



**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARININ
YOL TEMEL VE ALTTEMEL TABAKALARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Burcu AYTEKİN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARININ YOL TEMEL VE
ALTTEMEL TABAKALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Burcu AYTEKİN
0000-0002-4059-8559

Doç. Dr. Ali MARDANİ-AGHABAGLOU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARININ YOL TEMEL VE ALTTEMEL TABAKALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI **Burcu AYTEKİN**

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali MARDANİ-AGHABALOU

Doğal kaynakların insan yaşamının gereksinimlerini karşılayamayacak hızda tükendiği, insan kaynaklı etmenlerin iklime ve ekosisteme olumsuz etkilerinin giderek arttığı bu günlerde önerilen önlem ve çözümlerin ortak paydası sürdürülebilirliktir. Sürdürülebilirlik insan yaşamının gereksinimleri ve doğal kaynaklar arasında denge kurmaktır. Hem atık üretimi hem de doğal kaynak tüketimi göz önüne alındığında inşaat sektörü bu dengenin sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Geçtiğimiz birkaç on yılda, inşaat ve yıkıntı atıkları içerisinde en yüksek paya sahip olan beton atıklarının geri dönüştürülerek agrega olarak kullanılması bu atıklarının kontrol edilmesi ve yönetilmesi için etkili bir yol olarak ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, tez çalışması kapsamında basınç dayanımı 35-40 MPa arasında değişen beton atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) kırma kireçtaşı agregası (KA) ile birlikte bağlanmamış granüler yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu çalışmadaki temel amaç; GDBA'nın doğal malzeme olan KA ile karşılaştırılması ve Karayolları Teknik Şartnamesinde (2013) belirtilen limit değerlere uygunluğunun araştırılmasıdır. Bu doğrultuda, GDBA, %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında KA ile ikame edilerek 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların dayanım, dayanıklılık ve hidrolik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre GDBA kullanımı ile karışımların geçirgenlik özellikleri hariç diğer özelliklerinin ciddi mertebede olumsuz etkilenmediği hatta yassılık endeksi, ıslak CBR, donma-çözülme çevrimi sonrası CBR dayanımı ve esneklik modülü açısından daha üstün performans sergilediği anlaşılmıştır. Ayrıca, GDBA'nın granüler yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılmak üzere Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen limit değerlerinin sağlandığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, yapılan tez çalışması kapsamında, GDBA'nın yol temel ve alttemel tabakalarında granüler malzeme olarak kullanılmasının atık yönetimini kontrol altına almak ve doğal kaynakları korumak için uygun bir çözüm olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir yapı malzemeleri, geri dönüştürülmüş beton agregası, granüler yol tabakaları, inşaat ve yıkıntı atığı, esneklik modülü
2021, xiv + 132 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE UTILIZATION IN ROAD BASE AND SUBBASE LAYERS

Burcu AYTEKİN

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali MARDANI-AGHABAGLOU

Sustainability is the common denominator of the proposed precautions and solutions these days, where natural resources are being depleted at a rate that cannot meet the needs of human life, and the negative effects of human-induced factors on the climate and ecosystem are gradually increasing. Sustainability is to establish a balance between the requirements of human life and natural resources. Considering both waste generation and natural resource consumption, the construction industry has critical importance in terms of ensuring this balance. In the past few decades, using as aggregate by recycling of concrete waste, which has the highest share in construction and demolition waste, has emerged as an effective way to control and manage these wastes. For this purpose, within the scope of the thesis, the usability of recycled concrete aggregates (GDBA) obtained from concrete wastes with compressive strengths ranging from 35-40 MPa, together with crushed limestone aggregate (KA), in unbound granular base and subbase layers were investigated. The main aim of this study is to compare GDBA with KA, a natural material, to investigate the compliance of GDBA with the specifications specified in the Highway Technical Specification (2013). For this purpose, 5 different mixtures were prepared by replacing GDBA with 0%, 25%, 50%, 75% and 100% KA. The strength, durability and hydraulic properties of the mixtures were investigated. According to the results obtained within the scope of the study, it was understood that the use of GDBA did not adversely affect the properties of the mixtures, except for permeability, and even showed superior performance in terms of flakiness index, wet CBR value, CBR value after freeze-thaw cycle and resilient modulus. In addition, it has been determined that the limit values specified in the Highways Technical Specifications (2013) are provided for use in the granular road foundation and sub-base layers of GDBA. As a result, within the scope of the thesis, the use of GDBA as a granular material in the road base and sub-base layers has proven to be a suitable solution to control waste management and protect natural resources.

Key words: Sustainable building materials, recycled concrete aggregate, granular road layers, construction and demolition waste, resilient modulus

2021, xiv + 132 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin her aşamasında bilgi ve tecrübelerini aktararak her zaman desteğini aldığım danışman hocam, sayın Doç. Dr. Ali MARDANI-AGHABAGLOU'ya rehberliği, ilgisi ve sabrı için saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

Tez çalışmalarında yardımlarını ve tecrübelerini esirgenmeyen Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER GÜLER'e,

Bu tez çalışmasını Genel Araştırma Projeleri kapsamında FGA-2021-187 No'lu "Geri Dönüştürülmüş Beton Agregaların Yol Dolgularında Kullanılabilirliğinin Araştırılması" başlıklı araştırma projesi kapsamında destekleyen Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine,

Tez çalışması kapsamında deneylerin bir kısmının yapılmasında laboratuvar imkânlarını sunan PROTEST Yapı Araştırma ve Test Merkezi AŞ'ye ve laboratuvar çalışanlarına,

Malzemelerin temin edilmesinde yardımlarından ötürü Bursa Büyükşehir Belediyesi ve Bursa Beton AŞ'ye,

Manevi destekleriyle bana güç veren değerli dostlarıma,

Maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda yanımda olan, varlıklarıyla kendimi şanslı hissettiğim aileme teşekkürlerimi sunarım.

Burcu AYTEKİN
13/08/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Karayolu Esnek Üstyapısı.....	6
2.1.1. Temel Tabakası.....	7
2.1.2. Alttemel Tabakası.....	10
2.2. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Yönetimi.....	12
2.2.1. Dünyada İnşaat ve Yıkıntı Atığı Yönetimi.....	17
2.2.2. Türkiye’de İnşaat ve yıkıntı Atığı Yönetimi.....	23
2.3. Yol Uygulamalarında Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası Kullanımı.....	25
2.3.1. Geri Dönüşümün Avantajları.....	37
2.3.2. Geri Dönüşümün Dezavantajları.....	40
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	42
3.1. Malzeme.....	42
3.1.1. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası.....	42
3.1.2. Kırma Kireçtaşı Agregası.....	45
3.2. Agregası karışımlarının hazırlanması.....	47
3.3. Yöntem.....	49
3.3.1. Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini.....	49
3.3.2. Los Angeles Aşınma Direnci Tayini.....	54
3.3.3. Agregası Darbe Değeri Tayini.....	56
3.3.4. Yassılık Endeksi Tayini.....	58
3.3.5. Magnezyum Sülfat Direnci Tayini.....	60
3.3.6. Kompaksiyon Parametrelerinin Tayini.....	62
3.3.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Tayini.....	63
3.3.8. Donma-Çözülme Tayini.....	65
3.3.9. Geçirimsizlik Tayini.....	66
3.3.10. Esneklik Modülü Tayini.....	68
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	74
4.1. Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı.....	74
4.2. Los Angeles Aşınma Direnci.....	79
4.3. Agregası Darbe Değeri.....	81
4.4. Yassılık Endeksi.....	83
4.5. Magnezyum Sülfat Direnci.....	89
4.6. Kompaksiyon Parametreleri.....	91
4.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	94
4.8. Donma-Çözülme Direnci.....	98
4.9. Geçirimsizlik.....	101

4.10. Esneklik Modülü	103
5. SONUÇ.....	112
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ	132



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

M_R	Esneklik Modülü
θ	Toplam gerilme
k_1, k_2, k_3	Regresyon katsayıları
σ_d	Deviator gerilme
σ_{atm}	Atmosfer basıncı
τ_{oct}	Oktahedral gerilme
γ_{kmaks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
W_{opt}	Optimum su muhtevası

Kısaltmalar

Açıklama

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACPA	American College Personnel Association
ASCE	American Society of Civil Engineers
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
CERCLA	Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
EUPG	European Aggregates Association
Eurostat	European Statistics
FHWA	Federal Highway Administration
GDBA	Geri dönüştürülmüş beton agregası
KA	Kırma kireçtaşı agregası
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
LA	Los Angeles
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
WARR	Waste Avoidance and Resource Recover
XRD	X-ışını difraktometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. 2010 ve 2017 Yıllarında agrega üretim miktarları	2
Şekil 2.1. Rijit ve Esnek üstyapılarda yük aktarımı.....	6
Şekil 2.2. Yol üstyapısı enkesiti.....	7
Şekil 2.3. Granüler temel tabakasında kullanılan malzeme ve serilme işlemi	8
Şekil 2.4. Granüler alttemel malzemesi ve serilme işlemi	11
Şekil 2.5. 2012-2016 Yılları arasında inşaat yapım ve yıkım atıkları geri dönüşüm oranlarının Avrupa ülkelerine göre değişimi	15
Şekil 2.6. İnşaat ve yıkıntı atığı yönetim haritası	16
Şekil 2.7. Agrega üretim etki değerlendirmesinin karşılaştırmalı grafiği	32
Şekil 2.8. 1961'den 2014'e kadar Dünya Ekolojik Ayak İzi ve Biyolojik Kapasite değerleri.....	38
Şekil 2.9. Geri dönüştürülmüş beton agregası içerisinde bulunan safsızlıklar	41
Şekil 3.1. Tower Plaza'nın görünümü ve kat kesit planı	43
Şekil 3.2. Silindirik karot numuneleri ve basınç dayanımının belirlenmesi.....	43
Şekil 3.3. Bursa Büyükşehir Belediyesi Küçükbalıklı Geri Dönüşüm Tesisi	44
Şekil 3.4. Beton atıklarının geri dönüşüm prosesi	45
Şekil 3.5. Bursa Beton Fabrikası Kayapa Agrega Ocağı	45
Şekil 3.6. a) Geri dönüştürülmüş beton agregası yüzey görünümü, b) Kireçtaşı agregası yüzey görünümü.....	46
Şekil 3.7. Geri dönüştürülmüş beton agregası ve kırma kireçtaşı agregasının mikroskopik görünümü; a, c, e: Geri dönüştürülmüş beton agregası; b, d, f: Kırma kireçtaşı agregası	47
Şekil 3.8. Karayolları Teknik Şartnamesi Alttemel-Tip A ve Tip B'ye göre hazırlanan karışımın tane çapı dağılım eğrisi	48
Şekil 3.9. a) İri agreganın ince tanelerden temizlenmesi, b) 24 saat suda bekletilmesi, c) Suyu doymuş kuru yüzey agrega, d) etüvde kurutulmuş agrega	51
Şekil 3.10. a) İnce agreganın doymuş kuru yüzey hale getirilmesi, b) Doymuş kuru yüzey agrega, Piknometre + Numune + Su ağırlığının belirlenmesi (c) ve Piknometre + Su ağırlığının belirlenmesi	53
Şekil 3.11. LA aşınma aleti ve deney için hazır hale getirilmesi.....	56
Şekil 3.12. 50GDBA karışımının a) LA aşınma deneyi öncesi, b) LA aşınma deneyi sonrası görünümü	56
Şekil 3.13. a) Agrega darbe değer deney aleti, b) 100GDBA karışımının deneye hazır hale getirilmesi.....	57
Şekil 3.14. Yassılık endeksi belirlenmek için hazırlanan 100GDBA karışımı ve kare gözlü elek üzerinde kalan numuneler.....	59
Şekil 3.15. Yassılık endeksi deneyinde kullanılan silindirik çubuk elekler; a) 16 mm, b) 3.15 mm, c) 2.5 mm	60
Şekil 3.16. Magnezyum sülfat çözeltisine daldırılan agregaların kurutulduktan sonraki görüntüleri a) 100KA karışımı, b)100GDBA karışımı	61
Şekil 3.17. a) Otomatik sıkıştırma aleti, b) %100 Kırma kireçtaşı agregası içeren karışım	63
Şekil 3.18. a) Kaliforniya Taşıma Oranı Deney aleti, b) 50GDBA karışımının CBR deneyi sonrası görünümü	65
Şekil 3.19. Donma-Çözülme kabineye yerleştirilen 100GDBA karışımları	66
Şekil 3.20. Donma-Çözülme numunelerine uygulanan süre-sıcaklık çevrimi	66

Şekil 3.21. Permeabilite deney düzeneği ve 100GDBA karışımı için hazırlanan numune örneği.....	67
Şekil 3.22. Tekrarlı yükler altında elastik ve plastik deformasyonlar	69
Şekil 3.23. Esneklik modülü deneyi cihaz sistemi.....	70
Şekil 3.24. Esneklik modülü deneyi için optimum su muhtevasına sahip kuru karışımın hazırlanması ve sıkıştırılması.....	71
Şekil 3.25. Esneklik modülü deneyi numunenin deney hazır hale getirilmesi ve deney hücresine yerleştirilmesi.....	71
Şekil 4.1. 100KA karışımına kıyasla bağıl su emme oranı değerleri (%).....	77
Şekil 4.2. 48 saatlik su emme oranı sonuçlarına kıyasla bağıl su emme oranı değerleri (%)	78
Şekil 4.3. Karışımların 100KA karışımına kıyasla bağıl Los Angeles Aşınma direnci değerleri (%).....	80
Şekil 4.4. Karışımların 100KA karışımına kıyasla bağıl agrega darbe değeri sonuçları (%)	82
Şekil 4.5. Geri dönüştürülmüş beton agregası tane şekilleri.....	83
Şekil 4.6. 100KA karışımına kıyasla bağıl magnezyum sülfat direnci sonuçları (%)	91
Şekil 4.7. Hazırlanan karışımların Modifiye Proktor eğrileri	93
Şekil 4.8. Hazırlanan karışımların Standart Proktor eğrileri	94
Şekil 4.9. Karışımların kuru CBR deneyi sonuçları	96
Şekil 4.10. Karışımların ıslak CBR deneyi sonuçları	97
Şekil 4.11. Karışımların Kaliforniya Taşıma Oranı (%) ve Değişim yüzdesi	98
Şekil 4.12. Karışımların farklı donma-çözülme çevrimine maruz kaldıktan sonra CBR değeri değişimi(%).....	99
Şekil 4.13. Her karışım için donma-çözünme çevrimine maruz kalmadan ölçülen CBR değerine kıyasla bağıl CBR değerleri (%)	100
Şekil 4.14. Karışımların AASTHO modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri	106
Şekil 4.15. Karışımların MEPDG modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri	107
Şekil 4.16. Karışımların Uzan modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri ..	107
Şekil 4.17. AASTHO, MEPDG ve Uzan modeli esneklik modülü değerleri	108
Şekil 4.18. Farklı toplam gerilme değerleri için AASTHO modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

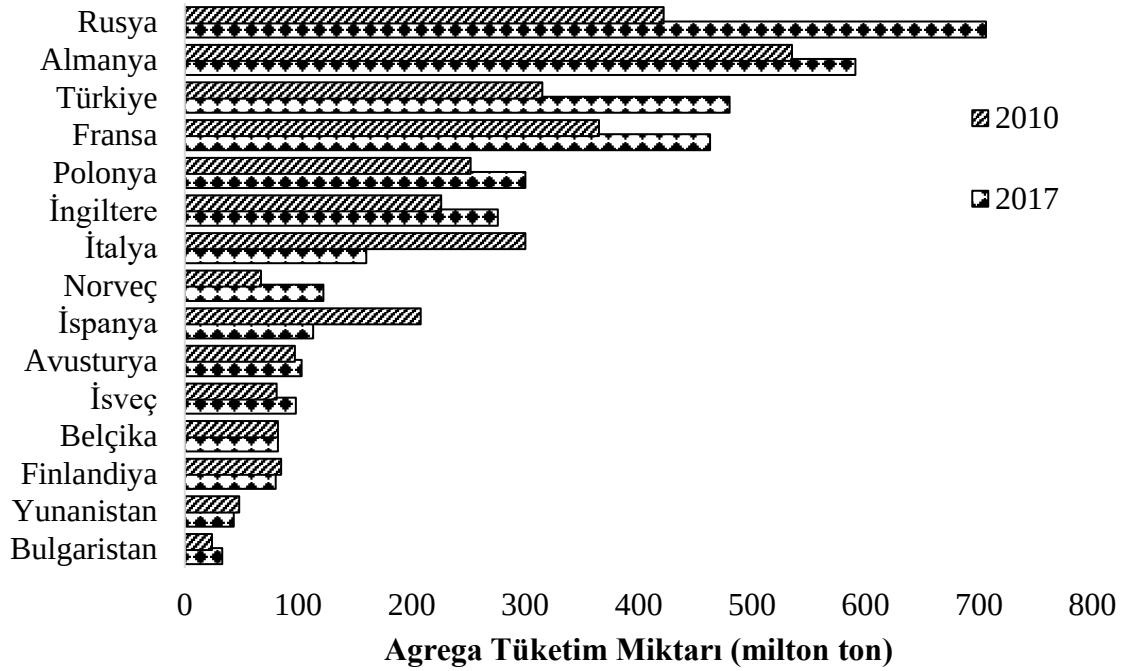
Çizelge 2.1. Karayolları Teknik Şartnamesi granüler temel tabakası için tane çapı dağılımı sınır değerleri	9
Çizelge 2.2. Temel malzemelerinin sahip olması gereken fiziksel özelliklerin sınır değerleri.....	10
Çizelge 2.3. Karayolları Teknik Şartnamesi alttemel tabakası için tane çapı dağılımı sınır değerleri	11
Çizelge 2.4. Alttemel malzemelerinin sahip olması gereken fiziksel özelliklerin sınır değerleri.....	12
Çizelge 2.5. 2010-2016 yılları arasında Avrupa ülkelerinde oluşan inşaat yapım ve yıkım atığı miktarları	14
Çizelge 2.6. Hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atıklarının sınıflandırması.....	25
Çizelge 2.7. Doğal agrega deney sonuçları.....	28
Çizelge 2.8. Geri dönüştürülmüş beton agregası deney sonuçları	29
Çizelge 2.9. Hazırlanan karışımların deney sonuçları	33
Çizelge 2.10. Doğal agrega, karışık geri dönüştürülmüş atık agrega ve geri dönüştürülmüş beton agregasının karakterizasyon sonuçları	39
Çizelge 3.1. Los Angeles Deneyi gerekli numune miktarları ve kullanılacak bilye sayısı	55
Çizelge 3.2. Yassılık endeksi deneyi için di/Di kare gözlü elek aralığına karşılık gelen silindirik çubuk elekler.....	59
Çizelge 3.3. Tip-1 Numunelerine ait yükleme tablosu	73
Çizelge 4.1. İri agrega özgül ağırlık ve su emme oranı deney sonuçları	75
Çizelge 4.2. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme oranı deney sonuçları.....	76
Çizelge 4.3. Agregaların Los Angeles aşınma direnci sonuçları	79
Çizelge 4.4. Agrega darbe değeri deney sonuçları	82
Çizelge 4.5. 100KA karışımı yassılık endeksi deney sonucu	85
Çizelge 4.6. 25GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu	86
Çizelge 4.7. 50GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu	87
Çizelge 4.8. 75GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu	88
Çizelge 4.9. 100GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu.....	89
Çizelge 4.10. Hazırlanan karışımların magnezyum sülfat direnci sonuçları (%)	90
Çizelge 4.11. Hazırlanan temel ve alttemel karışımlarının kompaksiyon deneyi sonuçları	93
Çizelge 4.12. Permeabilite deney sonuçları.....	102
Çizelge 4.13. Esneklik modülü için oluşturulan model denklemleri ve regresyon katsayıları	105

1. GİRİŞ

Sanayi devriminin gerçekleşmesiyle birlikte kentleşme potansiyelindeki artış, teknolojik gelişmeler, endüstriyel alanlardaki yenilikler, insan gereksinimlerinin değişmesi gibi birçok nedenden dolayı inşaat sektörüne olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu ilginin karşılanabilmesi için gerekli olan doğal hammadde yakın gelecekte yeterli olmayacaktır (Öztürk ve ark. 2003). Bu hammaddelerin inşaat amaçlı tedarik edilmesi kaynak tükenmesi, çevresel bozulma ve enerji tüketimi üzerinde olumsuz etki yaratır. İnşaat sektörü hammaddesinin yaklaşık %50'si doğa kaynaklı olup, tüketilen toplam enerjinin %40'ı ve toplam atığın %50'sini oluşturmaktadır (Oikonomou 2005, Silva ve ark. 2019). Doğal kaynakların sınırlı olması ve zamanla insan ihtiyaçlarının karşılanamama riskinin artması, hammaddenin verimli kullanılmasını ve etkin yönetimini gerekli kılar. Gelenen bu noktada ana prensip doğal kaynakların korunması ve kullanımının azaltılmasıdır.

