında enerji tüketiminde, %20 oranında hava kirliliğinde, %80 oranında maden atığında ve %50 oranında da su tüketiminde azalma sağlanabilmektedir (TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 2018).

Genel olarak, camı soda-kireç camı (genel ambalajlama, inşaat ve otomobillerde kullanılan), Pyrex camı (termal şoklara dayanabilen ev aletlerinde kullanılan) ve kurşunlu cam (bardaklarda, şampanya flütlerinde ve süslemelerinde kullanılan) gibi kimyasal bileşimlerine göre üç tipte sınıflandırmak mümkündür. Cam 5 mm'lik bir elekten geçmek için ezilip elendiğinde, doğal kuma çok benzemektedir ve diğer ince agrega malzemelerine benzer mühendislik özellikleri göstermektedir. Bu nedenle, atık cam agregası inşaat agregaları için bir hammadde ikame maddesi olarak değerlendirilmektedir. Cam atıklarının çimento esaslı ürünlerde kullanılması üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Geri kazanılmış malzemelerin kullanım alanının çeşitlendirilmesi amacıyla atık camın diğer potansiyel uygulamalarını keşfetmeye ihtiyaç vardır. Atık cam çimento esaslı ürünlerde kullanılmakta olup, sadece atık bertaraf endişesini azaltmakla kalmamakta aynı zamanda çimento harçlarının, parke bloklarının ve betonun özelliklerini de iyileştirmektedir. Çimento esaslı malzemelerde bazı bileşikler ile birlikte kullanıldığında hava kirletici maddeleri gidermek, büzülmeyi ve su emilimini azaltmak gibi olumlu etkilere sahip olmakla beraber çekici renklerde atık camın kullanımı estetik açıdan hoş bir görünüme sahip mimari harçlar geliştirmek için de kullanılabilir (Lu ve Poon, 2019). Atık camların çimento ve beton üretiminde kullanımının birçok çevresel ve ekonomik faydası bulunmaktadır. Atık bertaraf maliyetlerini ve doğal malzeme kullanımını azaltması, depolama alanlarımızın ömrünü uzatması, kırsal alanların korunmasına yardımcı olması, çimento klinkerinden salınan hava kirletici maddelerinin miktarını azaltması sayılabilecek ekonomik ve çevresel faydalarından bazılarıdır (Tamanna ve diğ, 2013).

Yüksek tonajlarda elde edilen cam atıkları çimento esaslı ürünlerde kullanım alanı dışında da çeşitli uygulamalarda tercih edilebilir. Wartman ve diğ. (2004) cam atıklarının kullanım alanlarını yapısal uygulamalar ve drenaj uygulamaları olarak ayırmıştır. Cam atıkları çeşitli dolgularda (yapısal ve yapısal olmayan dolgularda, alt temel ve tabakalarında, istinat duvarı geri dolgularında vb.) ve drenaj uygulamalarında (temel drenajı, drenaj örtüsü, engelleyici drenaj, sızıntı suyu toplama ortamı, kum filtreleri (atık su) vb.) kullanım potansiyeline sahiptir. Mohajerani ve diğ. (2017) ezilmiş atık camın asfalt karışımlarında agrega ile değiştirilme potansiyelini araştırmıştır. Bu çalışmada camın asfalt karışımlarında bulunması asfaltın çekme dayanımı ile kararlılığı üzerindeki olumsuz etkisine rağmen döşemenin uygun performansı ve dayanıklılığı için doğal agreganın en fazla %15 oranında atık camla değiştirilebileceği belirtilmiştir.

Ülkemizde, İsviçre’de %94.18, Luxemburg’da %93.76, İsveç’te %92.9 olan cam geri dönüşüm oranı %25.81’dir. Geri kazanım oranının ise cam için %20 seviyelerinde kaldığı öngörülmektedir. Türkiye’de başta cam ambalaj sektörü olmak üzere, çeşitli üretim faaliyetlerinde hammadde olarak kullanılan ve yüksek miktarda doğal kaynak, enerji ve karbon emisyonu tasarrufu sağlama potansiyeli olan cam kırığı istenen miktarlarda temin edilememektedir. Bunun sebebi cam ambalaj atığı toplama ve geri dönüşüm faaliyetlerinin etkin şekilde yürütülememesidir. Cam atıklarının, birçok ülkede cam ambalaj üreticileri için ana hammadde haline gelmişken, ülkemizde toplanan atık miktarının çok düşük olması halen doğal kaynaklara bağımlı durumda kalmamıza neden olmaktadır (Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, 2012).

Cam atığının geri dönüşüme ve geri kazanıma uygun malzeme olması ülkemizde de bu konuda yapılan çalışmalara son yıllarda hız kazandırmıştır. Toplumda çevre bilinci oluşturulması için Millî Eğitim Bakanlığı ve belediyeler iş birliği yapılarak Eğitim Farkındalık Projeleri yürütmüşlerdir. Cam geri dönüşüm tesislerinin modernize edilmesi için geri dönüşüm tesislerinin modernizasyonu yapılmış ve Cam Kumbarası Projesi için cam atık toplama sistemlerine finansal destek sağlanmıştır. Şişecam firmasının kurduğu Çevre Koruma ve Ambalaj Atıkları Değerlendirme Vakfı (ÇEVKO) tarafından devralınan cam kumbara sistemi ile geri dönüşüm toplumuna geçiş yapmak amaçlanmıştır. Kumbara sistemi kurulmuş 22 ilde cam kırıkları çeşitli yöntemlerle (kumbara, poşet, konteyner vb.) toplanmakta ve tesislerde çeşitli işlemlerden geçirilerek fırına hazır cam kırığı haline getirilmektedir.

Evlerden ve işletmelerden (otel, restoran vb.) karışık olarak toplanan atıkların içerisinde bulunan cam atıklar düzenli depolama alanlarında son bulmakta ve tesis girişinde ayrıştırılmasına rağmen bu çalışmalar yeterli olmamakta, hemen hemen tamamı çöplerle birlikte gömülmektedir. İstanbul, Ankara ve İzmir’de her yıl yaklaşık 400.000 ton cam atığının gömülmekte olduğu bilinmektedir. Düzenli depolama öncesinde ayrıştırılabilen cam şişe miktarı yılda 5000 tonu geçmemektedir. Yapılan çalışmalar yeterli olmamakta, ülkemizde halen maddi değeri düşük olan cam verimli bir şekilde geri kazanılmamakta ve değerlendirilmemektedir. Cam atıklarının verimli bir şekilde değerlendirilmesi için yapılan çalışmalara ve diğer ülkelerde yararlanılan çeşitli mühendislik uygulamalara ağırlık verilmesi gerekmektedir (Aydeniz, 2016).

2.2 Endüstriyel Atıklar

Sürdürülebilir katı atık yönetimi ve geri dönüşümü ile ilgili endişeler ekonominin tüm sektörlerinde giderek daha belirgin hale gelmiştir. Dünyadaki mevcut eğilim sürdürülebilir inşaat içindir ve yan ürünlerin uygulanması bunu başarmanın yollarından biri olarak gösterilmektedir. Ekonomide önemli bir yer tutan endüstri sektörünün oluşturduğu atıklardan yararlanmak için yapılan çalışmalar da gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Çevre Koruma Kurumu (EPA) endüstriyel atıkları kömür santral atıkları ve inşaat yapım yıkımından oluşan atıklar olarak 2’ye ayırmıştır. Bu bölümde de endüstriyel atıklar kömür santral atıkları ve inşaat yapım yıkım atıkları olarak incelenmiş, inşaat mühendisliği uygulamalarında en çok yararlanma alanı bulan kömür santral atıklarından uçucu kül ve taban külü, inşaat yapım yıkım atıklarından ise geri dönüştürülmüş asfalt ve beton agregası ele alınmıştır.

2.2.1 Kömür Santral Atıkları

Termik enerji, modern uygarlık dünyasında büyük bir enerji kaynağıdır. Biokütle son zamanlarda geleneksel yakıtların ümit verici bir alternatifi olarak dikkat çekse de fosil yakıtlar, termik enerji üretimi için ana kaynak olmaya devam etmektedir. Ekonomik ve teknik avantajlarından dolayı birçok ülkede elektrik ve enerji üretiminde en çok termal kömür tercih edilmektedir. Santrallerde elektrik üretimi sürecinde yüksek miktarlarda kömür santral atıkları oluşmaktadır. Kömür külü, çevreye atılabilecek ağır metal içerikleri nedeniyle potansiyel çevresel tehlikelere neden olmaktadır.

Kömür santral atıklarının (KSA) kullanımı yenilenemeyen malzeme kaynaklarının kullanımını azaltmaya yardımcı olmakta ve bu nedenle sürdürülebilirliğin artırılmasına katkıda bulunmaktadır (Jayaranjan ve diğ, 2014).

Kömür santral atıkları çeşitli kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Uçucu kül, taban külü, sentetik alçı temizleyici olarak bilinen kükürt giderme malzemeleri, kazan cürufu ve akışkan yatak yakma külü kömür santral atıklarını oluşturmaktadır. Fakat uçucu kül ve taban külü diğer kömür santral atıklarına göre daha yüksek miktarlarda oluşmakta ve bu miktarların giderek artacağı öngörülmektedir. ABD’de hükümet tarafından sağlanan yardım ve destekler ile karayolu, kaldırım ve köprü, yol tabanı, yapısal veya yapısal olmayan dolgu inşasında kullanıldığından dolayı kömür santral atıkları büyük bir pazardır. ABD’de uçucu kül üretimi 1974’ten 2013’e kadar 40.4 milyon tondan 53.4 milyon tona yükselirken, taban külü yıllık %1 artışla 14.5 milyon tona yükselmiştir. Çizelge 2.1’de 2013 yılında ABD’de kömür santral kalıntılarından elde edilen malzemelerin üretim ve kullanım miktarı ile 2033 yılında beklenen miktarlar özetlenmiştir. Kömür santral atıkları üretim ve kullanım oranının artmasıyla, kullanımı yöneten standartlar da uygulanmaya başlamıştır. Kömür santral atıkları kullanımı için çok sayıda teknik ve mühendislik standart devlet kurumları tarafından geliştirilmiştir. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaşım Görevlileri Birliği (AASHTO), Federal Karayolu İdaresi (FHWA), Federal Havacılık İdaresi (FAA) bunlardan bazıları olup, Ulusal Hazır Beton Birliği (NRMCA), Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği (ASCE) ve çok sayıda devlet ulaşım departmanı kömür santral atıklarının kullanımını arttıran itici güçtür. (Amerika Kömür Külü Kurumu (ACAA), 2015).

Çizelge 2.1 : ABD, 2013 KSA üretim ve kullanım miktarları ile 2033 yılında beklenen miktarlar (ACAA, 2015).

Malzeme	2013 Üretim (Milyon Ton)	2013 Kullanım (Milyon Ton)	2033 Beklenen Üretim (Milyon Ton)	2033 Beklenen Kullanım (Milyon Ton)
Uçucu Kül	53.4	23.3	54.6	35.7
Taban Külü	14.5	5.6	14.7	7.2
Toplam	114.7	51.6	120.6	76.5

Türkiye’deki durum incelendiğinde ise ekonomik büyüme eğiliminin enerji tüketimlerinin de artmasına sebep olduğu görülmektedir. Enerji tüketimindeki artışlar ve endüstriyel gelişim beraberinde çevre kirliliğinde artış meydana getirmektedir.

Küresel ısınma ile ilgili problemlerin çözümü için fosil kaynaklı enerjiler yerine yenilenebilir kaynakların kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizde güncelliğini koruyan en önemli konulardan biri enerjiden ve kullanılan hammaddeden tasarruftur. Türkiye'nin orta ve uzun vadeli enerji üretim politikalarının başında termik santrallerden enerji üretimi gelmektedir ve termik santrallerde taş kömürü ve linyit yakılmaktadır. Türkiye, 2016 yılında dünyanın 7. büyük taş kömürü ithalatçısı, Avrupa'nın ise en büyük 2. linyit üreticisi ve tüketicisidir. 2016 yılında elektrik üretiminin %34'ü kömürden sağlanmıştır. Eylül 2018 itibariyle ülkemizde 27 tane kömür termik santralin 16'sında linyit kullanılmaktadır ve bu durum kömüre dayalı kurulu gücün %52'sinden linyit kullanıldığını göstermektedir. Termik santrallerde elektrik üretimi sırasında maden atığı, sıvı atık ve kömürün yakılması sonrası arta kalan uçucu kül olmak üzere 3 grup kömür atığı oluşmaktadır (TMMBO Çevre Mühendisleri Odası, 2019).

Türkiye'de bulunan 14 adet büyük ölçekli termik santrallerden kullanılan kömür ve oluşan atık kül miktarları Çizelge 2.2'de özetlenmiştir. Türkiye'de kömür santral atıklarını kontrol altında tutmak ve değerlendirmek için çeşitli kanun, yönetmelik, tebliğ ve genelgeler yürürlüğe konmuştur. Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği (2014), Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği (2011), Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğe İlişkin Genelge (2010/16) ve Entegre Atık Yönetim Planı Genelgesi (2010/9) bunlardan bazılarıdır. 2872-Çevre Kanunu (1983) ile Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015), Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (2010), Yeraltı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (2012), Yüzeysel Sular ve Yeraltı Sularının İzlenmesine Dair Yönetmelik (2014) ise oluşan kömür santral atıklarını kontrol altına almayı amaçlayan kanun ve yönetmeliklerdendir. Türkiye'de Kanun, yönetmelik, tebliğ ve genelgelere rağmen termik santrallerden kaynaklanan küllerin çevreyle uyumlu bir şekilde yönetimi halen tam olarak yapılamamaktadır. Bunun sonucu olarak oluşan kömür santral atıklarından yüksek oranlarda yararlanılamamaktadır. Üretilen kömür santral atık miktarını azaltmak ve yararlanma oranını arttırmak için sırasıyla oluşan kömür santrallerinden kaynaklı oluşan kül miktarının kaynağında azaltılması, küllerin geri kazanımı, geri kazanılamayan küllerin mevzuata uygun düzenli depolanması ve mevcut kül depolama sahalarının iyileştirilmesi gerekmektedir (Başar ve diğ, 2016).

Çizelge 2.2 : Türkiye’de büyük ölçekli termik santrallerde kullanılan kömür ve oluşan kül miktarları (Başar ve diğ, 2016).

Termik Santral	Kullanılan Kömür (Ton/yıl)	Oluşan Kül (Ton/yıl)
Soma	5.884.156	2.373.439
Çatalağzı	1.710.000	803.703
Kangal	6.452.745	1.322.832
Sugözü	3.300.000	375.000
Tunçbilek	1.240.786	591.854
Seyitömer	5.850.000	1.989.000
Kemerköy	3.962.987	1.585.195
Afşin	23.382.791	6.141.137
Yatağan	6.558.000	1.320.570
Orhaneli	1.426.360	357.391
Yeniköy	2.522.432	713.847

2.2.1.1 Uçucu Kül

Termik santrallerde elektrik üretimi sırasında baca gazı içindeki bir yanma odasından çıkan ve hava kirliliği kontrol ekipmanı tarafından yakalanan, genellikle yüksek yüzey alanına sahip çok küçük parçacıklardan ve yüzeyde daha yüksek miktarda metalden oluşan küller uçucu kül olarak adlandırılır (ABD Federal Karayolu İdaresi). Uçucu külün kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri önemli olmakla birlikte, ticari başarı külün kullanım miktarı ile maliyetine bağlıdır. Bu durum uçucu külün kullanım alanları üzerinde yapılan çalışmaları genişletmiş ve her geçen gün endüstriyel atıkların inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı artmıştır. Uçucu kül inşaat mühendisliğinde en çok çimento ve beton üretiminde kullanılmaktadır.

Dünyada gelişen uçucu kül pazarı göz önüne alındığında, uçucu külün bir atık olarak değil kaynak olarak kabul edildiği görülmektedir. Avustralya’da kömür külü üretimi 2014 yılında 12.38 milyon tona ulaşmış ve 1.72 milyon tonu beton ve çimento üretiminde kullanılmıştır. Güney Afrika’da 2014 yılında uçucu külden neredeyse sadece çimento esaslı pazarlarda yararlanılmıştır (%72’si çimento, %26’sı ise beton üretiminde). Çin’de uçucu kül inşaat projelerinde maden dolgu işlerinde, çimento harcı ve beton üretiminde kullanılmaktadır (Kruger, 2017). Caldas-Vieira (2014), Avrupa Birliği ülkelerinde uçucu külün çimento esaslı uygulamalarda %52’sinin, açık döküm madenlerinin çevre restorasyonu için %40’ının kullanılıp, yaklaşık %2’sinin stoklanıp, %6’sının atıldığını belirtmiştir.

Uçucu külün etkin kullanımı ve kullanılmayan uçucu külün imha edilmesi geoteknik ve çevre mühendisleri için her zaman bir zorluk olmuştur. Literatürde uçucu külün geoteknik mühendisliğinde kullanımı üzerine birçok çalışma yer almaktadır. Uçucu kül geoteknik uygulamalardan en çok dolgularda tercih edilmektedir. Karayolları, demiryolları, su rezervuarları, ıslah çalışmaları vb. altyapı projeleri çok büyük miktarda toprak dolgu malzemesi gerektirmektedir. Çoğu zaman bu büyük alanlar, bu amaç için uygun olmayan toprakla kaplanmaktadır. Kapsamlı laboratuvar ve saha denemeleri çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş ve bu tür geniş alanlarda uçucu kül gibi katkı maddelerinin kullanılması uygun bulunmuştur.

Pandian (2004), uçucu külün fiziksel, kimyasal ve mühendislik özellikleri ile sızıntı davranışının bilindiği durumlarda, alt temel dolgu malzemesi gibi geoteknik uygulamalarda toplu olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Düşük özgül ağırlığı, sıkıştırma kolaylığı, nem içeriğindeki değişikliklere karşı duyarsızlığı, iyi sürtünme özellikleri vb. nedenlerle dolguların yapımında, yollarda, istinat yapılarının ardında dolgu malzemesi olarak büyük ölçüde kullanılabileceğini ve çeliğe zarar vermeyeceğinden betonarme yapılarda da tercih edilebileceğini bildirmiştir. Kumar ve diğ. (2004) yaptığı çalışmada ise uçucu külün geniş toprakların mühendislik özelliklerini iyileştirmede bir katkı maddesi olarak kullanımını sunmaktadır. Deneysel bir program yapılarak, uçucu kül içeriğinin serbest şişme indeksi, şişme potansiyeli, şişme basıncı, plastisite indeksi, sıkışma ve hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Uçucu kül içeriğindeki artışla birlikte karışımların plastisite indeksi, hidrolik iletkenliği, şişme indeksi azalmış, kuru birim hacim ağırlığı ve mukavemeti artmıştır. Bhuvaneshwari ve diğ. (2005), çalışmalarında değişen oranlarda uçucu kül içeren geniş toprak dolgulardaki özellikleri kontrol etmek amacıyla yapılan laboratuvar ve saha testlerini sunmuştur. Saha uygulamasındaki en büyük zorluklardan biri, iki malzemenin (geniş toprak ve uçucu kül) homojen bir kütle oluşturmak için gereken oranda karıştırılmasıdır. Sahada yapılan deneyler alçak döşeme alanlarının doldurulması için uçucu külün uygun olduğunu kanıtlanmıştır. Çalışmalar gün geçtikçe çeşitlenmektedir. Wang ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada doymuş uçucu kül ile modifiye edilmiş lös numunelerinin dinamik davranışı incelenmiştir. Farklı uçucu kül içerikleri kullanılarak modifiye edilmiş doymuş lös numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli testler yapıp, dinamik davranış ve uçucu kül içeriği arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Türkiye açısından uçucu kül üretimi ve kullanımı incelendiğinde, Türkiye'nin Avrupa Birliği ülkelerine kıyasla hem sayı hem de kapasite bakımından en fazla termik santral planlayan ülke olduğu görülmektedir. Termik santrallerde enerji üretmek amacıyla yakıt olarak düşük kalorili linyit kömürleri ince tane boyutunda öğütülerek yakılmaktadır. Toz kömürün yakılması sırasında baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımıyla bacalarda tutulan ve boyutu 1-150 µm arasında değişen kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde teknolojik ve ekonomik değeri olan uçucu külün değerlendirilmesi düşük seviyede kalmaktadır. Türkiye'de termik santrallerden çıkan uçucu kül genellikle çimento fabrikalarına hammadde olmaktadır. Artan enerji ihtiyacına bağlı olarak artan kömür tüketimi, kömürün yanması sırasında atık olarak elde edilen kül miktarının da artmasına neden olmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, Türkiye'de termik santrallerde 2014 yılında yaklaşık 24 milyon ton, 2016 yılında ise yaklaşık 19.5 milyon ton uçucu kül açığa çıkmıştır. Termik santrallerde oluşan toplam atığın yaklaşık %83'ü kül dağına/kül barajına veya düzenli depolama tesislerine gönderilmiş, yaklaşık %17'si tesislere gönderilmiş veya taş ocaklarına geri doldurulmuştur (TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 2019).

2.2.1.2 Taban Külü

Enerji üretmek için yakılan organik kömür yandıktan sonra kömür külü olarak adlandırılan inorganik mineraller ve elementleri oluşturur. Kömür yandıktan sonra oluşan 2 ana kömür külü türünden biri de taban külüdür. Taban külü, baca gazlarında taşınamayacak kadar büyük olan ve bunun yerine kazan duvarlarına yapışan ya da açık ızgaraların içinden kazanın altındaki bir kül haznesine düşen kül parçacıklarından oluşur. Bu malzeme uygulamalara fayda sağlayan kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu özellikler kömürün özelliklerine, kullanılan yanma teknolojisine ve kullanılan baca gazı işlemine bağlı olarak değişmektedir (Bradley, 2017).

Dünyada taban külünün üretim ve yararlanma miktarları incelendiğinde ülkelerdeki üretim ve kullanım miktarlarının çeşitlendiği görülmektedir. Kömür külü pazarını tanımlayan birçok faktör olup kömürün doğası, bulunabilirliği, çevresel düzenlemeler, ilgili teşvikler ile nakliye ve bertaraf maliyeti mevcut kömür santral atık çeşitlerinin kullanılmasında önemli rol oynamaktadır. Taban külü, beton ve çimento üretiminde, mühendislik dolgularında, yol alt temel ve temel tabakasında, atık dengelemede ve dolgu maddesi olarak çeşitli alanlarda geniş miktarlarda kullanılmaktadır.

Avustralya’da 2014 yılında üretilen taban külünün yaklaşık yarım milyon tonu mühendislik dolguları ile çimento ve beton üretiminde kullanılmıştır. İngiltere’de, taban külü üretimi yaklaşık 0.6-1.0 milyon ton olup öncelikle beton bloklar için hafif bir agrega olarak kullanılmıştır. İsrail çevresel kaygılar nedeniyle taban külünün kullanımı başlangıçta ertelenmesine rağmen, daha sonra özellikle toprak ıslahı ve tarımsal uygulamalarda kullanmaya başlamıştır. Çeşitli uygulamalarda faydalı bir şekilde kullanılabilen taban külü, ABD’de en çok, yapısal ve yapısal olmayan dolgu malzemesi ile çimento üretiminde kullanılmaktadır (Kruger, 2017).

Ülkemizdeki durum incelendiğinde ise kömürün ısıl değerine bağlı olarak, oluşan kül miktarı değişmektedir. Ülkemizde elektrik enerjisi üreten bir termik santralde kullanılan linyit kömürlerinin genelde %20-50’si kül atığı olarak ortaya çıkmakta, ithal kömürde ise bu oran %10-15’e düşmektedir. Kül miktarının %80-90’ını uçucu kül oluştururken %10-20’sini taban külü oluşturmaktadır. Taban külünün net oluşan miktarı ve yararlanıldığı uygulamalarda kullanım miktarı ile ilgili net veriler bulunmamaktadır. Türkiye’de taban küllerin ince ve kaba agrega, beton, beton ürünleri, derz araları, çimento klinker hammaddesi olarak katkılı çimento üretiminde, yapısal ve akışkan dolgular ile karayolu inşaatlarında (katkı, mineral ve dolgu olarak), terkedilmiş maden sahalarında ve tarımsal toprakların ıslahında kullanılabilmesi üzerine çalışmalar yapılması gerektiği konusunda bilincin artmış olmasına rağmen, halen yaygın olarak kullanılmamaktadır (Başar ve diğ, 2016).

Taban külünün çeşitli uygulamalarda kullanımı literatürde geniş bir yer bulmuştur. Dünyada altyapıdaki büyüme nedeniyle betona talep hızla artmakta, beton tüketimi de betonun temel bileşeni olan Portland çimentosu talebini artırmaktadır. Portland çimentosu için artan talebin, yeni ek çimentolama malzemeleri ile karşılanması beklenmektedir. İnşaatın sürdürülebilirliği göz önüne alındığında, endüstriyel atık yan ürünlerinden ek çimentolama malzemeleri geliştirmek şarttır ve bu tür atıklardan biri, kömür bazlı termik santraller tarafından üretilen kömür taban külüdür. Taban külünün beton yapımında tamamlayıcı çimentolama malzemeleri olarak kullanılmasının faydaları arasında betonarme yapının uzun vadeli dayanım performanslarını artırması ve geçirgenliği azaltması, puzolanik bir malzeme olarak kullanılabilmesi, dayanıklı ve sürdürülebilir beton yapılarda çimento ile kısmen değiştirilmesi, açık alanlarda boşaltma problemleri ve çevre sorunlara çözüm olması gösterilmektedir (Mangi ve diğ, 2018).

Çevre dostu malzeme geliştirmek amacıyla taban külünün inşaat yapı malzemelerin biri olan tuğlada kullanımı Sütçü ve diğ. (2019) tarafında kil, uçucu kül ve taban külü içeren tuğlalar üzerinde incelenmiştir. 950°C ve 1050°C sıcaklıkta 12 parti şeklinde üretilen tuğlaların boşluk oranını, su emilimini, birim hacim ağırlığını, basınç dayanımını ve ısı iletkenliğini belirlemek için testler ve mikro yapı analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, ateşleme sıcaklığındaki artış sebebiyle 1050°C sıcaklıktaki tuğlaların, 950°C sıcaklıktakilere oranla biraz daha düşük porozite ve su emilimine, ancak biraz daha yüksek birim hacim ağırlığa ve termal iletkenliğe sahip olduğunu göstermiştir. Taban külü içeriğı, tuğlaların özelliklerinde önemli bir etkiye sahip olmamakla beraber, %5 uçucu kül, %5 taban külü ve %10 taban külü içeren tuğlaların, sadece kil içerenlere benzer bir basınç dayanımı sergiledikleri gösterilmiştir. Bulgular, atıkların %30'a kadarının küllerle değıştirilmesinin olumsuz çevresel etkileri azaltılabileceğini ve yenilenemeyen doğal kaynakları koruyabileceğı göstermektedir. Pant ve diğ. (2019) ise geogrid ile güçlendirilen betonarme yapılarda dolgu malzemesi olarak iki termik santralden elde edilen taban külünün kullanılmasını incelemiş, taban külü ile geogrid ara yüz davranışını ile bir yapısal dolgu malzemesi olarak taban külü kullanmanın uygunluğu değışlendirilmiştir. Çekme testleri, ASTM D-6706-01'e göre sıkıştırılmış taban külü numunelerine gömülü polyester geogrid üzerinde yapılmıştır. Mevcut doğal kum referans malzemesi olarak kullanılmıştır. Taban külü içine yerleştirilmiş geogrid tarafından sunulan çekme direnci, kumdakiyle neredeyse aynı bulunmuş ve taban külünün geleneksel dolgu malzemelerine benzer çekme dayanımı davranışı sergilediğini görölmüştür.

Taban külü diğeri atık malzemeler ile beraber de kullanılabilmektedir. Singh ve diğ. (2019) kömür taban külü ve geri dönüşümlü kaba beton agregaları ile hazırlanan kendiliğinden yerleşen betonun kullanılabilirliğini araştırmıştır. Farklı geri dönüştürölmüş beton agregaları ve taban külü oranlarında hazırlanan kendiliğinden yerleşen betonun çeşitli mekanik (basınç ve çekme) ve uzun vadeli (klorür geçirgenliği, kılcal emme, hızlandırılmış karbonatlaşma, elektriksel direnç vb.) özellikleri incelenmiştir. Çelik cürufu ve taban külünün beraber asfalt kaplamada kullanılması da tercih edilebilecek uygulamalar arasındadır. Taban külü, mukavemet özelliğı bakımından daha zayıf olsa da fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikler açısından karakterize edildiğinde her iki malzemenin de asfalt karışımında agrega olarak kullanılma potansiyeli olduğunu ortaya konulmuştur (Jattak ve diğ, 2019).

2.2.2 İnşaat Yapım Yıkım Atıkları

Atık Depolama Sınıflandırması ve Atık Tanımları 1996 (Aralık 2009), inşaat yapım ve yıkım atıklarını inşaat, yenileme veya yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan atık malzemeler olarak tanımlamaktadır. İnşaat yapım ve yıkım atıkları, herhangi bir sivil yapının onarımı, yeniden modellenmesi veya yıkılması (inşaatın kaldırılması ve kullanımdan kaldırılması dahil) sırasında atık olarak üretilen tüm malzemeleri içerir. Sivil yapı, genellikle kirişler, kolonlar, iskeleler, duvarlar, kablolar, döşemeler, temeller vb. gibi tüm inşaat mühendisliği yapılarını içermekle beraber yollar, pistler, barajlar, su rezervuarları, kanallar, insan yapımı nehir cepheleri ve su temini, kanalizasyon, telefon, elektrik temini vb. gibi kamu hizmetlerinin sunulabilmesi için yapılan mühendislik sistemleri de sivil yapılar arasında yer almaktadır (Hindistan Hükümeti Yapı Malzemeleri ve Teknolojileri Geliştirme Konseyi Konut ve Şehircilik Bakanlığı, 2018). İnşaat yapımı sırasında ve yıkımı sonrasında oluşan malzemeler arasında beton, tuğla, , asfalt, metal, kereste, duvar, cam, plastik ve diğer yapı malzemeleri bulunmakla beraber inşaat yapım ve yıkım atıklarından elde edilen ürünlerin çoğu agregadır. Dünyada inşaat yapım ve yıkım atıkları oluşan katı atıklar içerisinde önemli bir pay edinmiş olup, her ülkede farklı miktarda üretilme ve yararlanılma miktarına sahiptir.

Artan nüfus ile beraber artan inşaat yapım yıkım atıkları ile mücadele için farklı ülkelerde çeşitli politikalar benimsenmiş, bu artışın önüne geçilip yararlanma oranını arttırmak hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda hükümetlerin teşvik amaçlı inşaat yapım ve yıkım atıklarının imhasına ilişkin seçici kısıtlamaları ve çevre planlama kontrollerini arttırmasının, yerel veya ulusal vergi uygulanmasının, projeler için maddi destek ve uygulama alanları ile ilgili eğitim vermesinin faydalı olacağı öngörülmektedir (Bester ve diğ, 2004). İnşaat yapım yıkım atık miktarları incelendiğinde, 2008-2009 yılları arasında Avustralya'da toplam 19 milyon ton inşaat yapım yıkım atığı üretildiği ve bunun 8.5 milyon tonunun çöp sahasına atıldığı, 10.5 milyon tonunun (%55) geri kazanılmış olduğu görülmektedir. Avustralya'da geri kazanılan inşaat yapım yıkım atıklarının yaklaşık %85'i beton, tuğla, asfalt ve kum, temiz dolgu ve molozdan oluşmaktadır. Avustralya'nın çeşitli bölgelerinde kaynaklardan yararlanmayı sağlayan ve malzemelerin performansının iyileştirilmesine engel olan kilit faktörler farklıdır. Bu durum çeşitli bölgelerde inşaat yapım yıkım atık miktarları ve bunlardan yararlanma alanlarını oldukça değişmesine sebep olmaktadır.

Batı Avustralya inşaat yapım yıkım atıklarının çeşitli uygulamalarda kullanımına büyük önem veren bölgelerden biri olup, bu konuda çeşitli uygulamaları yürürlüğe koymuştur. 2013 2014 yılları arasında üretilen yaklaşık 3.2 milyon ton inşaat yapım ve yıkım atığı bu bölgede üretilen toplam katı atık miktarının neredeyse yarısını tekabül etmekte olup, 1.2 milyon tonu (yaklaşık %38) geri dönüştürülmüştür. Batı Avustralya Hükümeti bu oranı arttırarak israfı azaltmayı ve kaynak geri kazanımını hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda yapılanlardan biri 2007 Atıktan Kaçınma ve Kaynak Kurtarma Yasası (WARR Yasası) olmuştur. WARR Yasası, Batı Avustralya atık otoritesini ve işlevlerini belirlemektedir. Bununla beraber belirlediği atık stratejisi ile Batı Avustralya'yı düşük atık üreten bir toplum statüsüne ulaştırmayı ve 2020 yılına kadar çöp depolama alanlarından inşaat yapım yıkım atıklarını %75 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Batı Avustralya hükümeti inşaat yapım ve yıkım atığı ürünlerini kullanmaya teşvik etmek amacıyla yaptığı çalışmalardan biri de 1 Temmuz 2018'ten itibaren geçerli olan, atık malzemeleri depolama vergi ücretini arttırmak olmuştur. Bu artış ile depolama maliyetlerini geri dönüşümden daha pahalı hale getirerek inşaat yapım yıkım atıklarından yararlanma oranını arttırmak hedeflenmiştir. İnşaat yapım ve yıkım atığı geri dönüşüm tesislerini kurduğu bölgelerin (Perth ve Peel bölgeleri gibi) gelecekte malzemelerin ihtiyaç duyulacağı yerlere daha yakın olarak belirlenmesi, malzeme kaynaklarının ise genellikle şehir ötesine yerleştirilmesi de hükümetin bu konuya verdiği önemi göstermektedir. İnşaat yapım ve yıkım atıklarının geri kazanımı, 2020 yılına kadar Batı Avustralya'nın Atık Stratejisi hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Hükümet ekonomik olarak uygulanabilir olan yerlerde çevre standartlarını ve yasal gereklilikleri karşılayan inşaat yapım ve yıkımı sonucu oluşan atık malzemelerinin kullanımını güçlü bir şekilde desteklemektedir (Batı Avustralya Hükümeti, 2016).

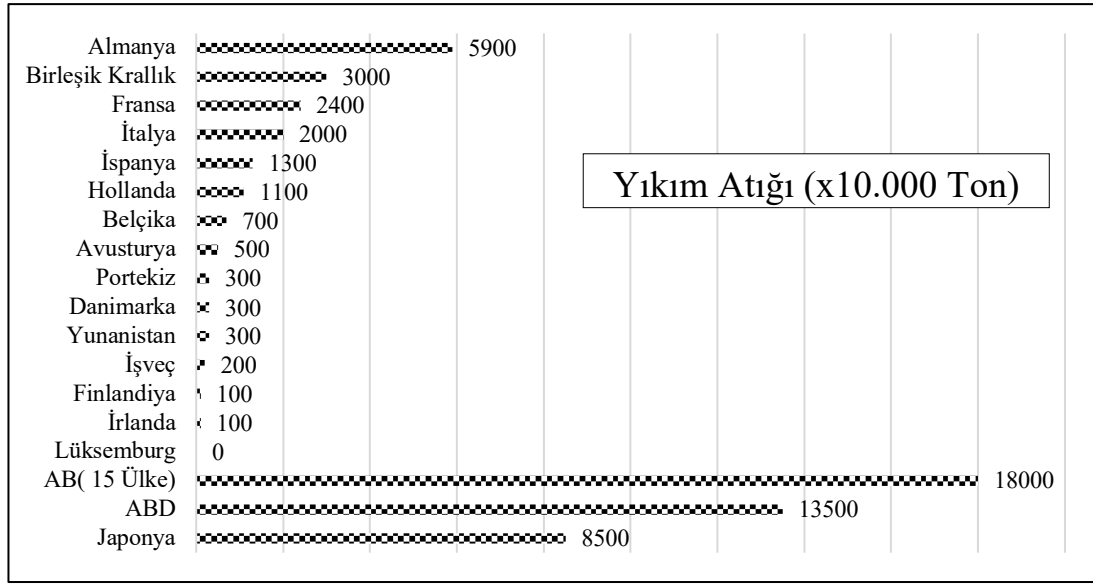
Hindistan'da ise inşaat yapım ve yıkım atıkları şehirlerin atık depolama alanlarına ya da açık alanlara, su kütlelerine ve taşkın ovalarına atılmakta, Delhi'de günde yaklaşık 4.000 ile 4.600 ton arasında inşaat yapım ve yıkım atığı üretilmektedir. Kentsel Gelişim Bakanlığı'nın tahminlerine göre 2000 yılında Hindistan'da yaklaşık 12 milyon ton inşaat yapım ve yıkım atığı üretilmiş ve bakanlığın 2015 raporunda bu miktar değişmeden kalmıştır. 2001 yılında, Teknoloji Bilgi, Tahmini ve Değerlendirme Konseyi inşaat endüstrinden kaynaklı atıklarının toplam üretilen katı atıkların % 25'ini oluşturduğunu ve bunun 12 ila 14 milyon tona karşılık geldiğini bildirmiştir.