Doğal kaynakların önemli bir tüketicisi olan inşaat sektöründe, en çok kullanılan malzemelerin başında agrega gelmektedir. Betonun ağırlıkça %60-80'i, asfalt döşemelerin %90-95'i ve bağlanmamış granüler tabakaların %100'ü agregadan oluşmaktadır (Öztürk ve ark. 2003, Shi ve ark. 2016). Bu nedenle, dünyada kişi başına en fazla tüketilen malzemeler sırasıyla su ve agregadır (Arıoğlu 2003). Küresel agrega üretimi 2007 yılında 21 milyar ton iken 2014 yılında bu miktar neredeyse iki katına çıkarak 40 milyar tona ulaşmıştır (Tam ve ark. 2018). Son 10 yılda, Asya, Rusya ve Güney Amerika bölgeleri en büyük agrega üreticileri olmuştur (Tam ve ark. 2008). Bu doğrultuda Çin, 2010-2015 dönemlerinde dünya genelinde toplam agrega tüketiminin yarısını oluşturmuştur (Slattery 2014). Avrupa Agregalar Birliği (European Aggregates Association, UEPG) tarafından düzenlenen 2010 ve 2017 yıllarında 15 ülkeye ait agrega üretim miktarları Şekil 1.1'de sunulmaktadır. Şekilden de anlaşıldığı gibi dünya genelinde agregaya olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin Rusya 2010 yılında 422 milyon ton olan agrega üretimini 2017 yılında neredeyse ikiye katlayarak 706 milyon tona çıkarmıştır. Almanya 2017 yılı verilerine göre 591 milyon ton agrega üretimiyle Rusya'dan sonra en çok agrega üreten ikinci ülke olmuştur. Ülkemizde ise son 20 yılda köyden kente göç artışına bağlı inşaat sektöründeki gelişmeden dolayı agrega talebinde ciddi artışlar olmuştur. Buna bağlı olarak 2017 yılında üretilen agrega miktarı 2010 yılına

göre %50 artarak 480 milyon tona ulaşmıştır. Agregâ Üreticiler Birliğı tarafından verilen bilgilere göre 2023 yılında bu rakamın 700 milyon ton seviyelerine çıkacağı öngörülmektedir.



Şekil 1.1. 2010 ve 2017 Yıllarında agrega üretim miktarları (UEPG 2018)

Toplumsal gereksinimler ve taleplerle birlikte altyapı ve konut inşaatı faaliyetleri büyük miktarda yapım ve yıkım atığı oluşturur. İnşaat atıkları, Avrupa'nın en büyük katı atık kaynağıdır. 2014 yılında Avrupa Birliğinde (AB) bulunan 28 ülkede üretilen 871 milyon ton katı atığın %33,5'ini yapım ve yıkım atıkları oluşturmaktadır. Bu değer her geçen gün katlanarak artmaktadır (Eurostat 2019). İnşaat atığı oluşumu açısından AB ülkelerini sırasıyla Çin, ABD ve Hindistan izlemektedir. İnşaat atıklarının içerisinde asbest, yapı kimyasalları, ağır metaller ve zehirli maddeler gibi toprak, su ve havanın kirlenmesine neden olan malzemeler bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu atıkların geri dönüştürülmüş malzeme olarak kullanımı hem çevresel hem de ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Çevresel etkileri ile beraber ekonomik ağırlığı da dikkate alındığında inşaat sektörünün karşı karşıya kaldığı beton atığı problemi son yıllarda birçok araştırmaya konu olmuş, problemin çözülmesine yönelik adımlar atılmaya başlanmıştır.

İnşaat atıklarının %50 - %75'ini oluşturan beton atıklarının geri dönüştürülerek yol temel ve alttemel tabakalarında bağlanmamış granüler bir malzeme olarak kullanılması sürdürülebilir mühendislik uygulamalarının en iyi örneklerinden biridir (Stein ve ark. 1994, Oikonomou 2005, Arabani ve Azarhoosh 2012, Tam ve ark. 2018, Albayati ve ark. 2018, Cardoso ve ark. 2016, Poon ve ark. 2004, Ardalan ve ark. 2017). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde GDBA'nın yol dolgularında kullanılabilirliği yaygın olarak kabul görmüş olup, doğal kaynak tüketiminin önüne geçmek için GDBA'nın esnek üstyapı granüler yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılması konusunda yoğun çaba sarf edilmektedir. Yol kaplama tabakalarında doğal agrega yerine GDBA'nın esnek ve rijit üstyapı sistemlerinde kaplama, temel ve alttemel tabakalarında agrega olarak kullanılması ekonomik ve çevresel faydalara sahiptir. Bu, doğal kaynakları tüketen doğal agregaya daha az bağımlı olmanın yanı sıra inşaat yapım ve yıkım faaliyetleri sonucu oluşan beton atıkların etkili ve sürdürülebilir bir şekilde bertarafını sağlar.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde GDBA'nın elde edildiği kaynak beton basınç dayanımının 0-15 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Ancak çeşitli doğal afetler sonucunda yıkılan yapılardan elde edilen yüksek dayanıma sahip beton atıklarının geri dönüştürülmesiyle oluşan GDBA'ların fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında yeterli bilgi mevcut değildir. Bu amaçla, bu tez çalışması kapsamında basınç dayanımı 35-40 MPa arasında değişen beton blokların geri dönüşümüyle elde edilen GDBA'nın, kırma kireçtaşı agregası (KA) ile birlikte yol üstyapısında granüler yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu çalışmadaki temel amaç; KA ve GDBA'nın mekanik özellikleri ile durabilite performansının karşılaştırılması, GDBA'ların ilgili yönetmeliklerde belirtilmiş limit değerlere uygunluğunun araştırılmasıdır. Yapılan tez çalışması sonucunda hem yüksek dayanıma sahip atık beton agregaların özellikleri belirlenmiş hem de elde edilen sonuçlar KA ile kıyaslanmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılacak GDBA, Bursa Büyükşehir Belediyesi Küçük Balıklı Geri Dönüşüm Tesisinden ve KA ise Bursa Beton Kayapa Agreg Ocağı'ndan temin edilmiştir. GDBA ve KA'nın saf halleri ile %25- %50- %75 oranlarında ikame edilmesiyle 5 farklı karışım oluşturulmuştur. Oluşturulan 5 farklı karışım üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak ve GDBA'nın dayanım, dayanıklılık ve hidrolik

özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, yol üstyapısı temel ve alttemel tabakaları kalınlıklarının hesaplanması aşamalarında girdi değeri olarak kullanılan elastisite modülü değeri belirlenmiştir. GDBA'nın kullanım uygunluğu belirlenirken bölgedeki iklim koşulları da büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde mevsimsel donların görüldüğü bölgelerdeki yol tabakalarının her yıl en az bir donma-çözülme döngüsüne maruz kaldığı bilinmektedir. Donma-çözünme olaylarının sık görüldüğü bu yerlerde agregaların dayanım ve dayanıklılık özellikleri değişmektedir. Bu nedenle, donma-çözülme çevrimleri sonrası hazırlanan karışımların mekanik özelliklerindeki değişimi belirlemek amacıyla temel ve alttemel numuneleri farklı sayılarda donma-çözülme döngülerine maruz bırakılmış ve donma-çözülme sonrası dayanım özelliklerindeki değişim CBR değerlerindeki değişim ele alınarak belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen deney sonuçlarının Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) granüler yol temel ve granüler yol alttemel malzemesi olarak GDBA'nın gerekli şartlara uygunluğu belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

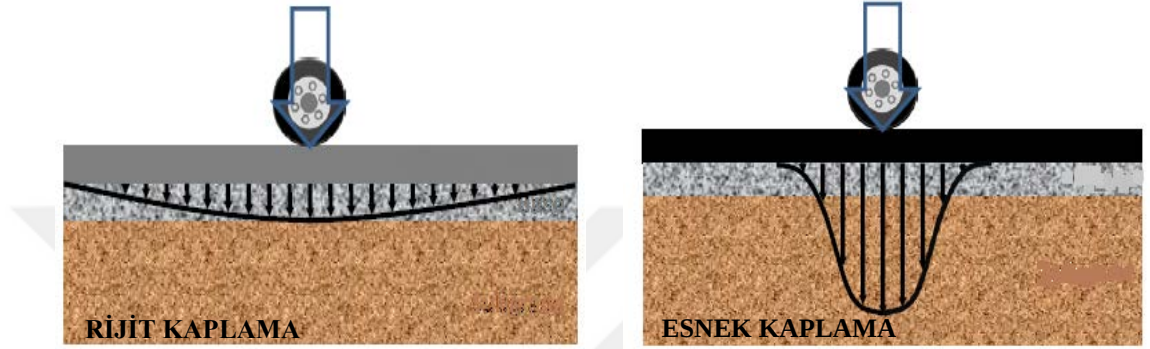
Karayolları Teknik Şartnamesi (2013)'e göre karayolu; trafik akışına imkân sağlamak üzere tüm kara taşıtları ve yaya ulaşımı için güvenlik parametrelerini de göz önünde bulundurarak standartlara göre yapılmış, kamu hizmetine açık arazi şeritleri, köprüler, sanat yapıları, tüneller ve diğer alanlardır.

Önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak seçilmiş olan bir güzergâh boyunca, doğal zeminin projede belirtilen yükseltilere getirilebilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü karayolu yapısı olarak tanımlanmaktadır. Karayolu yapısı özellikleri, yapım sırası ve görevi açısından altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır (Ilıcalı ve ark. 2001). Dolgu, yarma gibi toprak işleri ve istinat duvarı, köprü, menfez gibi sanat yapıları altyapı olarak kabul edilmektedir. Üstyapı ise taşıtlardan kaynaklanan trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değerlere indirmek, düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak ve altyapıyı korumak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan yol yapısıdır (Ağar ve Umar 1985).

Karayolu üstyapısı kaplama tabakasında kullanılan malzemelere (çimento veya bitüm) ve yapım tekniklerine göre rijit ve esnek üstyapı olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Yol projelendirme aşamasında taban zemini, çevre şartları, trafik yükü ve ekonomik faktörler dikkate alınarak uygun üstyapı tipi seçilmektedir. Beton yol olarak da adlandırılan rijit üstyapı taban zemini üzerine inşa edilen beton plakalardan oluşur. Rijit üstyapılarda betonun yüksek elastisite modülü ve taşıma kapasitesi sayesinde uygulanan tekerlek yükleri beton plak tarafından karşılanmaktadır. Esnek üstyapı ise üzerine gelen trafik yüklerini tabakalar vasıtasıyla oturduğu taban zeminine ileten nitelik ve taşıyıcılık bakımından en alt tabakadan en üst tabakaya doğru malzeme özelliklerinin iyileştiği üstyapı tipidir. Esnek üstyapılarda bağlayıcı malzeme olarak bitüm kullanılmaktadır.

Esnek ve rijit üstyapılarda tekerlek yükü altında oluşan yük dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Rijit üstyapıya uygulanan yükler beton plaka tarafından karşılanıp geniş

bir yüzeye yayılırken, asfalt kaplamalı esnek bir üstyapı ise gelen tekerlek yüklerini temel ve alttemel tabakalarına aktararak doğal zemine iletilmesini sağlamaktadır. Alt zemin mukavemetindeki küçük değişikliklerin rijit kaplamanın yapısal kapasitesi üzerinde çok az etkisi olurken, esnek üstyapılarda temel zemininde meydana gelen herhangi bir bozulma veya yer değiştirme taban rotasına yansımakta ve kaplama tabakasına doğru devam etmektedir.



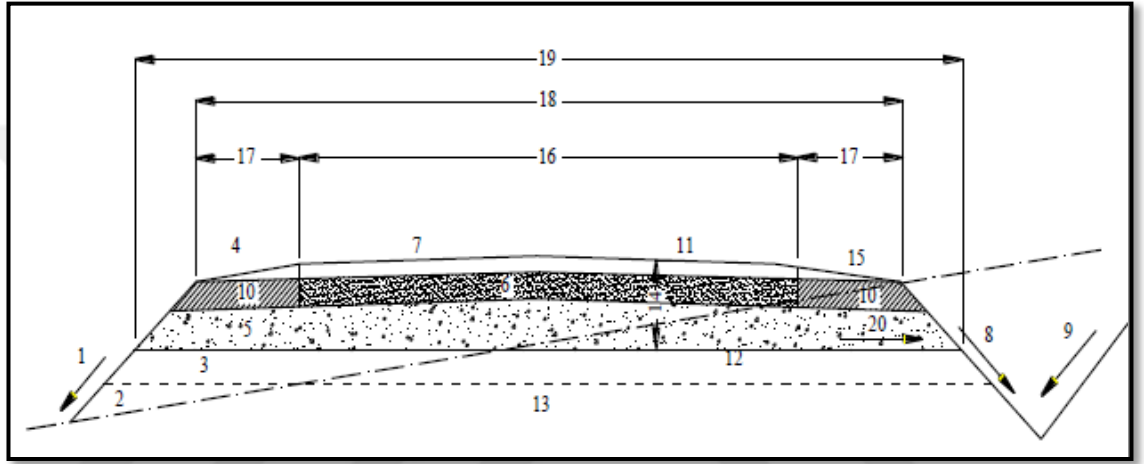
Şekil 2.1. Rijit ve Esnek üstyapılarda yük aktarımı

Esnek ve rijit üstyapıların birbirine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada esnek üstyapı tasarımında granüler temel ve alttemel tabakalarında geri dönüştürülmüş beton atıklarının agrega olarak kullanılabilirliği KTŞ'ye göre incelenmiştir.

2.1. Karayolu Esnek Üstyapısı

Esnek kaplama asfalt veya bitümlü malzeme ve alt tabaka üzerinde katmanlar halinde uygun kalitede sıkıştırılmış granüler malzeme üzerine yerleştirilmiş agregaların bir karışımından oluşan yapı olarak tanımlanmaktadır. Esnek üstyapı tasarımı, herhangi bir büyüklükteki bir yük için, yükün yoğunluğunun giderek daha geniş bir alana yayılarak, art arda gelen granüler malzeme katmanları aracılığıyla zemine aktarıldığı ve yüzeyden aşağı doğru iletildiği için azaldığı ilkesine dayanmaktadır. Bu nedenle üstyapı tabakalarında kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri gerilme dağılışına uygun olarak seçilmelidir (Sağlık ve Güngör 2008).

Tipik bir esnek kaplama yapısı Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Esnek üstyapı sıkıştırılmış temel zemini üzerine inşa edilen ve tekerlek yüklerini taban zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde aktaran aşınma tabakası, binder tabakası ile granüler malzemelerden oluşan temel ve alttemel tabakalarından oluşmaktadır. Bu tabakaların kalınlıkları proje ömrü, trafik hacmi, mevcut malzeme durumu ve taban zemininin özellikleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Yolun stabilizesi ise kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi özelliklerine bağlıdır.



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

Şekil 2.2. Yol üstyapısı enkesiti (Karayolları esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi 2008)

2.1.1. Temel Tabakası

Kaplama tabakası ile alttemel tabakası arasında bağlantıyı, yük dağılımını ve düzgünlüğü sağlayan, yola gelen yükleri taşıyan ve alttemel veya yol tabanına aktaran tabakadır (KTŞ 2013). Temel tabakasının görevi yüzeye uygulanan tekerlek yüklerini alt tabakalara kaplama sistemi boyunca dağıtarak tabanda meydana gelecek kesme ve oturma deformasyonlarının oluşmasını önlemektir. Bu nedenle temel tabakasında kullanılacak

malzemeler tekrarlı yükler altında oluşacak deformasyonlara dayanıklı olmalı ve aşınmamalıdır. Ayrıca temel tabakasının suyun drene edilmesi, don etkisini azaltmak ve kaplamanın taşıma kapasitesine katkıda bulunmak gibi fonksiyonları da bulunmaktadır.

Karayollarında, çimento bağlayıcılı granüler temel, plent-miks temel ve granüler temel olmak üzere üç farklı temel tipi kullanılmaktadır. Plent-mix temel, şartnamede belirtilen fiziksel özellikleri sağlayan ve iyi derecelenmiş agregaların uygun oranda su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin serilerek sıkıştırılmasından oluşmaktadır. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasında ise KTŞ'de belirtilen gradasyonda hazırlanan malzemeler uygun oranda çimento ve su ile karıştırılmakta ve bir veya birden fazla tabakalar halinde serilerek sıkıştırılmaktadır. Granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl veya kırmataş ile ince malzemelerin optimum su muhtevasında karıştırılarak taşıma gücü yeterli temel zemini veya alttemel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde projede belirtilen koşullara uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşan tabakadır (KTŞ 2013). Şekil 2.3'te temel tabakasında kullanılan malzeme ve serilme işlemine ait bir görsel verilmiştir. Bu çalışma kapsamında granüler temel tabakası incelenmiş olup, GDBA ve KA'nın KTŞ'ye göre granüler yol temel tabakasında kullanılabilirliği araştırılmıştır.



Şekil 2.3. Granüler temel tabakasında kullanılan malzeme ve serilme işlemi
(<https://pavementinteractive.org/>)

KTŞ, temel tabakasında kullanılacak malzemelerin tane çapı dağılım eğrisi kullanım yerine göre Tip A, Tip B ve Tip C olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Asfalt betonu ile

kaplanacak yollarda ve sahti kaplamalı devlet yollarında granüler temel tabakası tane çapı dağılımının Tip A veya Tip B gradasyonuna uygun olması gerekmektedir. Sahti kaplamalı yapılacak il yollarında ise proje koşulları dikkate alınarak temel tabakası A, B ve C tipi tane çapı dağılımlarından birinin kullanılabileceği belirtilmiştir. Granüler temel tabakasında kullanılacak tane çapı dağılımları üst ve alt sınır değerleri ile birlikte Çizelge 2.1’de verilmiştir. Proje kapsamında araştırmanın geniş bir uygulama alanını kapsamaması ve arazide uygulanabilir olması için granüler temel tabakasının tane çapı dağılımı Tip A ve Tip B gradasyonlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.1. Karayolları Teknik Şartnamesi granüler temel tabakası için tane çapı dağılımı sınır değerleri (KTŞ 2013)

Elek Açıklığı (mm)	Geçen Yüzde (%)		
	Tip A	Tip B	Tip C
50	100		
37,5	80 - 100	100	
25	60 - 90	70 - 100	100
19	45 - 80	60 - 92	75 - 100
9,5	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4,75	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0,425	8 - 20	10 - 25	12 - 30
0,075	2 - 8	0 - 12	0 - 12

Tane çapı dağılımına uygun olarak hazırlanmış temel malzemelerinin Çizelge 2.2’de belirtilen KTŞ (2013) limit değerlerini sağlaması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında GDBA ve KA kullanılarak hazırlanan karışımların şartname limitlerine uygunluğu araştırılmıştır.

Çizelge 2.2. Temel malzemelerinin sahip olması gereken fiziksel özelliklerin sınır değerleri (KTŞ 2013)

Deney Adı	Şartname Limitleri
Yassılık Endeksi, %	≤ 25 (FI ₂₅)
Los Angeles Aşınma Direnci, %	≤ 35 (LA ₃₅)
Su emme, % (İnce ve İri Arega)	≤ 3 (WA ₂₄₃)
Likit Limit, %	NP
Plastisite İndeksi, %	NP
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, MgSo ₄ ile kayıp, %	≤ 20 (MS ₂₀)

2.1.2. Alttemel Tabakası

Trafik yükünü taban zeminin üzerine dağıtmak ve su etkilerine karşı tampon görevi üstlenmek amacıyla ince tesviyesi tamamlanmış dolgu veya yarmadan oluşan taban zemini üzerine bir ya da birden fazla tabakalar halinde yerleştirilen, belirli fiziksel özelliklere sahip granüler malzemelerin optimum su muhtevasında sıkıştırılmasıyla oluşan üstyapı tabakasıdır (KTŞ 2013). Alttemel tabakası drene olabilen, düşük mukavemet ve elastisite modülü özelliklerine sahip granüler malzemelerden oluşmaktadır. Bazı durumlarda, alttemel tabakasının özellikleri iyileştirmek için Portland çimentosu, asfalt, kireç, uçucu kül veya bu katkıların kombinasyonları ile granüler malzemeler karıştırılarak kullanılmaktadır (FHWA 2014). Alttemel tabakasının esas görevi üstteki tabakalara yapısal olarak destek sağlamaktır. Ayrıca, bu tabaka üstyapıdan gelen trafik yüklerini temel tabakasına üniform bir şekilde aktarmak, şişme, büzülme, don kabarması gibi hacimsel değişikliklere karşı koymak, üstyapı sistemine girebilecek serbest su için drenaj sağlanmak ve temel tabakası zemin danelerinin temel katmanına girişinin önlenmesi gibi görevleri bulunmaktadır.

KTŞ'ye göre alttemelde kullanılacak malzemeler Tip A ve Tip B olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Alttemel malzemesi, kum-çakıl ocaklarından temin edildiğinde malzemenin tane çapı dağılımının Tip A limitlerine uygun olması gerekmektedir, aksi halde bu tane çapı dağılımı limitlere uymayan malzemelerin elenerek Tip A gradasyonuna uygun hale getirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Alttemel malzemesi, kum-çakıl veya taş ocaklarından kırılarak hazırlanması durumunda ise malzemelerin tane çapı dağılımının

Tip B gradasyon limitlerine uygun olması gerektiği belirtilmiştir. Alttemel tabakasında kullanılan malzemeye ve serilmesine ait görsel Şekil 2.4’te sunulmaktadır.



Şekil 2.4. Granüler alttemel malzemesi ve serilme işlemi
(<https://pavementinteractive.org/>)

Çizelge 2.3. Karayolları Teknik Şartnamesi alttemel tabakası için tane çapı dağılımı sınır değerleri (KTŞ 2013)

Elek Açıklığı (mm)	Geçen Yüzde (%)	
	Tip A	Tip B
75	100	—
50	—	100
37,5	85 - 100	80 - 100
25	—	60 - 90
19	70 - 100	45 - 80
9,5	45 - 80	30 - 70
4,75	30 - 75	25 - 55
2	—	15 - 40
0,425	10 - 25	10 - 20
0,075	0 - 12	0 - 12

Alttemel tabakasında kullanılacak Tip A ve Tip B türü malzemelere ait tane çapı dağılımı üst ve alt sınır değerleri Çizelge 2.3’te sunulmaktadır. Tane çapı dağılımına uygun olarak hazırlanmış alttemel malzemelerinin KTŞ’de belirtilen kriterleri sağlaması gerekmektedir (Çizelge 2.4). Ayrıca alttemel tabakasının kalınlığı nedeniyle birden fazla tabakalar

halinde serilmesi durumunda tabaka kalınlıklarının birbirine eşit ve her tabakanın optimum su içeriğinde sıkıştırılması gerektiği KTŞ'de belirtilmektedir. %98 Modifiye Proktor sıkılığında hazırlanmış tabakaların ıslak Kaliforniya Taşıma Oranı değerleri Tip A türü malzemeler için minimum %30, Tip B için ise en az %50 olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında GDBA ve KA kullanılarak hazırlanan alttemel numunelerinin şartname limitlerine uygunluğu araştırılmıştır.

Çizelge 2.4. Alttemel malzemelerinin sahip olması gereken fiziksel özelliklerin sınır değerleri (KTŞ 2013)

Deney Adı	Şartname Limitleri
Yassılık Endeksi, %	≤ 35 (FI ₃₀)
Los Angeles Aşınma Direnci, %	≤ 45 (LA ₄₅)
Su emme, % (İnce ve İri Agregası)	$\leq 3,5$ (WA _{243,5})
Likit Limit, %	≤ 25
Plastisite İndeksi, %	≤ 6
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık, MgSO ₄ ile kayıp, %	≤ 25 (MS ₂₅)

2.2. İnşaat ve Yıkıntı Atığı Yönetimi

İnşaat sektörü için doğal kaynakların tüketilmesinin yanı sıra, mevcut ve yapılmakta olan yapıların yapım ve yıkımları sonucunda ortaya çıkan atıkların depolanması da ayrı bir sorun teşkil etmektedir. Atık Depolama Sınıflandırması ve Atık Tanımları (Aralık 2009) yönetmeliğine göre yapım ve yıkım atıkları, inşaat, yenileme veya yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan atık malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Ancak, Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliğine (2004) göre, inşaat faaliyetleri sonucu oluşan atıkları inşaat ve yıkıntı atıkları olmak üzere iki kısma ayırmıştır. Bu yönetmeliğe göre konut, bina, köprü, yol ve benzeri alt ve üst yapıların yapımı esnasında ortaya çıkan atıklar inşaat atıklarını oluşturmakta, bu yapıların tamirat, tadilat, yenilenmesi, yıkımı veya doğal bir afet sonucunda ortaya çıkan atıklar ise yıkıntı atıklarını oluşturmaktadır. Bu atıklar, beton, sıva, tuğla, briket, asfalt, metal, kereste, duvar, cam, plastik ve asfalt gibi yapı malzemelerini içermektedir.

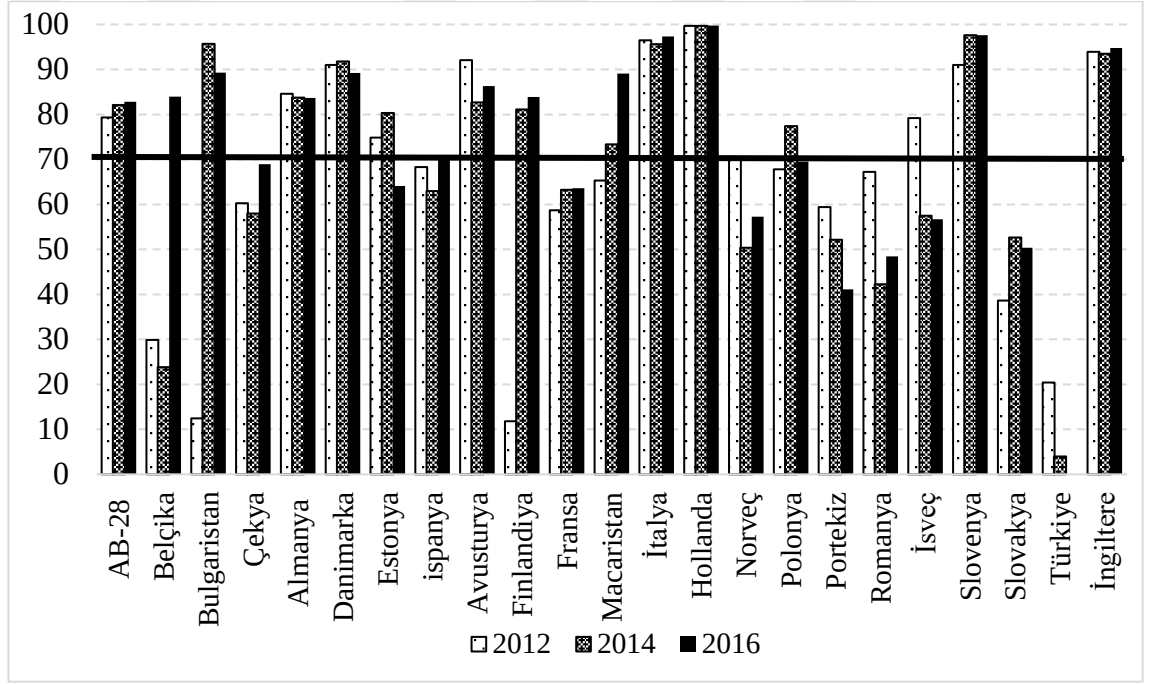
Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, doğal kaynakların aşamalı olarak tükenmesi ve sürdürülebilir atık yönetimi konusunda geri dönüşümü ve yeniden kullanımı için giderek artan bir ilgi göstermektedir. Bu nedenle, doğal kaynaklarını verimli bir şekilde kullanmak ve çevrenin korunmasına yardımcı olmak için farklı yollarla (yasa, yönetmelik vb.) farkındalık yaratarak inşaat yapım ve yıkım atığı artışının önüne geçerek, bu atıklardan yararlanma oranını artırmayı hedeflemişlerdir. Daha önce de vurgulandığı gibi inşaat atıkları, Avrupa'nın en büyük katı atık kaynağını oluşturarak, toplam atığın yaklaşık üçte birini temsil etmektedir (Eurostat 2019). Avrupa İstatistik Ofisi (Eurostat 2019) tarafından hazırlanan 2010-2016 yılları arasında Avrupa ülkelerinde oluşan inşaat yapım ve yıkım atığı miktarları Çizelge 2.5'te özetlenmiştir. Almanya, İngiltere ve İtalya'nın en çok inşaat atığı üreten ülkeler olduğu Çizelge 2.5'ten anlaşılmaktadır.

Çizelge 2.5. 2010-2016 yılları arasında Avrupa ülkelerinde oluşan inşaat yapım ve yıkım atığı miktarları (Eurostat 2019)

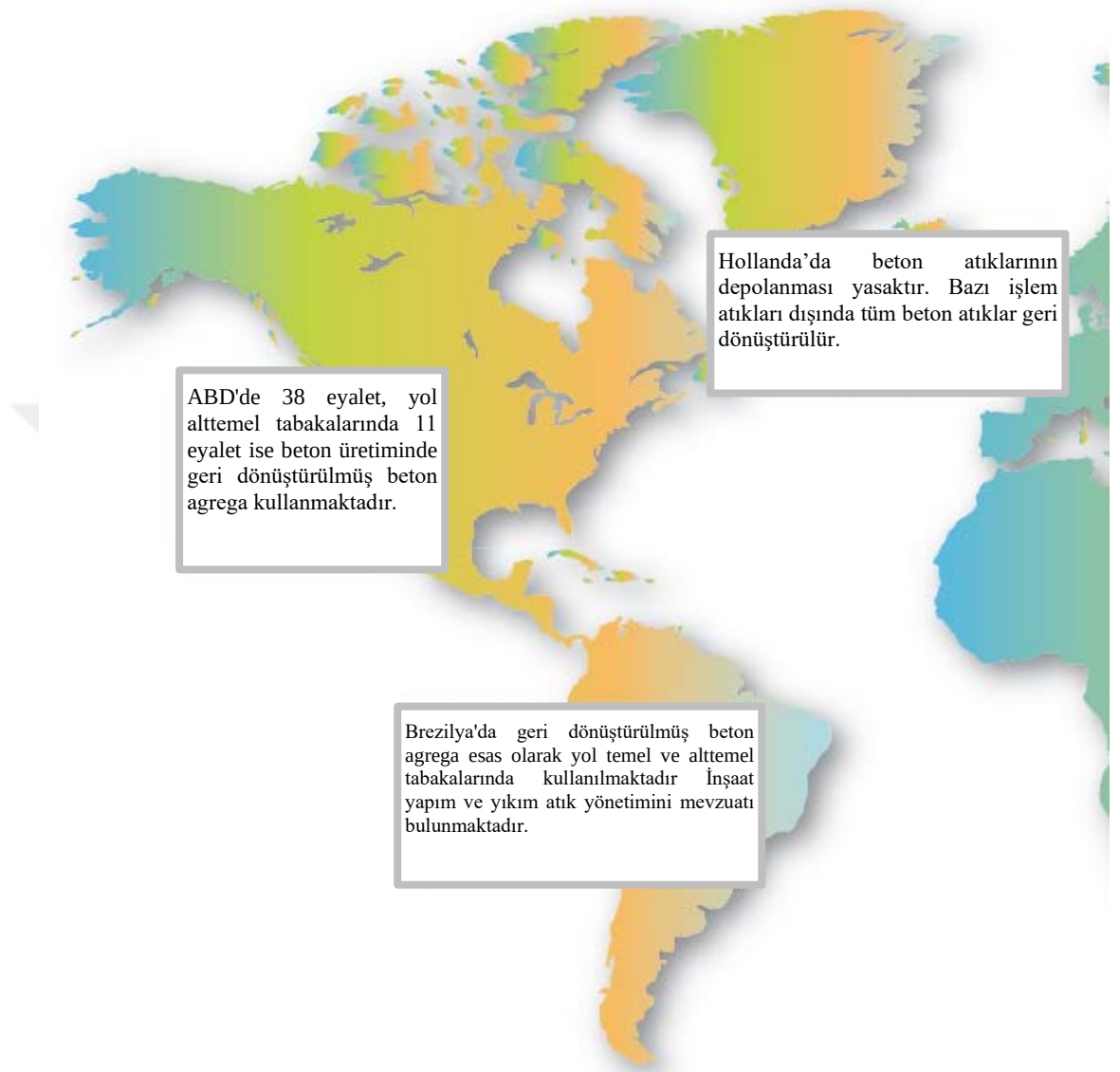
Ülkeler	Üretilen İnşaat ve Yıkıntı Atığı Miktarı (ton)			
	2010	2012	2014	2016
Avusturya	5.908.180	6.285.962	9.160.040	10.009.516
Belçika	123.515	243.167	222.219	472.985
Bulgaristan	48.877	487.036	682.013	611.674
Çekya	2.986.424	3.502.831	3.583.425	4.893.384
Almanya	74.824.387	75.561.613	76.384.581	83.796.189
Danimarka	2.188.962	2.743.145	3.297.001	3.471.625
Estonya	608.427	543.081	724.210	509.531
İspanya	11.383.724	27.393.121	7.097.160	9.148.448
Finlandiya	24.787.784	4.370.197	1.727.279	2.057.185
Fransa	65.061.585	61.818.603	60,551,785	63.998.536
Macaristan	2.374.434	1.923.520	2.415.994	2.580.731
İtalya	31.130.088	30.865.123	31.389.371	34.092.663
Hollanda	20.079.722	19.420.519	18.892.255	19.409.926
Norveç	330.928	840.152	1.964.564	2.366.510
Polonya	3.173.454	3.016.359	5.109.453	3.730.719
Portekiz	526.638	576.904	503.805	879.274
Romanya	881.671	787.277	657.901	1.156.358
İsveç	801.565	627.599	1.017.767	1.480.338
Slovenya	686.217	312.540	524.347	596.321
Slovakya	499.762	435.228	435.389	408.993
Türkiye	97.359	277.518	497.156	152.187
Birleşik Krallık	53.018.460	49.817.511	56.175.681	60.336.741

Tüm bu bilgiler sayesinde atık miktarının zamanla ciddi mertebede arttığı anlaşılmıştır. Bu atıkların yakma ve düzenli depolama gibi atık bertaraf yöntemleri dışında uygun bir yöntemle ayrıştırılarak geri dönüştürülüp yeniden kullanım sistemine kazandırılmasının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu bağlamda AB atık yönetim politikasının ana unsuru atığın önlenmesinin yanı sıra oluşan atıkların geri dönüşümünün teşvik edilmesidir. Böylece oluşması kaçınılmaz olan atığın kaynak olarak kullanımı ve ek doğal kaynakların çıkarılmasının asgari düzeye indirilmesiyle kaynak verimliliği ve sürdürülebilir büyüme