Fakat Ocak 2014'te, Kentsel Gelişme Bakanı parlamentoya, ülkede üretilen inşaat yapım ve yıkım atık miktarlarının net olarak belirlenemediğini açıklamıştır. Bilim ve Çevre Merkezi de 2013 yılında, tek başına binaların ürettiği toplam inşaat yapım ve yıkım atığının, mevcut resmi tahminin yaklaşık 50 katı olup, 531 milyon ton olduğunu belirtmiştir. Yollar, barajlar vb. altyapı projeleri tarafından üretilen inşaat yapım ve yıkım atıkları da eklenirse, bu miktarın daha da artacağı öngörülmektedir. Kurumların hiçbirinde net doğrulanmış veriler olmamakla beraber, farklı hükümet ve özel kurumlar tarafından verilen rakamlara göre inşaat yapım ve yıkım atık miktarı yılda 10-15 milyon ton ile 625 milyon ton arasındadır. Net veriler üretmek için hala uygun sistemler uygulamaya konmaya çalışılmaktadır (Hindistan Hükümeti Yapı Malzemeleri ve Teknolojileri Geliştirme Konseyi Konut ve Şehircilik Bakanlığı, 2018). Hindistan'da inşaat atıklarını kullanıma üzerine çeşitli uygulamalar bulunsa da yeterli olmamaktadır. Delhi Doğu Belediye Şirketi ve IL&FS Çevre Altyapısı Hizmetleri Limited Şirketi, Delhi'de inşaat yapım yıkım atıklarını yönetmek için kamu özel ortaklığı modelinde günde 500 ton kapasiteli bir tesis kurma konusunda öncü bir girişim başlatmıştır. Bu tesiste inşaat yapım yıkım atıklarından elde edilen agregalar hazır beton, kaldırım taşları, bordür taşları ve tuğlalara dönüştürülmektedir. Ancak, geri dönüşüm tesisi tarafından üretilen ürünler, bilgi eksikliği ve inşaat yapım yıkım atık politikasının veya standartlarının bulunmamasından dolayı alıcı bulmakta zorluk çekmektedir (Küresel Geri Dönüşüm, 2015).

İngiltere'de de inşaat yapım yıkım atıkları katı atıklar içerisinde önemli bir paya sahiptir ve 2016 yılında toplam üretilen katı atıkların %61'ini oluşturmuştur. 2016 yılında 66.2 milyon ton tehlikeli olmayan inşaat yapım yıkım atığı üretmiştir ve bunun 60.2 milyon tonu geri kazanılmıştır. Bu %91'lik bir geri kazanım oranını temsil etmektedir (Devlet İstatistik Birimi, 2019). Güney Afrika inşaat yapım yıkım atık oranlarına bakıldığında diğer ülkelerde olduğu gibi inşaat atıklarının katı atıklar içerisinde önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. İnşaat atıkları 2017 yılında katı atıkların %13'ünü oluşturmuştur. Güney Afrika Atık Raporu (2018) verilerine göre 2017 yılında yaklaşık 5 milyon ton inşaat yapım yıkım atığı üretilmiş olup, %6'lık bir yararlanma oranında kalınmıştır. İsrail'de inşaat yapım yıkım atıkların değerlendirilmesi konusunda yerel ve ulusal makamlar uygun politikalar ve mevzuat oluşturmak için birlikte çalışmaktadır. Yerel yetkililer, transfer istasyonları kurup işletmekten ve istasyondan geçen atıkların geri dönüşümü vb. işlerden sorumludur.

Yasadışı çöplere karşı uygulamaların arttırılması için fon tahsis edilmesi, inşaat yapım yıkım atıkları için geri dönüşüm tesislerinin kurulmasına destek sağlanması gibi durumlar ise ulusal düzeydeki makamların kontrolündedir. İnşaat yapım yıkım atıkları ile ilgili en büyük sorun belediye katı atıklarından farklı olarak yerel yetkililerin bu tür atıkları düzenli olarak toplamamasıdır. İnşaat yapım yıkım atıkları toplanması için yerel makamlara özel bir istekte bulunmak veya özel bir şirket ile anlaşmak gerekmektedir. Bu da büyük miktarda inşaat yapım yıkım atığının açık alanlarda ve yol kenarlarında yasa dışı olarak atılarak çevresel hasara yol açması ile sonuçlanmaktadır. İsrail inşaat faaliyetlerinden yılda yaklaşık 7 milyon ton atık meydana getirmektedir. Bu miktarın yaklaşık 4 milyon tonu inşaat yapım yıkım atığı ve 3 milyonu ise kazı atığı olarak nitelendirilmektedir. 2.5 milyon ton inşaat atığı düzenli bir şekilde bertaraf edilmekte ve 1.5 milyon tondan fazlası yasa dışı yollarla atılmaktadır. İsrail inşaat, yıkım ve kazı atıkları için yetkili sahaların kurulmasına ve geri dönüşümüne teşvik üzerinde yoğunlaşmaktadır. 2010 itibariyle, İsrail'de inşaat atığının bertarafı için belirlenmiş 8 depo sahası ve bu atıklar için 9 geri dönüşüm tesisi bulunmakta fakat depo sahaları ve geri dönüşüm tesisleri henüz ülkenin farklı coğrafi bölgelerinde eşit olarak dağıtılamamaktadır. Şu anda 11 onaylanmış inşaat yapım yıkım depolama sahasından bazıları geri dönüşüm tesislerine sahiptir ve böylece atıklar geri dönüştürülebilmektedir. Temmuz 2005'te, Ulusal Planlama ve İnşaat Kurulu, 2040 yılı için öngörülen ihtiyaçları temel alan Ulusal Madencilik ve Taş Ocakçılığı Master Planını güncellemeye karar vermiştir. İnşaat yapım yıkım atıkların geri dönüşümünü teşvik etmek için üreticiler ve müteahhitler ile gönüllü yapılan anlaşmalar yürürlüğe konmuştur (İsrail Ulusal Rapor, 2010).

Gelişmiş ülkelerde artan bilinçle beraber atık malzemelerin tekrar kullanımı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. İnşaat yapım yıkım atıklarının geri dönüşüm oranı yüksektir. Hollanda, İsveç, Danimarka, Avusturya, Fransa ve İsviçre gibi ülkeler artık inşaat yapım yıkım atıklarının %80-90'ını geri dönüştürmektedir. Singapur ise inşaat yapım yıkım atıklarının %100'ünü yeniden kullanmaktadır. Japonya da bu konuda önemli çalışmalar yapan ülkeler arasındadır. Tokyo'da da inşaat atıkları geri dönüşüm yasası uygulanmaktadır. Tokyo'da mevcut inşaat yapım yıkım atığının geri dönüşüm oranı %99'dan fazladır. Şekil 2.2'de farklı ülkelerde üretilen inşaat yıkım atık miktarları gösterilmektedir (Hindistan Hükümeti Yapı Malzemeleri ve Teknolojileri Geliştirme Konseyi Konut ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).



Şekil 2.2 : Çeşitli ülkelerde oluşan inşaat yıkım atık miktarları (Hindistan Hükümeti Yapı Malzemeleri ve Teknolojileri Geliştirme Konseyi Konut ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).

Avrupa ülkelerinden sonra en çok inşaat yapım yıkım atığı ABD’de oluşmaktadır. İnşaat yapım yıkım atıkları ABD’de önemli bir atık akışı oluşturmaktadır. EPA, 1996 yılında ABD’de 136 milyon ton inşaat yapım yıkım atığı üretildiğini belirtmiştir. EPA’nın Atık Karakterizasyon Raporu, 2015’e göre ABD’de belediye katı atık miktarının iki katından fazla miktarda yani yaklaşık 548 milyon ton inşaat yapım yıkım atığı üretilmiştir. Yıkım atıkları, toplam inşaat yapım yıkım atıklarının %90’ından fazlasını temsil ederken, inşaat yapım atıkları %10’dan azdır. ABD’de oluşan katı atıklardan elde edilen malzemeler çelik, ahşap ürünler, alçıpan ve sıva, tuğla ve kiremit, beton ve asfalt betonu gibi malzemeler olup, en büyük yüzdeye beton sahiptir (%70). Beton %15 ile asfalt, %7 ile ahşap ürünleri izlemektedir.

Dünya çapında inşaat yapım yıkım atıkları yüksek miktarlarda üretilirken, ülkemizde de durum farklı değildir. Türkiye’de kentsel atıklar toplam oluşan atıkların %42.8’ini oluştururken, kentsel atıklardan sonra en çok atık enerji sektörü kaynaklıdır. Kentsel dönüşüm ve kentleşmenin artmasıyla çok fazla inşaat ve yıkım atığı oluşmaktadır. Bu atıklar genelde vahşi depolandığı için Türkiye’de inşaat sektörü kaynaklı atık miktarları net bir şekilde belirlenememektedir. Türkiye’de yılda 125 milyon ton hafriyat atığının bertaraf edildiği tahmin edilmektedir. Ülkemizde kentsel dönüşüm projesi süreci hızla ilerlemekte olup, proje süresince inşaat yıkım atık miktarında büyük bir artış olacağı tahmin edilmektedir. Kentsel yenileme sürecinde en önemli sorun olarak yıkım sonrası çıkan molozların döküleceği alanların yetersiz olmasıdır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Atık Yönetimi Başkanlığı tarafından Türkiye’de yıllık 45 milyon ton inşaat/yıkıntı atığı miktarının Kentsel Dönüşüm Kanunu ile birlikte ilk 3 yıl boyunca yıllık 10 milyon ton, geri kazanılacak malzeme miktarının da yıllık 6 milyon ton olacağı hesaplanmıştır. Ülkemizde oluşan inşaat atık miktarı fazla olmasına rağmen değerlendirilebilen ve geri kazanılabilen atık miktarı yetersizdir. Türkiye’de en yaygın ve geçerli geri kazanım yöntemi sahada ayıklamadır. Ancak, düzenli katı atık ayrıştırma ve geri kazanım ünitelerinin sayısı sınırlıdır. Atık yönetiminde kullanılan düzenli depolama tekniği ise Türkiye için yeni bir uygulama olmakla birlikte henüz istenilen düzeye ulaşamamıştır. Eski düzensiz depolama sahalarının kapatılması ve rehabilite edilmesi gerekliliği karşısında yerel yönetimler düzenli depolama sahalarının planlanması, inşa edilmesi, finansmanı ve işletilmesi konularında desteğe ihtiyaç duymaktadırlar. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı bu konuda çelişti çalışmalar yapmakta ve stratejiler geliştirmektedir. Yıkıntı atıklarını lisanslı depo sahalarına bırakmayıp gelişigüzel yerlere atan yıkım firmalarına kapatma, yüklü para cezası, geçici süreyle faaliyetlerini durdurma ve ihale yasağı gibi yaptırımlar uygulanmaktadır. Bu konuda mevzuat çalışması yapan Bakanlık denetimlerini de arttırmıştır. “Sıfır atık” sloganıyla yola çıkan Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, çevreye zarar vermeden atıkların tekrar ekonomiye geri kazandırılmasını hedeflemektedir. Hafriyat ve inşaat yıkıntı atıklarının düzenlenmesi ve geri dönüşüm konusundaki yönetmeliğin şu an tam olarak ihtiyaçlara karşılık vermemesi nedeniyle yeni bir yönetmelik çıkarılması konusunda çalışmalar da devam etmektedir. Türkiye’de geri kazanılmış ürünler ilgili standartları sağladığı durumda orijinal malzemeler ile birlikte veya ayrı olarak kullanılabilir. Beton üretiminde, yol inşaatında, yürüyüş yollarında, drenaj çalışmalarında, kanalizasyon borusu ve kablo döşemelerinde dolgu malzemesi olmak üzere çeşitli alt ve üst yapı inşasında kullanılabileceği belirtilmiştir (Kılıç, 2012; TMBBOB Çevre Mühendisleri Odası, 2018).

Avrupa Birliği (AB) Atık Çerçeve Direktifi (2008/98/EC) 11. maddesinde inşaat ve yıkıntı atıkları için 2020 yılına kadar ağırlık olarak %70 oranında yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi hedefi koymuştur. Türkiye’de ise Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliğinde “Atıkların kaynağında en aza indirilmesi, hafriyat toprağı ile inşaat/yıkıntı atıklarının geri kazanılması ve özellikle altyapı malzemesi olarak yeniden değerlendirilmesi esastır.” ibaresi yer almaktadır.

Avrupa Birliğinde Atık Depolama Direktifi (1999/31/EC) ve sonrasında uygulanmaya başlayan depolama alanı vergileri veya yasaklamaları ile depolamadan geri dönüşüme geçiş teşvik edilmektedir. Türkiye’de 26 Mart 2010 tarih ve 27533 Sayılı Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte ise tehlikeli madde bulaşmış inşaat atıklarının mutlaka ayrıştırılması konusu yer almaktadır. İnşaat yapım aşamasında oluşan atıklar mümkünse sahada ayrıştırılmalı ve atık depolama sahasına gönderilen atıklar en aza indirilmelidir. Enerji verimliliği üzerine yoğunlaşan yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde atık konusu ele alınmaya başlanmıştır. İnşaatın yapım, tadilat ve yıkım aşamalarında atık olma potansiyeline sahip inşaat yapı malzemelerinin üretimi ve temini doğrudan ve dolaylı fosil yakıtı kullanımına, sera gazı salınımına ve enerji tüketimine neden olmaktadır. Türkiye’de, 18 Mart 2004 tarih ve 25406 Sayılı Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği’nin 23. Maddesine göre faaliyetleri sonucu 2 tondan fazla atık oluşumuna neden olacak inşaat/yıkıntı atığı üreticileri, “Atık taşıma ve kabul” belgesi almak ve doldurmakla yükümlü kılınmışlardır. Bu belge ile hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atığı üreticisi ile ilgili irtibat bilgileri, üretilen atığın türü ve miktarı, atıkları taşıyanların, depolama ve geri kazanım tesislerinin bilgileri kaydedilmektedir. Ancak detaylı bilgi barındırmayan bu belge, atık yönetim planları ile hedeflenen sonuçlara ve faydalara ulaşmak için yeterli değildir. Üretici sorumluluğu prensibi de dikkate alınarak, Türkiye’de yüksek maliyetli inşaat projeleri için detaylı atık yönetim planının zorunlu hale getirilmesi ile ülke ekonomisine ve çevreye büyük faydalar sağlanacağı düşünülmektedir. İnşaat atıklarının önlenmesi ve atık yönetim planlarına uygun koşullarda yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi sonucu çevresel faydaların yanı sıra ekonomik olarak da fayda sağlanmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017)

İnşaat yıkım atıklarından biri olan asfalt geri dönüşüm çalışmaları ülkemizde gün geçtikçe önem kazanmaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesine (İBB) bağlı İSFALT kurduğu asfalt dönüşüm tesisleriyle bugüne kadar yollardan kazılan 1 milyon 238 bin ton atık asfaltı geri kazandırmıştır. Kazınan asfaltın %50’ye yakınına sıcak geri dönüşüm malzemesi olarak kullanıma imkân veren tesisler, asfalt hammaddelerinden ciddi tasarruf sağlamaktadır. Kazınan asfaltın %100’ünü yeniden kullanmak ve 1 kg atık asfaltı dahi geri dönüşümle ekonomiye yeniden kazdırmak hedeflenmektedir.

İSFALT, 2017 yazında başlatılan geri dönüşüm ile agrega ve bitümden tasarruf sağlandığını, süreç içinde deneme üretimi yapılan %100 geri dönüşüm sistemi sayesinde doğal kaynakların aşırı kullanımını azaltarak ekonomiye çok daha önemli katkılar sağlamayı planladığını bildirmiştir. Geri dönüşüm sistemi sayesinde çevreyi koruma ve küresel ısınmayı önleme açısından da önemli kazanımlar elde edildiği açıklanmıştır (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2016).

İnşaat ve yıkıntı atıklarının yeniden kullanımı ve geri kazanımı çevresel ve ekonomik yönden yarar sağlamaktadır. Günümüzde inşaat yıkıntı atıklarının taşıma ve depolama alanı ücretleri geri kazanım maliyetine göre çok daha pahalı duruma gelmiştir. Geri kazanılmış agreganın depolama alanlarına götürülmeden yeniden kullanımı ile önemli ölçüde ekonomik kazanç sağlanabileceği öngörülmektedir. Bu bölümün alt başlıkları olarak inşaat yapım yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş asfalt ve beton atıklarının çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı ele alınmıştır. Geri dönüştürülmüş beton ve asfalt agregaları üzerine yapılan çeşitli çalışmalar özetlenmiştir.

2.2.2.1 Geri Dönüştürülmüş Asfalt Agregası

Geri dönüştürülmüş asfalt kaplaması, kaldırılmış veya yeniden işlenmiş, asfalt çimentosu ile kaplanmış yüksek kaliteli ve iyi dereceli agrega içeren kaldırım malzemeleri olarak tanımlanmaktadır. Geri dönüştürülmüş asfalt agregası (GDAA), asfalt kaplamalarında yapılan yapılanma veya kaplama çalışmaları ile gömülü tesislere erişim için kaldırılma sırasında üretilir (Taha ve diğ, 2002). Sıcak karışım asfalt ile inşa edilmiş yolların belirli bir kullanım süresinden sonra iyileştirilmesi veya yenilenmesi gerekmektedir. Otoyol sistemlerinin inşasında kullanılan malzemeler onları onarmak, yeniden inşa etmek ve bakımını yapmak için yeniden kullanılmaya başlanmış ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama, doğal kaynakların kullanımını optimize eden bir yeniden kullanım malzeme döngüsü oluşturmakla beraber hem doğal agrega kullanma ihtiyacını hem de asfalt kaplama karışımlarının üretiminde gerekli olan yeni asfalt bağlayıcı miktarını azaltmaktadır. Uygun olduğu yerde, agregaların ve diğer otoyol yapı malzemelerinin geri dönüşümü ekonomik, çevresel ve mühendislik açısından değerlendirildiğinde büyük önem taşımaktadır. Geri dönüştürülmüş asfalt en çok asfalt kaplamalarda kullanılmaktadır. Bu durumun iki temel nedeni ise ekonomik tasarruf ve çevresel faydadır (ABD Federal Karayolu İdaresi, 2011).

GDAA'nın asfalt kaplamalarda kullanımı üzerine yapılan çalışmalar, geri dönüştürülmüş asfalt ve doğal agrega ile yapılan asfalt kaplamaların performans testlerinin sonuçları doğal karışıma göre daha iyi performans sağladığını göstermiştir. GDAA kullanımı kaldırımların performansını daha hızlı ve etkili bir şekilde değerlendirmek için önerilmektedir. Yolların sürdürülebilir inşası ve iyileştirilmesinde için de %100 GDAA kullanımı avantajlıdır ve döşemeye daha iyi yük dağılımı ile daha fazla yük direnci sağlayan çimento benzeri stabilizatörlerle kullanımı tercih edilen uygulamalar arasındadır (Pradyumna ve diğ, 2013; Mhlongo ve diğ, 2014; Mahankale ve diğ, 2016; Verma ve diğ., 2017).

GDAA, yol dolgularında alt temel ve temel tabakası malzemesi olarak tek başına veya geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) ile beraber kullanılabilir (Taha ve diğ, 2002; Correia ve diğ, 2016). Fakat esneklik modülü geri dönüştürülmüş agregaların yol alt temel ve temel tabakasında kullanımı sırasında önemli bir sorun olarak görülmektedir. Puppala ve diğ. (2011) geri dönüştürülmüş asfalt agregalarının çimento ile stabilizasyonunun, esneklik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendiren bir araştırma yapmıştır. Araştırmada, üç farklı miktarda çimento ile karıştırılarak hazırlanan GDAA'nın esneklik modülü değerlerindeki değişimleri incelenmiştir. Çimento ile stabilizasyon, düşük kaliteli geri kazanılmış asfalt kaplama malzemelerinin, mukavemet ve sertlik özelliklerini arttırarak kullanıma uygun hale getirmiş ve yol altyapısını desteklemek için temel tabakası malzemesi olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Bazı çalışmalar da GDAA ve GDBA kullanımının esneklik modülünün azalmasına neden olabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, çoğu çalışmada GDBA ile yapılan alt temel ve temel tabakaların zaman içinde esneklik modülleri artmış ve doğal agrega ile yapılan tabakalara göre daha düşük kalıcı deformasyonlar göstermiştir (Cardosa ve diğ, 2015). Uçucu kül, kaldırım agregalarının fiziksel ve geoteknik özelliklerini geliştirmek için potansiyel bir dengeleyici olarak gören Mohammadinia ve diğ. (2016) ise yaptığı araştırmada, uçucu külü GDAA'yı stabilize etmek için kullanmıştır. GDAA ile uçucu kül kullanımının, bu geri dönüştürülmüş malzemelerin kaldırım alt temel ve temel uygulamaları için dayanıklılığını arttırması beklenmiştir. Tüm numuneler, 7 gün boyunca nem kontrollü bir odada kürlenip daha sonra test edilmiştir. Stabilize GDAA serbest basınç mukavemeti ve esnek modülü değeri oda sıcaklığında ve 40°C sıcaklıkta incelenmiştir. Deneysel sonuçlar stabilize edilmemiş GDAA ile karşılaştırılmıştır.

%15 uçucu kül ile stabilize edilmiş GDAA hem oda sıcaklığında hem de 40°C’de yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri vermiştir. Artan esneklik modülü ve serbest basınç mukavemeti değerleri GDAA’nın, kaldırım inşaatında alt temel ve temel yapı malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğunu göstermiştir.

Geri Dönüştürülmüş Asfalt Agregasının (GDAA) mekanik ve geoteknik özelliklerinin diğer atık malzemeler ile karşılaştırıldığı çalışmalardan biri Rahman ve diğ. (2015) tarafından yapılmıştır. Çalışmada, kentsel yağmur suyu yönetim sistemi olarak kullanılmaya başlanan, yağmur suyunun kaldırım yüzeyinden ve filtre katmanına sızmasını sağlayan geçirgen kaldırım sistemlerinde 3 geri dönüştürülmüş malzemenin filtre malzemesi olarak kullanım uygunluğu incelenmiştir. Kıрма tuğla (KT), Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası (GDBA) ve GDAA geotekstiller ile beraber kullanılmıştır. Malzemelerinin geoteknik özelliklerini değerlendirmek için bir dizi laboratuvar testi ile hidrolik özelliklerini (yağmursuyu filtreleme kapasitesini ve tıkanma davranışını) belirlemek için sabit seviyeli permeabilite testleri yapılmıştır. Hidrolik iletkenlik GDBA ve KT için düşük ve GDAA için yüksek olarak tanımlanmıştır. Geotekstil ile sarılan atık malzemelerinin kirletici temizleme verimliliğini arttırdığı fakat uzun süre devam eden tortu birikmesi nedeniyle daha fazla tıkanma potansiyeli olduğu belirtilmiştir. En düşük kirletici temizliği GDAA’nın hidrolik iletkenliğinin daha yüksek olmasının dolayı GDAA’da gözlenmiştir. Yapılan testlere dayanarak GDAA’nın uygun alternatif filtre malzemesi olduğu sonucuna varılmıştır.

GDAA’nın diğer kullanım alanlarından biri betonda doğal agrega yerine kullanımıdır. Son araştırmalar GDAA içeren betonunun yapısal uygulamalar için de yeterli dayanımı sağlayabileceğini göstermiştir. GDAA beton karışımlarının ulaşım altyapısı uygulamalarında kullanılmadan önce, dayanıklılıklarının kanıtlanması gerekmektedir. Klorür geçirgenliği, donma-çözülme dayanıklılığı, genleşme gibi özellikler önemli olup, Thomas ve diğ. (2018) yüksek dayanımlı betonun klorür geçirgenliğinin doğal agreganın %50 oranında GDAA ile değiştirilmesinden etkilenmediğini göstermiştir. Yüksek mukavemetli GDAA betonunun donma-çözülme dayanıklılığı, %100 doğal agrega içeren yüksek dayanımlı betona göre değerlendirilmiş ve en uygun GDAA yüzdesi ağırlıkça %35 olarak bulunmuştur. Doğal agrega yerine %50 oranında GDAA kullanıldığında ısıl genleşme katsayısında dikkate değer bir değişim olmadığı ve ulaşım altyapısı uygulamaları için yeterli olduğu belirtilmiştir.

2.2.2.2 Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası

Gelişmekte olan ülkelerin büyük şehirlerinde sürekli kentleşmeyle birlikte inşaat yıkım atıkları inşaat endüstrisini çevre kirliliğine sebep olan bir endüstri haline getirmiştir. Dünyadaki en yıkıcı çevre sorunlarından biri, inşaat ve yıkım atıklarının depolanması ve imha edilmesidir. İnşaat ve yıkım atıkları genellikle parçalanamaz niteliktedir, bu nedenle atık yönetimi ve ilgili kirlilik ile ilgili endişeler gün geçtikçe artmaktadır. Çevre bilinci, doğal kaynakların korunması, sürdürülebilirlik, kalkınma gibi parametreler inşaat sektörünün modern gereksinimlerini oluşturmaktadır. İnşaat atıklarında somut geri dönüşüm konusu, zamanımızda genel olarak sürdürülebilir kalkınma girişimi için çok önemlidir. Sürdürülebilirliği artırma çabası içinde, geri dönüştürülmüş agrega kullanma fikri daha fazla ilgi görmüştür. Geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) beton kullanılan her türlü yapının çeşitli sebeplerden dolayı yıkılması sonucu elde edilen betonun geri dönüştürülmesi ile elde edilen malzeme olarak tanımlanmaktadır. Geri dönüştürülmüş beton agregası kullanımı çeşitli şekillerde sürdürülebilirlik sağlamaktadır. Geri dönüştürülmüş beton agregaların kullanılması doğal agrega ihtiyacını ve agrega çıkarma işleminin çevresel etkisini azaltmaktadır. Hem atık bertarafını hem de yeni malzeme üretim ihtiyaçlarını ortadan kaldırarak proje için taşıma gereksinimleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Kaynak yönetimine ek olarak, geri dönüştürülmüş beton agregaları betonun ezilme işleminde atmosferik karbondioksit maruz kalmakta ve ortamdan yüksek miktarda karbon dioksit emmektedir. Bütün bunlar geri dönüştürülmüş beton agregasının sürdürülebilirliğe sağladığı katkılar arasında sayılabilir. İnşaat sektörü hammaddelerin yaklaşık %50'sini doğadan alıp, toplam enerjinin %40'ını tüketip, toplam atığın %50'sini oluşturmaktadır. Bu durum oluşan bütün inşaat atıklarının geri dönüşüm sürecini hızlandırmakla beraber inşaat atıklarının önemli bir kısmını oluşturan, bileşikleri çimento, agrega ve su olan beton atıklarının da geri dönüşüm sürecine yön vermiştir. Yapı malzemeleri çevresel özelliklerine göre giderek daha fazla değerlendirilmekte ve beton geri dönüşümü daha fazla önem kazanmaktadır. Düşük maliyetli alternatif bir çözüm sunması, projeleri sürdürülebilir kılması, doğal kaynakları koruyup toplam tüketilen enerjiyi azaltması, uygulamalar için bir toplu kaynak olarak kullanarak elden çıkarma ihtiyacını ortadan kalması GDBA'nın tercih edilmesinin temelini oluşturmaktadır (Oikonomou, 2005; Schrager ve diğ, 2018; Silva ve diğ, 2019; www.cement.org).

GDBA üzerinde yapılan çalışmalar ve uygulamalar GDBA doğru kullanıldığı takdirde sağladığı olumlu etkileri ortaya koymuştur. Literatürde GDBA'nın inşaat mühendisliği uygulamalarında çeşitli alanlarda kullanılması ve özellikleri ile ilgili birçok çalışma sunulmuştur. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde en yaygın kullanım alanı olarak betonda doğal agrega yerine ve yol dolguları alt temel ve temel tabakasında agrega olarak kullanıldığı görülmektedir. GDBA'nın yol dolgularında kullanımı yaygın olarak kabul görmüş olup, son yıllarda geri kazanılmış diğer malzemelerin alt temel ve temel tabakası malzemesi olarak GDBA ile beraber kullanılması için çaba sarf edilmektedir.

Betonda kullanımı üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde GDBA'nın beton üretimine çevresel faydaları olan sürdürülebilir bir çözüm olarak hizmet ettiği görülmektedir. Yap ve diğ. (2018), yapısal olmayan beton uygulamalarda GDBA kullanarak potansiyel kullanım alanlarını genişletmeyi amaçlamıştır. Yaptıkları çalışmada, doğal agrega ve GDBA'dan yapılan geçirgen betonun mekanik, geçirgenlik ve yüzey özellikleri incelenmiştir. %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında GDBA doğal agrega yerine kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, GDBA karışımlarının daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Elastisite modülü artmış fakat yüksek oranda GDBA içeriğine sahip geçirgen beton, aynı sıkıştırma yükü altında daha düşük bir gerilmede erken kırılma göstermiştir. GDBA karışımlarındaki daha büyük gözenekli ağa sahip olması normal agregadan oluşan kontrol karışımından daha yüksek geçirgenlik katsayılarına sahip olmasının nedeni olarak belirtilmiştir. GDBA geçirgen beton için aşınma kaybı %40-55 aralığında bulunmuştur. Arredondo-Rea ve diğ. (2019), betonarme yapılarda GDBA kullanımını incelemek amacıyla, farklı GDBA değişim oranlarında (kaba ve ince) 10 adet beton karışımı hazırlamıştır. Betonarme numunelerde çeliğin korozyon hızı ve betonun elektriksel direnci, ıslatma-kurutma işlemlerine tabi tutulan %3.5 Sodyum Klorür çözeltisi ile belirlenmiştir. Korozyon hızı, elektrokimyasal teknikler kullanılarak belirlenirken, elektriksel direnç elektrokimyasal empedans spektroskopisi ile ölçülmüştür. Sonuçlar, yüksek oranda GDBA kullanımının boşluk oranını ve elektriksel direnci azaltması nedeniyle çelik korozyon sürecini hızlandırdığı yönündedir. Fakat çelik korozyonunun ve betondaki elektriksel direncin, maksimum kaba agreganın %30'unun veya ince agreganın %20'sinin GDBA ile değiştirilmesinden önemli ölçüde etkilenmediğini belirtilmiştir.

Zheng ve diğ. (2018), doğal kaba agreganın geri dönüşümlü beton agregası (GDBA) ve geri dönüştürülmüş tuğla agregası (GDTA) ile değiştirilmesi durumunda betonun basınç dayanımındaki değişimi deneysel bir araştırma sunmuştur. Farklı su-çimento oranları kullanılarak elde edilen iki sınıf (C25 ve C50) beton araştırılmıştır. Her sınıf betonda geri dönüştürülmüş agregalar sırasıyla belli oranlarda (%0, %25, %50, %75 ve %100) doğal agrega yerine kullanılmıştır. 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde en büyük azalmanın, doğal kaba agreganın GDBA ile %100 oranında değiştirildiğinde gözlenmiştir. Genel olarak, GDBA içeren beton, GDTA içeren betondan daha iyi performans göstermiştir. C25 sınıfı beton için, GDTA kullanılan betonun basınç dayanımı, GDBA kullanılan betona yakın bulunmuştur. Fakat C50 beton sınıfı için betonun basınç dayanımı GDBA ve GDTA kullanılması durumuna göre kayda değer bir değişim göstermiştir. GDBA kullanılan beton için, basınç dayanımındaki artışın 28 günlük kürlenmeden sonra da devam ettiği fakat GDTA içeren betonda bu artışın çok yavaş olduğu belirtilmiştir.

Wu ve diğ. (2018) ise yaptıkları çalışmada, GDBA'nın özelliklerini geliştirmek için kalsiyum karbonat (CaCO_3) emülsiyonunu temel alan yeni bir yaklaşım kullanmışlardır. Çalışmada bir bakteri kültürü çözeltisi ile biyolojik çökeltme işlemine tabi tutulmuş GDBA'nın su emme, kırma değeri ve yoğunluğunu içeren fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ardından, işlenmiş GDBA ile hazırlanan harçların işlenebilirliği, basınç dayanımı ve su emilimi belirlenmiştir. Biyolojik çökeltme işlemi uygulanan GDBA'nın, uygulanmayan GDBA ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir yoğunluğa, daha düşük kırma değerine ve su emilimine sahip olduğu bulunmuştur. Önceki çalışmalardaki biyolojik çökeltme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, bu çalışmada benimsenen yöntemin daha çevre dostu ve daha büyük bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

GDBA'nın, yol dolgularında temel veya alt temel malzemesi olarak doğal agrega yerine kullanımı da diğer yüksek kaliteli bir alternatiftir. Yol malzemesinin kalitesini belirleyen özelliklerden biri de Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değeridir. Sas (2015), CBR taşıma kapasitesini karakterize etmek için GDBA'da çeşitli nem ve sıkıştırma özelliklerine sahip CBR testlerinin sonuçlarını sunmuştur. Dane çapı dağılımının da etkisinin incelendiği çalışmada ortalama CBR değeri %80 olarak bulunmuştur. İyi derecenmiş bir GDBA'nın gelişmiş bir alt temel malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Yol dolgularının performansını belirlemede önemli bir mühendislik parametre de esneklik modülüdür. Bozyurt ve diğ. (2012), yaptıkları çalışma 64 laboratuvar ve 5040 saha testinin sonuçlarından donma çözülme döngülerinin sıkıştırılmış geri dönüştürülmüş asfalt agregası (GDAA) ile geri dönüştürülmüş beton agregasının (GDBA) esneklik modülü üzerindeki etkisini açıklamıştır. Temel ve alt temel agregası olarak kullanılan GDAA ve GDBA malzemelerinin performansını optimize etmek için önerilerde bulunmuşlardır. Donma-çözünme döngüleri, GDAA'nın esneklik modülü sabit bir şekilde azaltırken uzun vadeli donma çözülme döngüleri GDBA'nın esneklik modülü değerini arttırmıştır. Beş yıl boyunca sahadaki donma çözülme döngüleri GDAA ve GDBA'nın esneklik modülünü önemli ölçüde etkilememiştir. Laboratuvar sonuçlarına benzer şekilde sahada da GDBA ortalama 320 ± 73 MPa esneklik modülüne sahipken, GDAA ortalama 240 ± 33 MPa esneklik modülüne sahiptir. Bu araştırmada elde edilen sonuçlar kullanılan geri dönüştürülmüş asfalt ve beton agregalarına özgü olarak bulunmuştur. Genel davranışın önemli ölçüde değişmesi muhtemel olmasa da farklı kaynaklardan gelen agregalar kullanıldığında, çeşitli parametrelerin nicel değerlerinin farklı olabileceği belirtilmiştir.