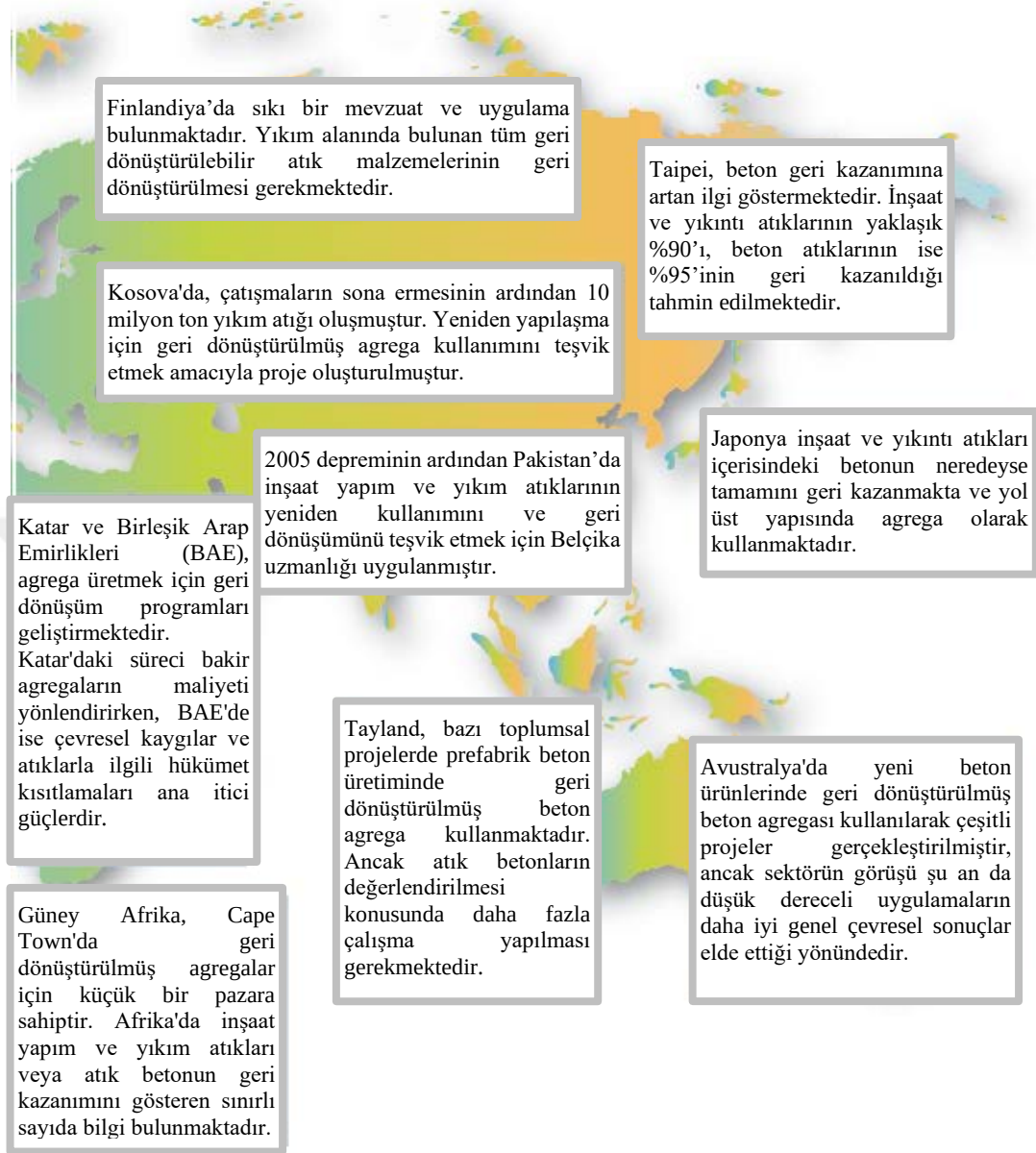
hedeflenmektedir. Söz konusu atıklar yüksek geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyeline sahip olup, son yıllarda ayırma ve geri kazanım piyasaları oldukça gelişmiştir. AB Atık Çerçeve Direktifi (2008/98/EC) 11. maddesinde inşaat ve yıkıntı atıklarının 2020 yılına kadar ağırlık olarak %70 oranında yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi hedefi konulmuştur (Şekil 2.5). 17 Üye ülkede inşaat atığının geri kazanım oranının %90'ın üzerinde olduğu, Hollanda, İrlanda, Malta ve Lüksemburg'da bu atıkların %95'inin geri dönüşümünü sağladığı rapor edilmiştir. Ancak 2014 yılında sadece 7 ülkenin bu %70'lik hedefi sağlamadığı Şekil 2.5'ten anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 2.6'da ülkelerin inşaat ve yıkıntı atığı yönetim haritası sunulmaktadır. Buradan da AB ülkelerinin atık yönetimi konusunda başarılı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.5. 2012-2016 Yılları arasında inşaat yapım ve yıkım atıkları geri dönüşüm oranlarının Avrupa ülkelerine göre değişimi (Eurostat 2019)



Şekil 2.6. İnşaat ve yıkıntı atığı yönetim haritası (Cement Sustainability Initiative 2009)



Şekil 2.6. İnşaat ve yıkıntı atığı yönetim haritası (Cement Sustainability Initiative 2009)
(devamı)

2.2.1. Dünyada İnşaat ve Yıkıntı Atığı Yönetimi

Japonya'da atık yönetimi 1950'li yıllarda başlamasına rağmen 2000'li yılların başında atık yönetim planları güncellenmiş ve atıklar gruplandırılmıştır (Yonetani t.y). 1960-1970 yılları arasında ekonomik gelişmenin bir sonucu olarak kentlerde meydana gelen hızlı nüfus artışı beraberinde büyük miktarda inşaat ve yıkıntı atığı ortaya çıkmasına neden

olmuştur. Hükümet, inşaat ve yıkıntı atığı yönetimini inşaat şirketlerine bırakmış fakat atık bertaraf alanlarına sahip olmayan şirketler, atıkları; boş arazilere, sokaklara veya nehirlerle yasadışı olarak boşaltmıştır. Bu sorunların üstesinden gelmek ve kaynakların etkin kullanımını sağlamak amacıyla Japonya’da geri dönüşümü bir kültür haline getirme hedefini taşıyan Geri Dönüşüm Toplum Yasası (Recycled Society Act) çıkarılmıştır. Bu yasayla birlikte yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir atıklar tanımlanmış olup, geri dönüşümün mecburi olduğu inşaat alanlarında ayrıştırma yapılması zorunlu tutulmuştur (Gao 2006). Ardından 2001 yılında çıkarılan Yeşil Satın Alma Yasası (Green Purchasing Act) ile hükümetin kamusal kullanıma ait yapıların inşasında çevre dostu ve yapım-yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. İnşaat atıklarının yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi üzerine getirilen bu düzenlemelerden sonra 2012 yılında inşaat ve yıkıntı atıklarının %85’ni, beton atıkların ise %90’ından fazlası geri dönüştürülerek kullanılmıştır. Günümüzde, Japonya yapısal atıklar konusunda çalışmalarını güçlü bir malzeme döngüsü kurulmasını ve yasadışı çöplük düzenlenmesini amaçlayan 3R prensibi (azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür) üzerine kurgulamaktadır. Böylece geri dönüşüm oranını %95 mertebesine kadar yükseltmiştir (Gao 2018, Japonya’da Atık Yönetiminin Tarihçesi ve Mevcut Durumu 2014).

En çok yapım ve yıkım atığı oluşturan ülkelerden biri Amerika Birleşik Devletleri’dir. ABD’de artan çevre kirliliği nedeniyle çevresel düzenlemelerin yürütülebilmesi amacıyla 1970 yılında Çevre Koruma Ajansı (EPA) kurulmuştur. EPA tarafından 1976 yılında Kaynak Koruma ve Kurtarma Yasası çıkartılmış ve bu yasa ile birlikte tehlikeli olmayan katı atıkların inşaat, yıkım, azaltma, düzenli depolama, çevre ve güvenlikle ilgili etkin yönetiminde kayda değer gelişmeler yaşanmıştır. Ayrıca bu yasa eyaletlere kendi atık yönetimine dayalı düzenlemelerini geliştirmeleri ve uygulamaları için ilham vermekle birlikte birincil rollerini tanımlamamaktadır (Jin ve Chen 2019, EPA 2019a, EPA 2019b). Kapsamlı Çevresel Müdahale Tazminat ve Sorumluluk Yasası’yla (CERCLA) birlikte, atıkların bertaraf edilmesi kadar üretilen inşaat yapım ve yıkım atığı miktarının da önemli bir parametre olduğu kabul edilmiştir ve müteahhitler inşaat atık faaliyetlerini yürütmekten ve yönetmekten sorumlu tutulmuştur (Clark ve ark. 2006).

ABD’de inşaat yapım ve yıkım atıkları toplam katı atıkların ağırlıkça %25-45’ini oluşturmaktadır (Gruzen Samton LLP 2003). EPA’nın 2015 yılında yayınladığı Atık Karakterizasyonu Raporu’na göre 2013 yılında 532 milyon ton, 2014 yılında 539 milyon ton ve 2015 yılında ise 548 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluşmuştur. İnşaat ve yıkıntı atığı kapsamında toplanan atık malzemelerin %70’i beton, %15’i yol betonu, %7’sini ahşap ürünler oluşturmuştur (EPA 2015). Yapım ve yıkım atıkları arasında en fazla yüzdeye sahip olan beton atıkları geri dönüştürülme konusunda önceliğe sahiptir. Bu amaçla bu atıkların değerlendirilmesi için pilot projeler yürütülmektedir. EPA, atık yönetimin azalt, yeniden kullan, geri dönüştür, yeniden satın al olan 4R prensibi ile tanımlamıştır. ABD, atık yönetimine diğer ülkelerden farklı olarak tüketicileri geri dönüştürülmüş atık malzemelere yönlendirmek için yeniden satın al prensibini eklemiştir. Ayrıca ABD’de geri dönüşüm verimini arttırmak için yıkım rehberleri de bulunmaktadır. Sürdürülebilir Malzeme Yönetimi’nin bir parçası olan Kapsamlı Satın Alma Rehberi programı, yeni malzeme kullanımını ve malzemelerin yaşam döngüsü üzerindeki çevresel etkileri azaltmak için EPA tarafından geliştirilmiştir. Kapsamlı satın alma rehberi, atık akışından geri kazanılan malzemelerin kullanımı teşvik etme amacıyla ortaya çıkmıştır. Yıkım rehber ile birlikte; geri kazanılan malzemelerle yapılan ürünlerin satın alınması ve geri dönüşüm programlarında toplanan malzemelerin yeni ürünlerin üretiminde tekrar kullanılmasını sağlamaktadır.

Çin 2012 yılında 1 milyar ton ve 2014 yılında 1,13 milyar tona ulaşan inşaat atığıyla dünyada en çok inşaat atığı üreten ülke olmuştur (Lu 2014). Ülke genelinde yapılan çalışmalarda resmi kayıtlara göre inşaat yapım ve yıkım atıkları, yılda 1,5 milyar ton ile toplam atık miktarının %30-40’ını oluşturmaktadır. Genel olarak rasyonel kentsel planlama eksikliği ve “kısa ömürlü” bina (ortalama ömür 35 yıl) tasarımı nedeniyle, belediye inşaatları sıklıkla tekrar edilmekte ve bu durum çok sayıda inşaat ve yıkıntı atığıyla sonuçlanmaktadır (Jin ve Zhao 2008). Mevcut düzenlemeler bu atıkların merkezi olarak depolanmasını ve işlenmesini gerektirse de Çin’deki yapım ve yıkım atıklarının büyük bir bölümü rastgele çöp sahalarına atılmaktadır (Gao ve ark. 2012). Ayrıca, altyapı inşaatlarından üretilen büyük miktarlardaki inşaat atıkları kentsel alanlardan kırsal alanlara aktarılmaktadır. Ortalama geri dönüşüm oranının ise yaklaşık %5 olduğu rapor edilmiştir (Huang ve ark. 2018, Gao 2018).

Çin’de inşaat ve yıkıntı atıkları yönetimiyle ilgili ilk düzenleme “şehir görünümü ve çevresel sanitasyon yönetimi düzenlemeleri” adı altında Mayıs 1995’te yayınlanmıştır. Bunu takiben, İskân ve Kentsel-Kırsal Kalkınma Bakanlığı ve diğer yönetim organları tarafından birkaç ilgili politika yayınlanmıştır. Ancak tüm bu düzenlemelere rağmen, Çin’deki çoğu şehirde inşaat atıklarının ortalama geri dönüşüm oranı %3 ile %10 arasında olduğu bilinmektedir. Örneğin, Pekin’de 2014 yılında yaklaşık 40 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı üretildiğini bunun %74’ü doğrudan depolama sahalarına atılırken %3’ten daha az bir kısmı işlendiği veya geri dönüştürüldüğü belirtilmiştir (Zuo ve ark. 2011). Geri dönüştürülen malzemelerin daha çok ekonomik değeri yüksek olan bakır ve çelik olduğu, beton ağırlıklı atıkların ise atık sahalarına dökülerek bertaraf edildiği belirtilmiştir (Zhao ve ark. 2008). Şanghay’da ise iki adet geri dönüşüm tesisi bulunmakla birlikte, inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşüm oranı yaklaşık %20’dir (Çin’in İnşaat Atıkları Bertarafının Mevcut Durumu ve Beklentisi Üzerine Araştırma Raporu 2015). 2014 yılında Şanghay’da 144 milyon ton inşaat yapım ve yıkım atığı üretildiği bildirilmiştir. İnşaat atıklarının Şanghay’daki çöp sahalarına boşaltım oranı yaklaşık %70-80 olarak bildirilmiştir (Çin İstatistik Yıllığı 2015). Atıkların bir kısmı (yaklaşık %10) doğrudan veya bazı fabrikalar için yakıt olarak değerlendirilmekte bir kısmı ise deniz ıslah çalışmaları için kullanılmaktadır. Atıklar yerinde ayırma işleminden sonra üç farklı yöntem (doğrudan geri dönüştürme, işlendikten sonra geri dönüştürme veya özelliklerine göre çöpe atılma) kullanılarak işlenmektedir. Çin’de inşaat ve yıkıntı atıklarının yeniden kullanımının önündeki engellerin; etkili atık toplama ve ayırma için rehberlik eksikliği, geri dönüştürülmüş atıklar için bilgi ve standart eksikliği ve az gelişmiş pazar olduğu bildirilmiştir (Huang ve ark. 2018).

Avustralya’da atık yönetim sistemi, merkezi hükümet sisteminden ziyade eyaletler ve bölgeler tarafından ele alınmaktadır (Andrews ve ark. 2009). 2013-2014 yılları arasında 3,2 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluşmuştur. Bu atıkların yaklaşık %38’i (1,2 milyon ton) geri dönüştürülmüştür. 2016 yılında, bu oran %57’ye artmıştır. Geri kazanılan malzemelerin %85’i beton, tuğla, asfalt ve kum, temiz dolgu ve molozdan oluştuğu rapor edilmiştir. Bu malzemelerin beton üretimi, drenaj malzemesi, yol dolgusu gibi alanlarda değerlendirildiği anlaşılmıştır. Hükümet geri dönüşüm oranını artırmak ve doğal dengeyi korumak için 2007 yılında Atıktan Kaçınma ve Kaynak Kurtarma Yasasını (WARR

Yasası) çıkarmıştır. Bu amaçla 2018 yılında atık malzemelerin depolama vergi ücretini arttırılmıştır. Bu düzenlemelerle birlikte 2018-2019 yılında inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşüm oranı %87 olmuştur (Batı Avustralya Hükümeti 2016).

Brezilya'da inşaat sektörü gayri safi yurtiçi hasılanın yaklaşık %14'ünü oluşturmakta ve toplam tüketimin yaklaşık %20-%50'si ile doğal malzemelerden temin edilmektedir (Paz ve Lafayette 2016). Brezilya belediyelerinin, depolama ve yasa dışı bertaraf alanlarından yılda 45 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı topladığı tahmin edilmektedir. Brezilya'daki belediyelerin yaklaşık %90'ını küçük ölçekli şehirler temsil etmektedir. Tüm şehirlerde, resmi yıkım şirketleri yerleşim yerlerinden daha çok sanayinin bulunduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bu nedenle yıkılan alanın resmi veri tabanının çok düşük ve tahminlerin kesin olmadığı bildirilmiştir. Bu durumda ülkede üretilen toplam atık miktarının daha da yüksek olduğu sonucuna varılabilir (ABRELPE 2015). Brezilya'nın en kalabalık ve ekonomik açıdan en önemli eyaleti olan Santo Paulo eyaletinde yılda toplam 24 milyon ton inşaat atığı üretilmektedir. Bu miktar eyalette üretilen belediye katı atıklarının %55'ine tekabül ettiği bildirilmiştir (Sao Paulo 2014). Mevcut Brezilya çevre yönetmeliğinin atık önleme ve değerlendirme üzerine odaklanmasına rağmen, atık depolama yönetimi için dolgu malzemesi olarak kullanımının yaygın olarak benimsendiği rapor edilmiştir. Bu nedenle, inşaat sektörünün sürdürülebilirliğini iyileştirmek için, özellikle lojistik ve geri dönüşüm olmak üzere inşaat yapım ve yıkım atıkları yönetiminin teknik, düzenleyici, ekonomik ve çevresel yönlerinin araştırılmasına yönelik bir talebin olması gerektiği bildirilmiştir. Brezilya'da inşaat yapım ve yıkım atıklarının yönetimine ilişkin ilk direktif 2002 yılında Ulusal Çevre Konseyi tarafından 2004 yılında tamamen uygulanmak üzere onaylanmıştır (John ve Angulo 2018). Yayınlanan direktifte inşaat ve yıkıntı atıkları gruplara ayrılmıştır. Ancak yüksek verimli ayırma uygulamalarının ve teknolojilerinin eksikliği, Brezilya'daki inşaat yapım ve yıkım atıklarının geri dönüşüm potansiyelini büyük oranda etkilemektedir. Bu nedenle 2010 yılında inşaat ve yenileme alanlarında alçı ve boya atıklarının üreticiler tarafından toplanmasını zorunlu kılan yasal çerçevenin uygulanması konusunda katı atık yönetimi ulusal politikası onaylanmıştır.

Almanya'daki inşaat yapım ve yıkım atığı geri kazanım oranı dünyadaki en yüksek oranlardan biridir. 2004 yılında, inşaat yapım ve yıkım atıklarının geri kazanım oranı %89

olarak belirlenmiştir (Weil ve ark. 2006). LAGA (Devlet atık derneği) yönetmeliklerinde (LAGA 2003), geri dönüştürülmüş agrega kullanımı için kategoriler ve sınır değerler belirtilmiştir. İçerdiği kirleticilere bağlı olarak, geri dönüştürülmüş agregalar Z0 (sınırsız kullanım), Z1 (açık kullanım; olumsuz hidrolojik koşullar için Z1.1, Z1.1'den büyük değerlere sahip kirli alanlar için Z1.2) ve Z2 (teknik koruma önlemleriyle sınırlı kullanım) olarak sınıflandırılmıştır. Kirletici konsantrasyonlarının Z2 için verilen sınır değerleri aştığı durumlarda, atık malzemelerin geri dönüştürülmesi, kirletici içeriğini azaltmak için daha ileri işlemlere tabi tutulması veya düzenli depolama alanlarına atılması gerektiği belirtilmiştir. Almanya'da inşaat atıklarının daha iyi kullanılmasıyla ilgili bu engellerin üstesinden gelmek için geliştirilen ana siyasi strateji, Federal “Kapalı Madde Döngüsü Atık Yönetimini Teşvik Etme ve Çevreyle Uyumlu Atık Bertarafını Sağlama Yasası’dır. Bu yasayla birlikte atık yönetimi hiyerarşisi sağlanmakta ve atık yönetiminin ilk hedefinin atık önleme ve kaçınma olması gerektiğini belirtilmektedir. Önleme mümkün değilse, yeniden kullanım veya geri dönüşüme izin vermek için atık bileşimi iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bunlara ilaveten Almanya’da da atık kullanım oranını arttırmak için Avrupa Atık Kataloğu’na dayalı olarak yapı söküm malzemelerinin ve bileşenlerinin çıkarılması, depolanması ve taşınmasını kapsayan teknik standartlar belirlenmiştir (Sunke ve Schultmann 2019). Almanya Hükümeti, akademik kurumlar ve endüstri dernekleri, günümüzde geri dönüştürülmüş malzemelerin yeniden kullanımını ve “sürdürülebilir” yapı sökümünün ilerlemesini desteklemek amacıyla teknik çözümler geliştirmektedir. Ayrıca kamu binaları da inşaat yapım ve yıkım atıklarının geri dönüşümü ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı için bir çalışma talimatı bulunmaktadır (BMVBS ve Stölzle 2008). Geliştirilmekte olan diğer stratejiler arasında, hâlihazırda yıkım planlama aşamasında olan sürdürülebilir yıkımı destekleyen sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi yer almaktadır. Bu amaçla geleneksel yıkımdan sonra C&D atıklarının manuel olarak ayrılmasına karşı seçici sökme gibi çeşitli yıkım yöntemlerinin maliyet, zaman ve çöp sahası etkilerinin yüzdesini karşılaştırmak için çalışmalar yapılmaktadır (Schultmann ve Rentz 2002).

2.2.2. Türkiye’de İnşaat ve Yıkıntı Atığı Yönetimi

Miktarı her geçen gün katlanarak artan yapım ve yıkım atıklarının olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması ve bu atıkların ekonomik faydaya dönüştürülmesi gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de temel politika haline getirilmelidir. Ülkemizde inşaat ve yıkıntı atık yönetimiyle ilgili çalışmalar Avrupa Birliğine uyum çerçevesinde hazırlanmıştır. Ancak ülke genelinde uygulanması ve denetlenmesi konusu ne yazık ki yaygınlaştırılamamıştır. Atıkların ayrıştırılmasının doğru bir şekilde yapılmamasına ilaveten yıkım sonucu oluşan atıklar çoğu zaman hiçbir işleme tabi tutulmadan doğrudan dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bilindiği gibi bu atıklar asbest ve kurşun gibi zararlı malzemeler içerdiği için gelişigüzel bir şekilde özellikleri belirlenmeden kullanılması insan sağlığı ve çevrenin korunması açısından zararlı olmaktadır.

Atık İstatistikleri Anketi’ne göre belediyelerde toplanan günlük atık miktarı 1,17 kg/kişi olarak belirlenmiştir. Ancak bu atık verilerine inşaat ve yıkıntı atıkları dahil edilmemiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atık Yönetimi Yönetmeliği’nde atıklar 20 farklı başlık altında toplanmasına rağmen 5 grup atık verisi (ambalaj atığı, belediye atığı, tehlikeli atık, özel atık, tıbbi atık) istatistiklerde yer almaktadır. İnşaat ve yıkıntı atıklarının dahil edildiği veya ayrıca yer verildiği herhangi bir atık verisine ulaşılmamıştır. Bu nedenle Türkiye’de oluşan yapım ve yıkım atıklarının miktarı, denetim ve izleme faaliyetlerinin yetersizliğinden dolayı kesin olarak tespit edilememekle birlikte yılda 125 milyon ton inşaat sektörü kaynaklı atık oluştuğu tahmin edilmektedir (TMBBOB Çevre Mühendisleri Odası 2018). Ayrıca 2012 yılında yürürlüğe konulan Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanun’la son yıllarda devam eden kentsel dönüşüm süreci ivme kazanmıştır. Önümüzdeki 20 yıl içerisinde gerçekleştirilecek kentsel dönüşüm projeleri kapsamında 6,5 milyon konutun yıkılıp yeniden yapılması planlanmaktadır (Acar 2013). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Atık Yönetimi Başkanlığı tarafından kentsel dönüşüm kanunuyla yapım ve yıkım atıklarının yıllık 10 milyon ton artacağı öngörülmüştür. Buna bağlı olarak geri kazanılacak malzeme miktarının da yıllık 6 milyon ton olacağı hesaplanmıştır (Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2017).

Ülkemizde 18 Mart 2004 tarihinde yayınlanan Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği'yle birlikte belediyelere inşaat ve yıkıntı atıklarının toplanması, geçici biriktirilmesi, taşınması, geri kazanılması ve bertarafı ile ilgili yönetim planı hazırlaması, depolama sahası belirlemesi kurması veya kurdurması, işletmesi veya işletmeme görevi verilmiştir. Atıklar Çizelge 2.6'da belirtildiği gibi sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma sayesinde atıklar kategorize edilerek toplanan atıkların ayrıştırılması ve değerlendirilmesi yapılabilecektir. Günümüzde inşaat ve yıkıntı atıkları belediyeler tarafından belirlenen depolama alanlarına, genellikle belli bir ücret karşılığında depolanabilmektedir. Yönetmelikte geri kazanılmış ürünlerin, ilgili standartları sağlamak şartı ile gerekli işlemlerden geçirildikten sonra doğal malzemeler ile birlikte veya ayrı olarak, yeni beton üretiminde, yol, otopark, kaldırım, yürüyüş yolları, drenaj çalışmaları, kanalizasyon borusu ve kablo döşemelerinde dolgu malzemesi olmak üzere, alt ve üst yapı inşaatlarında, spor ve oyun tesisleri inşaatları ile diğer dolgu ve rekreasyon çalışmalarında öncelikli olarak kullanılacağı maddesi yer almaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2006). Ayrıca, ülkemizin 2023 yılı Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı hedeflerinde oluşan atığın; %35'inin geri kazanım, %65'inin düzenli depolama yönetimi ile bertaraf edilmesi, Vahşi Döküm sahalarının rehabilite edilmesi, inşaat ve yıkıntı atıkları ve hafriyat toprağı yönetiminin ülke genelinde yaygınlaşmasını sağlamak yer almaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2016). Ancak ülkemizde yalnızca birkaç şehirde geri dönüşüm tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerde bilinçsiz geri dönüşüm ve depolama nedeniyle atık malzemeler geri dönüştürülerek kullanıma hazır hale getirilseler dahi ilgili standartlardaki şartları karşılayamadığı için kullanılabilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca ülkemizde çevre koruma bilinci tam olarak gelişmediği için geri dönüşüm konusunda tam olarak farkındalık oluşmadığı düşünülmektedir.

Çizelge 2.6. Hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atıklarının sınıflandırması (Hafriyat toprağı ve inşaat/yıkıntı atıkları yönetmeliğı 2004)

HAFRİYAT TOPRAĞI VE İNŞAAT/YIKINTI ATIKLARI			
HAFRİYAT TOPRAĞI	YOL YIKINTI ATIKLARI	YIKINTI ATIKLARI	KARIŞIK YIKINTI ATIKLARI
KAYNAKLARI Hafriyat Faaliyetleri	KAYNAKLARI Karayolu, demiryolu ve havaalanı pistlerinin yapımı, tamirat, tadilat ve yıkım faaliyetleri	KAYNAKLARI Konut, okul, hastane ve endüstriyel tesisleri gibi yapıların yıkım faaliyetleri	KAYNAKLARI Binaların seçici olmayan yıkımları, tamirâtı, tadilatı güçlendirilmesi faaliyetlerindeki yıkımlar
BİLEŞENLERİ -Bitkisel Toprak -Toprak -Kum -Çakıl -Taş -Kil	BİLEŞENLERİ -Beton -Kırılmış asfalt -Yol kaplama Malzemeleri -Kaldırım taşı -Kum -Çakıl -Demiryolu traversleri ve balastları	BİLEŞENLERİ -Demir içeren ve içermeyen beton -Çatı konstrüksiyon ve örtü malzemesi -Duvar örgü malzemeleri	BİLEŞENLERİ -Beton -Duvar örgü malzemeleri -Sıva -Kum -Çakıl -Ahşap -Plastikler -Seramikler -Metaller -Kâğıt ve Karton

2.3. Yol Uygulamalarında Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası Kullanımı

Geri dönüştürülmüş beton atıklarının yol temel ve alttemel tabakalarında bağlanmamış granüler bir malzeme olarak kullanılması sürdürülebilir mühendislik uygulamalarının en iyi örneklerinden biridir (Park 2003, Poon ve ark. 2004, Ardalın ve ark. 2017). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde GDBA'nın yol dolgularında kullanılabilirliği yaygın olarak kabul görmüş olup, doğal kaynak tüketiminin önüne geçmek için GDBA'nın esnek üstyapı granüler temel ve alttemel tabakalarında kullanılması konusunda yoğun çaba sarf edilmektedir. Özellikle hükümetler ve birçok özel kuruluş doğal kaynak kullanımını azaltmak, çevreyi korumak ve inşaat maliyetleri

ve atık stoklarını azaltmak için GDBA'yı doğal agrega yerine değerlendirmektedir. GDBA 1940'lardan beri Avrupa'da ve 1970'lerden bu yana ise ABD'de yaygın olarak granüler temel ve alttemel tabakalarında kullanılmaktadır. ABD'de yıllık ortalama 100 milyon ton üretilen GDBA'nın birincil uygulama alanı temel ve alttemel tabakalarıdır (ACPA-wiki 2019). Danimarka Yol Enstitüsü 2002 yılında GDBA'yı yol üstyapısında kullanabilmek için ulusal şartnameler oluşturmuştur. Bu şartnamede GDBA'nın aşınma direnci ve saflığına dayanan A, B ve C olmak üzere üç farklı sınıf oluşturulmuştur. A ve B sınıfı malzemeler tüm yol türlerinde kullanılabilirken C sınıfı GDBA'nın kullanımı sınırlı tutulmuştur (Pihl ve ark. 2003). 2006 yılında Ulusal Portekiz İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı, GDBA'nın temel ve alttemel tabakalarında kullanımına ilişkin yönetmelik yayınlamıştır. Yönetmelik EN 13242 ve EN 13285 Avrupa Standartlarında belirtilen gerekliliklere dayanmaktadır. Güney Galler, Victoria gibi Avustralya'da bulunan birçok eyalet kendi yönetmeliklerini geliştirerek GDBA'yı yol inşaatında başarıyla kullanmaktadırlar (VicRoads 2009, Andrews ve ark. 2009). Ayrıca Avustralya'da bağlanmamış yol tabakalarında kullanılmak üzere GDBA ve kırılmış tuğlanın karıştırılarak kullanılması yaygın bir uygulamadır (Poon ve Chan 2006, Arulrajah ve ark. 2013). Hollanda'da beton atıklarından elde edilen agregaların %95'i yol taban malzemesi olarak kullanılmaktadır. Öte yandan, İspanya Hükümeti geri dönüştürülmüş agregaların yol üstyapısı granüler tabakalarında malzeme olarak kullanılmasına izin verilmesi amacıyla İspanya Yol Yapımı PG-3 Genel Teknik Şartnamesinde (Spanish General Technical Specification for Road Construction PG-3) düzenlemeler yapmıştır. Bu düzenlemeyle birlikte, İspanya'da yapım ve yıkım atıklarının üretimi ve yönetimi kontrol altına alınarak, geri dönüşüm tesislerine ulaşan malzemelerin değerlendirilmesini artırmak için işlenmemiş atıkların çöp depolama alanlarına boşaltılması yasaklanmıştır (Jiménez ve ark. 2011).

Mevcut çalışmalar incelendiğinde; Poon ve Chan (2006), ince GDBA'nın çeşitli boyut fraksiyonlarının X-ışını kırınım difraktometresi, pH değerlerini, CBR dayanımı ve geçirgenliğini ölçerek kendiliğinden çimentolaşma özelliklerinin nedeni üzerine bir araştırma yapılmıştır. Ayrıca meydana gelen hidrasyonun alttemel malzemelerinin özellikleri üzerindeki olası etkilerini belirlenmiştir. XRD sonuçları, GDBA numunelerinde C_2S ve $C_3H_2S_3$ 'ün (C-S-H) tespit edildiğini göstermiştir. Ancak,

GDBA tanelerinin çapı arttıkça C_2S miktarının yavaş yavaş azaldığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Benzer şekilde 0,15 mm tane çapından küçük ince GDBA agregalarının yüksek miktarda C_2S içeriğinden dolayı kendiliğinden çimentolaşma özelliklerinin olası nedeni olabileceği belirtilmiştir. Permeabilite deneyi sonuçları incelendiğinde ise GDBA numunesinin daha yüksek geçirgenlik katsayısı, GDBA tanelerinin gözenekli yapısından kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Bununla birlikte, 7 günlük su küründen sonra, GDBA numunesinin geçirgenliği önemli ölçüde azalırken, kontrol karışımında hafif bir düşüş gözlemlenmiştir. Ardından numuneler 3 gün hava kürüne tabi tutulmuş ve hava kürünün GDBA numunesinin geçirgenliğini daha da azalttığı ancak kontrol numunesi üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar, ince GDBA tanelerinin hidrasyonunun geçirgenlik üzerinde önemli derecede etkili olduğunu göstermektedir. GDBA sızıntı suyundaki toksik bileşenlerin EPA tarafından öngörülen düzeyi aşmadığı için GDBA'nın alttemel tabakalarında kullanılmasının çevre için potansiyel bir risk oluşturmayacağı belirlenmiştir. Araştırmacılar bu sonuçlara dayanarak, kendiliğinden çimentolanma özelliklerinin nedeninin, ince GDBA'nın yaş, derece ve GDBA'nın üretildiği orijinal betonda kullanılan çimento miktarı, orijinal betonun yaşı, kalitesi ve karışım oranlarının, ince GDBA tanelerinde hidrate olmayan çimento ve C_2S miktarının belirleyici faktörleri olacağını bildirmişlerdir. Ayrıca, GDBA ile hazırlanan alttemel malzemelerinin kendiliğinden çimentolanma özelliklerine, sıkıştırma derecesi ve hızının etkilerinin araştırılması gerektiği önerilmiştir. Çünkü ince GDBA'nın derecelendirmesi sıkıştırmadan sonra değişebilmekte ve derecelendirmenin kendi kendini çimentolanma özellikleri üzerinde önemli bir faktör olduğu araştırmacılar tarafından kanıtlanmıştır.

Aghililotf ve diğerleri (2019), GDBA'ların yol üstü yapısında agrega olarak kullanılabilirliğini değerlendirmiştir. Bu amaçla, altı tip KA ve üç tip GDBA seçilmiştir. KA numunelerinin dördü bina yapımında kullanılan kırmataş agregalarından oluşurken, diğer ikisi nehir tipi çakıl esaslı agregalardır. Agregaların kaya türlerinin kireçtaşı ve tuff olduğu belirtilmiştir. GDBA₁ ve GDBA₂, daha önce 90 günlük basınç dayanımını belirlemek için kullanılan 150 mm kübik numunelerin manuel olarak ezilmesiyle üretilmiştir. GDBA₁'in kaynak betonu kendiliğinden yerleşen beton, GDBA₂'nin ise normal betondur. GDBA kullanımındaki en büyük sorunlardan bir tanesi, GDBA'ların

elde edildiği kaynak beton hakkında yetersiz bilgidir. Araştırmacılar bu durumu göz önünde bulundurmak için, GDBA₃ malzemesini birçok bilinmeyen atık beton ve yabancı atıklardan oluşan çöp sahasından temin etmiştir. Çalışmada kullanılan maksimum tane çapı 25 mm olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan KA ve GDBA karışımlarının deney sonuçları sırasıyla Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8’de sunulmuştur.

Çizelge 2.7. Doğal agreganın deney sonuçları

KARIŞIM	*KA₁	KA₂	KA₃	KA₄	KA₅	KA₆
Su Emme (%)	2,02	0,85	0,49	1,65	1,68	2,4
Özgül Ağırlık	2,63	2,69	2,69	2,64	2,67	2,62
Optimum Su Muhtevası (%)	7,36	5,91	5,12	6,32	9,4	8,77
Agrega Etki Değer, 2,36 mm (%)	4,23	4,66	4,1	1,71	2,57	2,72
Agrega Etki Değer, 10 mm (%)	31,4	28	25,2	15,6	19,4	21,3
Agrega Kırma Değer, 2,36 mm (%)	15,15	19,18	16,46	6,05	13,04	11,53
Agrega Kırma Değer, 10 mm (%)	69,1	69,9	66,3	43,2	57,6	57,8
Los Angeles Aşınma (%)	23,68	26,19	8,26	11,52	13,69	15,93
Magnezyum Sülfat Direnci (%)	22,37	16,92	7,2	5,7	15,92	21,36
Donma Çözülme Direnci (%)	9,43	4,47	7,2	4,67	6,62	6,5
CBR (%)	79	109	130	116	95	89

*KA: Kırmataş Agregası

Sonuçlar incelendiğinde, GDBA'ların KA'lara kıyasla 5,36 kat daha yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu ve bu durumun, GDBA tanelerinin daha yüksek gözenekliliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Kendiliğinden yerleşen betondan elde edilen GDBA₁'in maksimum su emme değeri fazla miktarda çimento hamuruna sahip olmasına bağlanmıştır. Ayrıca, yapılan SEM analizi sonuçları da, GDBA₁ ve GDBA₃'ün GDBA₂'ye kıyasla daha fazla gözenekliliğe sahip olduğunu göstermiştir. GDBA'ların yüksek su emme kapasitesi ve gözenekliliği nedeniyle özellikle yağmurlu bölgelerde veya su kaynaklarına maruz kalma durumunda agregaların doyma derecesinin artacağı

bildirilmiştir. Bu durum, katmanların taşıma kapasitesinde azalmaya yol açabileceği ve bu işlemin tekrarlanmasıyla yol yapısının hizmet ömrünün azalacağı rapor edilmiştir.