Geri dönüştürülmüş beton agregasının yol dolgularında kullanımı, ekonomik ve çevresel fayda sağlamasının yanında, uzun bir süre sonra ağır metal sızdırma ve yüksek pH sızıntı suyu sızıntısı üretimi gibi çevresel sorunlara da sebep olabilmektedir. Bu nedenle belirli bir süre sonra fiziksel ve kimyasal özelliklerde meydana gelen değişiklikleri karakterize etmek gerekmektedir. Natarajan ve diğ. (2019), bu sorunları analiz etmek amacıyla Chen ve diğ. (2012, 2013) tarafından analiz edilen geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılarak yapılan Minnesota yol araştırması sahasını incelemişlerdir. Yolun yapımından 8 yıl sonra yoldan numuneler alıp, orijinal geri dönüştürülmüş beton agregasının bazı özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Yapılan laboratuvar çalışmaları 8 yıllık süreçte asit nötrleştirme kapasitesinin ve inorganik karbon içeriğinin arttığını göstermiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının ince kısmının, kaba kısmından daha yüksek bir asit nötrleştirme kapasitesine sahip olmasının nedeni olarak ise karbonatlaşma gösterilmiştir. Laboratuvarda ölçülen pH değerinin ise hem mevcut saha değerinden hem de 8 yıl önceki geri dönüştürülmüş beton agregasının sahip olduğu pH değerinden önemli ölçüde yüksek bulunmuş olması geleneksel laboratuvar tekniklerinin saha koşullarını temsil etmemesi ile açıklanmıştır.

Saberian ve diğ. (2019) geri dönüştürülmüş beton agregasına (GDBA) farklı yüzdelerde atık cam ekleyerek, bu karışımların yol dolgularında kullanımını değerlendirmiştir. Bu amaçla Modifiye Proctor, Serbest Basınç Mukavemeti, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve Esneklik Modülü testleri yapılmıştır. Atık cam, boşluk alanlarını doldurma eğiliminde olduğu için, küçük yüzdelerde atık cam eklenmesi bile GDBA'nın mühendislik özelliklerinde iyileşmeye neden olmuştur. Atık cam içeriği artırıldığında, serbest basınç mukavemeti, CBR ve esneklik modülü değerleri artmıştır. Sonuçlar, atık maddelerin karışımlarının düşük karbonlu bir kavram olarak, gelecekteki yol alt temel ve temel malzemesi için uygun ve tatmin edici alternatif bir çözüm olabileceğini göstermiştir. Arulrajah ve diğ. (2014), yaptıkları araştırmada geri dönüştürülmüş asfalt agregası (GDAA) ile GDBA'nın sürdürülebilir bir şekilde harmanlanmasını ve alternatif bir alt temel malzemesi olarak kullanılmasını kolaylaştırmayı amaçlamıştır. GDBA-GDAA karışımları %100, %50, %30, %15 GDAA içerikli olarak hazırlanmış ve geoteknik deneyler yapılmıştır. %15 oranında GDAA içeren karışımın, alt temel malzemesi için gerekli üç eksenli basınç gereksinimlerini karşıladığı belirlenmiştir. GDAA yüzdesi arttıkça alt temel malzemesinin sağlaması gereken mühendislik özellikleri sağlaması zorlaşmıştır. Fakat genel bir değerlendirme yapıldığında düşük GDAA içeriğine sahip GDBA'nın düşük trafik yoğunluğunun olduğu yollarda alt temel malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu belirtmiştir. López-Alonso ve diğ. (2019), yaptıkları çalışmada GDBA'ya alüminyum atıkları eklemiş ve karışımların mekanik davranışları ve mikro yapısal özellikleri karşılaştırmıştır. GDBA'ya eklenen alüminyum atıklarının GDBA'nın CBR ve 28 günlük basınç değerlerini arttırdığı, yeni kalsiyum ve alüminyum içeren silikatlar oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışma GDBA'nın alüminyum atıklarıyla karıştırılarak yol dolgularında kullanılabileceğini göstermiştir.

Geri dönüştürülmüş beton agregasının geoteknik mühendisliğinde birçok özel konuda da kullanılmaktadır. Bunlar arasında boru arkası, ses bariyeri, kıyı koruma ve drenaj yapılarında dolgu malzemesi olarak kullanımının yanında taş kolon, derin karıştırma, atık depolama sahası koruma tabakasında, geosentetikler ile güçlendirmede ve yol üstyapısı uygulamalarında kullanımı sayılabilmektedir. Fakat genellikle dolgu işlerinde, dökme dolgularda, blok ve dekoratif beton üretiminde en çok da yol alt temel ve temel dolgu malzemesi olarak kullanıldığı sonucuna ulaşılmaktadır (Vieira ve Pereira, 2015; Kawalec ve diğ, 2017).



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında geri dönüşüm tesisinden temin edilen işlem görmemiş geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) geoteknik mühendisliğinde ve yol dolgularında kullanım uygunluğunun deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla numunelerin endeks, sıkıştırma, CBR ve geçirimsizlik ile esneklik özellikleri belirlemek için deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ,2013) ile karşılaştırılmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının tesisten temin edildiği hali ile KTŞ’de belirtilen dane çapı dağılımına uygunluğunu belirlemek için ıslak elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılarak dane çapı dağılım eğrisi belirlenmiştir. Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının dane çapı dağılım eğrisi KTŞ’de belirtilen dane çapı dağılım sınırları arasında yer almadığı için geri dönüştürülmüş beton agregalarının tesisten temin edildiği hali ile yol dolgularında alt temel ve temel tabakası malzemesi olarak kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir.

Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarından Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ,2013) uygun dane çapı dağılımına sahip alt temel ve temel numuneleri hazırlanması sırasında izlenen yöntem de bu bölüm altında ele alınıp, uygun değerlendirme yapılabilmesi için tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları ile hazırlanan alt temel ve temel tabakaları üzerinde aynı laboratuvar deneylerinde, aynı metotlar kullanılmıştır. Son olarak numunelerin sırasıyla endeks ve sıkıştırma, California Taşıma Oranı (CBR) ve geçirimsizlik ile esneklik özelliklerini belirlerken kullanılan deneysel yöntemler açıklanmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregalarından hazırlanan alt temel ve temel numunelerinin donma çözölmeye maruz kaldığı takdirde, mukavemet özelliklerinde meydana gelen değişimlerin kullanım uygunluğu üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla CBR değerlerinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Bu amaçla numuneler 1-3-5-10 ve 20 defa olmak üzere donma çözölmeye maruz bırakılmış ve CBR değerlerinde meydana gelecek değişimler, 1-3-5-10-20 çevrim sonrası yapılan CBR deneyleri ile ayrı ayrı incelenmiştir.

3.1 Malzeme

Bu çalışma kapsamında 2012 yılından beri İstanbul'daki kentsel dönüşümden elde edilen ve depolandığı dönüşüm tesisinden temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agreganın kalitesi, elde edildiği bölgeye, o bölgedeki yapı özelliklerine ve kullanılan yapı malzemesinin kalitesine göre değişim göstermektedir. Sadece bir bölgeden temin edilen malzeme üzerinde yapılacak çalışmalar o bölge ile sınırlı kalabileceğinden İstanbul'un değişik bölgelerindeki bina yapım yıkım atıklarının toplandığı Göktürk Kentsel Dönüşüm Tesisinden temin edilen malzeme kullanımı uygun görülmüştür.

Şekil 3.1'de Göktürk Kentsel Dönüşüm Tesisinde dane çaplarına göre depolanan geri dönüştürülmüş beton agregaları verilmiştir. Dönüşüm tesisinden alınan GDBA'sına hiçbir işlem uygulanmadan geoteknik deneyler gerçekleştirilmiştir. Malzemeler üzerinde İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında sınıflandırma deneylerinin yanı sıra Standart proctor ve Modifiye Proctor sıkılığında hazırlanmış numuneler üzerinde, CBR, permeabilite, donma çözülme ve esneklik deneyleri uygulanmıştır.

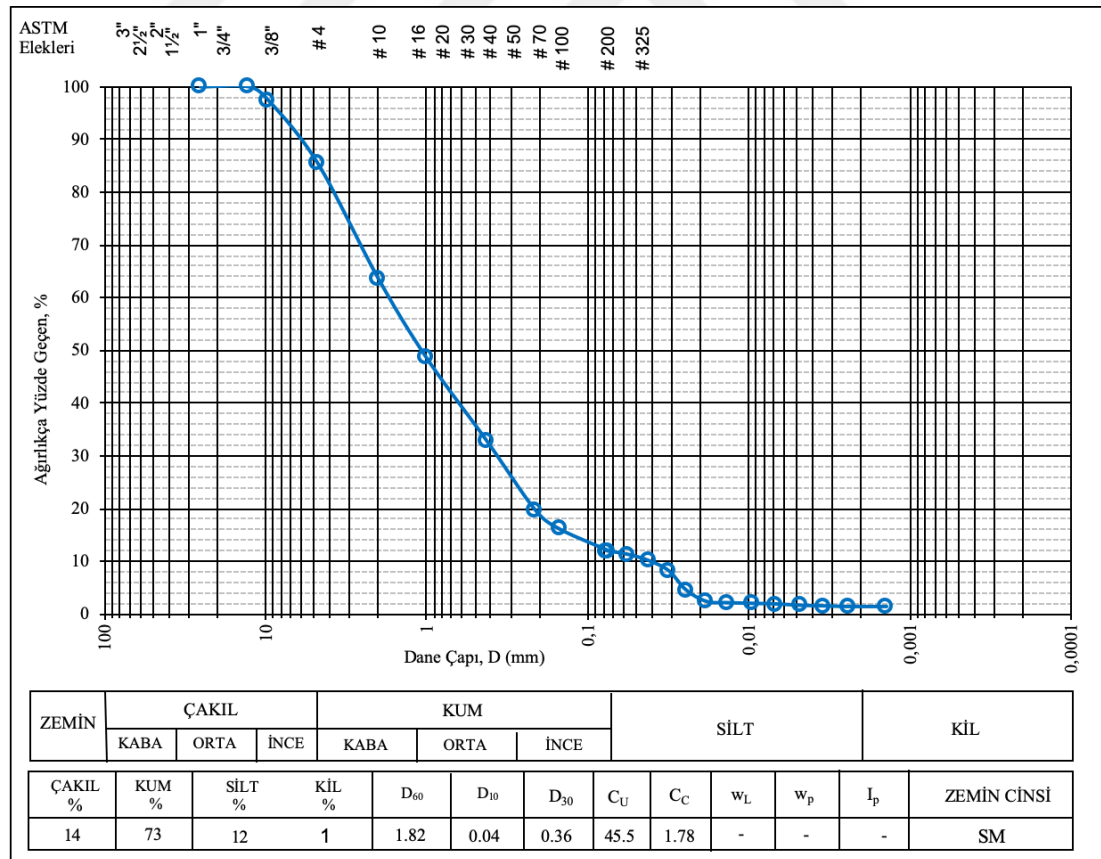


Şekil 3.1 : Dane boyutlarına göre depolanan GDBA (Göktürk, İstanbul).

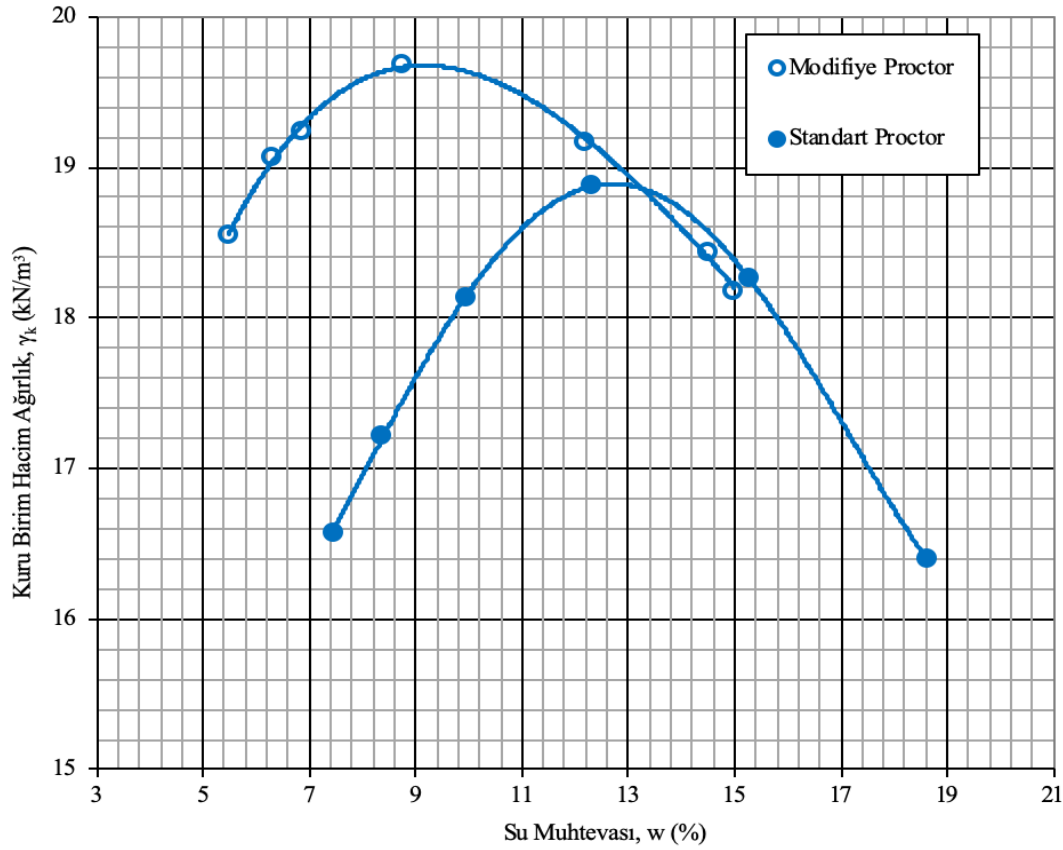
3.1.1 Endeks ve sıkıştırma özellikleri

Çalışma kapsamında, GDBA malzemesinden alınan temsili numuneler üzerinde sınıflandırma ve standart Zemin Mekaniği laboratuvar deneyleri yapılmıştır. GDBA üzerinde yapılan deneylerden numunenin %14 çakıl, %73 kum ve %13 ince daneli malzeme içerdiği, plastik özellik göstermediği belirlenmiştir. Bu sonuçlar numunenin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre Siltli Kum (SM) sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. GDBA'nın dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.2'de verilmiştir.

Sıkıştırma özelliklerini belirlemek amacıyla Standart ve Modifiye Proctor deneyleri sırasıyla ASTM D-698 ve ASTM D-1557'ye göre yapılmıştır. Standart Proctor deneyinde maksimum kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_{k,maks}$) 18.9 kN/m³ bulunurken, optimum su muhtevası (w_{opt}) %13 olarak bulunmuştur. Enerjinin arttırılması ile uygulanan Modifiye Proctor deneyinde malzemenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 19.7 kN/m³ ve optimum su muhtevası %9 olarak bulunmuştur. Deney sonuçları Çizelge 3.1'de, Proctor deneylerinden elde edilen kompaksiyon eğrileri ise Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : GDBA dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil 3.3 : GDBA numunesi için Proctor eğrileri.

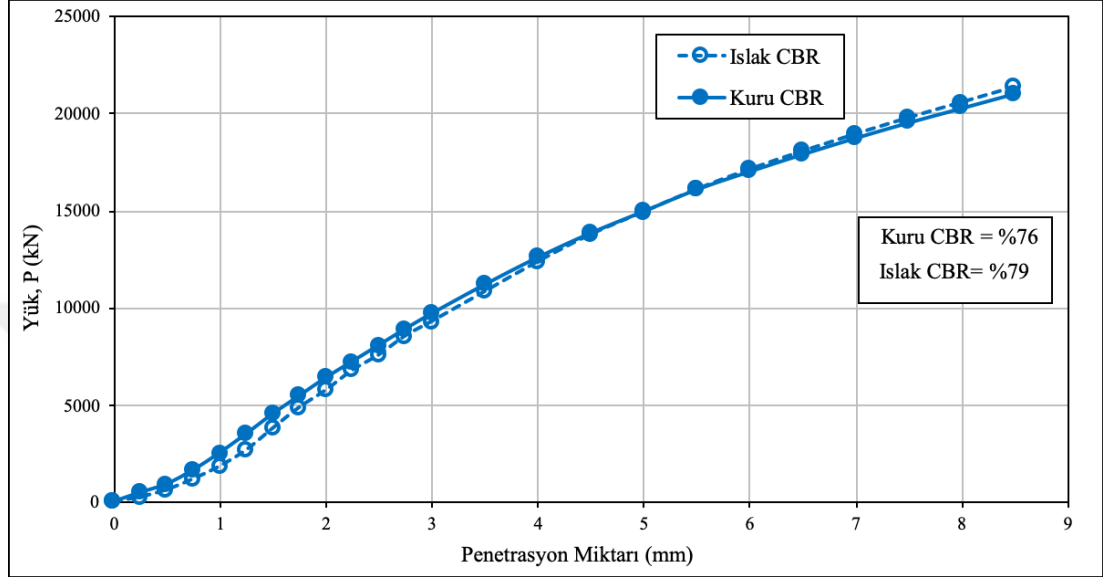
Çizelge 3.1 : GDBA Standart ve Modifiye Proctor deney sonuçları.

Standart Proctor - $\gamma_{k,maks}$ (kN/m ³)	18.9
Modifiye Proctor - $\gamma_{ku,maks}$ (kN/m ³)	19.7
Standart Proctor - w_{opt} (%)	13
Modifiye Proctor - w_{opt} (%)	9

3.1.2 California Taşıma Oranı (CBR) değerleri ve geçirimsizlik özellikleri

Silindirik bir pistonun belirli bir hızda numuneye düşey yönde itilmesi ile elde edilen yük-penetrasyon bağıntısının bulunmasını kapsayan bir deney olan California Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile tesisten temin edilen numunenin mukavemet özelliklerini belirlemek amaçlanmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının yol dolgularında alt temel ve temel tabakası malzemesi olarak kullanım uygunluğunu belirlemek için kullanılan önemli mühendislik değerlerinden biri olan California Taşıma Oranı (CBR) değeri için, Modifiye Proctor eğrisinden elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta numune hazırlanıp Kuru ve Islak CBR deneyleri ASTM D-1883'e göre yapılmıştır. Hem Kuru hem Islak CBR değerleri elde edilmiştir.

Sonuçlara göre GDBA'nın Kuru CBR değeri %76 bulunurken, Islak CBR değeri %79 olarak bulunmuştur. Deneyde uygulanan yük kilogram (kN) cinsinden, oluşan deformasyonlar ise milimetre (mm) cinsinden belirtilmiştir. Kuru ve Yaş CBR değerini elde etmek için kullanılan yük-deformasyon eğrileri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : GDBA numunesi CBR deney sonuçları.

Kullanılacak malzemenin geçirimsizlik özellikleri yol dolgularının performansı için de önemli olup, en çok farklılık gösteren ve diğer faktörlerden en çok etkilenen zemin parametrelerinden biri de permeabilite katsayısıdır. Bu çalışmada permeabilite katsayısını belirlemek için GDBA numunesi üzerinde ASTM D-2434'e göre Sabit Seviyeli Permeabilite deneyi yapılmış, değişen hidrolik eğimlerde permeabilite katsayıları ve filtre hızları bulunmuştur. Hidrolik eğim su akımının üzerindeki iki nokta arasında su düzeyleri farkının akım uzunluğuna bölünmesi ile bulunmaktadır ve boyutsuzdur. Filtre hızı ise debi hızı olarak da adlandırmakta olup, su akışının tüm kesit boyunca olduğu ve suyun kesitin her noktasından aktığı kabulüne dayanarak bulunan hızdır.

Tesis numunesinin farklı hidrolik eğimlerde permeabilite katsayıları ve filtre hızları bulunmuştur. Çizelge 3.2'de permeabilite katsayısı ve filtre hızları ile bu değerlerin hesabında kullanılan veriler özetlenmiştir. Tesis GDBA numunesinin hidrolik eğim arttıkça permeabilite katsayısı artarken, filtre hızında belirli bir değişim gözlenmemiştir. Ortalama permeabilite katsayısı ve filtre hızı sırasıyla 8.86×10^{-5} cm/s ve 7.69×10^{-4} cm/s olarak hesaplanmıştır.

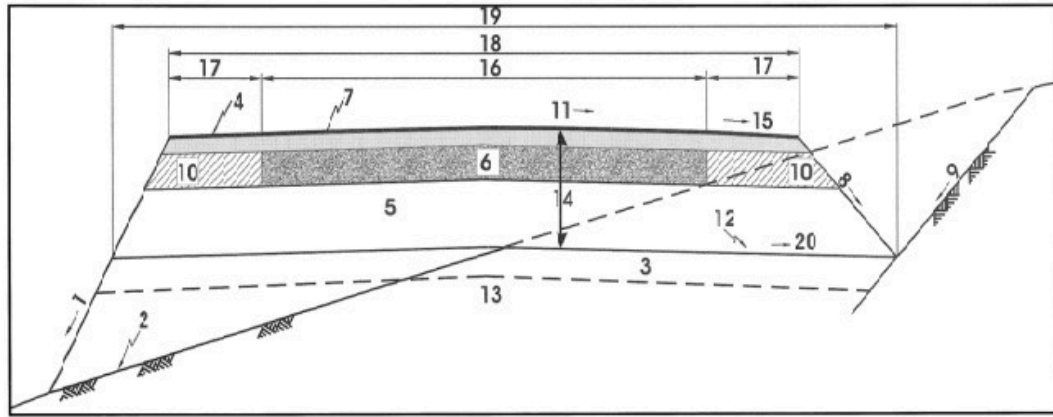
Çizelge 3.2 : GDBA'nın farklı hidrolik eğimlerde permeabilite katsayısı ve filtre hızı.

Hidrolik Eğim (i)	5	7	9	13
Numune Boyu (cm)	15	15	15	15
Numune Çapı (cm)	15.2	15.2	15.2	15.2
Numune Kesit Alanı (cm ²)	181.46	181.46	181.46	181.46
Hidrolik Yük (cm)	75.0	106.0	136.5	197.0
Geçen su hacmi (cm ³)	50	50	50	50
Süre (s)	661	442	331	229
Ort. Permeabilite Katsayısı (cm/s)	8.33×10^{-5}	8.81×10^{-5}	9.13×10^{-5}	9.18×10^{-5}
Filtre Hızı (cm/s)	4.17×10^{-4}	6.23×10^{-4}	8.31×10^{-4}	1.21×10^{-3}

3.2 Alt Temel ve Temel Hazırlama Yöntemi

Alt temel ve temel katmanlarında kullanılacak malzeme için Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından hazırlanmış Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ, 2013) kullanılarak malzeme dane çapı ile bu çaptan küçük olabilecek minimum ve maksimum malzeme yüzdeleri belirtilmiştir. KTŞ'de alt temel tabakası, uygun dane çapı dağılım eğrisinde hazırlanan malzemenin su ile karıştırılarak, ince tesviyesi tamamlanmış dolgu ve yarmadan üst yapı tabanı üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, proje belirtilen şekilde serilip sıkıştırılması ile oluşan tabaka olarak tanımlanmaktadır. Temel tabakası ise uygun dane çapı dağılımında hazırlanan malzemenin, alt temel tabakası üzerine tabakalar halinde serilip sıkıştırılan tabakadır. Şekil 3.5'da yol üstyapı kesiti verilmiş, GDBA numunesinin kullanılacak alt temel ve temel tabakaları gösterilmiştir.

KTŞ'de alt temel malzemeleri Tip A ve Tip B olarak 2'ye ayrılmıştır. Alt temel malzemesinin kum-çakıl ocaklarından temin edildiğinde Tip A için belirtilen dane çapı dağılım sınırlarına uygunluk göstermesi gerektiği, aksi halde Tip A limitlerine uygun olmayan malzemelerin elenerek Tip A dane çapı dağılımına uygun hale getirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Alt temel malzemesinin kum-çakıl ocaklarından kırılarak hazırlanması durumunda ise malzemenin dane çapı dağılımının Tip B'ye uygun olması gerektiği belirtilmiştir.



- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| 1- Dolgu Şevi | 11- Yolun Enine Eğimi |
| 2- Doğal Zemin | 12- Tesviye Yüzeyi |
| 3- Üstyapı Tabanı | 13- Yol Gövdesi Taban Zemini |
| 4- Banket Kaplaması | 14- Üstyapı Proje Kalınlığı |
| 5- Alttemel Tabakası | 15- Banket Eğimi |
| 6- Temel Tabakası | 16- Trafik Şeritleri Genişliği |
| 7- Kaplama Tabakası | 17- Banket Genişliği |
| 8- Hendek Şevi | 18- Yol (Platform) Genişliği |
| 9- Yarma Şevi | 19- Üstyapı Tabanı Genişliği |
| 10- Banket Temeli | 20- Taban Yüzeyinin Enine Eğimi |

Şekil 3.5 : Yol üstyapısı enkesiti (Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, 2008)

Çalışma kapsamında alt temel tabakası numunesi hazırlanırken Tip A türü malzeme yüzdeleri dikkate alınmıştır. Alt temel tabakasından kullanılacak Tip A ve Tip B malzemeler için belirtilen dane çapı dağılım limitlerinin üst ve alt sınır değerleri Çizelge 3.3'te GDBA numunesinin dane çağı dağılımı ile beraber verilmiştir. Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları üzerinde yapılan elek analizi sonuçlarına göre A tipi sınır değerlerine uymayan değerler koyu olarak işaretlenmiştir.

Çizelge 3.3 : Alt temel tabakası dane çapı dağılımı için KTŞ'de belirtilen sınırlar.

Elek çapı (mm)	Geçen Yüzde (%)		
	Tip A	Tip B	Tesis Numunesi
75	100	-	100
50	-	100	100
37.5	85-100	80-100	100
25	-	60-90	100
19	70-100	45-80	100
9.5	45-80	30-70	97
4.75	30-75	25-55	86
2	-	15-40	64
0.425	10-25	10-20	33
0.075	0-12	0-12	12

Temel tabakasında kullanılabilecek malzemeler de Karayolları Teknik Şartnamesinde kullanım yerine göre 3 tipe ayrılmış, her tipin kullanılabileceği alanlar belirtilmiştir. Asfalt betonu ile kaplanacak yollarda dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzemenin dane çapı dağılımının Tip A veya Tip B ye uygun olması gerektiği, sathi kaplama yapılacaklar Devlet yollarında Tip A veya Tip B kullanılabileceği, sathi kaplama yapılacak il yollarında proje koşulları dikkate alınarak A, B veya C tiplerinden herhangi birinin seçilebileceği belirtilmiştir.

Çalışmanın daha geniş uygulama alanlarını kapsaması için temel tabakasının A ve B tipi malzeme için belirtilen dane çapı dağılımı sınır değerleri arasında kalması esas alınmıştır. Temel tabakasında kullanılacak malzeme tipleri için belirtilen dane çapı dağılımları tesisten temin edilen GDBA numunesinin dane çapı dağılımı ile beraber Çizelge 3.4'te özetlenmiştir. Tesisten alındığı hali ile geri dönüştürülmüş beton agregasının A Tipi temel tabakasında kullanılacak agrega malzemeleri için verilen belirli elek çaplarından geçen yüzde değerlerine uymayan değerleri koyu olarak belirtilmiştir.

Çizelge 3.4 : Temel tabakası dane çapı dağılımı için KTŞ'de belirtilen sınırlar.

Elek Çapı	Geçen Yüzde (%)			
	Tip A	Tip B	Tip C	Tesis Numunesi
50	100	-	-	100
37.5	80-100	100	-	100
25	60-90	70-100	100	100
19	45-80	60-92	75-100	100
9.5	30-70	40-75	50-85	97
4.75	25-55	30-60	35-65	86
2	15-40	20-45	25-50	64
0.425	8-20	10-25	12-30	33
0.075	2-8	0-12	0-12	12

Alt temel ve temel tabakasının dane çapı dağılımının sağlaması gereken özelliklerden en az 1 tanesi tesis GDBA tarafından sağlanmadığı için bu malzemenin tesisten alındığı hali ile ne alt temel ne temel tabakalarında kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir. Tesis GDBA numunesinin dane çapı dağılımının KTŞ'de alt temel ve temel için belirtilen dane çapı dağılım limitlerinin dışında kalması bu limit değerleri dikkate alınarak yeni bir dane çapı dağılımının hazırlanmasını gerekli kılmıştır.

Belirtilen çaplardan geçen uygun yüzdelere seçilirken daha geniş bir kullanım alanı bulması hedeflenmiş, bu amaçla hem A hem B tipi üst ve alt sınır değerlerini sağlayan bir dane dağılımı hazırlanmıştır. Her iki tip için belirli çaplardan geçen malzeme yüzdeleri üst ve alt sınır değerlerinin ortalamasına yakın değerler seçilerek belirlenmiştir (Çizelge 3.5).

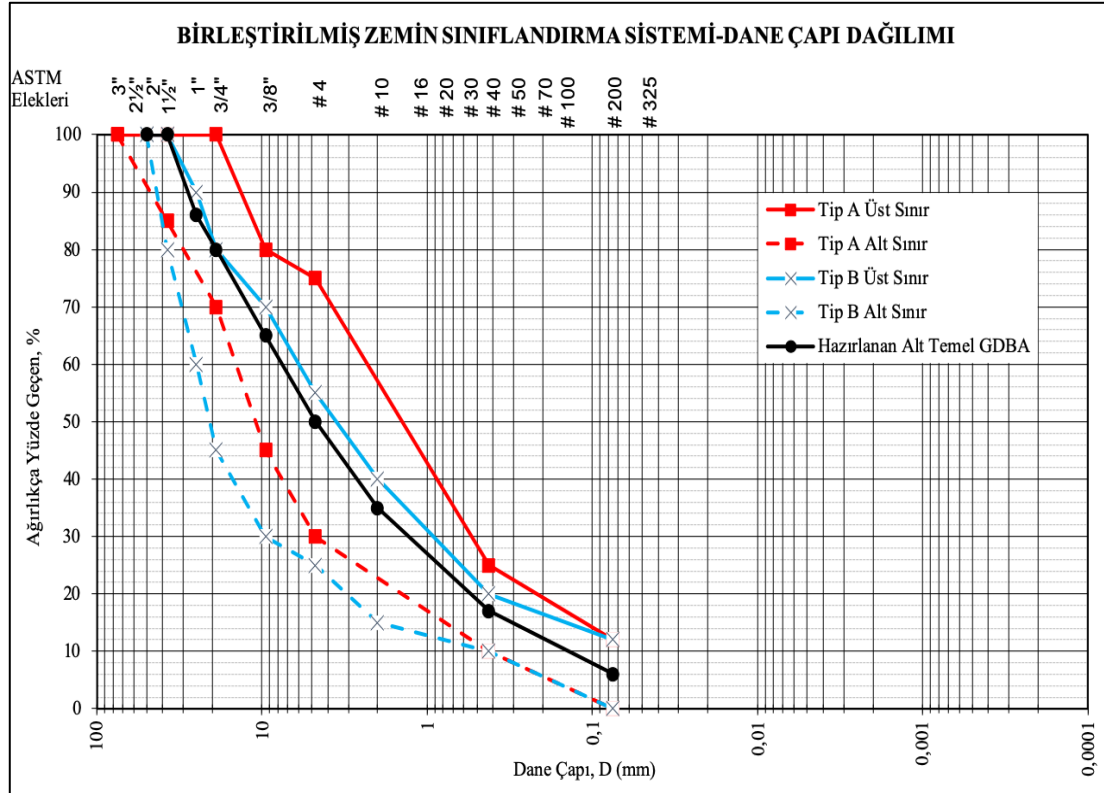
Çizelge 3.5 : Alt temel ve temel tabakaları dane çapı dağılımları.

Çap (mm)	Geçen Yüzde (%)	
	Alt Temel Tabakası	Temel Tabakası
50	100	100
37.5	100	100
25	86	80
19	80	70
9.5	65	50
4.75	50	38
2.0	35	26
0.425	17	14
0.075	6	5

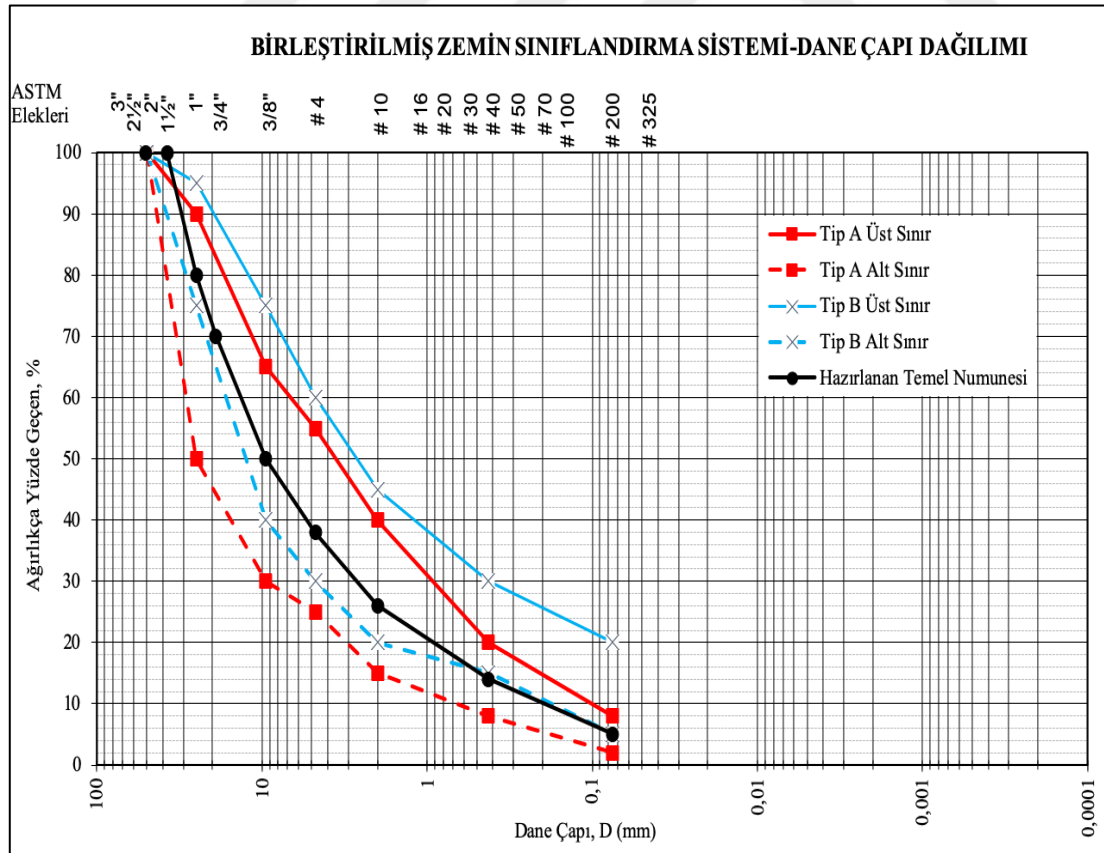
KTŞ'ye uygun alt temel ve temel numunelerini hazırlamak için tesisten temin edilen numune 3/4", 3/8", #4, #10, #40, #200 elekleri kullanılarak 7 farklı dane çapı aralıklarında depolanmıştır (Şekil 3.6). KTŞ'de A ve B Tipi dane çapı dağılım eğrisi üst ve alt sınırları ile bu sınırlar dikkate alınarak belirlenen dane çapı dağılım eğrisi alt temel tabakası için Şekil 3.7'de, temel tabakası için Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Depolanan farklı çaplardaki geri dönüştürülmüş beton agregaları, belirlenen yüzdelere uygun olarak karıştırılarak geoteknik deneylerde kullanılmak üzere uygun dane çapı dağılımında alt temel ve temel malzemesi elde edilmiştir.