Çizelge 2.8. Geri dönüştürülmüş beton agregası deney sonuçları

KARIŞIM	*GDBA ₁	GDBA ₂	GDBA ₃
Su Emme (%)	8,7	7,45	8,2
Özgül Ağırlık	2,3	2,35	2,31
Optimum Su Muhtevası (%)	12,91	10,63	10,28
Agrega Etki Değer, 2,36 mm (%)	10,4	10,55	9,37
Agrega Etki Değer, 10 mm (%)	54	57,4	50,8
Agrega Kırma Değer, 2,36 mm (%)	24,9	23,93	26,01
Agrega Kırma Değer, 10 mm (%)	78,5	76,1	74,2
Los Angeles Aşınma (%)	29,25	27,72	31,21
Magnezyum Sülfat Direnci (%)	6,95	7,38	7,73
Donma Çözülme Direnci (%)	17,17	17,33	18,82
CBR (%)	89	70	68

*GDBA: Geri dönüştürülmüş beton agregası

Mekanik özellikler incelendiğinde ise KA kullanılarak hazırlanan karışımların atık beton agregalar kullanılarak hazırlanan karışımlara göre CBR değerleri %28,6 daha yüksek ölçülmüştür (Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8). GDBA₃ karışımı çöplükten temin edildiği ve çok fazla safsızlık içerdiği için en düşük CBR dayanımına sahip olduğu bildirilmiştir. Agregaların dayanıklılık performansı incelendiğinde beton atık agregası çimento hamuru ve agregası arasındaki zayıf bağ nedeniyle doğal malzemeye göre daha düşük değerlere sahip olduğu vurgulanmıştır. GDBA taneleri darbe ya da aşınma gibi bir yüke maruz kaldığında çimento hamuru ve agregalar birbirinden ayrılma eğilimi göstermektedir. Daha sonra aşırı sayıda darbe yükleri tekrarlanarak ayrılan çimento hamurları, bakir agregalara göre daha düşük kalite ve daha gözenekli yapılarından dolayı ciddi şekilde tahrip olduğu belirtilmiştir (Nagataki ve ark. 2004, Rakshvir ve Barai 2006). GDBA tanelerinin statik bir sıkıştırma yüküne maruz kaldığında, yüzeyinde dış gerilmeler oluştuğu ve bu durumun agregası içinde bir çatlak ağı oluşmasına neden olduğu

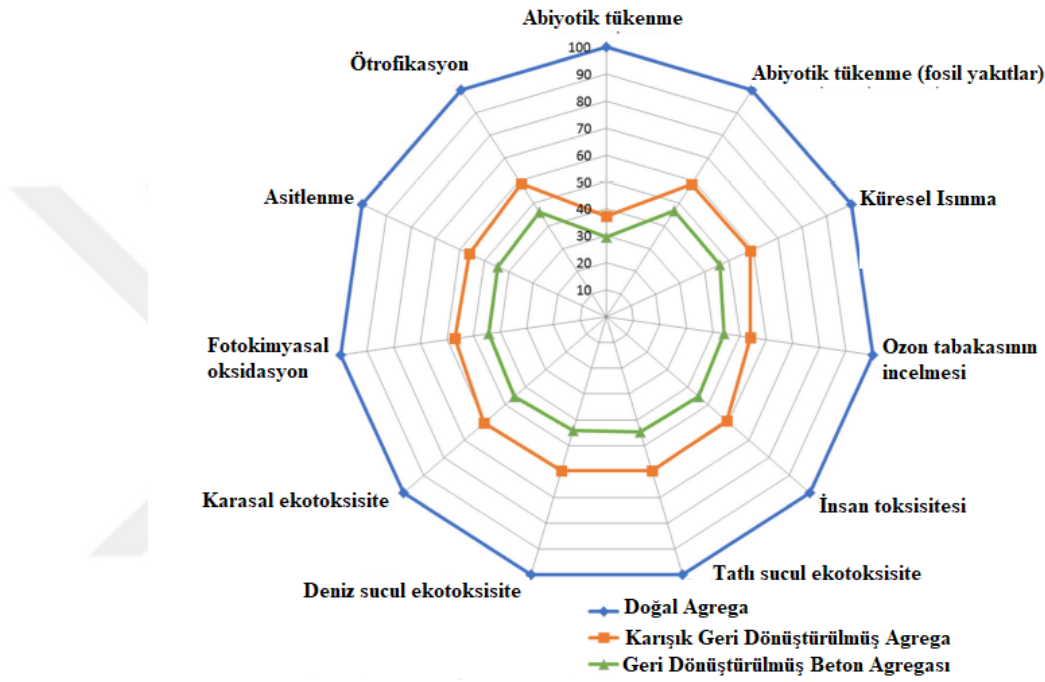
araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Statik sıkıştırma yük miktarının artışıyla, GDBA tanelerinde ciddi hasarlar meydana gelebileceği vurgulanmıştır. Bu nedenle, araştırmacılar GDBA karışımlarının darbe testine kıyasla etki deneyinde daha iyi bir performans gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca darbe ve etki deneyi sonuçları karşılaştırıldığında hem KA karışımları hem de GDBA karışımları için darbe deneyinde hasarsız agrega yüzdesinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Yaghoubi ve arkadaşları (2018), statik (titreşim) ve darbe sıkıştırma yönteminin geri dönüştürülmüş malzeme içeren karışımların mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla GDBA ve ezilmiş tuğla içeren karışımlar hazırlanmıştır. Darbe yönteminin kullanıldığı durumlarda, darbe etkisiyle tokmağın serbest düştüğü temas yüzeyinin altından kaçtığı vurgulanmıştır. Böylece tabakalar arası homojenliğin bozulduğu ve sıkıştırmanın istenilen seviyede yapılamadığı rapor edilmiştir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir (Hafez ve Asmani 2010). Ayrıca agregaların yük altında kırılarak ince malzeme miktarı artışının darbeli yöntemde titreşim yöntemine kıyasla daha bariz olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, statik sıkıştırmanın en belirgin dezavantajının, agregaların sıkıştırma basıncı altında yer değiştirmesinin sınırlı olduğu beyan edilmiştir. Bu olay statik sıkıştırma sırasında sürekli yükleme ve agrega kenetlenmesinin tanelerin birbirleri üzerinde serbestçe kaymasını önlediğinden kaynaklandığı söylenmiştir. Agregatanelerinin birbiri üzerinde serbestçe kaymasının önlenmesi agregaların kenetlendiği bölgelerde gerilme yoğunlaşması oluşturarak yüksek lokal yoğunluğa neden olmaktadır. Böylece diğer kısımlarda daha büyük makro boşluklar oluşabilmektedir. Yaghoubi ve arkadaşları statik kompaksiyon yöntemiyle sıkıştırılan numunelerde basınç dayanımının yüksek, esneklik modülü değerinin düşük olduğunu vurgulamışlardır. Son olarak, GDBA'ların daha pürüzlü ve köşeli yüzeye sahip olduğundan bu tür agregaları içeren numunelerde CBR değerinin yüksek olduğu yazarlar tarafından beyan edilmiştir. Benzer sonuçlar Kaya ve arkadaşları (2013) tarafından da elde edilmiştir.

Agrela ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan çalışmada, Huelva'daki "Ciudad de Palos" limanındaki bir yükleme platformunda yapısal katmanlarda tam bir gerçek ölçekli uygulamada kullanımları için GDBA'nın fiziksel, kimyasal ve mekanik davranışlarını

inceleme ve değerlendirme amaçlanmıştır. Bu platform, Ria Huelva'nın (Huelva, İşpanya) sol kıyısında, dış liman olarak bilinen bölgede yer almaktadır. Platformun arsa alanı 8200 m² ve asfaltsız yüzey alanı ise 28,500 m²'dir. Çalışmada kapsamında, bitümlü yüzey tabakasının altındaki 25 cm granüler temel tabakası için GDBA, 25 cm alttemel tabakası için ise karışık geri dönüştürülmüş atık agregalar kullanılmıştır. GDBA içeriği incelendiğinde; %88 beton ve doğal agrega parçacıkları ve %1'den daha az oranda alçı, plastik, cam vb. safsızlık içerdiği rapor edilmiştir. Karışık geri dönüştürülmüş atık agregalar ise %30 seramik, %72,1 beton, %7,4 asfalt ve %1,5 oranında safsızlık içerdiği belirtilmiştir. Uygulamada bu malzemeleri kullanmanın fizibilitesini göstermek için mekanik ve sızıntı özellikleri, eşdeğer modül ve sapmalar incelenmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak araştırmacılar kullanılan agregaların ince partikül içeriği, fiziksel ve kimyasal özellikler ve geri dönüştürülmüş agregaların sızması yoluyla potansiyel kontaminasyonu incelenerek değerlendirilmiş ve bu aşamanın sonunda gerçek ölçekli uygulamada uygulanacak bir çözüm önerilmiştir. GDBA agregasının maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri sırasıyla 2,08 t/m³ ve %9,77 olarak belirlenirken karışık geri dönüştürülmüş agrega için bu değerler sırasıyla 2,04 t/m³ ve %10,8 olarak hesaplanmıştır. Karışık geri dönüştürülmüş atık agrega karışımındaki özellikle harç ve seramik malzemelerin yüksek gözenekli yapısının GDBA karışımlarına kıyasla optimum nem içeriğini arttırdığı bildirilmiştir. Karışımların CBR değerleri ise GDBA için %74 ve karışık geri dönüştürülmüş atık agregalar için %50 olarak llmştir. Araştırmacılar laboratuvar deneyi sonuçlarının spesifikasyonları karşıladığını doğruladıktan sonra liman yapısı uygulaması başlatılmıştır. Katmanların geri dönüştürülmüş malzemelerle sıkıştırılması işleminin, doğal malzemelerin kullanımına göre n ıslatma ve daha zorlu bir kontrol gerektirdiği belirtilmiştir. Çalışma bitirildikten sonra belirli aralıklarda temel parametreleri araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir. Araştırmacılar temel ve alttemel tabakalarının elastisite modülü değerlerinde zamanla sırasıyla %6,7 ve %17,3 oranında artış gözlemlemiştir. GDBA ve karışık geri dönüştürülmüş atık agregalar içerinde bulunan hidrate olmayan imento taneleri zamanla su ile buluştuğunda hidrasyon meydana gelmektedir. Araştırmacılar meydana gelen hidrasyonun katmanların taşıma kapasitesinde iyileşmeye katkıda bulunabileceğini bildirmiştir (Poon ve ark. 2006, Garach ve ark. 2016, Tavira ve ark. 2018). Araştırmacılar bu çalışma kapsamında yaşam dnşs değerlendirmesiyle farklı

agregaların üretiminde neden olunan çevresel etkinin bir karşılaştırmasını da yapmıştır. Bu analiz, geri dönüştürülmüş agrega üretiminin neden olduğu gelişmiş çevresel etkiyi göstermektedir (Serresve ark. 2016, Rosado ve ark. 2017). 1 ton agrega üretimi için, her bir etki göstergesindeki en yüksek değere kıyasla varyasyon sonuçları Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirme sonuçlarına göre; KA üretiminin değerlendirilen tüm kategorilerde daha büyük bir etkiyle sonuçlandığı vurgulanmıştır.



Şekil 2.7. Agrega üretim etki değerlendirmesinin karşılaştırmalı grafiği (Agrela ve ark. 2020)

KA'nın geri dönüştürülmüş agregalara göre üretiminin neden olduğu çevresel etkideki artışın, esas olarak, üretimlerinde yer alan daha fazla sayıda işlem, doğal kaynakların çıkarılması ve tüketilmesi süreçlerinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Temel ve alttemel bölümünde atık agrega uygulanarak liman yükleme platformunun yapımından elde edilen çevresel yükleri belirlemek için 8200 m²'lik uygulama alanında üretilen CO₂ emisyonları analiz edilmiştir. Liman yükleme platformunda %100 KA kullanıldığı durumda 19,19 t CO₂ üretileceği, ancak projede GDBA ve karışık geri dönüştürülmüş beton agrega kullanımının CO₂ emisyonlarını %52,6 oranında azalttığı bildirilmiştir.

Zega ve diğerkleri (2010) tarafından farklı dayanım seviyelerine sahip konvansiyonel betonların üretiminde kullanılan KA türünün, kırılarak elde edilen geri dönüştürülmüş agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini değerlendirmek amacıyla çalışma yürütülmüştür. Seçilen agregalar yüzey dokusu, bileşim ve parçacık şekli açısından farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Temin edilen doğal agregaların granit (G), bazalt (B), kuvarsit (Q) ve silis (S) kökenli olduğu bildirilmiştir. Karışımların isimlendirmesi yapılırken su/çimento oranı ve agrega kökeni dikkate alınmıştır. Örneğin RG45 karışımı, su/çimento oranı 0,45 ve Granit kökenli çakıldan elde edilen atık geri dönüştürülmüş agregadır. Hazırlanan GDBA karışımlarının özgül ağırlık, su emme, Los Angeles aşınma, birim ağırlık, boşluk içeriği, ince malzeme yüzdesi, yassılık indeksi ve harç içeriği gibi farklı fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 2.9).

Çizelge 2.9. Hazırlanan karışımların deney sonuçları

Karışım	Su Emme (%)	Özgül Ağırlık	LA Aşınma (%)	İnce Malzeme Yüzdesi (%)	Boşluk Oranı (%)	Yassılık İndeksi (%)
Granit	0,3	2,72	25	0,6	48	19,2
Kuvars	2	2,48	59,8	0,9	46,2	25,3
Bazalt	0,8	3,03	9,1	0,3	49,3	26,7
Silis	0,5	2,6	18,8	0,2	38,4	9,9
RG45	4	2,52	34,8	0,6	49,4	12,9
RG65	4,1	2,51	37,4	0,1	50,9	10,1
RQ45	5,9	2,37	52,2	0,2	50,9	14,9
RQ65	6	2,35	55,4	0,2	48,5	12,7
RB45	3,9	2,66	25,3	0,2	50,9	11,3
RB65	4,5	2,65	30,3	0,4	49,2	9,9
RS45	3,9	2,45	31,6	0,1	49,5	11,2
RS65	4,4	2,44	37	0,1	48,1	10,4

Her bir KA türüne karşılık gelen GDBA karışımlarının özgül ağırlığının daha düşük olduğunu ve kaynak betonun s/ç oranından etkilenmediği belirtilmiştir. Ayrıca, araştırmacılar GDBA derecelendirmesinin orijinal betonun s/ç oranından bağımsız olduğunu göstermiştir. Özgül ağırlığın aksine, 0,65 s/ç oranına sahip betonlardan üretilen GDBA'lar, s/ç oranı 0,45 olan betonlardan üretilen GDBA'lara göre daha yüksek su emme

değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer özellik LA aşınma deneyinde de gözlemlenmiştir. 0,65 s/ç oranına sahip betonlardan üretilen GDBA agregaları daha zayıf ara yüzey geçiş bölgesine sahip olduğu için daha yüksek LA aşınma değerleri ölçülmüştür. Araştırmacılar çimento matrisinin zayıf olması durumunda (s/ç oranı 0,65), Bazalt ve Silis kökenli doğal agrega düzgün yüzey dokusunun aderansı olumsuz etkilediğini ve bu durumun geri dönüştürme esnasında harcın doğal agregadan ayrılmasını ve RB65 ve RS65 karışımlarının sadece harçtan oluşan parçacıkların oluşumunu kolaylaştırdığını rapor etmişlerdir. Granit ve Kuvars kökenli doğal agregaların pürüzlü yüzey dokuları nedeniyle, geliştirilmiş agrega-matris ara yüzü, kırma esnasında doğal agreganın parçalandığını, GDBA parçacıklarının hem harç hem de doğal agrega içerdiğini bildirmiştir. Tüm bu sonuçlardan yola çıkarak, araştırmacılar doğal iri agreganın GDBA'nın özellikleri üzerinde, çoğu durumda kaynak betonun s/ç oranından daha yüksek olan önemli bir etkisinin olduğunu ileri sürmektedir.

Poon ve Chan (2006), geri dönüştürülmüş beton agregasının bir kısmını, ezilmiş kil tuğlası ile değiştirerek alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Değiştirme seviyeleri, geri dönüştürülmüş beton agregasının ağırlıkça %25'i ve %50'si olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında 2 seri karışım hazırlanmıştır. Birinci seride %25 ve %50 GDBA, KA ile kısmi olarak ikame edilirken ikinci seride aynı oranlarda ezilmiş kil tuğlası ile ikame edilmiştir. Ezilmiş kil tuğlasının esas olarak tuğla, moloz ve yüksek miktarda yapışmış harç, kiremit, ahşap ve toz gibi diğer safsızlıklar içerdiği bildirilmiştir. Genel olarak, doğal agregaların en yüksek yoğunluk değerine sahip olduğu ve bunu GDBA ve ezilmiş kil tuğlasının izlediği belirtilmiştir. Buna karşılık, su emme değerlerinde ise tam tersi bir oran söz konusu olmuştur. Ezilmiş kil tuğla agregalarına tutturulmuş yüksek miktarda yapışmış harç, parçacık yoğunluğunda bir azalmaya ve su emme değerinde bir artışa yol açtığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Benzer sonuçlar maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerlerinde de ölçülmüştür. Ayrıca, elde edilen kompaksiyon eğrilerin şekli ve değerlerin önemli ölçüde farklı olduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar, el ile ezilmeye bağlı olarak ezilmiş kil tuğla parçacıklarının düzensiz şeklinin, malzeme içindeki boşluk miktarını arttırdığı ve maksimum kuru yoğunluğunda da azalmaya yol açtığını bildirmiştir. Ayrıca, sonuçlar ince GDBA karışımların, ince ezilmiş kil tuğla içeren karışımlara kıyasla daha yüksek

maksimum kuru yoğunluklara ve daha düşük optimum nem içeriğine sahip olduğunu göstermiştir. Bunun başlıca nedeninin, bu iki malzeme arasındaki yoğunluk ve su emme farkı olabileceği rapor edilmiştir. Buna ilaveten, ince GDBA içeren karışımların, ince ezilmiş kil tuğla içeren karışımlara kıyasla nemdeki değişime daha duyarlı olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle, daha iyi sıkıştırma elde etmek için, ince GDBA ile hazırlanan karışımların mümkün olan en iyi nem içeriğine mümkün olduğunca yakın sıkıştırılması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerle hazırlanan tüm karışımların, optimum nem içeriğinin kuru tarafındaki nem değişimine, optimum nem içeriğinin ıslak tarafına göre daha duyarlı olduğunu belirtilmiştir. Islak CBR deneyi sonuçları incelendiğinde ise 4 günlük kürleme süresinin tüm alttemel malzemelerinin CBR değerleri üzerinde ihmal edilebilir bir etkisinin olduğu belirtilmiştir.

Arulrajah ve arkadaşları (2012), birkaç ay arayla üç farklı zamanda temin ettikleri GDBA üzerinde CBR deneyleri yapmışlardır. CBR numuneleri, sıkıştırma testlerinde elde edilen optimum su muhtevasında karıştırılarak Modifiye Proktor sıkıştırma enerjisi uygulanarak hazırlanmıştır. Sıkıştırılmış örnekler, yüzeyine 4,5 kg'lık bir ek yük kütlesi konularak dört günlük bir süre boyunca suya batırılmıştır. Bu durum, üstyapı kaplama katmanlarının sınırlayıcı etkisini ve aynı zamanda bir temel ve alttemel tabakaları için olası en kötü hizmet-içi senaryoyu simüle etmektedir (VicRoads 1998). Deney sonucunda elde edilen CBR değerleri %118 ila 160 arasındadır ve numunelerin alttemel tabakasında kullanılacak malzemeler için Avustralya yerel devlet yolu şartnamesinde belirtilen minimum %80 CBR değeri gereksinimlerini karşıladığı bulunmuştur. GDBA malzemeleri, birkaç arayla temin edildiği için, ölçülen CBR değerindeki geniş aralık, atık malzemelerin toplam mukavemet ve kompozisyonlardaki küçük değişikliklerin bir sonucu olabileceği düşünülmüştür.

Arulrajah ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise beş farklı inşaat atığının (GDBA, ezilmiş tuğla, atık kaya, geri dönüştürülmüş asfalt kaplama ve geri dönüştürülmüş cam) bağlanmamış granüler temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçları Avustralya karayolu teknik şartnamesi ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada maksimum tane çapı 20 mm olan agregalar kullanılmıştır. Ancak cam agregası için bu boyut temin

edilemediğinden maksimum 4,75 mm tane çapı seçilmiştir. Modifiye Proktor sıkıştırma deneyi sonuçlarına göre atık kayanın en yüksek geri dönüştürülmüş atık cam agregalarının ise en düşük kuru yoğunluğa sahip olduğu bildirilmiştir. Bu olayın, atık cam agreganın daha ince ve daha düşük yoğunluğa sahip olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Atık cam agregalar yassı ve düz bir yüzeye sahip olduğundan sıkıştırma eğrileri basık olmuştur. Yol üstyapısı temel ve alttemel tabakalarında kullanım açısından GDBA'nın tipik taş ocağı malzemesine kıyasla eşit ya da daha üstün mühendislik özelliklerine sahip olduğu yazarlar tarafından beyan edilmiştir.

Dilbaş ve Çakır (2017) GDBA'nın yüksek su emme performansını iyileştirmek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla basınç dayanımı 10 MPa olan yıkılmış bir yapıdan kiremit, mermer, alçı, cam, tahta vs. gibi herhangi bir kirlilik içermeyen beton parçaları temin edilmiştir. Temin edilen parçalar çeneli kırıcı kullanılarak 0,125-30 mm aralığına getirilmiştir. Daha sonra farklı sayıda çelik bilye kullanılarak, 5 değişik devirde Los Angeles (LA) aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Agregaların su emme davranışının LA aşınma deneyine tabi tutulduktan sonra iyileştiği bildirilmiştir. Bu bağlamda en iyi sonucun 500 devir/10 bilye durumunda olduğu gözlemlenmiştir. Bu yöntemle GDBA'nın %9 olan su emme oranı %0,842'e kadar düşmüştür. Ayrıca aşınma deneyine tabi tutulan GDBA'ların LA aşınma dirençlerinde bariz bir şekilde iyileşme olduğu bildirilmiştir.