Şekil 3.6 : Farklı çap aralığında depolanan GDBA.



Şekil 3.7 : Tip A ve B'ye göre hazırlanan alt temel dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil 3.8 : Tip A ve B'ye göre hazırlanan temel dane çapı dağılım eğrisi.

3.3 Deney Yöntemi

Bu bölümde Geri Dönüştürülmüş Beton Agregalarının (GDBA) yol dolgularında alt temel ve temel tabakası malzemesi olarak kullanım uygunluğunu Karayolları Teknik Şartnamesine göre belirlemek amacıyla İTÜ Zemin Mekaniği laboratuvarında yapılan deneylerde izlenen yöntemler açıklanmıştır. Endeks ve sıkıştırma, California Taşıma Oranı (CBR) değerleri ve geçirimsizlik ile esneklik özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan geoteknik deneyler tamamlandıktan sonra donma-çözünme çevrimleri sonrası CBR değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Bütün bu deneyler yapılırken kullanılan yöntemler bu başlık altında Kompaksiyon deney yöntemi, CBR ve Permeabilite deney yöntemi, Esneklik Modülü deney yöntemi ile Donma çözünme çevrimleri uygulama ve donma çözülme sonrası inceleme yöntemi olarak 5 alt başlıkta incelenmiştir. Doğru değerlendirme yapılabilmesi amacıyla hem tesisten temin edilen GDBA numunesi hem de hazırlanan alt temel ve temel tabakalarında yapılan aynı deneylerde aynı yöntemler kullanıldığı için yöntemler açıklanırken kullanılan numuneler kavramı her 3 tip numuneyi (Tesis Numunesi, Alt Temel Numunesi ve Temel Numunesi) de kapsayacak şekilde kullanılmıştır.

3.3.1 Kompaksiyon deneyleri

Laboratuvarında numunelerin sıkıştırma özelliklerinin tayini için ASTM D-1557'ye göre Modifiye Proctor ve ASTM D-698'e göre Standart Proctor deneyleri yapılmıştır. Modifiye Proctor deneyi yapılırken kullanılacak kalıbın çapı, sıkıştırılacak tabaka sayısı ve her tabakaya uygulanacak tokmağın düşüş sayısı standartta belirtilen 3 farklı metottan uygun olan metot seçilerek belirlenmiştir. Bütün numunelerde 9.5 mm çaplı elek üstü malzeme toplam malzemenin ağırlıkça %20'sinden ve 19 mm üstünde biriken malzeme toplam malzemenin ağırlıkça %30 undan az olduğu için Metot C kullanılmıştır. Metot C'ye göre Modifiye Proctor yapılırken 19 mm elekten geçen malzeme kullanılmış, numune 5 tabaka halinde 152 mm çaplı kalıpta sıkıştırılmıştır. 56 000 ft-lbf/ft (2700 kN-m/m) bir sıkıştırma enerjisi, 4.5 kg ağırlığındaki tokmağın her tabakaya yaklaşık 46 cm'den 56 kez düşürülmesiyle numuneye aktarılmıştır. Deney yapımı sırasında su miktarı kontrollü olarak arttırılarak en az 5 farklı su içeriğinde kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Belirlenen ilk su muhtevası değeri malzeme dane çapı dağılımı da göz önünde bulundurularak %2-4 aralığında seçilmiştir.

Alınan 6 kg malzemeye belirlenen oranda su katılmıştır. Boş kalıp ağırlığı belirlendikten sonra, her tabakaya eşit miktarda malzeme yerleştirmeye dikkat edilmiş ve 5 tabakada, tabaka başına tokmak 56 kere düşürülerek sıkıştırılma işlemi tamamlanmıştır. Su muhtevası değerleri belirli oranda arttırılarak işlem tekrarlanmıştır. Her işlem sonrasında etüve konulmak üzere ağırlıkları belli olan kaplara alt ve üst kısımlardan numuneler alınmış, etüv öncesi ve sonrası ağırlıkları not edilmiştir.

Aynı numuneler üzerinde Standart Proctor deneyleri de ASTM D-698'e göre yapılmıştır. Modifiye Proctor deneyinde olduğu gibi ilk olarak dane çapı dağılım yüzdeleri dikkate alınarak kullanılacak metot belirlenmiştir. Kullanılacak metot belirlenirken izlenen yol Modifiye Proctor deneyi ile aynı olup Metot C kullanılarak deneyler yapılmıştır. ASTM D-698'e göre Metot C uygulandığı durumda 19 mm elek altı malzeme kullanılıp, 152 mm çaplı Proctor kalıbında 3 tabaka 56 vuruş şeklinde numunelerin sıkıştırılması gerekmektedir. Sıkıştırma enerjisinin değişmesi dışında numune hazırlanması ve deney sonrası optimum su muhtevasındaki maksimum kuru birim hacim ağırlığın belirlenmesinde Modifiye Proctor deneyinde izlenen yol izlenmiştir.

3.3.2 California Taşıma Oranı (CBR) ve permeabilite deneyleri

CBR deneyi genellikle yol ve havaalanı dolgularında alt temel, temel ve taban malzemesi olarak kullanılarak malzemenin dayanımını değerlendirmek için yapılan bir deneydir. Alt temel ve temel malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin CBR değerini belirlemek için ASTM D-1883'e göre California Taşıma Oranı (CBR) deneyi yapılmıştır. CBR değeri malzemede 2.5 ve 5 mm penetrasyon elde edilmesi için uygulaması gereken yük değerinin standart yük değerlerine bölünmesi ile bulunur. 2.5 mm'den bulunan CBR değerinin yüksek çıkması durumunda o değer direkt kabul edilirken, 5 mm'den elde edilen değerinin yüksek çıkması durumunda ise deney tekrarlanır. Tekrarlanan deneyde de 5 mm penetrasyondan elde edilen CBR değeri yüksek bulunuyorsa, 5 mm'den elde edilen yüzde CBR değeri olarak kabul edilir.

Yapılan bütün deneylerde CBR tipi kalıp kullanılmıştır. İç çapı 154 mm, yüksekliği 177.8 mm olan çelik kalıbın tabanına yüksekliği yaklaşık 50 mm olan düz taban plakası yerleştirilmiş ve yüksekliği yaklaşık 50.8 mm olan uzatma yakası eklenmiştir.

CBR deneyinde malzemelerin çapı 19 mm'den büyük olmamakla beraber Modifiye Proctor deneyinden bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılma yapılmıştır. Malzeme delikli taban plakası üzerine yerleştirilen CBR kalıbında ASTM D-1557'ye göre Metot C kullanılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zeminin üst kısmı düzeltme bıçağı ile düzeltildikten sonra filtre kâğıdı konulup yarıklı sürşarj ağırlıklar eklenmiştir. Islak CBR deneyi yapılırken numune 24 saat su içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.9). Numune üzerine tek taraflı olarak uygulanan kuvvet okumaları için bir kuvvet halkası ve penetrasyon okumaları için ise 1/100 mm hassasiyete sahip mikrometre kullanılmıştır. Deney sırasında elde edilen veriler kullanılarak çizilen yük penetrasyon eğrisinde ASTM D-1883'e göre gerekli düzeltmeler yapıp, 2.5 ve 5 mm penetrasyon değerlerine denk gelen yük değerleri bulunmuştur. Bulunan yük (kg) değerleri 2.5 mm için 1362, 5 mm penetrasyon için 2043 kg yük değerlerine bölünmüştür. Bütün yapılan CBR deneylerinde 5 mm penetrasyon değerinden elde edilen CBR değeri daha yüksek bulunmuştur. 5 mm penetrasyon için bulunan CBR değeri yüksek çıktığı için bütün deneyler 2 kez tekrarlanmış, tekrarlanan deneylerde de 5 mm'den elde edilen CBR değeri yüksek bulunduğu için 5mm penetrasyon değerinin verdiği CBR değeri kabul edilmiştir.



Şekil 3.9 : 24 Saat suda bekletilen CBR numunesi.

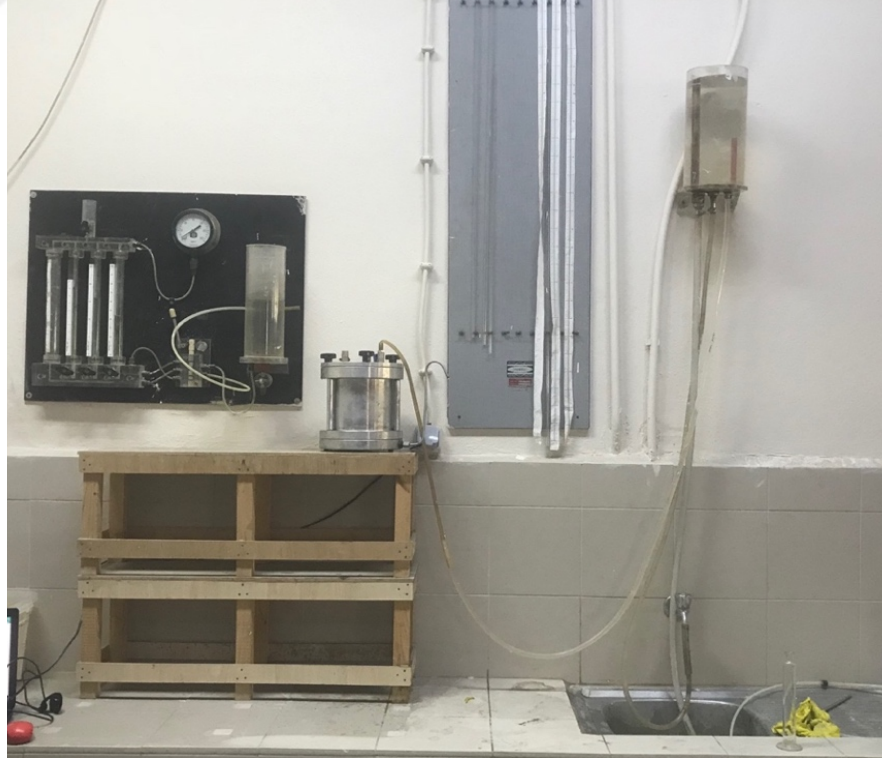
Zeminlerin geçirimsizlik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için ASTM D-2434'e göre Sabit Seviyeli Permeabilite deneyleri yapılarak, hidrolik eğimle permeabilite katsayısının ve filtre hızlarının değişimi belirlenmiştir. Bütün numunelerde maksimum dane çapı büyüklüğü 19 mm olduğu için 152 mm çapında kalıp kullanılmıştır. Numuneler Modifiye Proctor enerjisinde sıkıştırılmıştır. Numunenin alt ve üst kısmına poroz taşı yerleştirip üst kapak vanaları Şekil 3.10'da görüldüğü gibi sıkılmıştır. Sıkıştırılan numunenin içerisinde hava kabarcıklarının oluşup su geçişini engellemesini önlemek amacıyla vakum uygulaması yapılmıştır (Şekil 3.11). Sabit Seviyeli Permeabilite deneyinde sabit su düzeyine sahip bir haznedan gelen su, zeminden geçerek, hacim ölçekli bir kaptan toplanır. Deneyi başlatmadan önce kararlı akış elde edilmiş ve numuneye gelen suyun numune içinden geçip kaptan biriktirdiği 50 cm³ miktar (ΔQ) için geçen süre (Δt) hesaplanmıştır. Zemin numunesinin alt ve üst kısımlarına bağlanan piyezometre borularında su düzeyleri gözlenip, okunmalar kaydedilip, permeabilite katsayısı hesaplanmıştır. Hidrolik yük numune boyuna bölünerek hidrolik eğim belirlenmiş, permeabilite katsayısının hidrolik eğim ile değişim grafikleri çizilmiştir. Filtre hızının hesabından ise hidrolik eğim permeabilite katsayısına bölünmüş, ortalama filtre hızı değeri bulunmuştur. Farklı hidrolik eğim elde etmek için numunenin su haznesine olan mesafesi laboratuvarında yer alan yükseltici tahtalar kullanılarak değiştirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.10 : Sabit Seviyeli Permeabilite deneyinde kullanılan kalıp.



Şekil 3.11 : Hazırlanan numuneye yapılan vakum uygulaması.



Şekil 3.12 : Farklı hidrolik eğimde tekrarlanan permeabilite deneyi.

3.3.3 Esneklik Modülü deneyleri

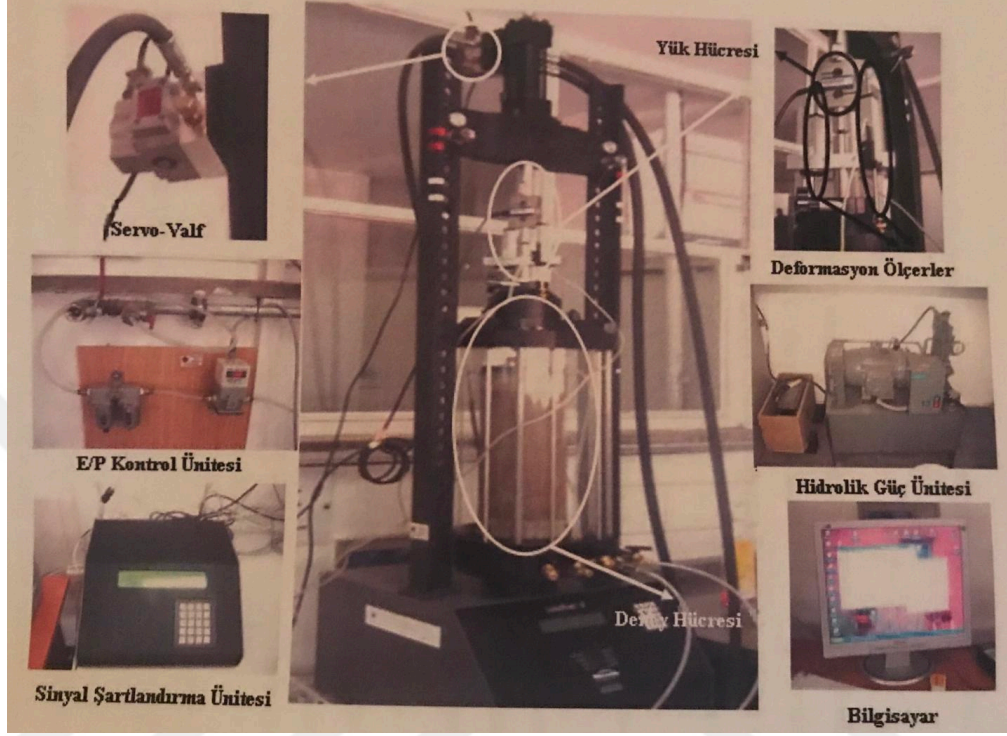
Esnek üstyapıların performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri alt temel, temel ve üst yapı taban malzemesinin tekrarlı trafik yükleri altındaki davranışdır. Malzemelerin trafik yükleri altındaki davranışını belirlemede eski ve statik bir deney olan CBR deneyi yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. CBR deneyinde arazi koşullarının laboratuvar ortamında oluşturulamaması nedeniyle trafik koşulları altındaki davranışı daha gerçekçi bir şekilde modelleyen ve arazi koşullarını daha iyi yansıtan dinamik bir deney olan Esneklik Modülü deneyi geliştirilmiştir. Esneklik Modülü deneyi yol temel ve alt temel tabakasında kullanılan malzemenin rijitliğini en iyi gösteren deney olmakla beraber farklı mevsim ve inşaat koşullarında esneklik modülleri değerlerinin belirlenmesine imkân sağlamaktadır.

Malzeme tekrarlı trafik yüklere maruz kaldığında plastik ve elastik deformasyonlar oluşmaktadır. Alt temel ve temel tabakasında kullanılan malzemeler elasto-plastik olduğundan yüklemeye maruz kaldıklarında elastik deformasyonların yanında bir miktar plastik deformasyonlar da meydana gelmektedir. Tek yüklemede oluşan plastik deformasyon yüksek iken, plastik deformasyonlardaki artış yükleme sayısı arttıkça azalmakta ve malzeme belirli miktarda yük tekrerründen sonra elastik davranış göstermektedir. Bu deney ile kullanılan malzemenin tekrarlı yükler altındaki davranışını belirlemek amaçlanmaktadır.

Çalışma kapsamında Esneklik Modülü deneyleri Ankara Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) laboratuvarında, AASHTO T-307 standardına uygun olarak yapılmıştır. KGM’de kullanılan deney aleti deney hücresi, deformasyon ölçer, hidrolik güç ünitesi, servo-valf, E/P kontrol ünitesi ve sinyal şartlandırma ünitesinden oluşmaktadır. Kullanılan cihaz sistemi Şekil 3.13’te verilmiştir. Deney sırasında numune tipinin belirlenmesi, belirlenen numune tipine uygun olarak numunenin hazırlanması, deneyin gerçekleştirilmesi ve yükleme dalgası ile serilerine göre deney çıktılarının alınması aşamaları izlenerek gerçekleştirilmiştir.

AASHTO T-307 standardında malzemeler Tip-1 ve Tip-2 olarak 2’ye ayrılmıştır. Malzemelerin Tip-1 sınıfında yer alması için dane çapı dağılımında 2 mm (NO.10) çaplı elekten geçen malzeme yüzdesinin %70’ten, 0.075 mm (No.200) çaplı elekten geçen malzeme yüzdesinin %20’den az olması ve PI değerinin %10 dan küçük olması gerekmektedir. Tip-1 koşullarını sağlamayan malzemeler ise Tip-2 olarak adlandırılır.

Numune hazırlama aşamasından İTÜ Zemin Mekaniği laboratuvarında belirlenen dane çapı dağılımı ve kıvam limitlerine göre tesisten temin edilen GDBA Tip-1 olarak belirlenmiştir. Esneklik modülü deneylerinde numunenin yüksekliği çapının en az 2 katı ve minimum kalıp çapı da maksimum dane çapının en az 5 katı olmalıdır.



Şekil 3.13 : Esneklik Modülü deneyinde kullanılan cihaz sistemi.

AASHTO T-307 standardında malzemeler Tip-1 ve Tip-2 olarak 2'ye ayrılmıştır. Malzemelerin Tip-1 sınıfında yer alması için dane çapı dağılımında 2 mm (NO.10) çaplı elekten geçen malzeme yüzdesinin %70'ten, 0.075 mm (No.200) çaplı elekten geçen malzeme yüzdesinin %20'den az olması ve PI değerinin %10 dan küçük olması gerekmektedir. Tip-1 koşullarını sağlamayan malzemeler ise Tip-2 olarak adlandırılır. Numune hazırlama aşamasından İTÜ Zemin Mekaniği laboratuvarında belirlenen dane çapı dağılımı ve kıvam limitlerine göre tesisten temin edilen GDBA Tip-1 olarak belirlenmiştir. Esneklik modülü deneylerinde numunenin yüksekliği çapının en az 2 katı ve minimum kalıp çapı da maksimum dane çapının en az 5 katı olmalıdır. Tesis GDBA numunesinin maksimum dane çapı 9.5 mm olduğu için çapı 150 mm yüksekliği 315 mm olan kalıp kullanımı uygun bulunmuştur.

Numune hazırlanırken öncelikle numunenin taşınması sırasında oluşacak problemleri önlemek için standartta da belirtildiği gibi kalıba membran yerleştirilerek, bu membran kalıbın alt ve üst kısmına geçirilen o-ring ile sabitlenmiştir (Şekil 3.14).

Sabitlenme işleminden sonra ve deney boyunca membrana vakum uygulanarak içerisinde hava kabarcığı oluşmasının önüne geçilmiş, sıkıştırma işlemi esnasında membranın kayması engellenmiştir. AASHTO T-307'ye göre Tip-1 numuneleri Modifiye Proctor deneyinden elde edilen optimum su muhtevastaki maksimum kuru birim hacim ağırlıkta, 6 tabakada titreşimli tokmak kullanılarak sıkıştırılmalıdır. Tabakaların dane çağı dağılımlarında görülen farklılıkları en aza indirmek için her tabaka ayrı ayrı hazırlanmıştır (Şekil 3.15). Hazırlanan 6 tabaka Modifiye Proctor deneylerinde belirlenen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde titreşimli tokmak kullanılarak sıkıştırılmıştır.



Şekil 3.14 : Sıkıştırma işlemi için hazırlanan kalıp.



Şekil 3.15: Sıkıştırma işlemi için hazırlanan tabakalar.

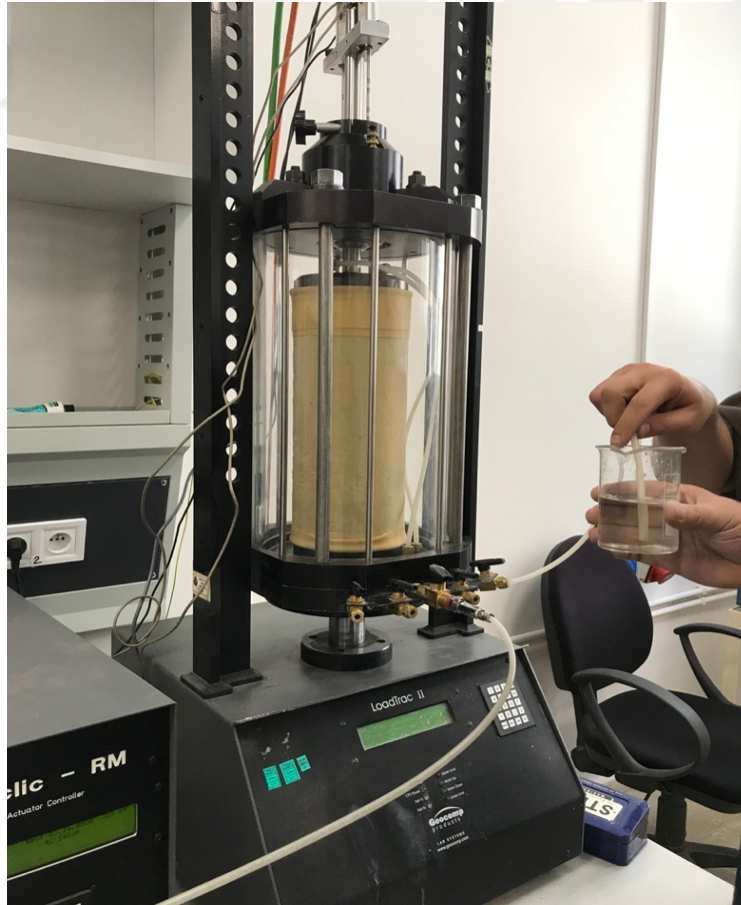
Şekil 3.16’da numunelerin titreşimli tokmak ile sıkıştırılma işlemi sırasında kullanılan ekipman gösterilmiştir. Bir tabaka için maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ve kalıp çapı bilgileri kullanılarak gerekli malzeme miktarı belirlenirken, her tabaka sıkıştırıldıktan sonrası yükseklik kontrol edilerek sıkışma işleminin gidişatı izlenmiştir.



Şekil 3.16 : Esneklik Modülü deneyinde numunesinin sıkıştırılması.

Sıkıştırma işleminden sonra numune tabanına poroz taşı konmuş ve deney hücresine yerleştirilmiştir. Numunenin üst kısmına da sırasıyla filtre kâğıdı, poroz taşı ve üst plaka yerleştirilmiştir. Drenaj kanalları üst yükleme plakasına bağlandıktan sonra yükleme pistonu ile yük hücresi arasında merkezlenmenin tam sağladığı ve hava kaçağının olup olmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.17). Kontrol ünitesi hücreye bağlanıp çevre basıncı kontrolü de yapıldıktan sonra deney başlatılmaya hazır hale gelmiştir.

Deney yazılımı açılarak haversine yükleme dalgası ve yükleme serileri belirlenmiştir. Esneklik Modülü deney yazılımının haversine yük formumun kullandığı 16 farklı yükleme serisini öngörmektedir. Tip-1 ve Tip-2 için önerilen farklı deviatör gerilmeler ve yanıl basınç değlerleri vardır. Bunun nedeni de yol en kesitinde bulunduğı konumun malzeme tipine göre değışmesidir. AASHTO T-307’de Tip-1 numuneler için belirtilen 16 farklı yükleme serisinde uygulanması gereken yükleme sayısı, çevre basıncı ve maksimum deviatör gerilme değlerleri kPa ve psi cinsinden Çizelge 3.6’da verilmiştir.

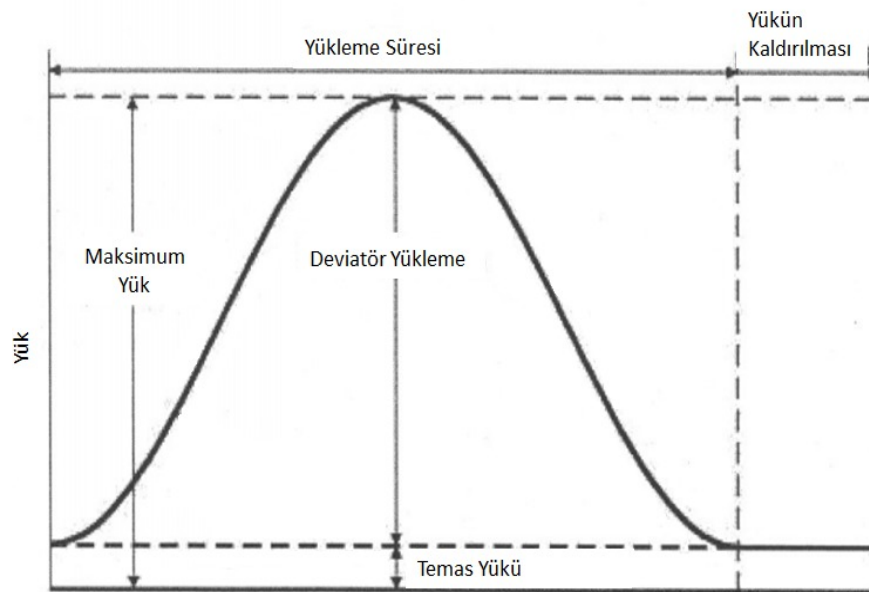


Şekil 3.17 : Deneye başlamadan önce yapılan hava kaçağı kontrolü.

Çizelge 3.6 : Esneklik Modülü deneyinde Tip-1 numunelere ait yükleme tablosu.

Yükleme Seri Numarası	Serilerdeki Yükleme Sayısı	Çevre Basıncı (σ_3)		Maks. Deviator Gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$)	
		kPa	psi	kPa	psi
0	500-1000	103.4	15	103.4	15
1	100	20.7	3	20.7	3
2	100	20.7	3	41.4	6
3	100	20.7	3	62.1	9
4	100	34.5	5	34.5	5
5	100	34.5	5	68.9	10
6	100	34.5	5	103.4	15
7	100	68.9	10	68.9	10
8	100	68.9	10	137.9	20
9	100	68.9	10	206.8	30
10	100	103.4	15	68.9	10
11	100	103.4	15	103.4	15
12	100	103.4	15	206.8	30
13	100	137.9	20	103.4	15
14	100	137.9	20	137.9	20
15	100	137.9	20	275.8	40

Deney sırasında bütün uygulanan düşey yüklerde yük 0.1 saniye numuneye uygulanmış, 0.9 saniyede ise numune üzerinden düşey yükün kaldırılmıştır. Sinüzoidal olarak numuneye verilen yükleme formu Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18 : Esneklik Modülü deneyinde yükün uygulama formu.

Esneklik Modülü deneyinde başlangıç evresi şartlanma evresi olarak da bilinen 0 yükleme seri numarası olarak adlandırılır. Şartlanma evresinde numuneye 1000 adet yükleme yapılmıştır. Bu evrede amaç numunenin sıkışması sırasında meydana gelecek deney sonuçlarını etkileyecek sıkıntıları ortadan kaldırmak ve numune başlıkları ile numune arasında teması sağlamaktır. Bu evreden sonra numune 1'den 15'e kadar farklı çevre basıncı ve maksimum deviator gerilme oluşturulan yüklemelere hazır hale gelmektedir. Kalan 15 seri numarasında yapılan yüklemelerde yükün tekrar sayısı 100'dür. Deney boyunca numuneye uygulanan her yüklemeye oluşturulan çevre basıncı ve maksimum deviator gerilme değerleri ile ölçülen esneklik modülü değerleri bilgisayar sistemine aktarılmaktadır. Deney tamamlandıktan sonra çevre basıncı, maksimum deviator gerilme değerleri AASHTO T-307'de belirtilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Uygulanması gereken ve uygulanan değerler arasındaki farkın göz ardı edilecek kadar az olduğu belirlenmiş ve deney başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Şekil 3.19'da deneyin uygulama aşaması gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : Esneklik Modülü deneyinin laboratuvarda uygulanması.

3.3.4 Donma çözülme çevrimleri uygulama ve sonrası inceleme yöntemi

Alt temel ve temel numunelerinin donma çözülme davranışlarını belirlemek için çeşitli sayılarda çevrime maruz bırakılmak üzere alt temel ve temel numuneleri hazırlanmıştır. Modifiye Proctor deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde, 5 tabakada sıkıştırılacak olan alt temel ve temel numunelerinin her tabakada benzer özellikleri göstermesi ve daha doğru sonuçlar vermesi için her tabakada kullanılacak malzeme ayrı ayrı hazırlanmıştır. 1 Tabaka için gerekli malzeme miktarları CBR kalıp hacmi ve Modifiye Proctor deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinden hesaplanmıştır. Her 1 tabaka için gerekli malzeme miktarı belirlendikten sonra dane çağı dağılım yüzdelere göre hangi çap aralığından ne kadar malzeme konulacağı hesaplanıp, optimum su muhtevası kadar su eklenip numuneler sıkıştırmaya hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.20’te temel numunesi için bir tabakada kullanılacak malzemelerin hazırlanması, Şekil 3.21’de ise optimum su içeriğinin katılıp sıkıştırılmaya hazır hale geldiği durum gösterilmiştir.

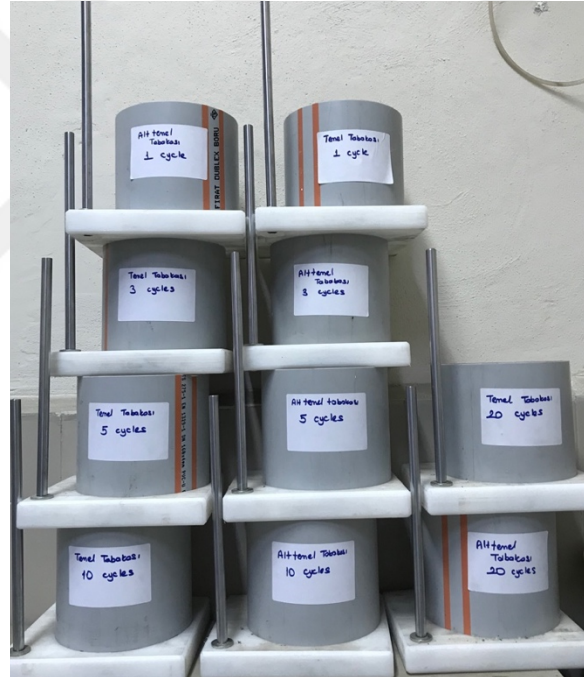


Şekil 3.20 : Sıkıştırılacak her temel tabakasının ayrı ayrı hazırlanması.



Şekil 3.21 : Optimum su içeriğinin eklenip karıştırıldığı temel tabakaları.

Donma çözünme çevrimlerine maruz bırakılacak numunelerin sıkıştırılacağı kalıp olarak plastik kalıp tercih edilmiş, CBR kalıp ölçülerinde 10 adet plastik kalıp yaptırılmıştır. Plastik kalıplar CBR kalıplarına göre hafif olduğu ve CBR kalıbının taban plakasına göre daha az yer kaplayacak şekilde tasarımı yapıldığı için kullanımı daha pratik bulunmuştur. Şekil 3.22’de CBR kalıp hacmine sahip olan ve özel olarak donma çözünme deneyleri için yaptırılan plastik kalıplar gösterilmiştir. Kalıp içine yerleştirilen her bir tabaka sıkıştırılırken titreşimli sıkıştırma aleti kullanılmıştır. Kullanılan titreşimli sıkıştırma aleti ile kalıp Şekil 3.23’de gösterilmiştir. Modifiye Proctor deneyinde çelik kalıp kullanılarak ve 4.5 kg tokmağın 56 kez düşürülmesi ile elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde etmek için titreşimli sıkıştırma aletinin titreşim hızı ve uygulama süresi denemeler yapılarak belirlenmiştir. Belirlenen uygulama süresinde ve titreşim hızında numuneler sıkıştırılmıştır.

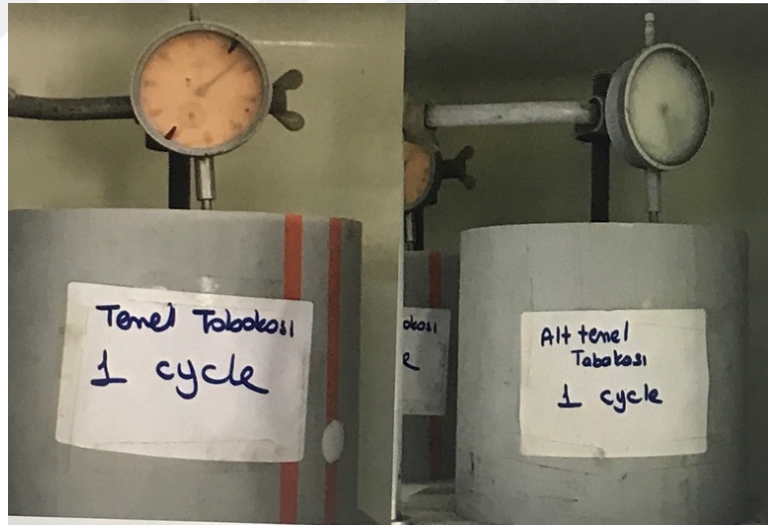


Şekil 3.22 : Donma çözünme çevrimleri için kullanılan plastik kalıplar.

Sıkıştırılan numuneler dondurulma işlemi için 24 saat boyunca -20 dereceye ayarlanan derin dondurucuya yerleştirilmiş, çözünme işlemi için ise 20 derece sıcaklıktaki odada 24 saat boyunca bekletilmiştir. 1 çevrim 24 saat dondurulup, 24 saat çözdürülen işlem olarak adlandırılmıştır. 1 çevrimi tamamlamak 2 gün sürerken, 20 çevrim 40 günde tamamlanmıştır. Numuneler 1-3-5-20 çevrim sayılarında donma çözünme olayına maruz bırakılmıştır. Şekil 3.24’te 24 saat dondurulup, çözdürülme işlemine henüz geçirilen alt temel ve temel numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3.23 : Kullanılan titreşimli sıkıştırma aleti.



Şekil 3.24 : Çözülme sürecine henüz geçirilen temel ve alt temel numunesi.

Sırasıyla 1-3-5-10 ve 20 kez dondurulup çözdürülerek çevrim sayılarını tamamlayan alt temel ve temel numuneleri üzerinde CBR deneyi yapıp, çevrim sayısının CBR değeri ve kullanım uygunluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bölüm 3.3.2’te açıklanan CBR deney yöntemi, donma çözülme çevrimlerini tamamlayan numuneler üzerinde yapılan CBR deneylerinde de uygulanmıştır. Donma çözülme olayının mukavemet özellikleri üzerindeki etkisi donma çözülme öncesi ve sonrası CBR deneylerinden elde edilen CBR değerleri ile değerlendirilmiştir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada İstanbul'daki kentsel dönüşüm sonucu oluşan inşaat yapım yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) yol dolgularında kullanım uygunluğu geoteknik deneyler ile belirlenmiştir. Alt temel ve temel tabakası için numuneler Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS,2013) dane çapı dağılımı için belirtilen alt ve üst sınır değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregasının dane çapı dağılımı Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen alt temel ve temel tabakalarında kullanılacak malzemelerin dane çapı dağılım limitlerinin dışında yer almaktadır. Bu nedenle şartname limitlerini sağlayacak şekilde alt temel ve temel numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan alt temel ve temel numunesi ile tesis numunesi üzerinde yapılan deneyler ile tüm numunelerin kompaksiyon, geçirimsizlik, CBR (California Taşıma Oranı) ile esneklik özellikleri belirlenmiştir.

Hazırlanan alt temel ve temel numuneleri tesis numunesinden farklı olarak donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. 1-3-5-10 ve 20 defa olmak üzere dondurulup çözdürülen numunelerin kullanım uygunluğu CBR değerlerindeki değişimleri dikkate alınarak tekrar değerlendirilmiştir. Bu amaçla her çevrim sonrası CBR deneyi yapılmış, donma çözülmeye maruz bırakılmayan durumlardaki CBR değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde deney sonuçları verilmiş, geçmiş çalışmalar da göz önünde bulundurularak deney sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Proctor (Standart ve Modifiye), CBR (Islak ve Kuru), Sabit Seviyeli Permeabilite, Esneklik Modülü ve Donma Çözülme Sonrası CBR alt başlıklarında ele alınmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi ise kompaksiyon özelliklerinin, CBR değerlerinin ve geçirimsizlik özelliklerinin, esneklik özelliklerinin değerlendirilmesi ile donma çözülme sonrası CBR değerlerinin değerlendirilmesi olarak alt başlıklara ayrılmıştır. En son genel değerlendirme ile bütün bulunan deney sonuçları ve bunların değerlendirilmesi özetlenmiştir.

4.1 Deney Sonuçları

Tesisten temin edilen numune ile alt temel ve temel olmak üzere farklı dane çapı dağılımına sahip 2 numune üzerinde yapılan geoteknik deneyler aşağıda verilen deney programı izlenerek gerçekleştirilmiştir:

1. Tesisten temin edilen GDBA numunenin ilk olarak dane çapı dağılım özellikleri belirlenmiştir. Tesisten alınan malzemenin KTŞ'de yol alt temel ve temel malzemesi olarak kullanılacak malzemeler için verilen dane çapı dağılım sınırlarının dışında kalması nedeniyle KTŞ limitlerine uygun hem alt temel hem de temel numuneleri için dane çapı dağılımları belirlenmiştir.
2. Deneylerde kullanılmak üzere belirlenen dane çapı dağılımlarına göre numune hazırlamak için laboratuvarda tesisten temin edilen GDBA numunesi 3/4", 3/8", #4, #10, #40, #200 nolu eleklerden elenmiştir. Elde edilen GDBA her çap aralığında şartname sınırlarını sağlayacak miktarda karıştırılarak alt temel ve temel numuneleri hazırlanmıştır.
3. Tesisten alınan GDBA ile alt temel ve temel numunelerinin sıkıştırma özelliklerini belirlemek için laboratuvarda Standart ve Modifiye Proctor deneyleri yapılmıştır.
4. Yol dolgularından kullanılacak malzemelerin önemli özelliklerinden biri olan CBR değerini belirlemek için numuneler üzerinde Islak ve Kuru CBR deneyleri yapılmıştır.
5. Geçirimsizlik özelliklerini belirlemek amacıyla kaba daneli zeminler için uygun olan sabit seviyeli permeabilite deneyi yapıp, permeabilite katsayıları belirlenmiştir.
6. Yol dolgularının performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan esneklik modülünün belirlenmesi için Esneklik Modülü deneyi alt temel, temel ve tesis numunesine uygulanmıştır.
7. Son olarak alt temel ve temel numunelerinin yol dolgularında kullanılması durumunda maruz kalabileceği soğuk iklim şartları göz önünde bulundurularak donma çözülme performansını değerlendirme gereği duyulmuştur. Donma çözülme çevrimlerinin uygulanacağı numuneler için CBR kalıbı boyutlarında plastik kalıplar, sıkıştırma sırasında ise titreşimli sıkıştırma aleti kullanılmıştır.

Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan durum ile karşılaştırılma yapılabilmesi için numuneler Modifiye Proctor sıkıştırma enerjisinde elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan alt temel ve temel numuneleri 1-3-5-10 ve 20 olmak üzere 5 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır.

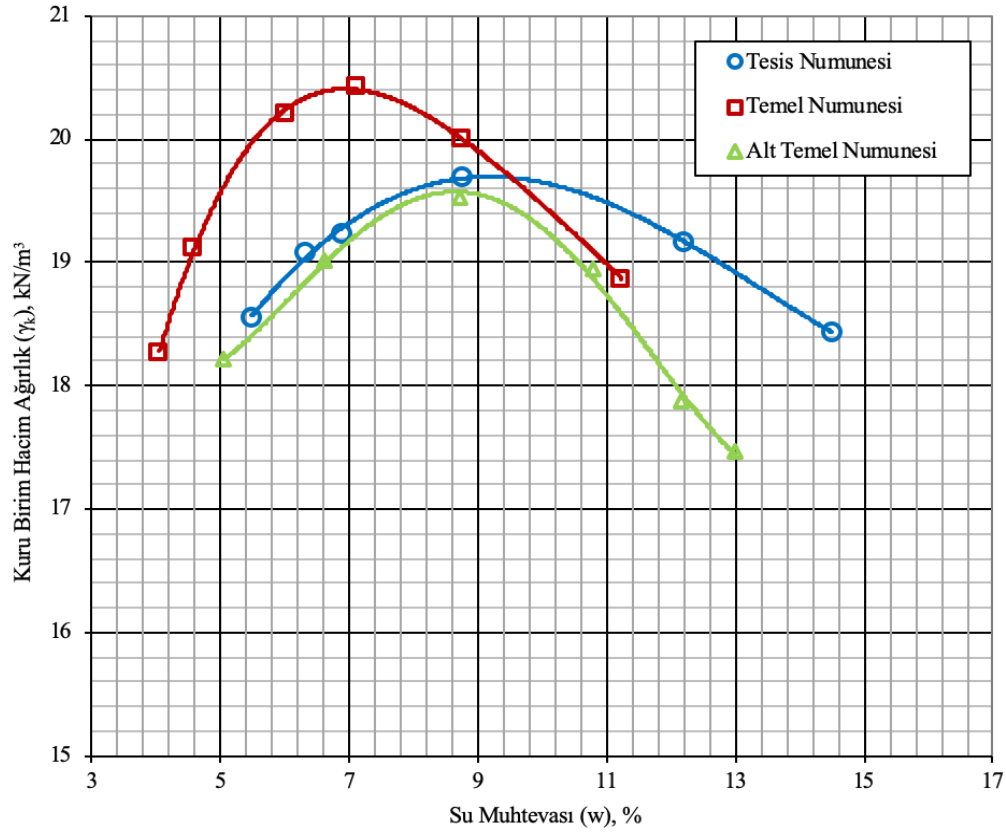
8. Donma çözülme çevrim sayısını tamamlayan numunelerin mukavemet değişimlerini belirlemek için CBR deneyi yapılmış, mukavemet kayıpları belirlenmiştir.

4.1.1 Kompaksiyon deney sonuçları

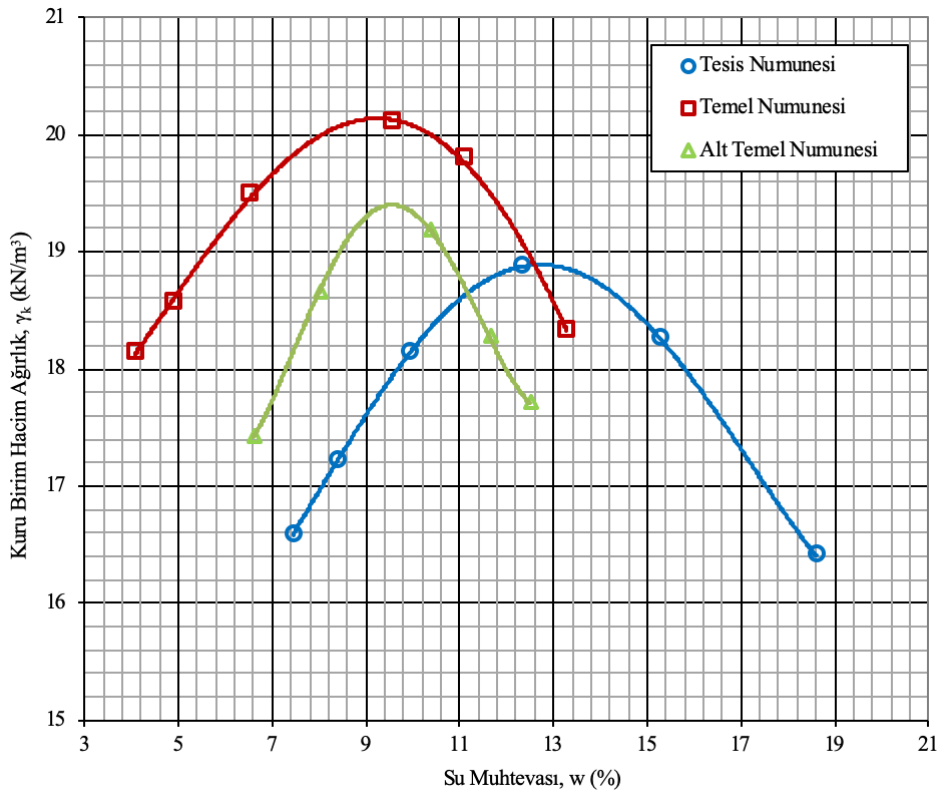
Alt temel ve temel numunesi üzerinde hem Standart hem de Modifiye Proctor deneyleri yapılmıştır. Alt temel ve temel numunesinin kompaksiyon sonuçları tesis numunesinden elde edilen sonuçlarla Çizelge 4.1’de özetlenmiştir. Standart Proctor eğrileri tesis numunesi eğrisi ile beraber Şekil 4.1’de, Modifiye Proctor eğrileri ise Şekil 4.2’de verilmiştir. Temel tabakasının Standart Proctor deneyinde optimum su muhtevası (w_{opt}) %10, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ($\gamma_{k,maks}$) 20.10 kN/m³ bulunurken, Modifiye Proctor deneyinde su muhtevası değeri %7, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 20.50 kN/m³ bulunmuştur. Alt temel numunesinde yapılan kompaksiyon deneylerinden Standart Proctor deneyinde %11 su muhtevası değerinde 19.4 kN/m³ maksimum kuru birim hacim ağırlık bulunurken, Modifiye Proctor deneyinde %8 su muhtevası değerinde 19.80 kN/m³ maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri elde edilmiştir. Temel, alt temel ve tesis numuneleri deney sonuçlarına göre hem Standart hem Modifiye Proctor deneyinde en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri temel tabakası numunesinde elde edilmiş, en düşük değeri ise tesis numunesi vermiştir. Her iki sıkıştırma enerjisi için de en düşük ve en yüksek optimum su muhtevası sırasıyla temel tabakası ve tesis numunesinde görülmüştür.

Çizelge 4.1 : Numuneler üzerinde yapılan kompaksiyon deney sonuçları.

Kompaksiyon Deneyi	Temel		Alt Temel		Tesis	
	$\gamma_{k,maks}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)	$\gamma_{k,maks}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)	$\gamma_{k,maks}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)
Standart Proctor	20.1	10	19.4	11	19.3	13
Modifiye Proctor	20.5	7	19.8	8	19.7	9



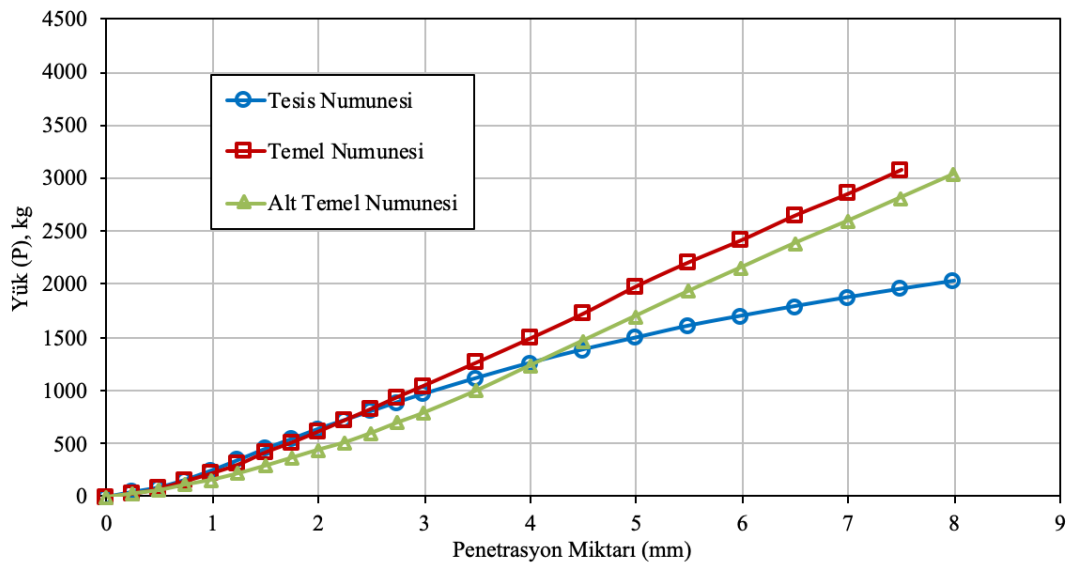
Şekil 4.1 : Alt Temel, temel ve tesis numunesine ait Modifiye Proctor eğrileri.



Şekil 4.2 : Alt temel, temel ve tesis numunesine ait Standart Proctor eğrileri.

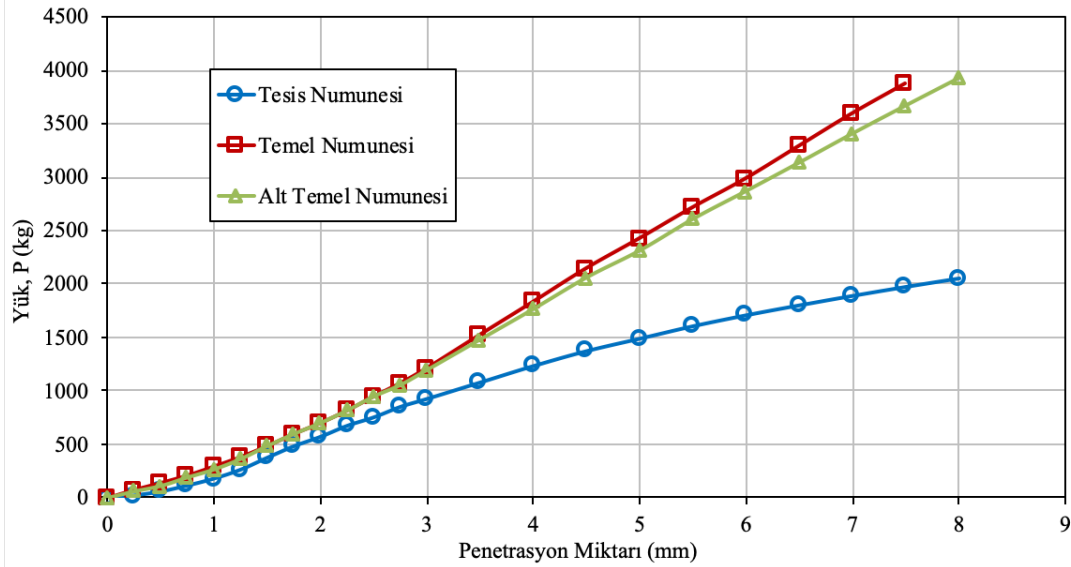
4.1.2 CBR deney sonuçları

Geri dönüştürülmüş beton agregalarından hazırlanan yol dolguları alt temel ve temel tabakasında kullanılacak numunelerin Karayolları Teknik Şartnamesine (KTŞ, 2013) uygunluğunu belirlemek için laboratuvarında California Taşıma Oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. CBR deneylerinde numuneler Modifiye Proctor deneylerinde elde edilen optimum su muhtevasında, Modifiye Proctor enerjisi ile hazırlanmıştır. KTŞ'ye uygun dane çapı dağılımlarına göre hazırlanan alt temel ve temel numuneleri üzerinde hem Islak hem Kuru CBR deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.3'te Kuru CBR deneyinden elde edilen yük(kg)-penetrasyon(mm) eğrileri, Şekil 4.4'te ise Islak CBR deneyinden elde edilen yük(kg)-penetrasyon(mm) eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.3: Kuru CBR deneylerinde elde edilen yük-penetrasyon eğrileri.

Tesis, temel ve alt temel numuneleri üzerinde yapılan CBR deneylerinde bütün numunelerde Kuru CBR değerleri Islak CBR değerine göre daha düşük bulunmuştur. Hem Islak hem Kuru CBR deneyinde en yüksek CBR değeri geri dönüştürülmüş agregalarından hazırlanan temel tabakası numunesinde bulunmuştur. Alt temel tabakasında bulunan Kuru ve Islak CBR değerleri temel numunesinde bulunan CBR değerlerinden küçük, tesis numunesinde bulunan CBR değerlerinden büyüktür. Temel tabakası için Islak ve Kuru CBR değerleri sırasıyla %133 ve %109 olarak bulunurken, alt temel tabakası için bu değerler ise yine sırasıyla %121 ve %106 olarak bulunmuştur. 3. Bölümde belirtildiği gibi tesis numunesi için Kuru CBR değeri %76 ve Islak CBR değeri %79'dur.



Şekil 4.4 : Islak CBR deneylerinde elde edilen yük-penetrasyon eğrileri.

Hazırlanan temel ve alt temel numunesi üzerinde yapılan Islak ve Kuru CBR deneylerinden elde edilen Kuru ve Yaş CBR değerleri ile tesisten temin edilen GDBA numunesi için bulunan CBR değerleri sonuçları Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 : CBR deney sonuçları.

Numune Türü	CBR (%)	
	Islak	Kuru
Temel	133	109
Alt Temel	121	106
Tesis	79	76

4.1.3 Permeabilite deney sonuçları

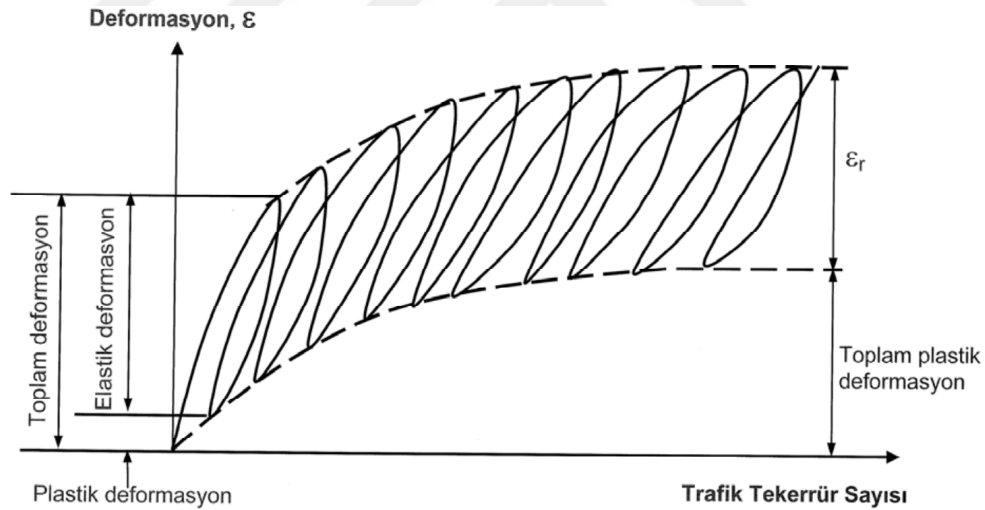
Laboratuvarda hazırlanan alt temel ve temel numunelerinin geçirimsizlik özelliklerini belirlemek için Sabit Seviyeli Permeabilite deneyi yapılmış, permeabilite katsayıları ve filtre hızları bulunmuştur. Hidrolik eğim sırasıyla 5, 7, 9 ve 13 seçilerek, hidrolik eğimlerde bulunan permeabilite katsayıları ile ortalama permeabilite katsayısı hesaplanmıştır. Çizelge 4.3’te her numune için sabit seviyeli permeabilite deneyinden hesaplanan permeabilite katsayıları ile filtre hızları özetlenmiştir. Her 3 numunenin de permeabilite katsayıları birbirine yakın olup 10^{-5} cm/s mertebesinde. En yüksek ortalama permeabilite katsayısı tesis numunesi için bulunmuştur. Tesis numunesi için daha önceden 7.69×10^{-4} cm/s olarak hesaplanan filtre hızı ise en yüksek tesis numunesi için hesaplanırken, en düşük alt temel numunesi için hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3: Sabit Seviyeli Permeabilite deney sonuçları.

Numune Türü	Permeabilite Katsayısı (cm/s)	Filtre hızı (cm/s)
Temel Numunesi	5.87×10^{-5}	4.96×10^{-4}
Alt Temel Numunesi	5.64×10^{-5}	4.88×10^{-4}
Tesis Numunesi	8.86×10^{-5}	7.69×10^{-4}

4.1.4 Esneklik Modülü deney sonuçları

Esneklik modülü, elastik teoreminin bir uygulaması olup trafik yükleri gibi tekrarlı yükler altında elastik modülünün tespiti için geliştirilen bir modüldür. Yol dolgularında kullanılan malzemeler tam elastik olmayıp bir miktar plastik deformasyon da göstermektedir. Uygulanan yükün tekrar sayısı arttıkça plastik deformasyonda meydana gelen artış azalmakta, 100-200 yük tekrarından sonra pratik olarak elastik davranış görüldüğü kabul edilmektedir. Şekil 4.5'te bir numunenin tekrarlı yükler altındaki davranışı görülmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, 2008).



Şekil 4.5 : Üstyapı malzemelerinin tekrarlı yükler altındaki davranışı (Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, 2008).

Esneklik modülü zeminin yapısı, su içeriği ve gerilme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Yol dolgularında alt temel ve temel tabakalarında kullanılacak malzemelerin esneklik modülü değeri üstyapı projelendirme sırasında gerekli olan önemli parametrelerden biridir. Esneklik modülü tayini laboratuvar ve sahada yapılan deneyler ile mümkün olup, deneyin karmaşık ve hassas olması, pahalı ve merkezi bir laboratuvar ortamı gerektiriyor olması gibi sebeplerden dolayı çeşitli ampirik formüller geliştirilmiştir.

Bu formüllerden biri Denklem 4.1’de görüleceği üzere, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından Türkiye’nin çeşitli bölgelerinden elde edilen alt temel ve temel numuneleri üzerinde yapılan çok sayıda esneklik modülü deney sonucu esas alınarak oluşturulmuştur. Ülkemizde üstyapının projelendirilmesi sırasında gerekli olan esneklik modülü değerini hesabında yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$M_R = [1750 \cdot (D_{BSK} + k)^{0.436} \cdot CBR^{0.4} \cdot \left(\frac{1}{1 + \log(No200)} \right)^{0.35(LL \cdot PI + 1)^{0.06}} \cdot \left(\frac{\gamma_{k,maks}^2}{No4} \right)^{0.09 \log(w_{opt})}] \quad (4.1)$$

Burada;

M_r : Esneklik Modülü

D_{BSK} : Bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı, cm

CBR : California Taşıma Oranı, %

w_{opt} : Optimum su muhtevası, %

$\gamma_{k,maks}$: Maksimum kuru birim hacim ağırlık, g/cm^3

LL : Likit Limit, %

PI : Plastisite indeksi, %

$No200$: 200 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi

$No4$: 4 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi

k : Derinlik düzeltme faktörü, cm.

D_{BSK} tek katlı sathi kaplamalı yollarda 2 cm, çift kat sathi kaplamalı yollarda 4 cm olarak alınmaktadır. Derinlik düzeltme faktörünün ise tabaka cinsi ile üstyapı kesit tipine göre değişimi, Karayolları Genel Müdürlüğü Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde (2008) ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bu başlık altında alt temel ve temel numunelerinde deney sonuçları kullanılarak esneklik modülleri hesaplanmış, elde edilen sonuçlar tesis numunesi için elde edilen sonuçlar ile beraber özetlenmiştir. Esneklik Modülü hesabı için çeşitli araştırmacılar birçok non-lineer model geliştirmiş ve bu hesap yöntemlerinde esneklik modülü farklı gerilme değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Esneklik modülü hesabında AASHTO Model (Toplam Gerilme Modeli), Uzan (Universal, 1985) Model ve Mekanistik-Ampirik Dizayn Yöntemi (MEPDG) yaygın olarak kullanılmaktadır.

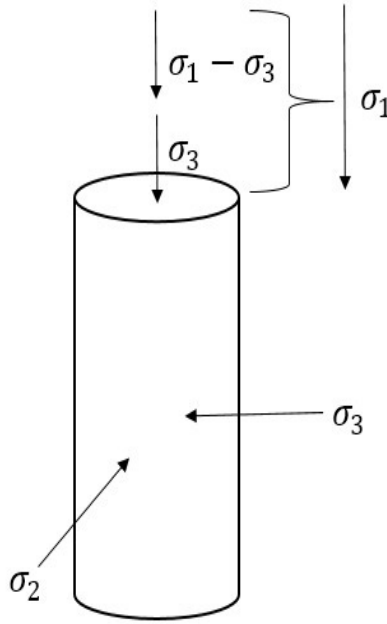
Bu çalışma kapsamında M_R hesabında Toplam Gerilme Modeli ve MEPDG kullanılmış, Mekanistik-Ampirik Dizayn Yönteminden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 4.6'da Esneklik Modülü deneyinde numunelere uygulanan gerilmeler gösterilmiştir. Şekil 4.5'te görülen σ_2 ve σ_3 birbirine eşit olup, numune etrafında hava yardımıyla oluşturulan çevre basınçlarıdır. $\sigma_1 - \sigma_3$ ise deviatör gerilmeyi vermektedir. Bağlantı 4.2'de esneklik modülünün genel formülü verilmiştir.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (4.2)$$

Burada,

ε_r : Elastik Birim Deformasyon

σ_d : Deviatör gerilme : $\sigma_1 - \sigma_3$



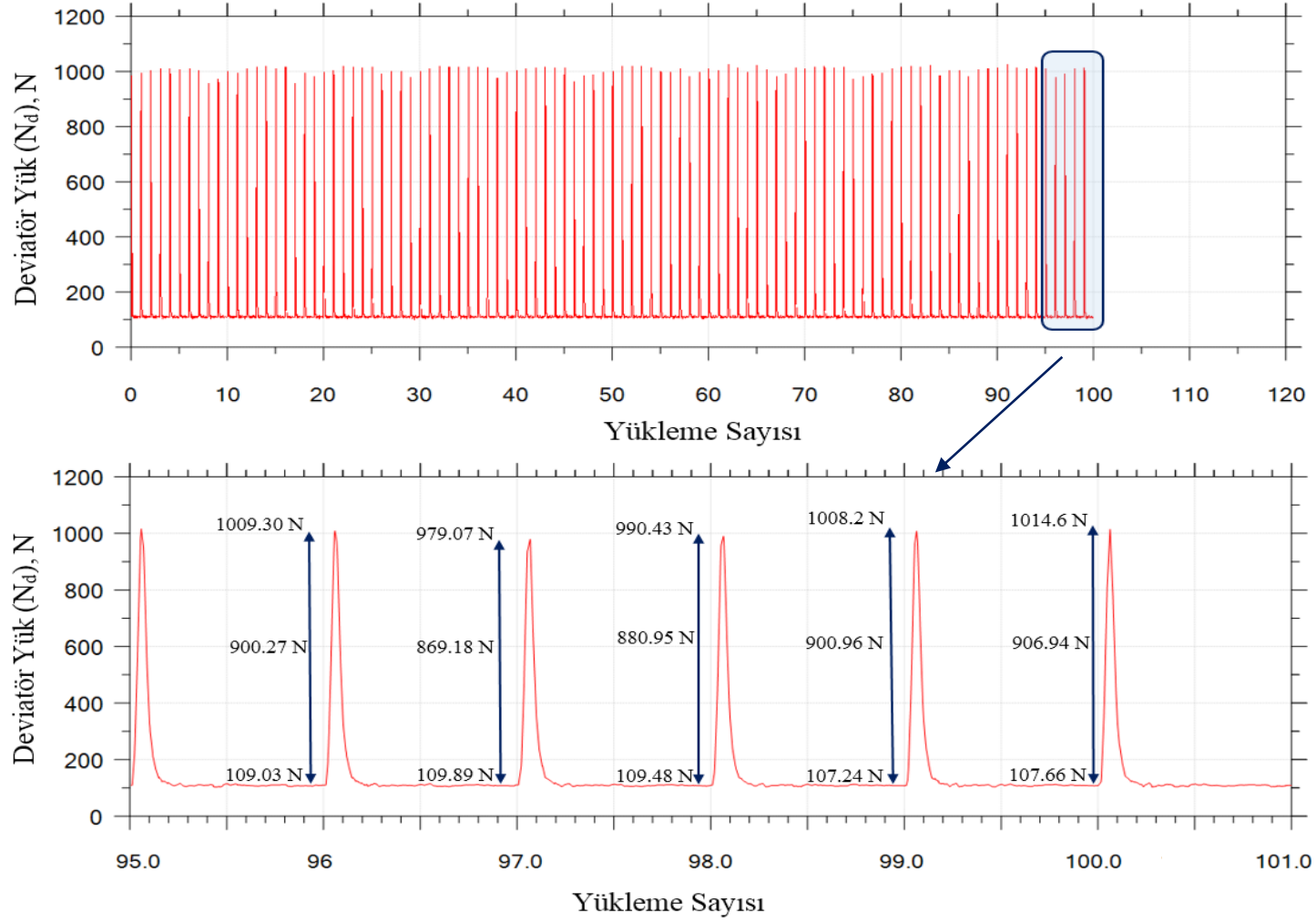
Şekil 4.6 : Esneklik Modülü deneyinde numuneye uygulanan gerilmeler.

Deney sırasında, saniyenin onda birinde numuneye uygulanan yüzer adet düşey yük tekrarının son 5 tanesi dikkate alınıp, bu 5 değerden elde edilen ortalama değerler o seri numarasında numuneye uygulanan çevre basıncı, deviatör gerilme ve esneklik modülü değerlerini belirlemektedir. Deney sırasında ölçülen çevre basıncı, deviatör gerilme ve ortalama esneklik modülü değerleri ile bu değerler kullanılarak hesaplanan toplam gerilme değerleri temel numunesi için Çizelge 4.4'te verilmiştir.

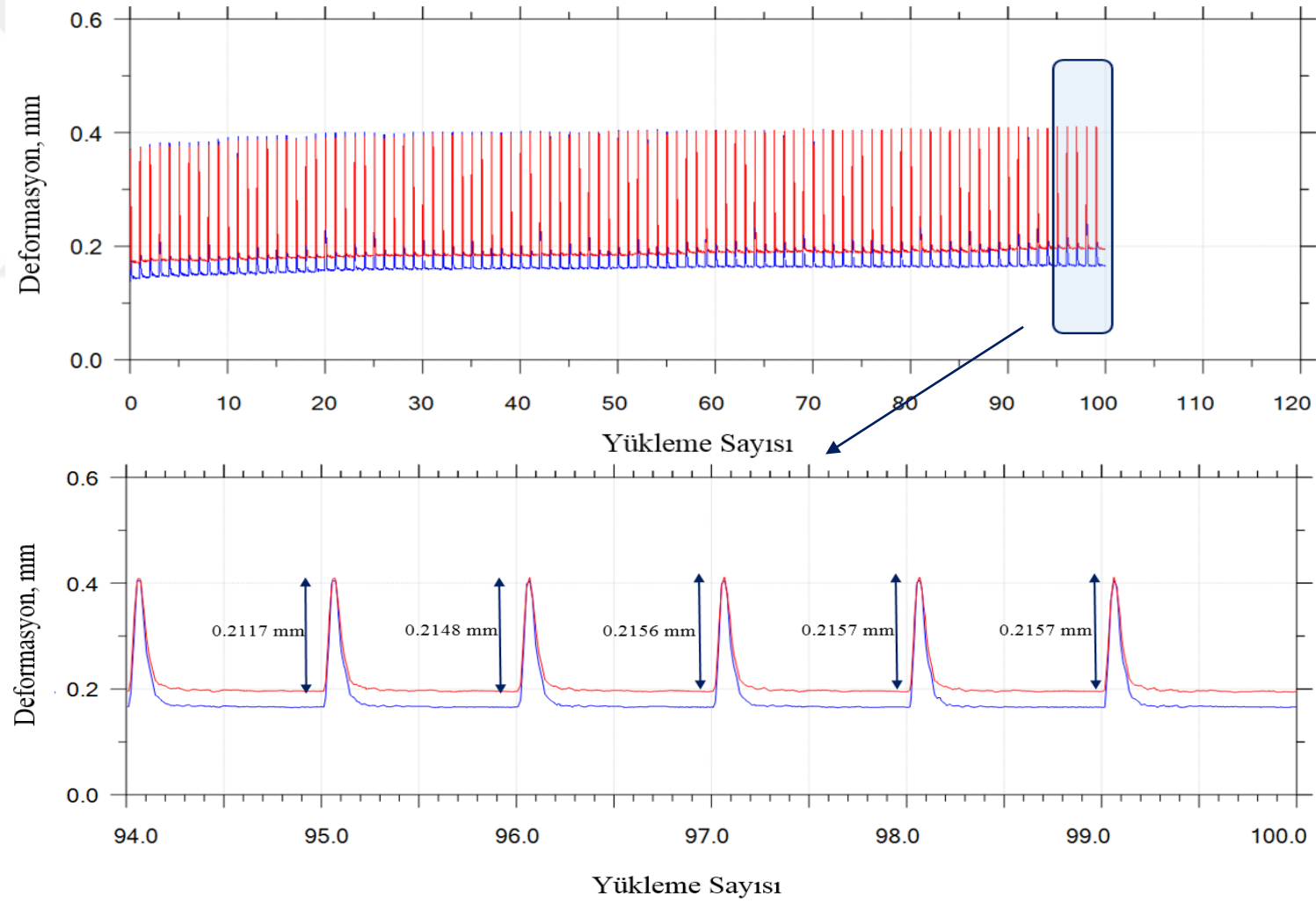
Çizelge 4.4 : Esneklik Modülü deneyinde temel numunesi verileri.