Ok ve Demir (2018), %88'i beton atıklarından oluşan karışık geri dönüştürülmüş agregayı farklı su içeriklerinde karıştırarak CBR deneyi yapmıştır. Malzemenin optimum su içeriğinde (%9,7) sıkıştırılan karışımların CBR değeri %99,98 olarak bulunurken, %6 su içeriğinde sıkıştırılan numunenin CBR değeri %50 ve optimum su içeriğinden daha yüksek olan %12 su içeriğinde sıkıştırılan numunenin CBR değeri ise %30 olarak bulunmuştur.

Karışık geri dönüştürülmüş agregaların CBR değeriyle ilgili bir başka çalışma Vegas ve arkadaşları (2011) tarafından yürütülmüştür. 3 farklı geri dönüşüm tesisinden temin edilen karışık agreganın içeriği incelendiğinde baskın malzemenin yaklaşık %57 oranla beton olduğu ve diğer malzeme miktarlarının %19 seramik, %16 doğal agrega, %6 asfalt

ve %2 alçı, cam vb. fraksiyonlar olduğu rapor edilmiştir. Hazırlanan numuneler zaman içinde CBR değerindeki artışı belirlemek için 4 ve 90 gün su altında kürlenmiştir. Geri dönüştürülen karışık agrega içerisinde beton ve seramik malzemelerin birlikte bulunması CBR değerinde artışa neden olmuştur. CBR değerindeki bu artışın ince öğütülmüş seramik malzemelerden kaynaklanan puzolanik reaksiyonlardan ve beton agregalarında bulunan hidrate olmamış çimento tanelerinin hidrasyonundan kaynakladığı belirtilmiştir. Seramik malzeme içeriği %5'in altında olan numunelerdeki CBR değeri artışının ise çimentonun hidrasyonundan kaynaklanabileceğini rapor etmişlerdir.

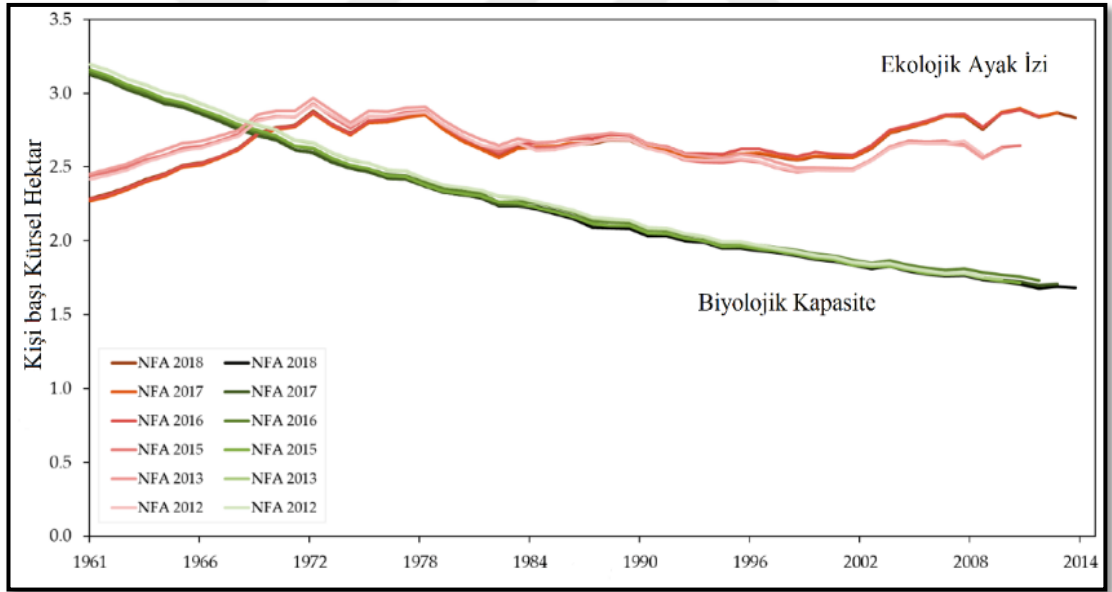
2.3.1. Geri Dönüşümün Avantajları

Çevresel Avantajlar

İnsanoğlu kendi ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla doğadaki kaynakları tüketerek atıkların hızlı bir şekilde artmasına sebep olmuştur (Tosunoğlu 2014, Özsoy 2015). Şekil 2.8'de özetlenen bilgiler bunun somut bir göstergesidir. Ekolojik dengenin 1960'lı yıllarda bir kırılma yaşayarak artış eğiliminde olduğu ve 1968 yılından sonra ekolojik ayak izinin biyolojik kapasiteyi geçtiği anlaşılmaktadır. Bu sebeple doğal kaynakların kısa bir süre de tükenmesi muhtemel olacaktır (Galli ve ark. 2014, Lin ve ark. 2018, ACPA-Wiki 2019). Küresel Ayak İzi Ağı (Global Footprint Network) tarafından yapılan ekolojik ayak izi hesaplamalarına göre, bugünkü üretim ve tüketim alışkanlıklarının devam ettiği sürece 2050 yılında gelindiğinde üç dünya eşdeğerinde bir dünyaya ihtiyaç olacağı belirtilmiştir.

Rao (2005) tarafından yapılan bir araştırmaya göre 2004 yılında ABD'de 2,7 milyon ton doğal agrega üretilmiştir. Doğal agrega özgül ağırlığının yaklaşık olarak 2,65 olduğu dikkate alınır, agrega üretimi için bir milyon metreküplük alandaki doğal çevrenin tahrip edildiği anlamına gelmektedir (Park 2003, Demir 2010). Ayrıca bu agregaların üretimi esnasında çevreye yaydığı sera gazları, toz emisyonu, görüntü ve gürültü kirliliği de dikkate alınması gereken hususlardır. Karbondioksit (CO₂) emisyonları için yapılan bir çalışmada bir ton doğal agrega üretimi sırasında 0,046 ton CO₂ salınımı olurken, bir ton geri dönüştürülmüş agrega üretiminde 0,0024 ton CO₂ salınımı olduğu belirlenmiştir. Doğal agregalara göre geri dönüştürülmüş beton agregalar %30'dan daha az karbon

emisyona neden olduğu bulunmuştur (Korre ve Durucan 2009). Avustralya’da yapılan benzeri bir çalışmada ise GDBA üretiminde konvansiyonel taş ocağı ürününe göre %22-%46 mertebesinde daha az CO₂ emisyonunun gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Australian Road Research Board 2009, Nayana ve Kavitha 2017). Ayrıca beton atıklarının geri dönüşümü sırasında beton parçaları karbonatlaşmaya maruz kalarak ortamdan yüksek miktarda karbondioksit emmektedir. Bir ton betonun geri kazanımı ile 11 kg CO₂ Emilimi gerçekleşmektedir (Kikuchi ve Kuroda 2011). Böylece betonun karbonatlaşması ile CO₂ emisyonları yılda yaklaşık %3 azalmaktadır. Buna bağlı sera gazlarının %65’ini oluşturan ve atmosferdeki ömrü binlerce yıl süren karbondioksitin Emilimi sağlanmaktadır (Nedeljkovic 2019, EPA 2020). Çevre Koruma Ajansı Kaynak Koruma Mücadelesi’nin dört ulusal önceliğinden biri sera gazı emisyonlarını azaltmak ve doğal kaynakları korumak olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla beton atıkların geri dönüştürülerek agrega olarak kullanılması bu gereklilikleri karşılamaktadır (EPA 2009).



Şekil 2.8. 1961'den 2014'e kadar Dünya Ekolojik Ayak İzi ve Biyolojik Kapasite değerleri (Lin ve ark. 2018)

Geri dönüştürülmüş agrega kullanımının neden olduğu çevresel etkiyi kontrol etmek amacıyla yaşam döngüsü değerlendirme analizleri de yapılmaktadır. Böylece analizler aracılığıyla, farklı agregaların üretiminde neden olunan çevresel etki karşılaştırılmaktadır. 1 ton doğal ve geri dönüştürülmüş agrega üretimi için karakterizasyon sonuçları Çizelge

2.10'da gösterilmektedir (Agrela ve ark. 2020). KA üretimi, değerlendirilen tüm kategorilerde maksimum bir çevresel etkiye neden olmaktadır. Karışık geri dönüştürülmüş agrega üretimi ise, küresel ısınma veya ozon tabakasının incilmesi gibi çevresel etkileri doğal agrega üretimine göre sırasıyla %41,1 ve %45,9 oranında azaltmıştır. Bu azalma miktarı GDBA üretimi esnasında aynı göstergeler için %53,6 ve %55,8 değerlerinde belirlenmiştir. KA'nın geri dönüştürülmüş agregalara göre üretiminin neden olduğu çevresel etkideki artış, esas olarak, üretimlerinde yer alan daha fazla sayıda işlem, doğal kaynakların çıkarılması ve tüketilmesi süreçlerinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir (Serres ve ark. 2016, Rosado ve ark. 2017, Agrela ve ark. 2020).

Çizelge 2.10. Doğal agrega, karışık geri dönüştürülmüş atık agrega ve geri dönüştürülmüş beton agregasının karakterizasyon sonuçları (Angela ve ark. 2020)

Kategori	Birim	Doğal Agrega	Karışık Atık Agregası	Atık Beton Agregası
Abiyotik tükenme	kg Sb eq.	$2,32 \times 10^{-6}$	$8,63 \times 10^{-7}$	$6,85 \times 10^{-7}$
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	MJ	23,9	13,9	11,1
Küresel ısınma	kg CO ₂ eq.	2,02	1,19	0,938
Ozon tabakasının incilmesi	kg CFC-11 eq.	$1,99 \times 10^{-7}$	$1,08 \times 10^{-7}$	$8,79 \times 10^{-8}$
İnsan toksisitesi	kg 1,4-DB eq.	0,761	0,451	0,345
Tatlı su sucul ekotoksikite	kg 1,4-DB eq.	0,677	0,404	0,302
Deniz sucul ekotoksikite	kg 1,4-DB eq.	$2,58 \times 10^3$	$1,54 \times 10^3$	$1,14 \times 10^3$
Karasal ekotoksikite	kg 1,4-DB eq.	$5,13 \times 10^{-3}$	$3,09 \times 10^{-3}$	$2,32 \times 10^{-3}$
Fotokimyasal oksidasyon	kg C ₂ H ₄ eq.	$4,43 \times 10^{-4}$	$2,53 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-4}$
Asitleştirme	kg SO ₂ eq.	$1,24 \times 10^{-2}$	$6,95 \times 10^{-3}$	$5,49 \times 10^{-3}$
Ötrofikasyon	kg PO ₄ eq.	$3,82 \times 10^{-3}$	$2,24 \times 10^{-3}$	$1,76 \times 10^{-3}$

Ekonomik Avantajlar

Beton atıklarının geri dönüşüm tesisinde işlenmesiyle elde edilen GDBA'nın doğal agregaya kıyasla çok daha ucuz üretildiği bilinmektedir (Lennon 2005). Böylece, beton ve asfalt kaplamaların büyük hacmini oluşturan doğal agreganın yerine GDBA'nın kullanımı ile önemli ölçüde ekonomik kazanç sağlanabilmektedir (Tayabji ve ark. 2010). Ayrıca beton atıkların geri dönüştürme maliyetinin, bertaraf maliyetinden çok daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Örneğin ABD'de yapılan bir araştırmaya göre inşaat atıklarının bertaraf maliyeti ton başına 105 dolar, ayrıca bu atıkların çöp sahalarına taşınmasının maliyeti ton başına 31 dolar olduğu bildirilmiştir (Lennon 2005, HQ AFCEE Report 1996). Ancak bu atıkların yeniden değerlendirmek amacıyla geri dönüştürülmesiyle ise bu maliyetin %90 oranında azaldığı aynı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Avusturya'da yapılan benzer bir araştırmada ise geri dönüşümle birlikte çöp sahalarına gönderilen atık miktarında %43'lük ve atık işleme ücretlerinde %50'lik maliyet tasarrufu sağlandığı vurgulanmıştır (McDonald ve Smithers 1998).

2.3.2. Geri Dönüşümün Dezavantajları

- Geri dönüşüm tesisi sayısı sınırlı olduğundan doğal agregalar kolay bir şekilde temin edilebilirken GDBA'nın temini zaman almaktadır (Cardosa ve ark. 2016).
- GDBA hacimleri, kalitesi ülkeler hatta bölgeler arasında farklılık göstermektedir ve genel bir bileşim sunulamamaktadır (Bergsdal ve ark. 2007, Monier ve ark. 2011, JRC 2011).
- GDBA'nın içeriğinin değişkenliği farklı kaynaklardan elde edilmesinden dolayı doğal agregaya kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle GDBA kullanılmadan önce zaman alıcı ve ekonomik olmayan deney ve analiz prosedürlerine tabi tutulmalıdır (Tam ve ark. 2018).
- Sıkıştırma tanelerde meydana gelen ezilme ve kırılmadan dolayı su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlık gibi GDBA'nın özelliklerini değiştirebilir. Bu nedenle belirli bir uygulama için performansları laboratuvar ve sahada incelenmelidir (Sóbol ve ark. 2017).

- Bazı ülkeler ve uygulamalar için (örneğin demiryollarındaki balast tabakası) tasarım kuralları çok kısıtlayıcıdır ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımına izin verilmemektedir.
- Tasarımcılar ve yükleniciler çeşitli uygulamalar için doğal agreganın malzeme özellikleri ve davranışı konusunda deneyime sahiptirler ve herhangi bir değişkenlikte nasıl davranacaklarını bilirler. Ancak GDBA'nın özelliklerindeki belirsizlik ve değişkenlik kullanımını kısıtlamaktadır (Ardalan ve ark. 2017).
- GDBA üretimi aşamasında beton bloklarla birlikte ahşap, cam, plastik donatı vb. malzemeler taşınmakta ve GDBA'nın fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Şekil 2.9'da tesisten temin edilen GDBA agregası içerisinde bulunan safsızlıklara ait resimler sunulmaktadır.



Şekil 2.9. Geri dönüştürülmüş beton agregası içerisinde bulunan safsızlıklar

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

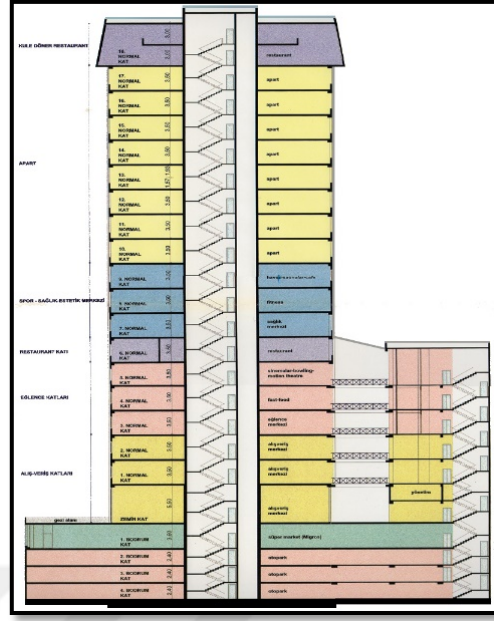
Bu çalışmada, 35-40 MPa dayanıma sahip atık betonların geri dönüşümünden elde edilen GDBA'nın karayolu üstyapısı temel ve alttemel tabakalarında agrega olarak kullanımının uygunluğu deneysel olarak incelenmiştir. Tesisten temin edilen malzemelerin özellikleri ve Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2013) (KTŞ) uygun gronölometriye sahip karışım hazırlanması sırasında izlenen yöntem bu bölümde ele alınmıştır.

3.1. Malzeme

Çalışma kapsamında geri dönüştürölüş beton agregası ve kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır.

3.1.1. Geri Dönüştürölüş Beton Agregası

Çalışma kapsamında kullanılan geri dönüştürölüş beton atıklar kentsel dönüşüm kapsamında Osmangazi ilçesinde bulunan Tower Plaza binasının yıkılması sonucu elde edilmiştir. 1998 yılında tamamlanan plazanın Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından taşıyıcı sisteminde yapılan incelemeler sonucunda deprem yönetmeliğı açısından yetersiz olduğı ve yıkılma tehlikesi bulunduğı için yıkım kararı alınmıştır. Tower Plaza, 38000 m² alan üzerine inşa edilmiş iki bloktan oluşmaktadır. Birinci blok 4 bodrum, zemin ve 18 normal kat, ikinci blok ise 4 bodrum ve 5 normal kattan oluşmaktadır. Alışveriş merkezi ve yaşam alanı şeklinde planlanan bu iki blok arasında köprülerle geçiş bulunmaktadır. Plazaya ait bir görsel ve kat kesiti Şekil 3.1'de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Tower Plaza'nın görünümü ve kat kesit planı

Çalışma kapsamında kullanılan agregalar, plazanın bodrum katı beton atıklarının geri dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. PROTEST Yapı Araştırma ve Test Merkezi tarafından Tower Plaza bodrum katından alınan karot numuneleri ve basınç dayanımına ait görseller Şekil 3.2'de verilmiştir. Karot numunelerinin basınç dayanımının 34.47-38.65 MPa arasında değiştiği bildirilmiştir.