Yükleme Seri Numarası	Çevre basıncı (σ_3), kPa	Deviatör Gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$), kPa	Birim Deformasyon (ϵ), %	Esneklik Modülü (M_R), kPa
1	21.40	19.28	0.03	60297
2	21.53	38.09	0.05	63028
3	21.74	56.61	0.07	74025
4	35.33	31.87	0.03	101500
5	35.56	62.01	0.05	111340
6	35.62	90.52	0.06	127720
7	70.11	60.72	0.02	269280
8	70.32	116.50	0.04	238200
9	70.62	184.80	0.08	209470
10	105.20	59.86	0.02	284660
11	105.20	86.42	0.03	267690
12	105.30	184.50	0.06	288460
13	139.70	85.18	0.02	458500
14	139.50	114.40	0.03	334690
15	139.80	252.90	0.05	410930

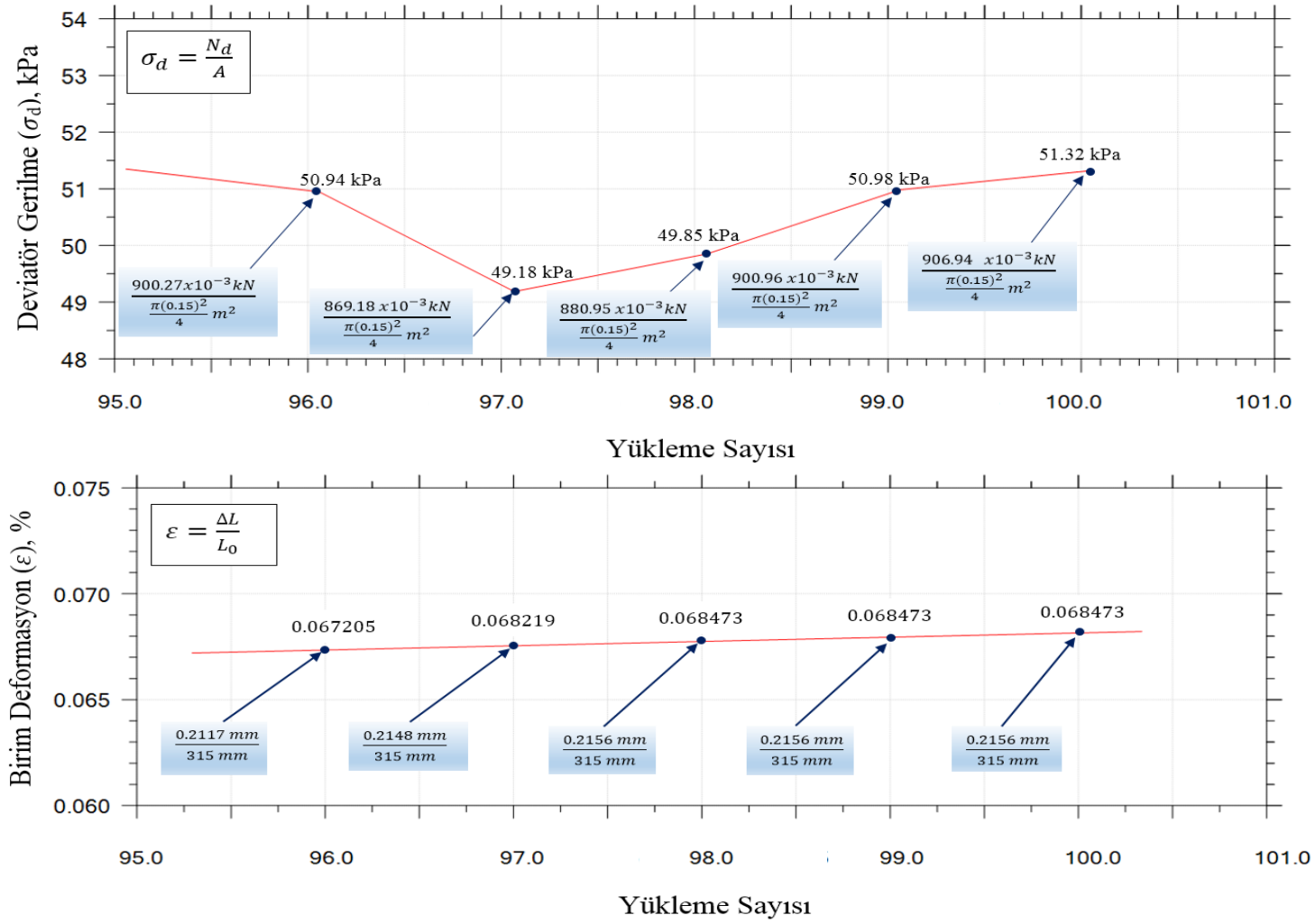
Ölçülen esneklik modülü değerlerinin hesaplanması sırasında izlenen yöntem temel numunesi 3 numaralı seri yükleme için ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Diğer bütün numunelerde ve her seri yüklemesinde aynı yöntem ile esneklik modülü değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.7’de 3 numaralı seri yüklemde 100 tekrar sayısının her birinde ölçülen deviatör yükler esneklik modülü hesabında kullanılan son 5 deviatör yük ile beraber verilirken, Şekil 4.8’de ise deney sırasında her 100 tekrar sayısında oluşan deformasyonlar ve son 5 yüklemedeki deformasyonlar verilmiştir. Şekil 4.9’da son 5 yükleme için hesaplana deviatör gerilmeler ile birim deformasyon değerleri, Şekil 4.10’da ise ölçülen son 5 deviatör gerilme ve birim deformasyon değerleri kullanılarak yapılan esneklik modülü hesabı açıklanmıştır. Çizelge 4.4’te gösterilen 74025 kPa değeri 3 numaralı seri yüklemde temel numunesi için hesaplanan son 5 esneklik modülü değerinin ortalamasıdır. Deney sırasında ölçülen çevre basıncı, deviatör gerilme ve ortalama esneklik modülü değerleri ile bu değerler kullanılarak hesaplanan toplam gerilme değerleri alt temel ve tesis numunesi için sırasıyla Çizelge 4.5 ve 4.6’da verilmiştir.



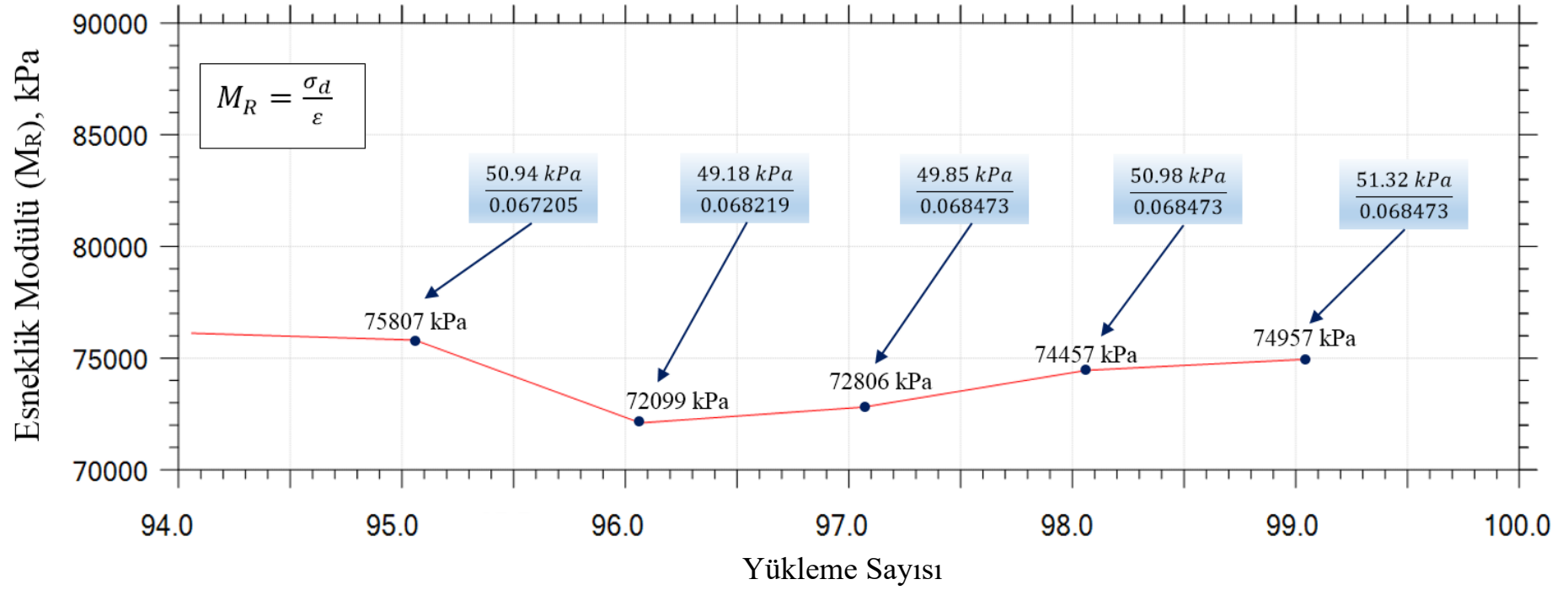
Şekil 4.7 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemesindeki deviatör yükler.



Şekil 4.8 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemedeki deformasyonlar.



Şekil 4.9 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemedeki son 5 deviatör gerilme ile birim deformasyon değerleri.



Şekil 4.10 : Temel Numunesi 3 numaralı seri yüklemedeki son 5 esneklik modülü değerleri.

Çizelge 4.5 : Esneklik Modülü deneyinde alt temel numunesi verileri.

Yükleme Seri Numarası	Çevre basıncı (σ_3), kPa	Deviatör Gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$), kPa	Birim Deformasyon (ϵ), %	Esneklik Modülü (M_R), kPa
1	20.67	19.32	0.03	64627
2	20.57	38.07	0.04	77594
3	20.46	57.12	0.05	95372
4	34.44	31.90	0.03	102780
5	34.36	62.11	0.05	119230
6	34.10	91.18	0.05	150540
7	69.30	61.41	0.02	293500
8	68.91	117.40	0.04	250570
9	69.07	186.20	0.06	263200
10	103.60	60.87	0.02	339170
11	103.70	87.05	0.02	317080
12	103.90	184.40	0.04	373540
13	138.20	86.47	0.02	363790
14	138.00	115.30	0.02	429800
15	138.30	253.80	0.05	430810

Çizelge 4.6 : Esneklik Modülü deneyinde tesis numunesi verileri.

Yükleme Seri Numarası	Çevre basıncı (σ_3), kPa	Deviatör Gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$), kPa	Birim Deformasyon (ϵ), %	Esneklik Modülü (M_R) kPa
1	22.22	20.68	0.02	77508
2	22.11	41.37	0.04	82733
3	22.52	62.05	0.05	99782
4	36.28	34.47	0.02	125800
5	36.30	68.95	0.04	145500
6	36.19	103.40	0.06	145430
7	70.97	68.95	0.03	206450
8	70.99	137.90	0.05	210640
9	71.36	206.80	0.08	214400
10	105.60	68.95	0.02	223510
11	105.80	103.40	0.03	227690
12	105.60	206.80	0.06	296470
13	140.20	103.40	0.02	436320
14	140.20	137.90	0.03	353010
15	140.50	275.80	0.06	374250

Esneklik modülü (M_R) ilk olarak bağlantı 4.3'e göre Toplam Gerilme Modeli esas alınarak hazırlanan temel, alt temel ve tesis numunesi için hesaplanmıştır.

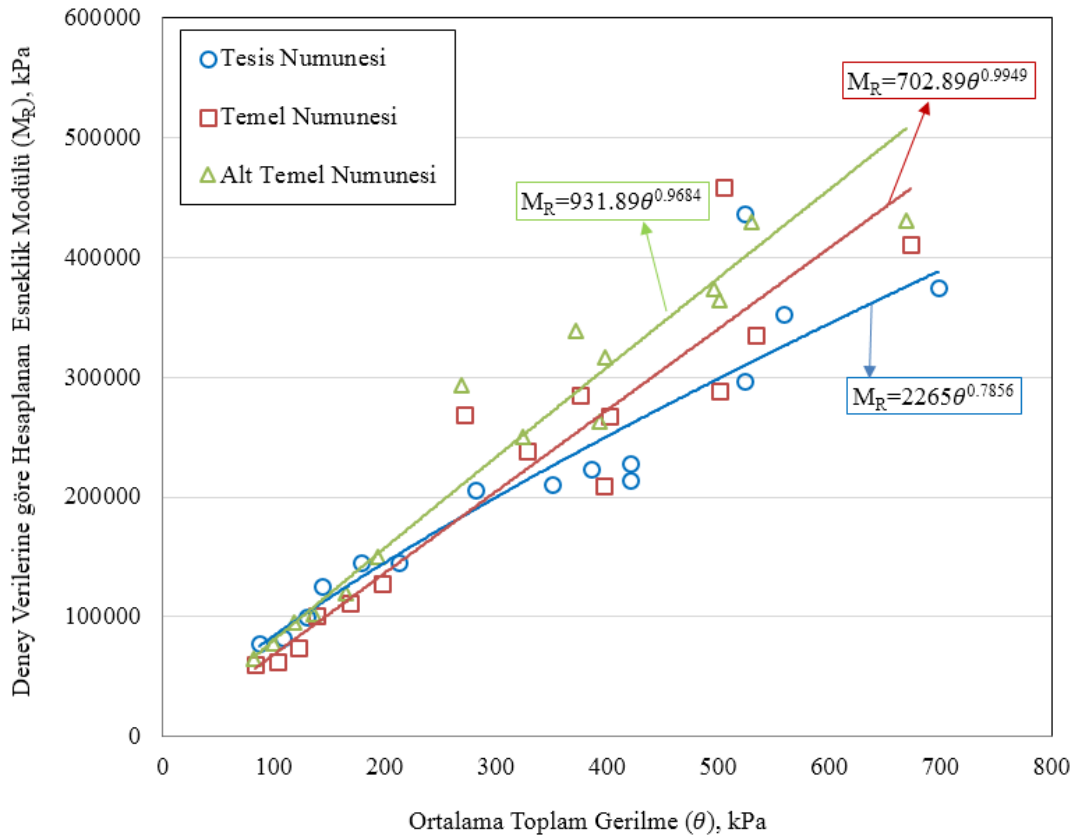
$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad (4.3)$$

Burada,

k_1, k_2 : Regresyon Katsayıları

$\theta : \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$: Toplam Gerilme ve $\sigma_2 = \sigma_3$

Çevre gerilmeleri olan σ_2 ve σ_3 değerleri birbirine eşit olduğu için toplam gerilme ifadesi $\sigma_1 + 2\sigma_3$ şeklinde yazılabilmektedir. k_1, k_2 regresyon katsayıları ise her bir yüklemde elde edilen ortalama toplam gerilme-esneklik modülü grafiğinde çizilen doğru denklemlerinden elde edilmektedir. Alt temel ve temel numunesi için 15 seri numarası için deney verilerinden hesaplanan ortalama toplam gerilme değerlerinde hesaplanan esneklik modülü değerleri tesis numunesi için elde edilen değerler ile beraber Şekil 4.11'da gösterilmiştir. k_1, k_2 regresyon katsayıları değerlerini elde etmek amacıyla bu noktalarda geçirilen üstel fonksiyonların denklemi her numune için yine Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Numunelerin farklı toplam gerilmelerdeki esneklik modülleri.

Şekil 4.11’de elde edilen noktalardan geçirilen üstel fonksiyon formundaki denklemlerden, Toplam Gerilme Modelinde M_R hesabı için gerekli k_1 ve k_2 değerleri belirlenmiştir. Belirlenen k_1 ve k_2 değerleri kullanılarak hesaplanan M_R değerleri temel, alt temel ve tesis numunesi için sırasıyla Çizelge 4.7 ve 4.8 ve 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Temel numunesi Toplam Gerilme Modele göre esneklik modülleri.

Yükleme Seri Numarası	Toplam Gerilme (θ), kPa	Regresyon Katsayısı, k_1	Regresyon Katsayısı, k_2	Hesaplanan Esneklik Modülü, kPa
1	87.34			57368.0
2	107.70			70487.9
3	129.61			83561.1
4	143.31			94496.2
5	177.85			115509.7
6	211.97			135046.9
7	281.86			185151.9
8	350.87	702.89	0.9949	223469.5
9	420.88			270429.4
10	385.75			256047.6
11	420.80			274064.9
12	523.60			340751.8
13	524.00			343380.4
14	558.50			362766.5
15	697.30			457119.7

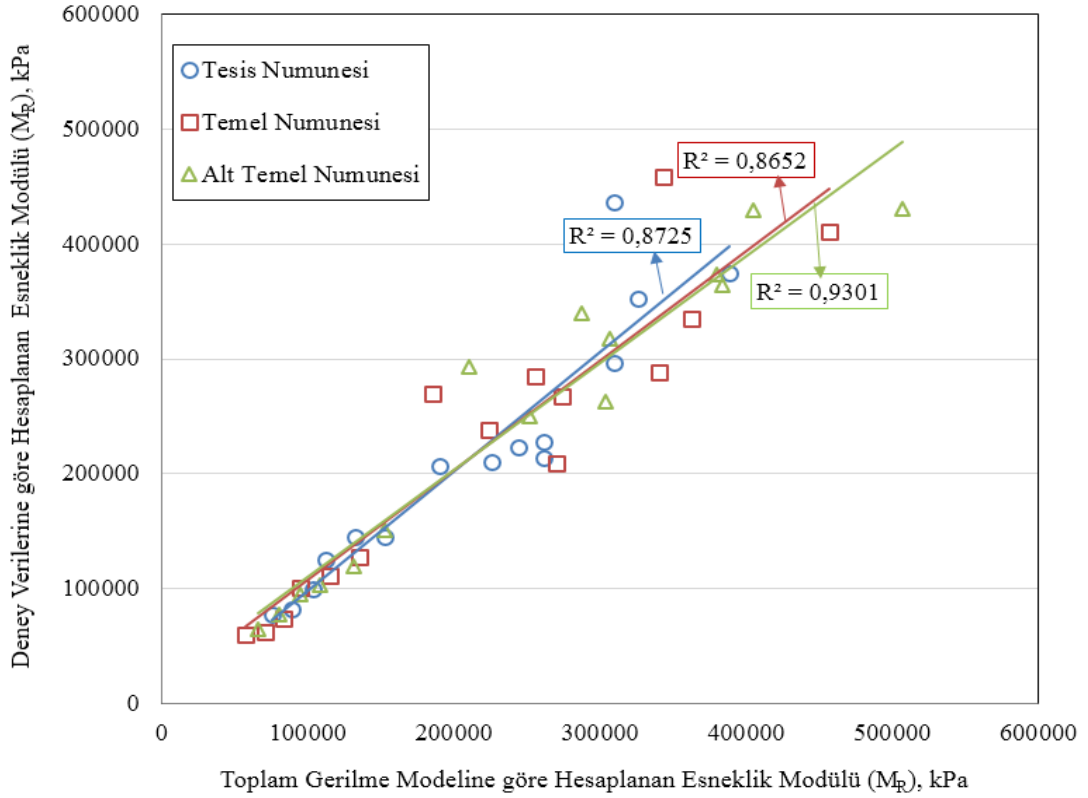
Toplam Gerilme Modelinden hesaplanan esneklik modülü değerlerinin deney verilerinden hesaplanan esneklik modülü değerlerine ne kadar yakın olduğunu belirlemek amacıyla tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu gösteren 0 ile 1 arasında bir sayı olan korelasyon katsayısının karesi (R^2) belirlenmiştir (Şekil 4.12). Numunenin 34.5 kPa (5 psi) çevre basıncına ve 103.4 kPa (15 psi) deviatör gerilme anında sahip olduğu değer üst yapı projelendirilmesi için kullanılan M_R değeri olup, bu tez projesi kapsamında bu değer $M_{R,proje}$ olarak belirtilmiştir. Bulunan regresyon katsayıları (k_1 , k_2) kullanılarak 34.5 kPa (5 psi) çevre basıncında ve 103.4 kPa (15 psi) deviatör gerilmede esneklik modülü değerleri temel, alt temel ve tesis numuneleri için hesaplanmıştır. Çizelge 4.10’da Temel, alt temel ve tesis numunesi için Toplam Gerilme Model parametreleri olan regresyon katsayıları (k_1 , k_2) ve R^2 değerleri ile $M_{R,proje}$ değerleri özetlenmiştir.

Çizelge 4.8 : Alt temel numunesi Toplam Gerilme Modele göre esneklik modülleri.

Yükleme Seri Numarası	Toplam Gerilme (θ), kPa	Regresyon Katsayısı, k_1	Regresyon Katsayısı, k_2	Hesaplanan Esneklik Modülü, kPa
1	87.34			65955.6
2	107.70			80396.7
3	129.61			94962.8
4	143.31			107910.7
5	177.85			130996.6
6	211.97			152666.2
7	281.86			210291.2
8	350.87	931.89	0.9684	251620.0
9	420.88			303537.9
10	385.75			287279.9
11	420.80			307078.8
12	523.60			379974.0
13	524.00			383659.8
14	558.50			404573.6
15	697.30			507362.9

Çizelge 4.9 : Tesis numunesi Toplam Gerilme Model'e göre esneklik modülleri.

Yükleme Seri Numarası	Toplam Gerilme (θ), kPa	Regresyon Katsayısı, k_1	Regresyon Katsayısı, k_2	Hesaplanan Esneklik Modülü, kPa
1	87.34			75872.7
2	107.70			89449.3
3	129.61			103456.3
4	143.31			111953.8
5	177.85			132651.0
6	211.97			152261.2
7	281.86			190464.7
8	350.87	2265.00	0.7856	226222.1
9	420.88			260979.8
10	385.75			243708.2
11	420.80			260940.9
12	523.60			309823.5
13	524.00			310009.4
14	558.50			325934.0
15	697.30			388024.1



Şekil 4.12 : Numunelerin Toplam Gerilme Modelinde hesaplanan esneklik modülleri ile deney verilerine göre hesaplanan esneklik modüllerinin karşılaştırılması.

Çizelge 4.10 : Toplam Gerilme Modelindeki parametreler ve $M_{R,proje}$ değerleri.

Numune	k_1	k_2	R^2	$M_{R,proje}$, (MPa)
Tesis Numunesi	2265	0.79	0.87	150.0
Temel Numunesi	702.89	0.99	0.86	142.3
Alt Temel Numunesi	931.89	0.97	0.93	163.7

MEPD’de kabul edilen M_R hesabı bağlantı 4.3’te verilmiştir.

$$M_R = k_1 \times P_a \times \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} \text{ ve } \tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (4.3)$$

Burada:

θ : Toplam Gerilme : $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

τ_{oct} : Orthogonal Kesme Gerilmesi

P_a : Atmosfer Basıncı

k_1, k_2, k_3 : Regresyon Katsayıları

σ_3 : Çevre Basıncı

MEPD'ye göre hazırlanan temel, alt temel ile tesis numuneleri için M_R hesabı sırasıyla Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13'te gösterilmiştir. Bu modelde aynı M_R değeri, farklı gerilmelerde elde edilebileceğinden Toplam Gerilme Modelinde olduğu gibi üstel fonksiyon formundaki denklemlerden regresyon katsayıları (k_1 , k_2 ve k_3) hesabında yararlanılamamaktadır. M_R hesabında kullanılan k_1 , k_2 ve k_3 regresyon katsayıları 15 farklı seriden elde edilen denklemler kullanılarak belirlenmiştir.

Şekil 4.13'te değişen deney verilerinden hesaplanan ortalama toplam gerilme değerindeki (θ) esneklik modülü değerleri (M_R) verilmiştir. Şekil 4.14'te ise değişen ortalama toplam gerilme değerindeki (θ) MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülü değerleri (M_R) gösterilmiştir. Hesaplanan esneklik modülü değerlerinin deney verilerinden hesaplanan esneklik modülü değerlerine ne kadar yakın olduğunu belirlemek amacıyla korelasyon katsayısının karesi (R^2) değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.15'te gösterildiği gibi 15 seri için MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülü değerlerindeki deney verilerinden hesaplanan esneklik modülleri değerleri belirtilmiş, eğilim çizgileri eklenerek R^2 değerleri her numune için bulunmuştur.

Çizelge 4.11 : Temel numunesi için MEPD'ye göre esneklik modülleri.

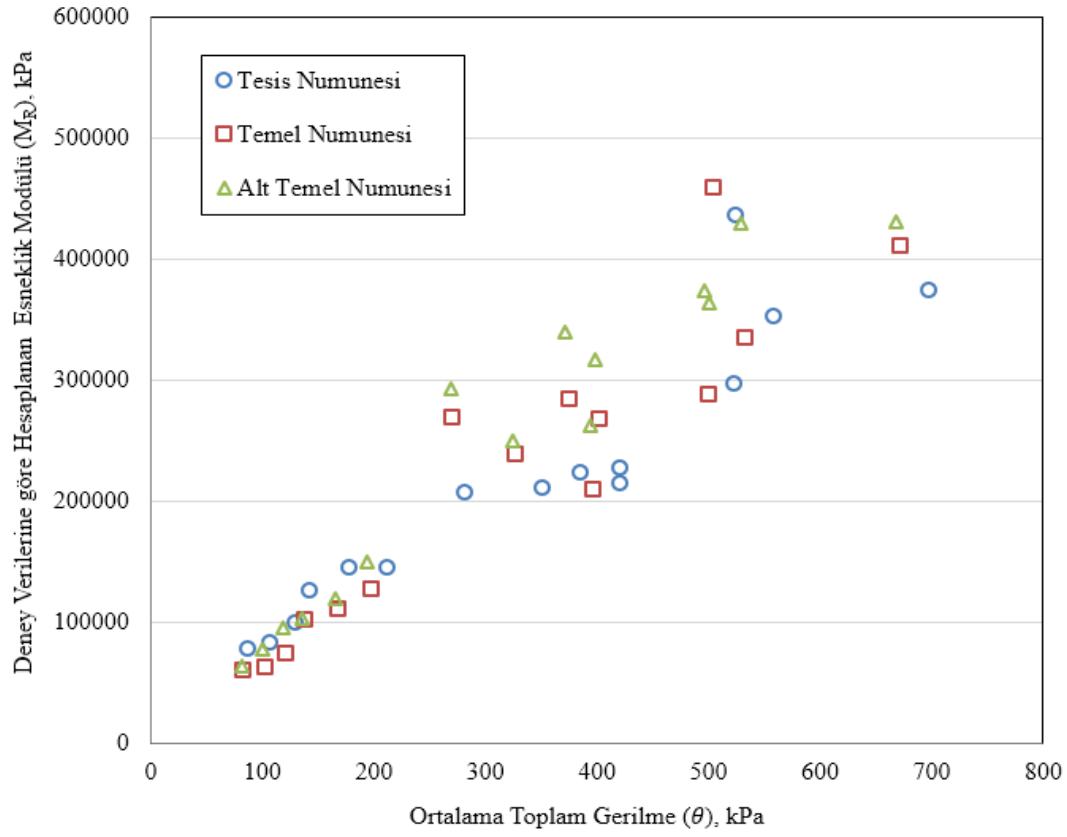
M_R (kPa)	σ_3 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)	$\frac{\theta}{Pa}$	$\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1$	Hesaplanan M_R , (kPa)
60297	21.40	19.28	83.48	9.09	0.82	1.09	57130.9
63028	21.53	38.09	102.68	17.96	1.01	1.18	68129.4
74025	21.74	56.61	121.83	26.69	1.20	1.26	78244.5
101500	35.33	31.87	137.86	15.02	1.36	1.15	100540.2
111340	35.56	62.01	168.69	29.23	1.66	1.29	114571.2
127720	35.62	90.52	197.38	42.67	1.95	1.42	125753.0
269280	70.11	60.72	271.05	28.62	2.68	1.28	206689.4
238200	70.32	116.50	327.46	54.92	3.23	1.54	215968.1
209470	70.62	184.80	396.66	87.12	3.91	1.86	225685.0
284660	105.20	59.86	375.46	28.22	3.71	1.28	309987.8
267690	105.20	86.42	402.02	40.74	3.97	1.40	306756.7
288460	105.30	184.50	500.40	86.97	4.94	1.86	300849.5
458500	139.70	85.18	504.28	40.15	4.98	1.40	407466.4
334690	139.50	114.40	532.90	53.93	5.26	1.53	396466.6
410930	139.80	252.90	672.30	119.22	6.64	2.18	368176.2

Çizelge 4.12 : Alt Temel numunesi MEPD'ye göre esneklik modülleri.

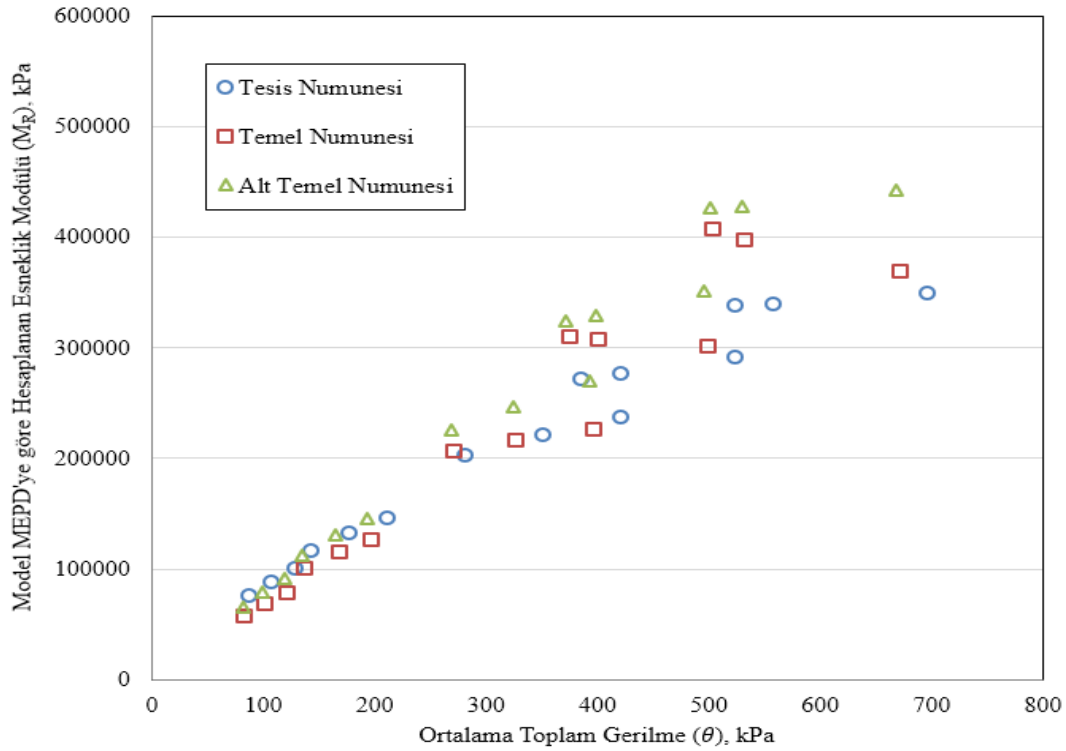
M_R (kPa)	σ_3 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)	$\frac{\theta}{Pa}$	$\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1$	Hesaplanan M_R , (kPa)
64627	20.67	19.32	81.33	9.11	0.80	1.09	65845.1
77594	20.57	38.07	99.78	17.95	0.98	1.18	78726.7
95372	20.46	57.12	118.50	26.93	1.17	1.27	91027.7
102780	34.44	31.90	135.22	15.04	1.33	1.15	112378.2
119230	34.36	62.11	165.19	29.28	1.63	1.29	130429.6
150540	34.10	91.18	193.48	42.98	1.91	1.42	145892.8
293500	69.30	61.41	269.31	28.95	2.66	1.29	225660.6
250570	68.91	117.40	324.13	55.34	3.20	1.55	246296.6
263200	69.07	186.20	393.41	87.78	3.88	1.87	270720.7
339170	103.60	60.87	371.67	28.69	3.67	1.28	323932.0
317080	103.70	87.05	398.15	41.04	3.93	1.40	329859.1
373540	103.90	184.40	496.10	86.93	4.90	1.86	351902.0
363790	138.20	86.47	501.07	40.76	4.95	1.40	427098.4
429800	138.00	115.30	529.30	54.35	5.22	1.54	427966.3
430810	138.30	253.80	668.70	119.64	6.60	2.18	442863.7

Çizelge 4.13 : Tesis numunesi MEPD'ye göre esneklik modülleri.

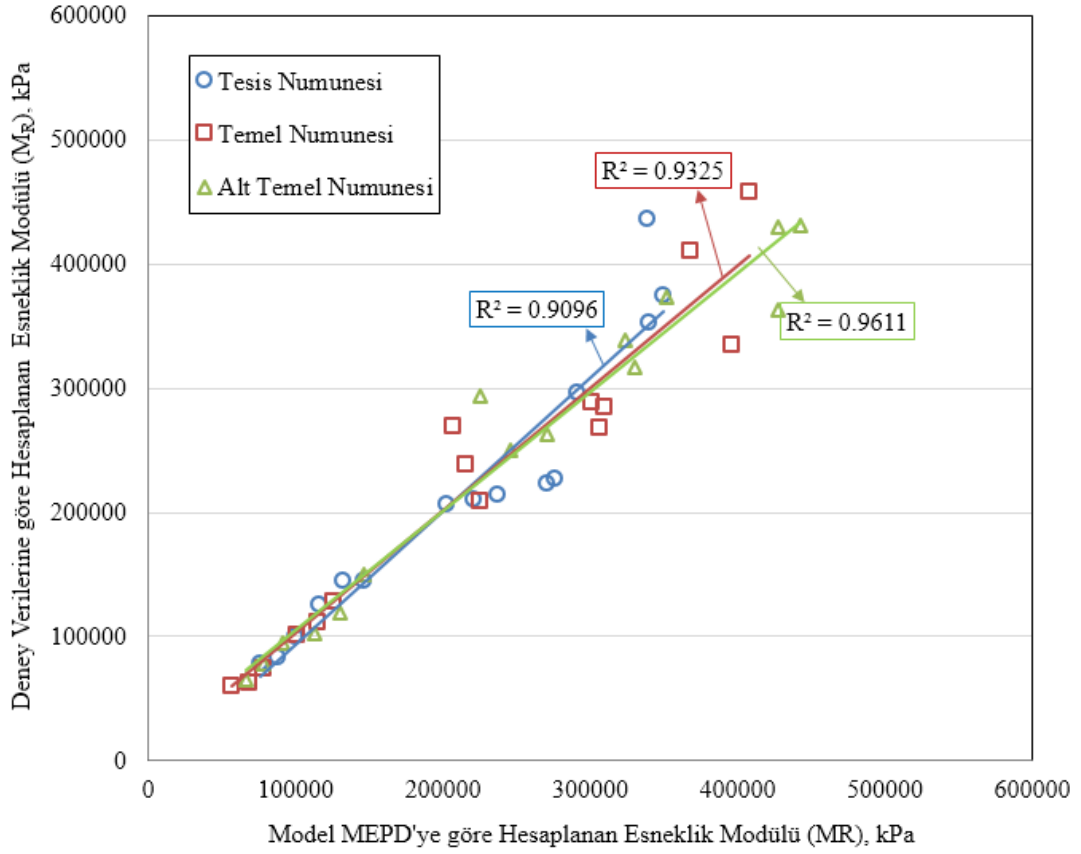
M_R (kPa)	σ_3 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)	$\frac{\theta}{Pa}$	$\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1$	Hesaplanan M_R , (kPa)
77508	22.22	20.68	87.34	9.75	0.86	1.10	75598.9
82733	22.11	41.37	107.70	19.50	1.06	1.19	87744.1
99782	22.52	62.05	129.61	29.25	1.28	1.29	99919.1
125800	36.28	34.47	143.31	16.25	1.41	1.16	116027.0
145500	36.3	68.95	177.85	32.50	1.76	1.32	132208.6
145430	36.19	103.40	211.97	48.74	2.09	1.48	146277.8
206450	70.97	68.95	281.86	32.50	2.78	1.32	202578.4
210640	70.99	137.90	350.87	65.01	3.46	1.64	220808.6
214400	71.36	206.80	420.88	97.49	4.15	1.96	237480.6
223510	105.60	68.95	385.75	32.50	3.81	1.32	270947.5
227690	105.80	103.40	420.80	48.74	4.15	1.48	276165.4
296470	105.60	206.80	523.60	97.49	5.17	1.96	290752.5
436320	140.20	103.40	524.00	48.74	5.17	1.48	338414.1
353010	140.20	137.90	558.50	65.01	5.51	1.64	339709.6
374250	140.50	275.80	697.30	130.01	6.88	2.28	349527.6



Şekil 4.13 : Numunelerin değişen toplam gerilme değerlerinde deney verilerine göre hesaplanan esneklik modülleri.



Şekil 4.14 : Numunelerin değişen toplam gerilme değerinde Model MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülleri.



Şekil 4.15 : Numunelerin MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülleri ile deney verilerine göre hesaplanan esneklik modüllerinin karşılaştırılması.

Bulunan regresyon katsayıları (k_1 , k_2 , k_3) kullanılarak 34.5 kPa (5 psi) çevre basıncında ve 103.4 kPa (15 psi) deviatör gerilmedeki esneklik modülü değerleri ($M_{R,proj}$) temel, alt temel ve tesis numuneleri için MEPD esas alınarak hesaplanmıştır. Kullanılan MEPD dizayn parametreleri (k_1 , k_2 , k_3) ve R^2 değerleri ile MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülü değerleri Çizelge 4.14'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.14 : MEPD dizayn parametreleri ile $M_{R,proj}$ değerleri.

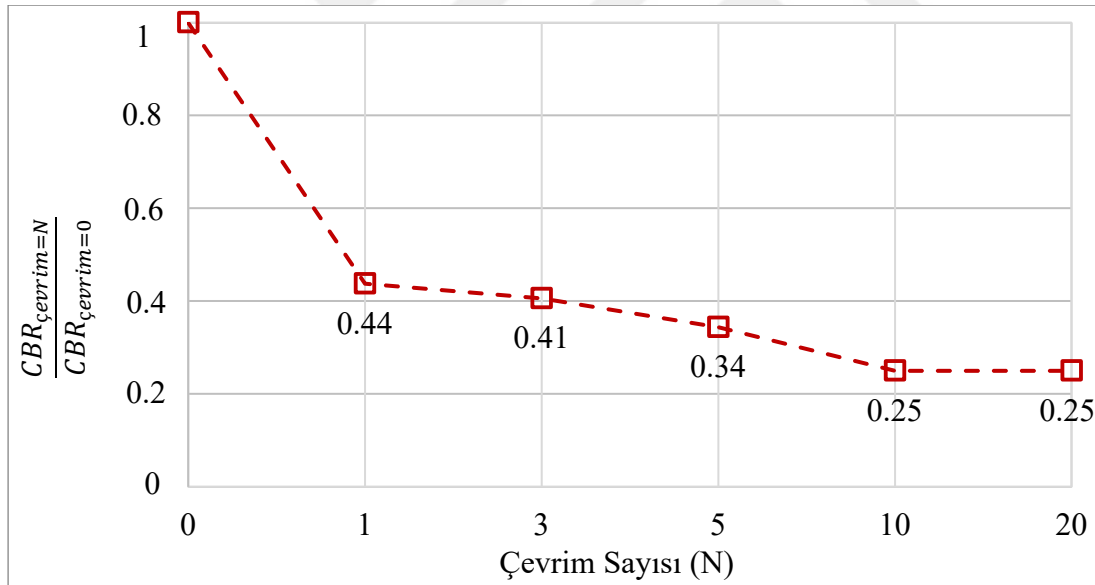
Malzeme	k_1	k_2	k_3	R^2	$M_{R,proj}$ (MPa)
Tesis Numunesi	899.52	0.93	-0.54	0.91	143.8
Temel Numunesi	782.20	1.23	-1.03	0.93	128.7
Alt Temel Numunesi	878.64	1.12	-0.65	0.96	154.3

Esneklik Modülü MEPD Model Parametrelerine bakıldığında, bütün numunelerin R^2 değerinin 1'e yakın bulunduğu görülmektedir. Tesis numunesi için regresyon katsayıları kullanılarak 103.4 kPa deviatör gerilmedeki esneklik modülü değeri MEPD'ye göre 143.8 MPa, temel numunesi için 128.7 MPa, alt temel numunesi için 154.3 MPa olarak hesaplanmıştır.

4.1.5 Donma çözülme sonrası CBR deney sonuçları

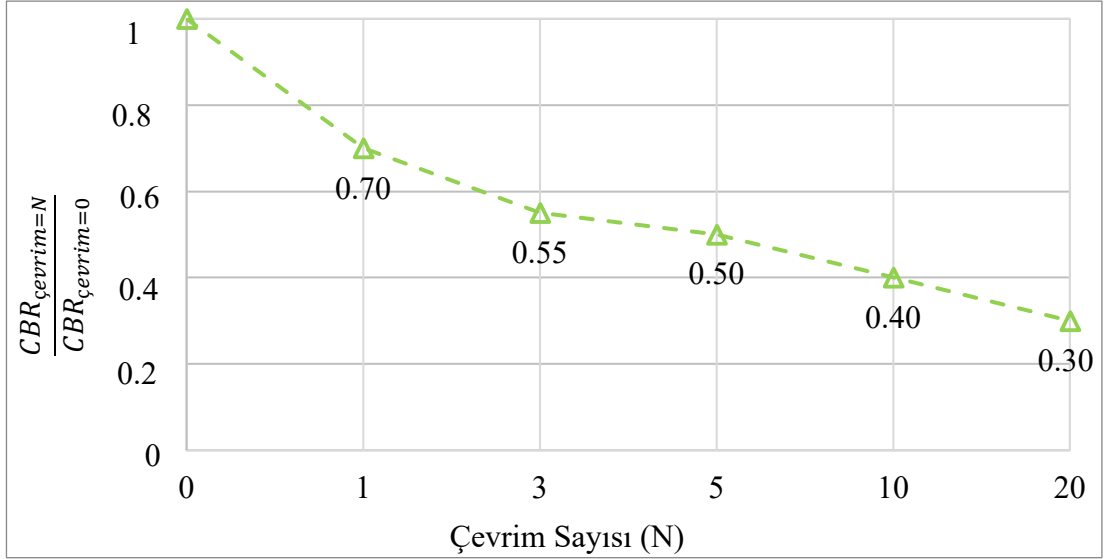
Donma çözülme çevrimleri sonrası numunelerin mukavemet kayıpları CBR değerlerindeki değişim ile belirlenmiştir. CBR kalıbı ölçülerinde, Modifiye proctor enerjisinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış alt temel ve temel numuneleri üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır.

Temel tabakası plastik kalıpta titreşimli sıkıştırma aleti ile sıkıştırıldığında donma çözülme çevrimine maruz bırakılmadan önce yapılan CBR deneyinde %32 CBR değeri vermiş olup, çevrim sayısı arttıkça bulunan CBR değerlerinde azalma gözlenmiştir. Temel numunesinde en çok mukavemet kaybı 1 kez dondurulup 1 kez çözündürüldüğünde görülmüş ve %18'lik bir azalma ile %14 değerine kadar düşmüştür. 3. çevrim sonunda CBR değeri %13, 5. çevrim sonunda %11 olarak bulunmuştur. 10 ve 20. çevrim sonunda elde edilen CBR değerleri aynı olup %8'dir. Şekil 4.16'de temel tabakasına ait donma çözünme çevrimleri sonrası bulunan normalize edilmiş CBR değerleri verilmiştir.



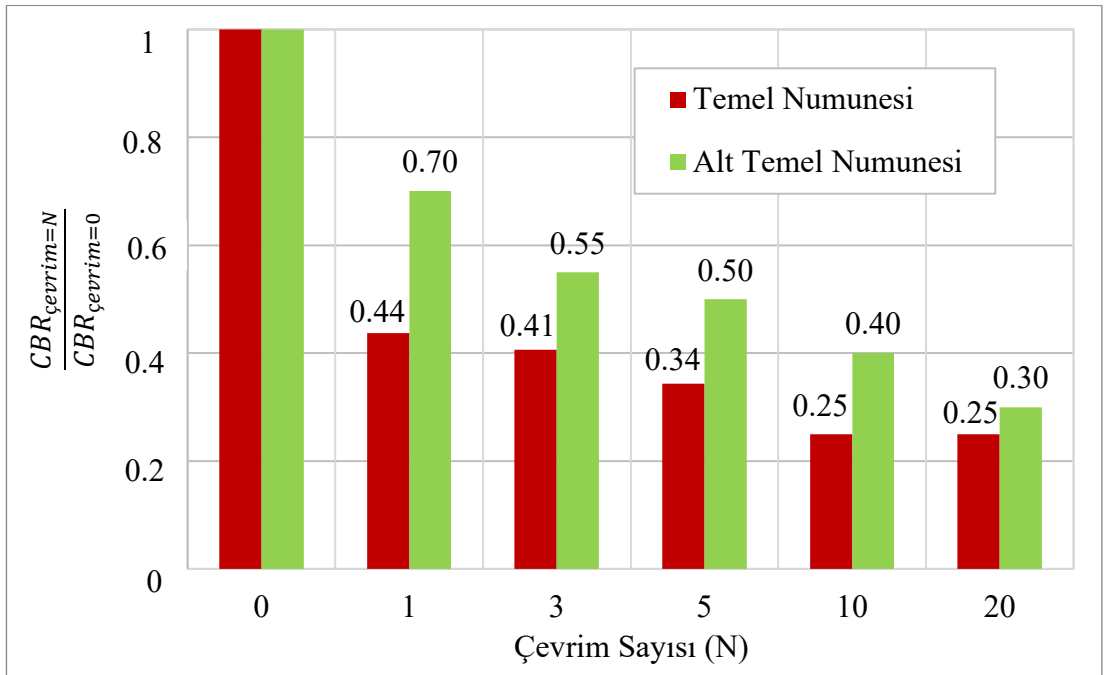
Şekil 4.16 : Donma çözülme çevrimleri sonrası temel tabakası normalize edilmiş CBR değerleri.

Alt temel tabakası üzerinde yapılan her donma çözülme çevrimleri sonrası CBR değerleri ise Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Donma çözülme çevrimine maruz kalmadan önce alt temel tabakasında da temel tabakasında olduğu gibi CBR kalıbı ölçülerine sahip plastik kalıpta Modifiye Proctor enerjisinde sıkıştırılan numune üzerinde CBR deneyi yapılmıştır. Donma çözülme çevrimine maruz bırakılmadan numune üzerinde yapılan CBR deneyinde numunenin CBR değeri %20 bulunmuştur.



Şekil 4.17 : Donma çözülme çevrimleri sonrası alt temel tabakası normalize edilmiş CBR değerleri.

Alt temel numunesi en çok mukavemet kaybına ilk çevrim sonrasında uğramış olmasına rağmen, diğer çevrimlerde de azalma devam etmiştir. 3 kez donma çözölmeye maruz kalan alt temel numunesi %11 CBR değerini verirken, 5 çevrim sonunda bu değer biraz azalarak %10'a düşmüştür. 10 ve 20 çevrim sonunda yapılan CBR deneylerinde bulunan CBR değerleri ise birbirine yine yakın olup, %8 ve %6 olarak bulunmuştur. Şekil 4.18'de ise alt temel ve temel numunesindeki normalize edilmiş CBR değerlerinin çevrim sayısı ile değişimi özetlenmiştir.



Şekil 4.18 : Temel ve alt temel numunelerinde çevrim sayısı ile normalize edilmiş CBR değerlerinin değişimi.

4.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ, 2013) esas alınarak alt temel, temel ve tesis numunesi üzerine yapılan geoteknik deneyin sonuçları değerlendirilerek kullanım uygunluğu belirlenmiştir. Yol dolguları alt temel ve temel tabakasında geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) kullanım uygunluğu şartları KTŞ’de ayrı ayrı belirtilmiş olup, bu çalışmada da ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

DeneySEL çalışmaya tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının dane çapı dağılım eğrisini belirlemek için yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri ile başlanmıştır. KTŞ’de alt temel ve temel tabakasının sağlaması gereken dane çapı dağılımı üst ve alt limitleri ayrı ayrı belirtilmiş olup, tesis numunesi bu limitlerin dışında kalmıştır. Bunun üzerine hem alt temel hem temel tabakası A tipi malzemenin sağlaması gereken yüzdelere uygun laboratuvar da özel dane çapı dağılımında numuneler hazırlanmıştır.

Tesis numunesinin temin edildiği hali ile dane çapı dağılım yüzdesinin şartname limitlerinin dışında kalmasından dolayı kullanım uygunluğu olmamasına rağmen, dane çapı dağılım etkisinin deney sonuçları üzerindeki etkisi belirlemek için aynı deneyler tesis numunesi üzerinde de yapılmıştır.

Temel, alt temel ve tesis numunesi üzerinde yol dolgularında kullanılacak malzemelerin geoteknik özelliklerini belirlemek için Proctor (Standart ve Modifiye), CBR (Islak ve Kuru), Sabit Seviyeli Permeabilite, Esneklik Modülü deneyleri ile donma çözünme çevrimleri sonrası CBR deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi bu başlık altında Standart ve Modifiye Proctor deney sonuçlarına dayanarak kompaksiyon özelliklerinin değerlendirilmesi, CBR deneylerine dayanarak CBR değerlerinin ve Sabit Seviyeli Permeabilite deney sonuçlarına dayanarak geçirimsizlik özelliklerinin değerlendirilmesi, Esneklik Modülü deney sonuçlarına dayanarak esneklik özelliklerinin değerlendirilmesi ve donma çözünme sonrası yapılan CBR deneylerine dayanarak donma çözünme etkisinin değerlendirilmesi olmak üzere 4 alt başlıkta incelenmiştir. Deney sonuçları değerlendirilirken geçmişte yapılan çalışmalar incelenmiş, bulunan sonuçlar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregası ile Karayolları Teknik Şartnamesine uygun olarak hazırlanan temel numunesi ve alt temel numunesi üzerinde bulunan deney sonuçlarının farklılık sebepleri belirtilmiştir.

4.2.1 Kompaksiyon özelliklerinin değerlendirilmesi

Numunelerin kompaksiyon özelliklerini belirlemek için İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarında ASTM D-1557'ye göre Modifiye Proctor ve ASTM D-698'e göre Standart Proctor Deneyleri yapılmış, kompaksiyon eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen kompaksiyon eğrilerine bakıldığında, başlangıç su muhtevası değerinden belli bir su muhtevasına kadar kuru birim hacim ağırlık değerinin arttığı, bu değerden sonra ise su muhtevasının arttırılmasına rağmen maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığı görülmektedir. Bu durum kuru bir zemine eklenen belirli bir miktar suyun öncelikle daneler etrafına adsorbe su tabakası olarak yerleşip, su miktarı arttıkça daneler arasında bir tür yağlama etkisi ile sürtünmeyi azaltarak danelerin daha kolay sıkışma eğilimine girmesine neden olması ile açıklanmaktadır. Ancak, belirli bir noktadan sonra adsorbe su kalınlığındaki ve boşluklardaki su hacmindeki artış kuru birim hacim ağırlık değerinde azalmaya sebep olmaktadır.

Kompaksiyon deneylerinde en yoğun durum, su içeriğinde hemen hemen hiç değişim olmadan zeminin içindeki havanın azaltılması (dışarı alınması) ile sağlanan durum olup, bu su muhtevasındaki kuru birim hacim ağırlık değeri maksimum kuru birim hacim ağırlığı vermektedir. Standart Proctor deney sonuçlarına bakıldığında en düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ile en yüksek su muhtevası değeri tesis numunesi üzerinde yapılan deneyden elde edilmiş olup, 19.3 kN/m^3 değerini %13 optimum su muhtevasında vermiştir. Alt temel numunesinde ise tesis numunesine yakın olarak optimum su muhtevası %11, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 19.4 kN/m^3 bulunmuştur. Temel numunesi ise Standart Proctor deneyinde %10 su muhtevası ve 20.1 kN/m^3 maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ile numuneler arasında en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık, en düşük su muhtevası değerini sahiptir. Bu durum dane çapı dağılım yüzdeleri ile açıklanabilmektedir. Kaba dane yüzdesi artıp ince dane yüzdesi azaldıkça daha düşük su muhtevası değerinde daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri elde edilir. Proctor deneyi yapılırken en yüksek çakıl yüzdesine %62 ile temel tabakası sahip olup, onu %50 ile alt temel tabakası ve %14 ile tesis numunesi takip etmektedir. İnce dane oranı fazla olan numunenin su tutma kapasitesi yüksek olup, kaba malzeme yüzdesi fazla olan numuneye göre optimum su muhtevaları daha yüksek bulunur. İnce malzeme yüzdelere bakıldığında ise tesis numunesi %13 ince malzeme oranına sahipken, alt temel numunesi %6, temel numunesi %5 ince malzeme oranına sahiptir.

Proctor deneyinden elde edilen sonuçları etkileyen temel faktörlerden biri de kullanılan enerjinin büyüklüğüdür. Modifiye Proctor deneyinde Standart Proctor deneyine göre uygulanan enerjinin arttırılmasıyla, bütün numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlığı artmış ve optimum su muhtevası değerleri azalmıştır. Bu durum uygulanan enerjinin artması ile sıkıştırma etkisine karşı daneler arası sürtünmenin azalarak, danelerin daha kolay sıkışma eğilimine girmesi ile açıklanabilir. Standart Proctor deneyinde olduğu gibi Modifiye Proctor deneyinde de dane çapı dağılımının deney sonuçlarına etkisi görülmektedir. Numunelerin kaba ve ince dane oranları arasında yüksek farklar olmadığından dolayı maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasına değerleri arasında yüksek farklar görülmemiştir. Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregası ile alt temel ve temel numunelerinin Modifiye Proctor deneyinde elde edilen optimum su muhtevaları sırası ile %9, %8 ve %7 ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 19.7 kN/m^3 , 19.8 kN/m^3 ve 20.5 kN/m^3 olarak bulunmuştur. En yüksek kuru birim hacim ağırlık değerini beklenildiği gibi en iyi derecelenmiş, çakıl yüzdesi en yüksek olan temel tabakası ve en yüksek su muhtevası değerini ince malzeme oranı en yüksek olan kötü derecelenmiş tesis numunesi vermiştir.

Kompaksiyon deneylerinden elde edilen sonuçlarının geçmişte GDBA üzerinde yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ile paralellik gösterdiği görülmektedir. Herrador ve diğ. (2012) çalışmalarında GDBA için %9.5 su muhtevası ve 20.2 kN/m^3 maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri elde ederken, Mohammadini ve diğ. (2015) kullandıkları GDBA'nın 19.6 kN/m^3 maksimum kuru birim hacim ağırlık ve %12.46 su muhtevası değerine sahip olduğunu belirtmiştir. Bassani ve Tefa (2018) 5 farklı GDBA üzerinde çalışmış ve %5.6-10.3 arasında değişen su muhtevası ile $19.40\text{-}20.78 \text{ kN/m}^3$ arasında değişen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri elde etmiştir. Bu durum dane çağı dağılımları ve ince malzeme yüzdesi ile açıklanmaktadır.

KTŞ'de alt temel ve temel tabakası için ayrı olarak bir maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri verilmemiş, dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzemeler için Standart Proctor deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığın 14.50 kN/m^3 'ten büyük olması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada her numune için kompaksiyon deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bu değerin üstünde bulunmuş, alt temel ve temel tabakasında kullanımının kompaksiyon özellikleri açısından uygun olduğu belirlenmiştir.

4.2.2 CBR değerlerinin ve geçirimsizlik özelliklerinin değerlendirilmesi

Tesis GDBA numunesi ile hazırlanan alt temel ve temel numuneleri üzerinde laboratuvarda mukavemet ve geçirimsizlik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için ASTM D-1883'e göre Islak ve Kuru CBR deneyleri ile ASTM D-2434'e göre Sabit Seviyeli Permeabilite deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılıp, KTŞ'de belirtilen şartları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilip, mukavemet ve permeabilite özellikleri bakımından kullanım uygunluğu değerlendirilmiştir.

Modifiye Proctor sıkıştırma enerjisinde hazırlanan alt temel, temel ve tesis GDBA numunesi üzerinde hem Islak hem Kuru CBR deneyleri yapıp, mukavemet özellikleri değerlendirilmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan tesis numunesi için %76 kuru CBR değeri bulunurken, ıslak CBR deneyinde bulunan CBR değeri %79'dur. Hazırlanan temel ve alt temel numunelerinin Islak CBR değerleri sırası ile %133 ve %121 olarak bulunurken, kuru CBR değerleri %109 ve %106 olarak bulunmuştur. Bütün numunelerde Islak CBR deneyinden elde edilen CBR değeri Kuru CBR deneyinden elde edilen CBR değerinden yüksek olması hidrate olamamış çimentonun su ile temas ettiğinde reaksiyona girmesi ile açıklanabilmektedir. Kaba malzeme yüzdesi arttıkça numunelere 2.5 mm ve 5 mm penetrasyon için uygulanması gereken yük ve dolayısıyla CBR değeri artmıştır. Temel tabakası numunesinin boşluk oranını en aza indirecek şekilde iyi derecelendirilmiş bir dane çapı dağılımına sahip olduğu için Islak ve Kuru CBR deneylerinde en yüksek CBR değerlerini verdiği düşünülmektedir.

Geçmişteki çalışmalar incelendiğinde benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Poon ve Chan (2006) yaptıkları bir seri CBR deneyinde geri dönüştürülmüş beton agregası ve tuğla karışımlarının CBR değerlerini belirleyip, hiçbir işlem görmemiş geri dönüştürülmüş beton agregasının CBR değerini %66 olarak belirlemiştir. Jiménez ve diğ. (2011) geri dönüştürülmüş beton agregası üzerine yaptıkları çalışmada CBR değerlerini %97-138 arasında bulurken, Vegas ve diğ. (2011) kullandıkları geri dönüştürülmüş beton agregası numunesinin CBR değerini %198 olarak bulmuştur. Geri dönüştürülmüş beton agregası üzerine yapılan çalışmalarda bulunan CBR değerleri geniş bir aralıkta yer almaktadır ve bu durum geri dönüştürülmüş beton agregası özelliklerinin alınan kaynağa bağlı olduğunu göstermekle beraber, geri dönüştürülmüş beton agregalarının kullanılmadan önce geoteknik özelliklerinin belirlenmesinin önemi de açıkça ortaya koymaktadır.

Alt temel ve temel tabakası için hazırlanan numunelerin geçirimsilik özelliklerini belirlemek için laboratuvarında Sabit Seviyeli Permeabilite deneyleri yapıp, farklı hidrolik eğimlerde permeabilite katsayıları belirlenmiştir. Permeabilite katsayıları bütün numuneler için 10^{-5} mertebesinde hesaplanmıştır. Tesis numunesinde 8.86×10^{-5} cm/s bulunan permeabilite katsayısı alt temel ve temel numuneleri için bu değerden çok farklı olmamakla beraber daha düşük bulunmuştur. Bu sonuç hazırlanan numunelerin daha iyi derecelenmiş dane çapı dağılımları dolayısıyla daha düşük boşluk oranları ile açıklanmıştır.

Geçmişteki geri dönüştürülmüş beton agregalarının geçirimsilik özelliklerinin belirlendiği çalışmalar incelendiğinde hesaplanan permeabilite katsayılarının geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Nokkaew ve diğ. (2012) kullandıkları geri dönüştürülmüş beton agregası numunelerinin permeabilite katsayısının 1.60×10^{-3} cm/s ile 2.60×10^{-3} cm/s arasında değiştiğini, Rahman ve diğ. (2015) de benzer şekilde kullandıkları numune için permeabilite katsayısını 1.67×10^{-3} cm/s olarak bulduklarını belirtmiştir. Arisha ve diğ. (2018) ise permeabilite katsayısını bu çalışmalardan farklı bir mertebede bularak, 1.80×10^{-6} cm/s olarak belirlemiştir. Bu durum yine kullanılan geri dönüştürülmüş beton agregalarının farklı bölgelerden alındığının bir göstergesi olup, malzemenin kaynağının geçirimsilik özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

Cetin ve diğ. (2010), bütün durumlarda bir malzemenin temel tabakasında kullanılabilmesi için dünya çapında kabul gören CBR değerinin %50'den büyük olduğunu belirtmiştir. KTŞ'de ise temel tabakasında kullanılacak malzeme için Islak CBR değerinin %100'den az olmaması şartı konulmuş olup, çalışmada hazırlanan temel tabakası için Islak CBR değeri %133 bulunmuştur. Karayolları Teknik Şartnamesinde alt temel tabakasında kullanılacak malzeme için ise Islak CBR değerinin minimum %30 olması gerektiği belirtilmiş olup, alt temel tabakası için bulunan %121 Islak CBR değeri bu değer çok üzerinde kalmaktadır. Bu durum GDBA'dan hazırlanan alt temel ve temel numunesinin mukavemet özelliği bakımından kullanımında herhangi bir sakınca olmadığı göstermektedir. Karayolları Teknik Şartnamesinde alt temel ve temel tabakasında kullanılacak malzemenin permeabilite katsayısı için bir limit değeri belirtilmemiştir. Bu çalışmada 10^{-5} cm/s mertebesinde bulunan permeabilite katsayısı değerleri literatürde bulunan değerler ile karşılaştırıldığında anlamlı ve uygun olarak değerlendirilmiştir.

4.2.3 Esneklik özelliklerinin değerlendirilmesi

Alt temel, temel ve tesis numunesinde AASTHO T-307'ye göre yapılan Esneklik Modülü deney sonuçları incelendiğinde toplam gerilme ile esneklik modülü arasında geçmiş çalışmalarda da olduğu gibi neredeyse doğrusal bir ilişkinin olduğunu görülmektedir (Cetin ve diğ. (2010); Arulrajah ve diğ. (2013); Haider ve diğ. (2014); Bestgen ve diğ. (2016); Y. Dayıoğlu ve diğ. (2018)). Çalışma kapsamında esneklik modülü değerleri AASHTO Model (Toplam Gerilme Modeli) ve Mekanistik-Ampirik Dizayn Yöntemi (MEPDG) olmak üzere 2 farklı metot esas alınarak hesaplanmıştır. Bu başlık altında geçmiş çalışmalarda bulunan değerler, Mekanistik-Ampirik Dizayn Yöntemi (MEPDG) için belirlenen regresyon katsayıları ve korelasyon katsayısının karesi (R^2) ile 34.5 kPa (5 psi) çevre basıncı ve 103.4 kPa (15 psi) deviatör gerilmede hesaplanan esneklik modülü değerleri ($M_{R,proje}$) esas alınarak değerlendirilmiştir.

34.5 kPa çevre basıncı ve 103.4 kPa deviatör gerilmedeki $M_{R,proje}$ olarak adlandırılan esneklik modülü değerleri ilk olarak Toplam Gerilme Modeline göre hesaplanmıştır. Hesaplanan esneklik modülü değerlerinin deney verilerine göre hesaplanan esneklik modülü değerine yakınlığını belirlemek amacıyla R^2 değerleri belirlenmiştir. 0.93 R^2 değeri ile Toplam Gerilme Modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerlerinin deney verilerine göre hesaplanan esneklik modüllerine en yakın olduğu numune alt temel numunesi olup, bunu 0.87 ve 0.86 ile sırasıyla ile tesis ve temel numunesi izlemektedir. $M_{R,proje}$ değerleri kullanılan modele göre farklılık göstermekle beraber, 3 tür numune (tesis, temel ve alt temel) için de Toplam Gerilme Modeli esas alınarak hesaplanan $M_{R,proje}$ değerleri daha yüksektir. Fakat korelasyon katsayısının karesi değerlerine bakıldığında MEPD R^2 değerlerinin tesis numunesinde 0.90, alt temel numunesinde 0.96 ve temel numunesinde 0.93 olduğu görülmektedir. MEPD'ye göre hesaplanan esneklik modülleri deney verilerinden hesaplanan esneklik modüllerine daha yakın olduğu için bu modelden elde edilen $M_{R,proje}$ değerleri esas alınmıştır.

Geri dönüştürülmüş beton agregalarının uygulanan tekrarlı yükler altındaki davranışını belirlemek için esneklik modülünün farklı yöntemler ile hesaplandığı geçmiş yıllara ait birkaç çalışma bulunmaktadır. Rahman ve diğ. (2014) takviye yapılmayan geri dönüştürülmüş beton agregaları ile geogrid takviyeli geri dönüştürülmüş beton agregaları numuneleri üzerinde Esneklik Modülü deneyi gerçekleştirmiş, farklı toplam gerilmelerdeki esneklik modüllerini belirlemiştir.

Takviye yapılmayan geri dönüştürülmüş beton agregalarının Esneklik Modülü deneyinden elde edilen M_R değerinin toplam gerilmeye göre değişimi bu çalışmada elde edilen sonuçlara çok yakındır. Bozyurt ve diğ. (2012) tarafından Amerika Birleşik Devletleri'ndeki çeşitli eyaletlerden toplanan 7 farklı geri dönüştürülmüş beton agregası üzerinde yapılan çalışmada, tez kapsamında proje esneklik modülü olarak adlandırılan esneklik modülü değerlerinin 163 ile 208 MPa arasında değiştiği belirtilmiştir. Bu sonuçlar tez kapsamında kullanılan numuneler için MEPD modele göre hesaplanan M_R değerleri ile paralellik göstermektedir.

MEPD modelde kullanılan regresyon katsayıları (k_1 , k_2 ve k_3) ise Haider ve diğ. (2013) tarafından kullanılan doğal agrega ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada temel numunesi için -1.03 bulunan k_3 değeri, alt temel numunesi için -0.65, tesis numunesi için -0.54 olarak bulunmuştur. Haider ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada bu çalışmada olduğu gibi negatif k_3 değeri bulmuştur. Stolle ve diğ. (2009), negatif k_3 değerinin esneklik modülünün toplam gerilme ile değişimini anlamlı olarak yorumlamak için bir gösterge olduğunu belirtmiştir.

Geçmişteki çalışmalar uygulanan deviatör gerilmeye bağlı olarak daneler arasındaki sürtünmenin, yanal basıncın, su muhtevası ve sıkışma yüzdesinin malzeme rijitliği üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. Yanal basıncın, deviatör gerilmenin ve su muhtevasının esneklik modülü değeri üzerinde etkisi büyüktür. İnce daneli malzemeler kaba daneli malzemelere göre deviatör gerilmedeki ve su muhtevasındaki değişimlere daha hassas iken, kaba daneli malzemelerde uygulanan yük artışı daneler arasındaki sürtünmeyi artırıp yanal basınç önemli bir etki olurken, ince daneli zeminler için esneklik modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Çalışmada kullanılan numuneler gibi granüler ve kohezyonsuz zeminler üzerinde yapılan esneklik modülü deneylerinde esneklik modülü değeri ince dane miktarına ve yapısına bağlıdır. Bu durum geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanarak hazırlanan alt temel, temel ve tesis numunelerinin farklı proje esneklik modülü değerlerini açıklanmaktadır. Karayolları Teknik Şartnamesinde yol dolgularının alt temel ve temel tabakasında kullanılacak malzemeler için herhangi bir sınır esneklik modülü değeri belirtilmemiştir. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar da dikkate alınarak hazırlanan alt temel ve temel tabakası ile tesis numunesi için bulunan esneklik modülü değerleri anlamlı olarak değerlendirilmiş ve model parametreleri ile istenilen gerilmelerde esneklik modülü hesabının yapılması uygun görülmüştür.

4.2.4 Donma çözülme etkisinin değerlendirilmesi

Donma çözülme olayı malzemelerin mühendislik özelliklerini etkilemekte, alt yapı ve üst yapı üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Yol dolgularında alt temel ve temel tabakasında kullanılan agregalar donma çözölmeye maruz kaldığında mukavemet ve geçirimlilik özelliklerinde görölen değişim yolda çatlaklara ve bozulmalara sebep olmaktadır. Bu etkileri gidermek ve oluşmasını engellemek geoteknik mühendisliği çalışma alanlarındandır.

Geoteknik mühendisliğinin inceleme konuları arasında ayrı olarak ele alınan donma çözölmeye olayı ölkemizin iklim koşulları göz önünde bulundurulduğunda yol dolgularında kullanılacak geri dönüştürölmüş beton agregaları için de ele alması gereken bir problem haline gelmiştir. Bu amaçla geri dönüştürölmüş beton atıklarından hazırlanan alt temel ve temel numuneleri 1-3-5-10 ve 20 defa olmak üzere 5 farklı sayıda donma çözölmeye çevrimine maruz bırakılmıştır. Farklı sayıda donma çözölmeye maruz kalan alt temel ve temel numuneler üzerinde CBR deneyleri yapıp, mukavemet kayıpları belirlenmiştir.

Temel ve alt temel numuneleri Modifiye Proctor sıkıştırma enerjisinde elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde titreşimli sıkıştırma aleti kullanılarak sıkıştırılmıştır. Çelik CBR kalıbı kullanımı numunedeki hacimsel değişimleri sınırlandıracığı için çelik kalıp kullanımı uygun bulunmamıştır. Plastik kalıplar donma çözölmeye işlemi sırasında numunenin gerçekleştireceğı hacim değişiklerine çelik kalıplara nazaran daha fazla imkân sağlayacağı için CBR kalıbı boyutlarında özel plastik kalıplar yaptırılmıştır.

Doğru bir değerlendirilme yapılabilmesi için donma çözölmeye maruz bırakılmamış, plastik kalıpta titreşimli sıkıştırma aleti ile sıkıştırılan alt temel ve temel numunelerinin de CBR değerleri belirlenmiştir. Donma çözölmeye uğramamış, plastik kalıpta titreşimle sıkıştırılmış temel numunesi için CBR değeri %32 olarak bulunmuş, 20 çevrim sonunda %8'e kadar düşmüştür. En büyük düşüş %18'lik kayıp ile ilk çevrim sonrasında görölmüştür. Plastik kalıpta titreşimli sıkıştırma aleti ile sıkıştırılan alt temel numunesinde ise donma çözölmeye gerçekleşmeden önce %20 olan CBR değeri, 20 çevrim sonunda %6 olarak bulunmuştur. En büyük düşüş temel numunesinde olduğu gibi %16'lık bir CBR değeri kaybı ile ilk çevrim sonrasında gerçekleşmiştir. Bunun sebebi olarak donma işlemi sırasında boşluklarda yer alan suyun hacminin artması ile zeminlerdeki danelerin diziliminin etkilemesi düşünülmektedir.

Bulunan sonuçlar Karayolları Teknik Şartnamesinde alt temel ve temel malzemesi için istenen CBR değerlerinin çok altında bulunduğu için don olaylarının görüldüğü bölgelerde kullanılmasının uygun olmadığı belirlenmiştir.

Donma evresini tamamlayan numuneler sıcaklığın arttığı çözülme evresine geçtiğinde oluşan buz mercekleri erimiş ve zemini daha gevşek hale getirerek CBR değerini azaltmıştır. Kullanım uygunluğu bulunan geri dönüştürülmüş beton agregalarının dane yapısının ve diziliminin değişmesi fiziksel ve mekanik özelliklerini de etkilemiştir. Bunun sonucu olarak kullanılan malzemenin dane yapısına ve dizilimine bağlı olan kompaksiyon, geçirimsizlik ve mukavemet gibi diğer geoteknik özelliklerini etkilemesi beklenen bir sonuçtur. CBR değerlerinde görülen ciddi düşüşler, geri dönüştürülmüş beton agregalarının mukavemet özelliklerinin zorlayıcı iklim şartlarından önemli derecede etkilendiği göstermektedir. Çevrim sayısı arttıkça numunelerin CBR değerlerindeki düşüşün azalması ise numunelerde suyun donduktan sonra hacim artışından dolayı oluşan boşluğun her çevrimden sonra aynı oranda artmaması ile açıklanmaktadır.

4.3 Genel Değerlendirme

Çalışma kapsamında İstanbul Kentsel Dönüşüm Projesi ile yüksek tonajlarda meydana gelen geri dönüştürülmüş beton atıklarının Geoteknik Mühendisliği alanında tekrar değerlendirilmesi amacıyla yol dolgularının alt temel ve temel katmanlarında kullanım uygunluğunu değerlendirilmiştir. Bu amaçla laboratuvar da geoteknik özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler yapıldıktan sonra donma çözülme etkisini belirlemek için numuneler donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Laboratuvar da yapılan bütün çalışmalardan elde edilen sonuçlar Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTS,2013) belirtilen sınır koşulları dikkate alınarak kullanım uygunluğu Geoteknik Mühendisliği açısından değerlendirilmiştir. Tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının dane çapı dağılımının KTS’de belirtilen dane çapı dağılım limitlerine uymadığı tespit edildikten sonra, belirtilen sınır şartları dikkate alınarak alt temel ve temel numunesi yeni dane çapı dağılımında hazırlanmıştır. Geoteknik deneyler bu numuneler üzerinde yapılmış ve yol dolgularında kullanım uygunluğu belirlenmiştir. Çizelge 4.15’te Karayolları Teknik Şartnamesinde temel numunesi için belirtilen dane çapı dağılım yüzdelilerinin alt ve üst limitleri ile hazırlanan numunenin dağılım yüzdesi verilmiş ve uygunluğu gösterilmiştir.

KTŞ’de temel ve alt temel tabakası malzemelerin sağlaması gereken bazı geoteknik özelliklerin sınır değerleri özel olarak belirtilirken, bazı geoteknik özellikler de bütün dolgu malzemelerinin sağlaması gereken özellikler adı altında verilmiştir. KTŞ’de dolgu ve temel tabakası malzemelerin sağlaması gereken geoteknik özellikler temel numunesi için bulunan değerler ile birlikte Çizelge 4.16’da verilmiş ve uygunluk durumu belirtilmiştir. Çizelge 4.17’te KTŞ’de alt temel numunesi için belirtilen dane çapı dağılım yüzdesi sınırları hazırlanan alt temel numunesinin dane çapı dağılımı ile birlikte gösterilmiştir. Alt temel numunesi üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ise KTŞ’de alt temel tabakasında ve dolguda kullanılacak agregalar için belirtilen sınırlar ile beraber Çizelge 4.18’de sunulmuş, uygunluk durumları belirtilmiştir.

Bulunan sonuçlar değerlendirildiğinde İstanbul Kentsel Dönüşüm Projesinden elde edilen alt temel ve temel tabakası için uygun dane çapı dağılımına sahip geri dönüştürülmüş beton agregalarının yol dolgularında kullanılmasının geoteknik özellikler açısından uygun olduğu görülmüştür. Geri dönüştürülmüş beton agregaları donma çözülme çevrimlerine maruz kaldığında ise CBR değerlerinde meydana gelen ciddi düşüşler ile kullanım uygunluğunu kaybetmiştir.

Çizelge 4.15 : Temel numunesi dane çapı dağılımının KTŞ,2013’e uygunluğu.

Elek Çapı	Geçen Yüzde (%)		
	Temel Tabakası Sınır değerleri (KTŞ)	Hazırlanan Temel Numunesi	KTŞ’ye Uygunluk durumu
75	100	100	Uygun
50	100	100	Uygun
37.5	80-100	100	Uygun
25	60-90	80	Uygun
19	45-80	70	Uygun
9.5	30-70	50	Uygun
4.75	25-55	38	Uygun
2	15-40	26	Uygun
0.425	8-20	14	Uygun
0.075	2-8	5	Uygun

Çizelge 4.16 : Temel numunesi geoteknik özelliklerinin KTŞ,2013'e uygunluğu.

Deney Adı	Kullanım Alanı	Şartname Limiti	Deney Sonucu	Uygunluk Durumu
Likit Limit	Dolgu Malzemesi	$\leq \%60$	Non-Plastik	Uygun
Plastisite İndeksi	Dolgu Malzemesi	$\leq \%35$	Non-Plastik	Uygun
Likit Limit	Temel Tabakası	Non-Plastik	Non-Plastik	Uygun
Plastisite İndeksi	Taban Tabakası	Non-Plastik	Non-Plastik	Uygun
$\gamma_{kuru,mak}$ (Sta.Proctor)	Dolgu Malzemesi	$\geq 1.450 \text{ t/m}^3$	2.01 t/m^3	Uygun
$\gamma_{kuru,mak}$ (Mod. Proctor)	Temel Tabakası	-	2.05 t/m^3	-
Kuru CBR Değeri	Temel Tabakası	-	$\%109$	-
Yaş CBR Şişme	Dolgu Malzemesi	$\leq \%3$	$\leq \%1$	Uygun
Yaş CBR Değeri	Temel Tabakası	$> \%100$	$\%133$	Uygun
Permeabilite Katsayısı	Temel Tabakası	-	5.87×10^{-5}	Uygun
Esneklik Modülü	Temel Tabakası	-	128.7	Uygun

Çizelge 4.17 : Alt temel numunesi dane çapı dağılımının KTŞ,2013'e uygunluğu.

Elek çapı	Geçen Yüzde (%)		
	Alt Temel Sınır Değerleri (KTŞ)	Hazırlanan Alt Temel Numunesi	KTŞ Uygunluk Durumu
75	100	100	Uygun
50	-	100	Uygun
37.5	85-100	100	Uygun
25	-	86	Uygun
19	70-100	80	Uygun
9.5	45-80	65	Uygun
4.75	30-75	50	Uygun
2	-	35	Uygun
0.425	10-25	17	Uygun
0.075	0-12	6	Uygun

Çizelge 4.18 : Alt temel numunesi geoteknik özelliklerinin KTŞ,2013'e uygunluğu

Deney Adı	Kullanım Alanı	Şartname Limiti	Deney Sonucu	Uygunluk Durumu
Likit Limit	Dolgu Malzemesi	$\leq \%60$	Non-Plastik	Uygun
Plastisite İndeksi	Dolgu Malzemesi	$\leq \%35$	Non-Plastik	Uygun
Likit Limit	Alt Temel Tabakası	≤ 25	Non-Plastik	Uygun
Plastisite İndeksi	Alt Temel Tabakası	$\leq \%6$	Non-Plastik	Uygun
$\gamma_{kuru,mak}$ (Sta.Proctor)	Dolgu Malzemesi	$\geq 1.45 \text{ t/m}^3$	1.94 t/m^3	Uygun
$\gamma_{kuru,mak}$ (Mod. Proctor)	Alt Temel Tabakası	-	1.98 t/m^3	-
Kuru CBR Değeri	Alt Temel Tabakası	-	%106	-
Islak CBR Şişme	Dolgu Malzemesi	$\leq \%3$	$\leq \%1$	Uygun
Islak CBR Değeri	Alt Temel Tabakası	$> \%30$	%121	Uygun
Permeabilite Katsayısı	Alt Temel Tabakası	-	5.64×10^{-5}	Uygun
Esneklik Modülü	Alt Temel Tabakası	-	154.3	-



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada İstanbul'daki Kentsel Dönüşüm Projeleri ile elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) yol dolgu malzemesi olarak alt temel ve temel tabakasında kullanımı geoteknik deneyler ile incelenmiştir. Tesisten temin edildiği hali ile geri dönüştürülmüş beton agregasının dane çapı dağılım yüzdelerinin Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ, 2013) belirtilen sınır değerlerinin dışında kalmasından dolayı hem temel hem alt temel için sınır değerlerine uygun yeni dane çapı dağılım yüzdeleri belirlenmiştir. Alt temel, temel ve tesis numuneleri üzerinde Proctor (Standart ve Modifiye), CBR (Islak ve Kuru), Sabit Seviyeli Permeabilite, Esneklik Modülü deneyleri yapıldıktan sonra, alt temel ve temel numuneleri üzerinde donma çözülme sonrası mukavemet kayıpları belirlenmiştir. Donma çözülme sonrası CBR değerlerindeki değişimlerini gözlemlemek için alt temel ve temel numuneleri Modifiye Proctor deneyinde elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanıp 1-3-5-10-20 çevrimde donma çözülmeye maruz bırakılmıştır. Donma çözülme çevriminin tamamlayan numunelerin CBR değerlerindeki değişimin kullanım uygunluğunu etkileyip etkilemediği incelenmiştir. Yapılan geoteknik deneylerde bulunan sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Elek analizi ve hidrometre sonuçlarına göre tesisten temin edilen numune Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre Siltli Kum (SM) olarak bulunmuş ve ince dane oranı %13 olarak belirlenmiştir. Dane çapı dağılım yüzdelerinin KTŞ'de belirtilen sınır değerlerine uymaması nedeniyle sırasıyla ince malzeme oranı %5 ve %6 olan temel ve alt temel numuneleri hazırlanmıştır.
- Standart Proctor deneyinde alt temel numunesinde optimum su muhtevası %11, maksimum kuru birim hacim ağırlık ise 19.40 kN/m³ olarak bulunmuştur. Temel numunesinde ise bu değerler sırasıyla %10 ve 20.10 kN/m³ olarak bulunmuştur.

- Enerjinin artırılması ile yapılan Modifiye Proctor deneyinde ise alt temel numunesi için %8 olarak bulunan optimum su muhtevası değeri temel numunesi için %7 bulunmuştur. Temel numunesinde Standart Proctor deneyinde 20.10 kN/m^3 bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 20.50 kN/m^3 (2.05 t/m^3)'e kadar yükselirken, alt temel numunesinde 19.40 kN/m^3 olan bu değer 19.8 kN/m^3 (1.98 t/m^3)'e kadar yükselebilmektedir. Bütün değerler Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTS, 2013) dolgu malzemesinin sağlaması gereken 1.45 t/m^3 değerinin çok üstünde olup, alt temel ve temel tabakasında kullanım şartlarını sağlamaktadır.
- Bütün numuneler üzerinde hem Islak hem Kuru CBR deneyleri yapılmıştır. Tesis numunesi Islak ve Kuru CBR deneyinde birbirine yakın CBR değerleri verirken, tesis numunesine göre daha iyi derecelenmiş ve kaba malzeme yüzdesi daha fazla olan temel ve alt temel numunelerinde Islak CBR değeri ile Kuru CBR değeri arasındaki fark artmıştır. Bütün numunelerde Islak CBR değeri Kuru CBR değerine göre daha yüksek bulunmuştur. Islak CBR değerleri sırasıyla %133 ve %121 olan temel ve alt temel numunelerinin Kuru CBR deneyinden elde edilen CBR değerleri sırasıyla %109 ve %106 olarak belirlenmiştir. Yaş CBR değerlerinin Kuru CBR değerlerinden daha yüksek bulunmasının nedeni olarak numuneler içinde henüz hidrate olmamış çimentonun su ile karşılaştığında reaksiyona girmesi gösterilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTS, 2013) alt temel numunesi için Islak CBR değerinin %30'dan temel numunesi için ise %100'den büyük olması gerektiği belirtilmiştir. Alt temel ve temel numunesinin CBR değerleri bu değerlerin çok üstündedir.
- Sabit seviyeli permeabilite deneyinde alt temel ve temel numunesi için permeabilite katsayıları yaklaşık 10^{-5} cm/s olarak bulunmuştur. Karayolları Teknik Şartnamesinde permeabilite katsayısı için bir sınır değeri belirtilmemiş olmasına rağmen, proje türüne göre dolgu malzemeleri açısından bilinmesi gereken önemli parametrelerdendir. Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde hidrolik özelliklerin geri dönüştürülmüş beton agregalarının kaynağına göre çok değişkenlik gösterdiği tespit edilmiş ve bu özelliğinin kullanılmadan önce mutlaka belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir.

- Yol projelerinde önemli bir indeks olan, yol alt temel ve temel tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılan Esneklik Modülü değerinin belirlenmesi için Karayolları Genel Müdürlüğünde Esneklik Modülü deneyleri yapılmıştır. Esneklik Modülü deney sonuçlarına göre tesisten temin edilen GDBA numunesi için projelerde kullanılmak üzere belirlenen Esneklik Modülü ($M_{R,proje}$) 143.8 MPa olarak hesaplanırken, hazırlanan temel numunesi için bu değer 128.7 MPa hazırlanan alt temel numunesi için ise 154.3 MPa olarak hesaplanmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesinde ortalama Esneklik modülü için bir sınır değeri belirtilmemiş olup, geçmişteki çalışmalar incelendiğinde bulunan esneklik modülü değerlerinin geçmiş çalışmada bulunan değerler ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Hazırlanan alt temel ve temel numuneleri ile tesis numunelerinin Esneklik Modülü değerlerinin farklı bulunması granüler ve kohezyonsuz zeminlerin ortalama esneklik modülü değerleri üzerinde önemli bir etki olan ince malzeme yüzdesi olduğu tahmin edilmektedir.
- Laboratuvar çalışmasının son bölümünde geoteknik özellikleri belirlenen, Karayolları Teknik Şartnamesini dikkate alınarak hazırlanan alt temel ve temel numuneleri donma çözülme çevrimlere maruz bırakılmıştır. Donma çözülme çevrimleri sonrası CBR değerlerindeki değişim belirlenerek iklim koşullarının değişken olduğu, don olaylarının görüldüğü bölgelerde de kullanım uygunluğu mukavemet özellikleri açısından ayrı olarak ele alınmıştır. Donma çözülme çevrim sayıları 1-3-5-10 ve 20 olarak belirlenmiştir. Çevrim sayılarının tamamlayan alt temel ve temel numuneleri ile donma çözülme gerçekleşmeyen durumdaki CBR değerleri aynı yöntem izlenerek belirlenmiştir. Donma çözülme çevrimlerinde numunelerin taşıma sırasında oluşan sarsmaları en aza indirmek için numuneler CBR kalıp ölçülerinde yapılan kalıplarda sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında titreşimli sıkıştırma aleti kullanılmıştır. Numuneler deney öncesinde belirlenen her tabaka için uygulanması gereken titreşim süresinde, 5 tabaka halinde, Modifiye Proctor deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde sıkıştırılmıştır. Donma çözülme çevrimleri öncesi ve sonrası CBR değerleri belirlenerek donma çözülmenin CBR değeri üzerindeki etkisi dikkate alınarak kullanım uygunluğu tekrar değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, tesisten temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregasının hazırlanan alt temel ve temel tabakasında kullanımının geoteknik açısından uygun olduğu belirlenmiştir. Fakat tesisten temin edildiği hali ile GDBA malzemesinin sağlaması gereken geoteknik özellikler dışında diğer mühendislik özellikleri ilgili İnşaat Mühendisliği dalları tarafından kullanılmadan önce belirlenmeli, Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen değerlere uygunluğu belirtilmelidir.

Geri dönüştürülmüş beton agregaların kullanım uygunluğu belirlenirken kullanıldığı bölgedeki iklim koşulları büyük önem taşımaktadır. Don olaylarının sık görüldüğü iklim koşullarında geri dönüştürülmüş beton agregalarının mukavemet özellikleri bu koşullar dikkate alınarak tekrar değerlendirilmelidir. Donma çözülme olayına maruz kalmadan önce alt temel ve temel tabakası için kullanılabilir olarak belirlenen geri dönüştürülmüş beton agregalarının, donma çözölmeye maruz kaldıktan sonra kullanım uygunluğunu kaybedileceğı unutulmamalıdır.

Bu çalışmada uygun dane çapı dağılımında geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılarak hazırlanan alt temel ve temel tabakalarının donma çözölmeye maruz kalması durumunda mukavemet kayıpları belirli çevrim sayılarında donma çözölmelerini tamamlayan numuneler üzerinde yapılan CBR deneyi ile belirlenmiştir. Donma çözölmeye sonrası CBR değerlerinin Karayolları Teknik Şartnamesinde alt temel ve temel tabakasında kullanılacak agregalar için belirtilen sınır değerlerinin altında kaldığı ve kullanımının uygun olmadığı tespit edilmiştir. Donma çözölmeye çevrimleri sonrası düşen CBR değerlerinin de Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen sınırlarını sağlaması için CBR değeri daha yüksek olan doğal agrega ile karıştırılması, katkı maddesi eklenerek veya geosentetik kullanarak mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi önerilmektedir.

Geri dönüştürülmüş beton agregalarının geoteknik özelliklerinin elde edilen kaynağına bağılı olup bulunan geoteknik özellikler İstanbul Kentsel Dönüşüm Projesi kapsamında yıkılan binalardan elde edilen İstanbul, Göktürk bölgesinden depolanan geri dönüştürülmüş beton agregaları için geçerlidir. Farklı kaynaklardan temin edilen dolasıyla farklı dane çapı dağılımına sahip geri dönüştürülmüş beton agregalarının kullanılmadan önce esas alınan şartnamede belirtilen geoteknik özellikleri ile diğer mühendislik özelliklerinin belirlenip kullanım uygunluğunun tespit edilmesi gerektiğı unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

ACAA-American Coal Ash Association. (2003). *Fly Ash Facts for Highway Engineers* (Chapter 1 - Fly Ash - An Engineering Material).

ACAA- American Coal Ash Association. (2015). *Key Findings - 2015 Coal Combustion Products Utilization U.S. Historical Perspective and Forecast*.

Appiah J.K., Berko-Boatenga, V.N, Tagborb, T.A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials*,6, 1-7.

Arisha, A., A. Gabr, S. El-Badawy, and S. Shwally. (2018). Performance evaluation of construction and demolition waste materials for pavement construction in Egypt. *Journal of Materials in Civil Engineering*,30(2). Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002127](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002127)

Arulrajah, J. Piratheepan, M. M. Disfani, and M. W. Bo. (2013). Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Application. *Journal of Materials in Civil Engineering*,25, 1077-1088.

Arredondo-Rea, S.P., Corral-Higuera, R., Gómez-Soberón, J. M., Gámez-García, D.C., Bernal-Camacho, J.M., Rosas-Casarez, C.A., Ungsson-Nieblas, M.J. (2019). Durability Parameters of Reinforced Recycled Aggregate Concrete: Case Study. *Applied Sciences.*, 9(4).

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M.M. (2016). Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(2), 349-357.

Arya, R.K. ve Kansa, R. (2013). Utilization of waste papers to produce eco-friendly bricks. *Int. J. Sci. Res.*,5, 92-96.

ASTM D698-07. (2007). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D1557-02. (2003). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN- m/m³)). ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D1883-16. (2016). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D2434-68. (2006). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). ASTM International, West Conshohocken, PA.

Aydeniz, V. (2016). Cam Atık Geri Dönüşümü ve Geliştirme Çalışmaları. *Türkiye'de Tüm Yönleriyle Atık Yönetimi Paneli – Türktay*, Ankara: 19-20 Ekim.

Balwaik, S.A. and Raut S.P. (2011). Utilization of waste paper pulp by partial replacement of cement in concrete. *J. Eng. Res. Appl.*,1(2), 300–9.

Bansal, S., Misra, A.K., Bajpai, P. (2017). Evaluation of modified bituminous concrete mix developed using rubber and plastic waste materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*,6 (2), 442-448.
doi: 10.1016/j.ijsbe.2017.07.009

Bassani, M. & L. Tefa. (2018). Compaction and freeze-thaw degradation assessment of recycled aggregates from unseparated construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*,160, 180-195.
doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2017.11.052

Başar, M., Pelitli, V., Güzel, B. (2016). Termik Santrallerden Kaynaklanan Küllerin Yönetimi- Uygulama Örnekleri. *Türkiye’de Tüm Yönleriyle Atık Yönetimi Paneli – Türktay*, Ankara: 19-20 Ekim.

Bester, J.J., Kruger, D., Hinks, A. (2004). Construction and Demolition Waste in South Africa. Retrieved from
<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/cdw.32859.0007>

Bestgen J. O., M. Hatipoglu, B. Cetin, A. H. Aydilek. (2016). Mechanical and Environmental Suitability of Recycled Concrete Aggregate as a Highway Base Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*,28(9).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) MT.1943-5533.0001564](https://doi.org/10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0001564).

Bhuvaneshwari, S., Robinson, R.G., Gandhi, S.R. (2005). Stabilization of Expansive Soils Using Fly Ash. Fly Ash Utilization Programme (FAUP), Technology Information Forecasting & Assessment Council (TIFAC), Department of Science and Technology (DST). New Delhi, India.

Bolden, J., Abu-Lebdeh, T., Fini, E. (2013). Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *Am. J. Environ. Sci.*,9(1), 14-24.

Bozyurt, O., J. M. Tinjum, Y. Son, T. B. Edil, and C. H. Benson. (2012). Resilient Modulus of Recycled Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate. *GeoCongress, Oakland, California, United States, March 25-29*, 3901-3910.
doi: 10.1061/9780784412121.400

Bradley, L.J.N. (2017). Coal ash in context. *Coal Combustion Products (CCP's) Characteristics, Utilization and Beneficiation*, 415-450. doi: 10.1016/B978-0-08-100945-1.00018-6

Building Materials & Technology Promotion Council Ministry of Housing & Urban Affairs Government of India. (2018). *Utilisation of Recycled Produce of Construction & Demolition Waste A Ready Reckoner*.

Cackler, T. (2018). *Recycled Concrete Aggregate Usage in the US Summary Report*, Iowa State University: National Concrete Pavement Technology (CP Tech) Center.

Cardoso, R., Silva R.V., de Brito J., Dhir R. (2015). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: a literature review. *Waste Management*,49, 131–145. doi: 10.1016/j.wasman.2015.12.021

Caldas-Vieira, F. (2014). Coal combustion products in Europe-A continuous challenge. *EuroCoalAsh*, Munich, Germany. ISBN: 978-3-86875-805-4.

- Centre for Innovations in Public Systems.** (2014). An Autonomous body of the Government of India Use of Plastics in Road Construction Implementation of Technology and Roll out. Retrieved from <https://www.tce.edu/sites/default/files/PDF/CIPS-PlasticRoad.pdf>
- Cetin, B., A. H. Aydilek, and Y. Guney.**(2010). Stabilization of recycled base material using high carbon fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 879–892.
- Correia, A.G., Winter M.G., Puppala, A.J.** (2016). A review of Sustainable Approaches in Transport Infrastructure Geotechnics. *Transportation Geotechnics*, 7, 21-28.
- Department of Environmental Affairs.** (2018). *South Africa state of Waste. A report on the state of the environment. First draft report.* Department of Environmental Affairs, Pretoria.
- Dilbas, H., Simsek M., Çakır O.** (2014). An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Construction and Building Materials*, 61, 50–59.
- EPA, U.** *Sustainable Management of Construction and Demolition Materials.* Retrieved from : <https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials#America>.
- EPA, U.** (2018). *Advancing Sustainable Materials Management: 2015 Fact Sheet.* Retrieved from : https://www.epa.gov/sites/production/files/201807/documents/2015_smm_msw_fact_sheet_07242018_fnl_508_002.pdf
- Esin, T. & Cosgun, N.** (2007). A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey. *Building and Environment*, 42(4), 1667–1674.
- European Union.** (2018). Changing the way we use plastics. *Publications Office of the European Union*, Luxembourg. Retrieved from : <https://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/pan-european-factsheet.pdf>.
- Eurostat.** (2016). *Waste Statistics.* Eurostat, Luxembourg. Retrieved from: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics.
- Frigione, M.** (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30(6), 1101-1106.
- Global Recycling-The Magazine for Business Opportunities & International Markets.** (2015). Recycling of C&D Waste in India: First Steps Taken. Retrieved from <https://global-recycling.info/archives/664> .
- Haider, I., Z. Kaya, A. Cetin, M. Hatipoglu, B. Cetin, and A. H. Aydilek.** (2014). Drainage and mechanical behavior of highway base materials. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140,(6). doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000708
- Hoornweg, D. & Bhada-Tata, P.** (2012). What a waste – A Global Review of Solid Waste Management. World Bank, Washington DC, USA.
- Israel National Report.** (2010). *Eighteenth Session of the Commission on Sustainable Development*, April 2010.

- İBB-İstanbul Büyükşehir Belediyesi.** (2016). İstanbul'da Tonlarca Asfalt Ekonomiye Geri Kazandırıldı. *Yol Yapım ve Altyapı Koordinasyon Daire Başkanlığı*, İstanbul. Erişim adresi : <https://yolbakim.ibb.istanbul/istanbulda-tonlarca-asfalt-ekonomiye-geri-kazandirildi/>
- Jalaluddin, M.** (2017) Use of Plastic Waste in Civil Constructions and Innovative Decorative Material (Eco- Friendly). *MOJ Civil Eng* 3(5):00082.
- Jattak, Z.A , Hassan N.A., Shukry, N.A.M., Satar, M.K.I.M., Warid, M.N.M., Nor, H.Md., Yunus, N.Z.M.** (2019). Characterization of industrial by-products as asphalt paving material . *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 220, 012012. doi:10.1088/1755-1315/220/1/012012.
- Kadiroğlu, İ., Öz, E., Tezcan ,O., Kuru E.B.** (2017). Geri Dönüşümlü Agreganın Beton Üretiminde Kullanılabilirliği. *HAZİR BETON*, Mart – Nisan, 2017, 86-94.
- Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2013). *Karayolları Teknik Şartnamesi-2013*. Erişim adresi https://www.tam Yol.com.tr/UserFiles/Content/KGM_Teknik_Sartnamesi_2013.pdf
- Kawalec, J., Kwiecien, S., Pilipenko, A., Rybak, J.** (2017). Application of Crushed Concrete in Geotechnical Engineering – Selected Issues. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 95(2), 022057. doi:10.1088/17551315/95/2/022057
- Kılıç, N.** (2012). Sektörel Kentsel Dönüşümde Geri Dönüşüm Atığı. *İzmir Ticaret Odası, AR&GE BÜLTEN*, Aralık 2012.
- Kolisetty, R.K. & Chore, H.S.** (2013). Utilization of Waste Materials in Construction Activities: A Green Concept. *International conference on Green Computing and Technology*. Maharashtra, India : SIES Graduate School of Technology, September 17-19.
- Kruger, R.A.** (2017). Introduction to the utilization of coal combustion products. *South African Coal Ash Association*, Pretoria, South Africa. doi: 10.1016/B978-0-08-100945-1.00004-6.
- Kumar, B.R., Sharma R.S.** (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *J Geotech Geoenviron Eng* 130(7),764–767.
- Jayaranjan, M.L.D., Hullebusch E.D., Annachhatre, A.P.** (2014). Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*,13(4). doi: 10.1007/s11157-014-9336-4.
- Jiménez, J. R., F. Agrela, J. Ayuso, M. López.** (2011). A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales de Construcción*,61,(302), 289-302. doi: 10.3989/mc.2010. 54009.
- Lu, J., Poon, C.S.** (2019). Recycling of waste glass in construction materials. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 153-167.
- López-Alonso, M., Martinez-Echevarria, M. J., Garach, L., Galán, A., Ordoñez, J., & Agrela, F.** (2019). Feasible Use of Recycled Alumina Combined with Recycled Aggregates in Road Construction. *Construction and Building Materials*, 195, 249-257. doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2018.11.084

- Mahankale, S.S., Patel S.R., Patil, V.A., Dalvi, A.A., Saraf, K.U.** (2016) Use of Rap Material in Bituminous Pavement. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(2), 450-457.
- Mangi, S.A., Ibrahim M.H.W., Jamaluddin N., Arshad, M.F., Memon F.A., Jaya, R.P., Shahidan, S.** (2018). A Review on Potential Use of Coal Bottom Ash as a Supplementary Cementing Material in Sustainable Concrete Construction. *International Journal of Integrated Engineering: Special Issue 2018: Innovations in Civil Engineering*, 10(9), 28-36. doi:10.30880/ijie.2018.10.09.006
- Manju, R., Sathya S., Sheema K.** (2017). Use of Plastic Waste in Bituminous Pavement. *International Journal of ChemTech Research CODEN (USA): IJCRGG*, 10(8), 804-811. ISSN: 0974-4290, ISSN(Online):2455-9555
- Mhlongo, S.M., Abiola, O.S., Ndambuki, J. M., Kupolati, W.K.** (2014). Use of Recycled Asphalt Materials for Sustainable Construction and Rehabilitation of Roads. *International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering (BCEE-2014)*, March 17-18, Dubai (UAE).
- Ministry of Environment.** (2014). *History and Current State of Waste Management in Japan*. Retrieved from : <http://www.env.go.jp/en/recycle/smcs/attach/hcswm.pdf>
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A.** (2016). Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 547-556.
- Mohammadinia A., A. Arulrajah, J. Sanjayan, M. M. Disfani, M. W. Bo, and S. Darmawan.** (2015). Geotechnical Properties of Lightly Stabilized Recycled Demolition Materials in Base/Sub-Base Applications. *IFCEE, San Antonio, Texas, March 17–21, 2015*, 2767-2776. doi: 10.1061/9780784479087.258
- Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H., Kurmus, H., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S.** (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review . *Construction and Building Materials*, Vol. 156, 443–467
- Natarajan B.M., Kanavas Z., Sanger, M., Rudolph J., Chen, J., Edil T., Ginder-Vogel, M.** (2019). Characterization of Recycled Concrete Aggregate after Eight Years of Field Deployment. *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(6), 04019070.
- Nokkaew K.** (2018). Characterization of Recycled Aggregate for Use as Base Course Material. *International Journal of GEOMATE*, 15(48), pp.129-136. <https://doi.org/10.21660/2018.48.PRE39>
- Oikonomou, N.** (2005). Recycled Concrete Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315-318.
- Okeyinka, O.M.** (2016). The Applicability of Recycled Waste Paper as Lightweight Building Materials. *University of Wolverhampton for the degree of Doctor of Philosophy*.
- Okeyinka, O.M. & Idowu, O.J.** (2014). Assessment of the Suitability of Paper Waste as an Engineering Material. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 4(6), 724-727.

Okeyinka, O.M., Oloke, D.A., Khatib, J.M. (2015). A Review on Recycled Use of Solid Wastes in Building Materials. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 9(12), 1570-1579.

Pandian, N. S. (2004). Fly Ash Characterization with Reference to Geotechnical Applications. *Journal of the Indian Institute of Science*, 84 (6).

Pant, A., Datta, M., Ramana, G.V. (2019). Bottom ash as a backfill material in reinforced soil structures Geotextiles and Geomembranes.
doi: 10.1016/j.geotexmem.2019.01.018

Poon, C. S. & D. Chan. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road subbase. *Construction and Building Materials*, 20,(8), 578–585.

Pradyumna, T.A., Abhishek, M., Jain, Procedia, Dr.P.K. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *Social and Behavioral Sciences*, 104, 1149 – 1157.

Puppala, A.J, Hoyos, L.R, Potturi A.K. (2011). Resilient Moduli Response of Moderately Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(7), 990-998. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000268.

Rahman, Md. A., Imteaz, M.A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M.M. (2015). Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 90, 183-194. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.042

Rajesh, S., Prabu, C., Selvaraj, J. (2018). Stability Analysis of Unsaturated Instrumented Fly Ash Embankment. *UNSAT 2018: The 7th International Conference on Unsaturated Soils*. Hong Kong.

Saberian, M., Li J., Cameron D. (2019). Effect of Crushed Glass on Behavior of Crushed Recycled Pavement Materials Together with Crumb Rubber for Making a Clean Green Base and Subbase. *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(7), 04019108. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002765,

Safiuddin, M., Jumaat, M.Z., Salam, M.A., Islam, M.S., Hashim, R. (2010). Utilization of solid wastes in construction materials. *Int. J. Phys. Sci.*, 5 (13), 1952-1963.

Sas, W. (2015). Application of Recycled Concrete Aggregate in Road Engineering. *Acta Sci. Pol. Architectura* 14(4), 49–59.

Schrager, M., Francioso, V., Kadakia A., Velay-Lizancos, M. (2018). High Performance Mortar with 100% Recycled Aggregate using Titanium Dioxide Nanoparticles. *The Summer Undergraduate Research Fellowship (SURF) Symposium*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

Shermale, Y. D. and Varma, M. B. (2015). *Papercrete: An Efficient Use of Waste Paper*. Recent Trends in Civil Engineering and Technology, ISSN: 2249-8753(Online), ISSN: 2321-6476(Print), Vol. 5(3), 54-59.

Silva, R.V., Brito J., Dhir, R.K. (2019). Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, Vol.236, 117629.

- Singh, M., Siddique, R.** (2013). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 20-32.
- Singh, N., Mithulraj, M., Shubham, A.** (2019). Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self compacting concrete blended with metakaolin. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, pp. 240-251. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.01.044
- Srivastava, S., & Chini, A.** (2009). Construction Materials and C&D waste in India. *CIB W115 Construction Material Stewardship* (pp. 72-76). Netherland: International Council of Building Research Studies and Documentation.
- Stolle, D., P. Guo, and Y. Liu.** (2009). Resilient modulus properties of granular highway materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36 (4), 639–654. <https://doi.org/10.1139/L08-141>.
- Sule, J., Sule, E., Joseph I., Ibhado O., Alfred, B.Y., Waziri, F.I., Sunny, E.** (2017). Use of Waste Plastics in Cement-Based Composite for Lightweight Concrete Production. *International Journal of Research in Engineering Technology*, 2 (5), 44-54, ISSN: 2455-1341.
- Sutcu, M., Erdogmus E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., Ozbakkaloglu, T.** (2019). Recycling of Bottom Ash and Fly Ash Wastes in Eco-Friendly Clay Brick Production. *Journal of Cleaner Production*, Vol.233, pp. 753-764.
- T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.** (2017) *İnşaat ve Yıkıntı Atıkları ile İlgili Mevzuat ve Uygulamalar*.
- Taha, R., Al-Harthy A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M.** (2002). Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. *J. Mater. Civ. Eng.*, 14(3): 239-245. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(239)
- Tamanna N., Sutan N.M., Lee, D. T. ., Yakub I.** (2013). Utilization of Waste Glass in Concrete. *Conference: 6th International Engineering Conference, Energy and Environment (ENCON 2013)*, Kuching, Sarawak, Malaysia . doi: 10.3850/978-981-07-6059-5_090
- The Western Australian Government.** (2016). *Waste Authority Position Statement Construction and Demolition (C&D) Waste*.
- Thomas, R.J., Andrew, J.F., Andrew, D.S.** (2018). Durability Analysis of Recycled Asphalt Pavement as Partial Coarse Aggregate Replacement in a High-Strength Concrete Mixture. *J. Mater. Civ. Eng.*, 30(5): 04018061. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002262.
- TMMOB Çevre Mühendisleri Odası.** (2018). *Dünya Çevre Günü Türkiye Raporu*.
- TMMOB, Çevre Mühendisleri Odası.** (2019). *Dünya Çevre Günü Türkiye Raporu*.
- Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Chaipanich, A.** (2017). Utilization of coal bottom ash to improve thermal insulation of construction material. *J Mater Cycles Waste Manag* 19, 305–317. doi: 10.1007/s10163-015-0419-2
- Turan, N.G., Coruh, S., Akdemir, A., Ergun, O.N.** (2009). Municipal solid waste management strategies in Turkey. *Waste Management*, Vol. 29, 465.
- Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği.** (2012). *Türkiye Cam ve Cam Ürünleri Sanayi Meclisi Sektör Raporu*. ISBN :978-605-137-299-0.

UEPG, European Aggregates Association (2018). *Annual review 2017–2018*. Brussels: Belgium.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2011) *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. Publication No. FHWA-HRT-11-021.

The United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP). Retrieved from <https://www.unescap.org>

Verma, A., Sharma, R., Shrivastava, M., Prashant M. (2017). Evaluation Of Reclaimed Asphalt Pavement (Rap) in Flexible Pavement Layers. *World Journal of Engineering Research and Technology WJERT* *wjert*,3(2), 91 -104. ISSN 2454-695X

Vieira, C.S & Pereira, P.M. (2015). Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources Conservation and Recyclin*, 103, 192-204. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.07.023

Y. Dayioglu, A., M. Hatipoglu, and A. H. Aydilek. Comparative Evaluation of Mechanical Performance of Steel Slag and Earthen Granular Aggregates. *Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington DC, United States, 2018*.

Yap, S.P., Chen, P.Z.C., Goh, Y., Ibrahim, H. A., Mo, K.H., Yuen, C.W. (2018). Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*,181, pp. 155-165. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.205

Vegas I., J. A., Ibañez, A. Lisbonaa, A.S. Cortazar, and M. Frías. (2011). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 5, May 2011, pp. 2674-2682.

Wang, Q., Wang, L., Zhong,X., Guo, P., Wang, J., Ma, H., Gao, Z., Wang, H. (2019). Dynamic behaviour and constitutive relationship of saturated fly ash-modified loess. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. doi:10.1080/19648189.2019.1577181

Wartman, J., Grubb, D., Nasim, A.S.M. (2004). Select Engineering Characteristics of Crushed Glass. *Journal Of Materials In Civil Engineering*,16(6), 526 -539. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(526)

Waste Statistics Department for Environment Food Rural Affairs. (2019). *UK Statistics on Waste*, March 2019.

Wu, C., Zhu, Y., Zhang, X., Kou, S. (2018). Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach. *Cement and Concrete Composites*,94, 248-254. doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.09.012

Zheng, C., Lou, C., Du, G., Li, X., Liu, Z., Li, L. (2018). Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics*, 9, pp 1317-1322. doi: 10.1016/j.rinp.2018.04.061

Url-1 <<http://plastic-pollution.org> >, erişim tarihi 15.06.2019.