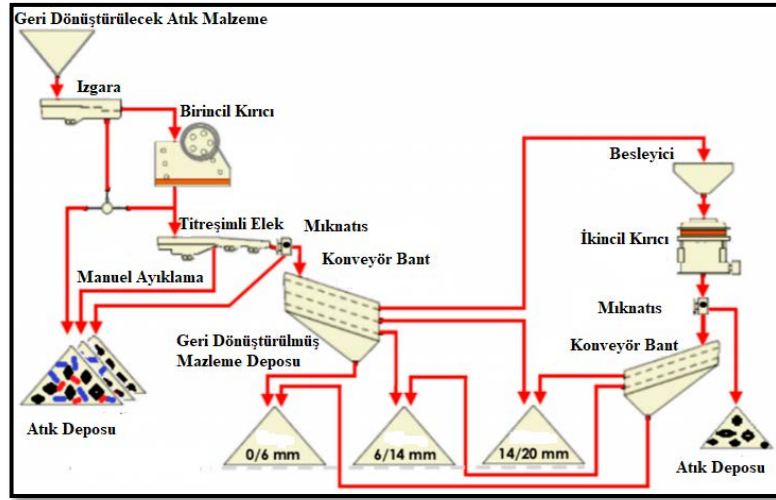


Şekil 3.2. Silindirik karot numuneleri ve basınç dayanımının belirlenmesi (PROTEST Yapı Araştırma ve Test Merkezi, 2019)

Tower Plaza'nın yıkılmasıyla elde edilen beton bloklar Bursa Büyükşehir Belediyesi Küçükbalıklı tesisinde geri dönüştürülmüştür. Geri dönüşüm tesisine ait görsel Şekil 3.3'te sunulmaktadır. Kentsel dönüşüm kapsamında ortaya çıkan atıklar araçlarla merkezi geri dönüşüm tesislerine taşınmıştır. Tesiste depolanan bu atıklar türüne göre ayrılmakta ve içerisinde bulunan tahta, plastik, cam, çelik vb. gibi kirletici malzemeler uzaklaştırılmaktadır. Daha sonra, darbeli kırıcı ile daha küçük parçalar haline getirilen beton bloklardan çeneli kırıcı kullanılarak 75-150 mm tane çapına sahip agregalar elde edilmiştir. Bunu takiben kil, toz, alçıtaşı vb. malzemeler bir hava üfleyici yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Temizlenen agregalar daha küçük tane çaplarına getirilmek üzere ikincil konik kırıcıda öğütülmüştür. Öğütülmüş agregalar konveyör bir banttıan geçirilerek mıknatıs yardımıyla içinde bulunan küçük çelik parçalarından arındırılmıştır. Benzer proses diğer araştırmacılar tarafından da uygulanmıştır (Vuono ve Welch 1988, FHWA 2014). Beton atıkların geri dönüşüm prosesi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Bursa Büyükşehir Belediyesi Küçükbalıklı Geri Dönüşüm Tesisi



Şekil 3.4. Beton atıklarının geri dönüşüm prosesi

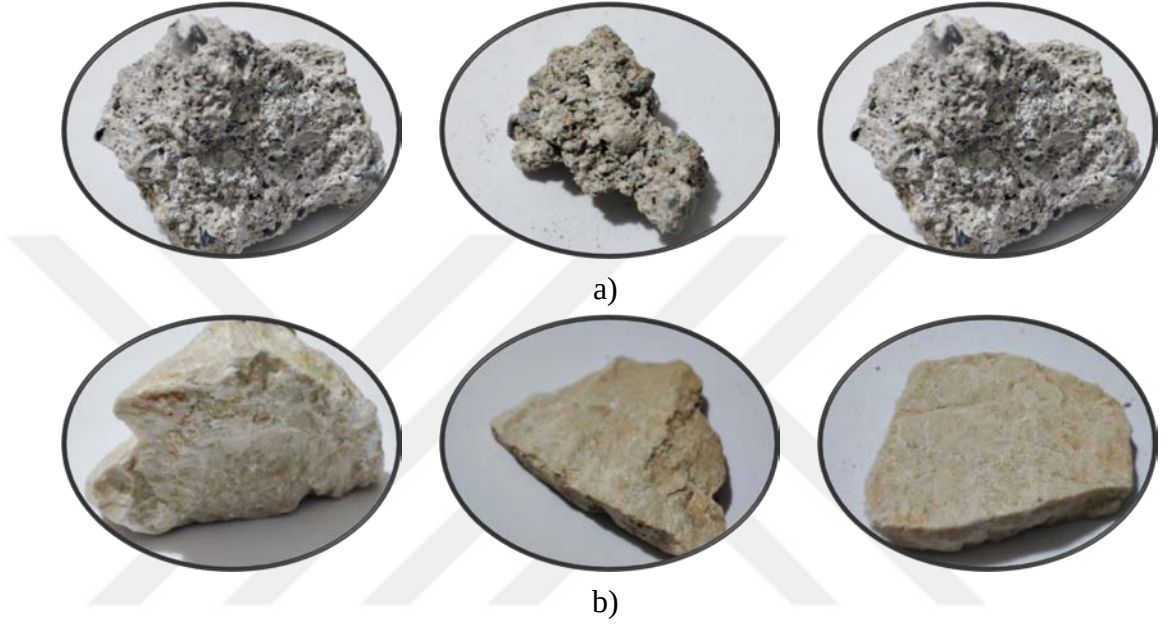
3.1.2. Kırma Kireçtaşı Agregası

Deneyisel çalışmada kullanılan kırma kireçtaşı agregası Bursa Beton Kayapa Agregası Ocağı'ndan temin edilmiştir. Kamyonlarla ocak sahasına getirilen kayalar agrega bunkerlerine boşaltılıp arasında bulunan kil ve istenmeyen malzemelerden arındırılmıştır. Temizlenen kayalar konkasörden geçirilerek parçalanmış ve konveyör bantları yardımıyla titreşimli eleklerle ulaştırılmıştır. Kırılmış taşlar 4 katlı titreşimli elekte istenilen tane çaplarına göre ayrılarak konveyör bantların yardımı ile agrega silolarına taşınmıştır. Ocakta agregalar 0-5 mm, 5-12 mm, 12-25 mm ve 25-45 mm tane çaplarında ayrı ayrı depolanmıştır. Şekil 3.5'de Bursa Beton Kayapa Agregası Ocağına ait bir görsel sunulmaktadır.



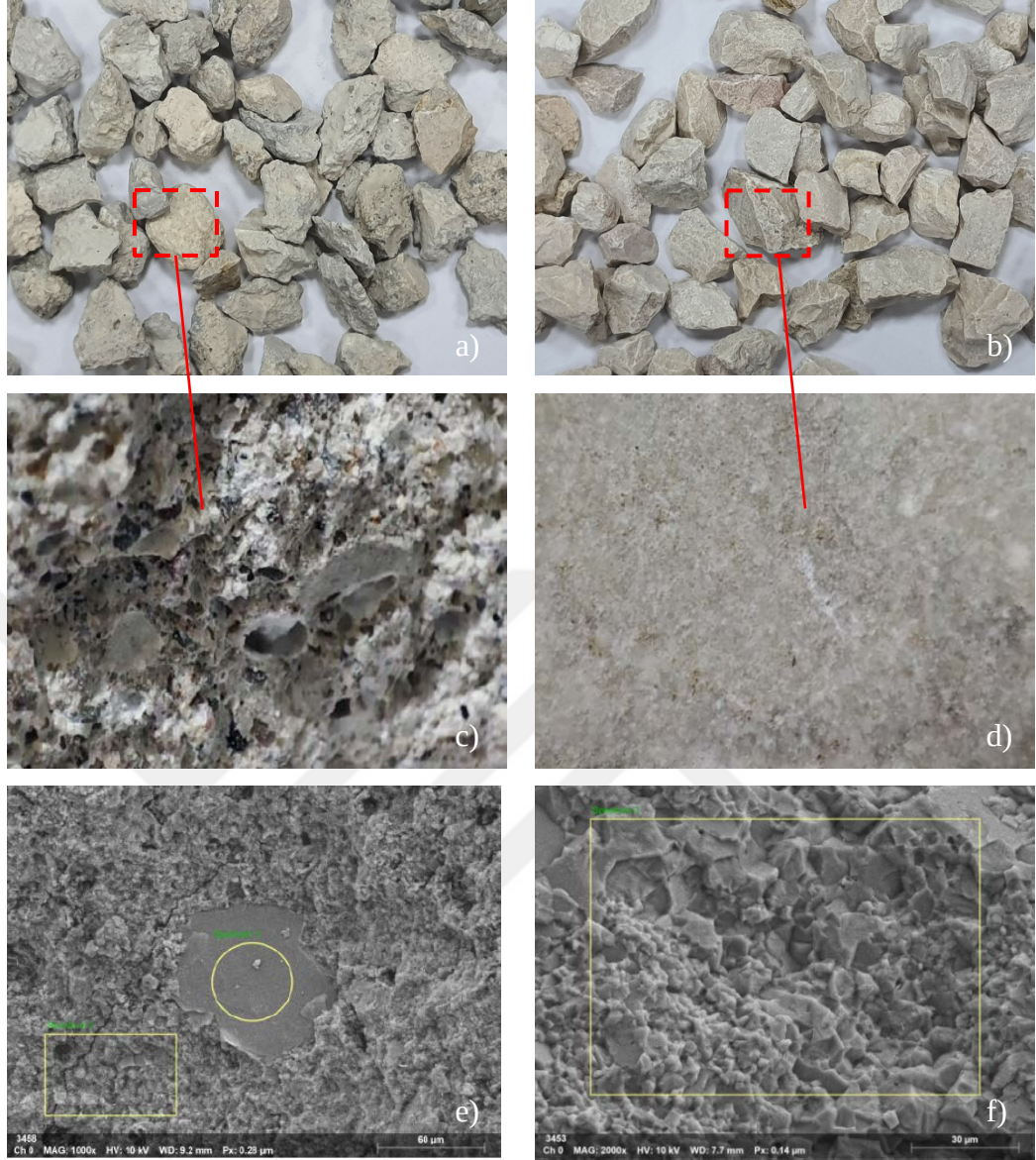
Şekil 3.5. Bursa Beton Fabrikası Kayapa Agregası Ocağı (www.bursabeton.com)

Temin edilen GDBA ve kırma kireçtaşı agreganın yüzey görünümü ve mikro-yapısı sırasıyla, Şekil 3.6 ve 3.7’de gösterilmiştir. GDBA ’ların kireçtaşı agregasına kıyasla daha gözenekli, pürüzlü, köşeli ve heterojen bir yapıya sahip olduğu Şekil 3.6’dan da anlaşılmaktadır. Benzer ifadeler diğer araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (Guedes ve ark. 2013, Thomas ve ark. 2013, Giwangkara ve ark. 2019, Wang ve ark. 2020).



Şekil 3.6. a) Geri dönüştürülmüş beton agregası yüzey görünümü, b) Kireçtaşı agregası yüzey görünümü

GDBA tanelerinin yüzeyi pürüzlü ve bağlı harç nedeniyle çok fazla boşluk içerirken KA taneleri pürüzsüz ve boşluksuz bir yüzeye sahiptir. Bu durum Şekil 3.6 ve 3.7’den net bir şekilde anlaşılmaktadır.

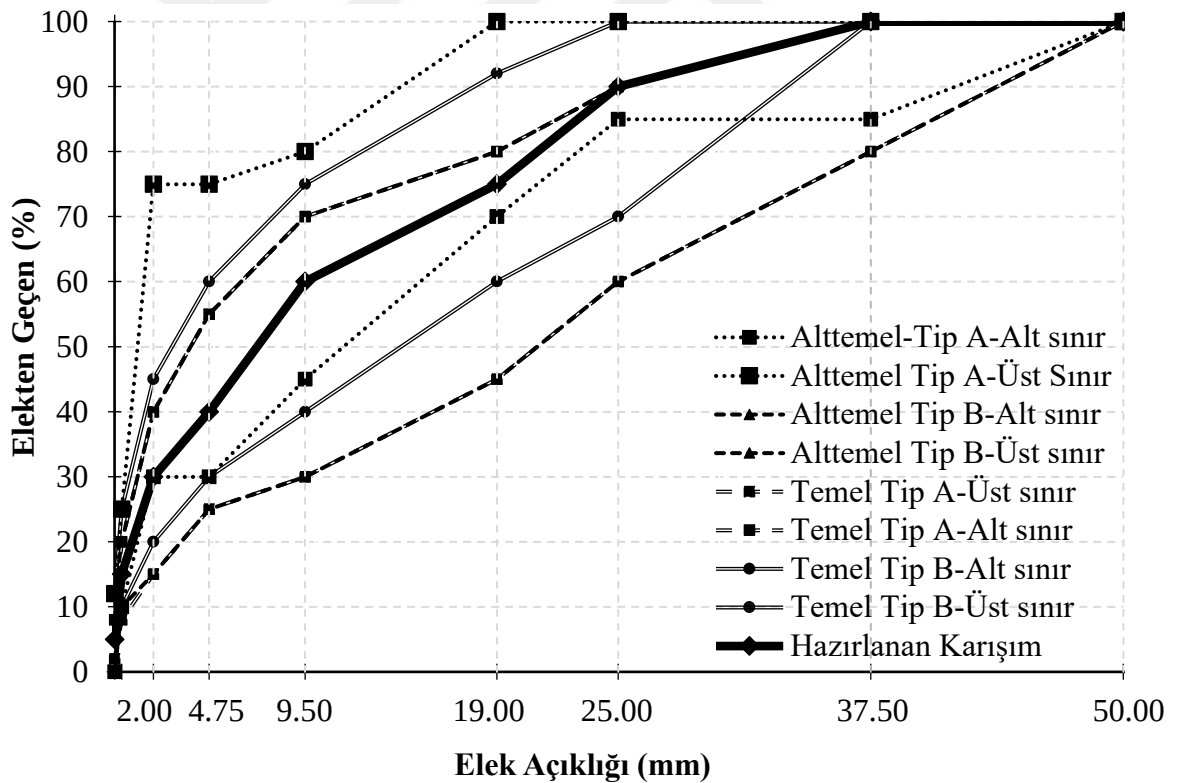


Şekil 3.7. Geri dönüştürülmüş beton agregası ve kırma kireçtaşı agregasının mikroskopik görünümü; a, c, e: Geri dönüştürülmüş beton agregası; b, d, f: Kırma kireçtaşı agregası

3.2. Agregalar karışımlarının hazırlanması

Çeşitli tane boyutlarında temin edilen geri dönüştürülmüş beton ve kırma kireçtaşı agregaları KTŞ'de temel ve alttemel tabakası için belirtilen gradasyon sınırlarına göre hazırlanmıştır. Bu amaçla, agregalar 1 ½", 1", 3/4", 3/8", No.4#, No.10#, No.40# ve No.200# eleklerinden elenmiştir KTŞ'de hem alttemel hem de temel tabakaları için Tip A ve Tip B olmak üzere ikişer tip gradasyon eğrisinin mevcut olduğu bilinmektedir (KTŞ

2013). Agrega karışımlarının gradasyon eğrilerinin belirlenmesinde karışımların hem geniş bir kullanım alanına sahip olabilmesi hem de sahada uygulanabilir olabilmesi gerekçesi ile hem Tip A hem de Tip B'nin alt ve üst sınırları dikkate alınmıştır. Böylece hem temel hem de alttemel tabakalarında kullanılan agrega karışımı için tek bir gradasyon eğrisi seçilmiştir. Seçilen gradasyon eğrisi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında kireçtaşı agregasının %25, 50, 75 ve 100 oranlarında GDBA ile ikame edilerek 5 farklı agrega karışımı elde edilmiştir. Tüm karışımlar, temel ve alttemel tabakaları için seçilen agrega gradasyonuna göre (Şekil 3.8) hazırlanmıştır. Agrega karışımlarının isimlendirmesi kireçtaşı (KA) ve geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeriğine göre yapılmıştır. Örneğin %100 kireçtaşı ve %100 geri dönüştürülmüş beton agregası içeren karışımlar sırasıyla, 100KA ve 100GDBA olarak adlandırılırken %75 kireçtaşı ve %25 geri dönüştürülmüş beton agregası içeren karışım ise 25GDBA olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.8. Karayolları Teknik Şartnamesi Temel ve Alttemel-Tip A ve Tip B'ye göre hazırlanan karışımın tane çapı dağılım eğrisi

3.3. Yöntem

Seçilen gradasyon eğrisine uygun olarak hazırlanan agrega karışımlarının özgül ağırlık ve su emme, yassılık endeksi, magnezyum sülfat direnci, Los Angeles aşınma direnci ve agrega etki değeri gibi karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, karışımların kompaksiyon, Kaliforniya Taşıma Oranı, permeabilite ve esneklik modülü gibi özellikleri da ölçülmüştür. Bu bölümde ilgili deneylerin nasıl ve hangi standartlara uygun olarak gerçekleştirildiği açıklanmıştır.

3.3.1. Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini

Karışım oranları hesaplanırken agreganın özgül ağırlığı ve su emme değerleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özgül ağırlık, agreganın gerçek birim hacmine karşılık gelen ağırlığı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle; agreganın ağırlığının o agreganın hacmine eşdeğer suyun ağırlığına oranıdır ve birimsizdir (ASTM C127 2015, ASTM C128 2015). Su emme kapasitesi ise kuru agrega ile karşılaştırıldığında agrega tanelerinin sahip olduğu gözeneklerde emilen su nedeniyle agrega kütleindeki değişimi hesaplamak için kullanılmaktadır (ASTM C127 2015, ASTM C128 2015). Agregada tanelerinde bulunan boşluk oranının ve doygun kuru yüzey duruma gelinceye kadar emdiği su miktarının belirlenmesi agreganın kimyasal stabilitesini, donma-çözülme ve aşınma direnci gibi özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Su emme kapasitesi yüksek olan agregaların içerisine su kolayca girebilmekte ve soğuk havalarda buz haline dönüşerek genişlemeye, çatlamaya yol açmaktadır (Guo ve ark. 2018). Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı değerlerini belirlemek için 31,5 mm göz açıklıklı deney eleğinden geçen ve 4,75 mm göz açıklıklı deney eleğinde tutulan iri agrega taneleri için tel sepet yöntemi, 4,75-0,075 mm aralığındaki ince agregalar için ise piknometre yöntemi kullanılmıştır. KTŞ'ye göre temel alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin su emme oranının sırasıyla %3,0 ve %3,5'ten az olması gerekmektedir.

İri Agregalarda Özgül Ağırlık ve Su Emme Tayini

İri agregalarda özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi ASTM C127 “İri Agregada için Yoğunluk, Bağlı Yoğunluk (Özgül Ağırlık) ve Su Emme Oranı” Standardına uygun

olarak yapılmıştır. No.4 (4,76 mm)-1 ½ in. (38,1 mm) boyutlarındaki tane boyutları için özgül ağırlığı ve su emme değerleri tel sepet yöntemine uygun olarak belirlenmiştir.

Deney için gereken malzeme miktarları ASTM C127 Standardına göre hazırlanmıştır. Alınan numune, yüzeyine yapışmış ince tanelerden arındırmak için 4,75 mm elek üzerinde yıkanmış (Şekil 3.9a) ve agregalar doygun hale gelinceye kadar 24 ± 4 saat suda bekletilmiştir (Şekil 3.9b). Standartta belirtilen suda bekletme süresi doğal agregalara göre belirlenmiştir. Ancak araştırmacılar GDBA'ların içerdiği derin boşluklar nedeniyle doğal agregalar için önerilen bu sürenin yeterli olmadığını hatta bazı durumlarda tam doygunluğun 120 saate kadar sürebileceğini bildirmişlerdir (Tam ve Lee 2007, Tam ve ark. 2008). Bu nedenle, bu çalışmada agregalar 24 ± 4 ve 48 ± 4 saat olmak üzere 2 farklı sürede suda bekletilmiştir. Tamamen suya doyan agregalar sudan çıkartılmıştır. Agregalar üzerinde görülebilen su tabakası kalmayınca kadar emici bir bezle suya doygun yüzeyi kuru (DYK) hale getirilmiş ve agregaların DYK durumundaki ağırlığı ölçülmüştür (Şekil 3.9c). DYK durum, agregalar bünyesindeki boşlukların su ile dolu, yüzeyinin kuru olduğu durumdur. Bu sebeple, agregalar gözeneklerindeki suyun buharlaşmamasına dikkat edilmiştir. Ağırlığı belirlenen DYK numune Arşimet terazisinde tartılmıştır. Şöyle ki; numune kafes örgülü tel sepete konarak su ile dolu kovanın içine su yüzeyinden en az 5 cm kalacak şekilde daldırılmıştır. Batırılmış durumdayken numune su yüzüne çıkarılmadan kovanın içinde en az 10 defa serbestçe daldırılıp çıkarılarak taneler arasında kalabilecek hava kabarcıkları çıkarılmıştır. Özel bir düzenekle terazi kefesinin ortasına yerleştirilen tel sepet yardımıyla suya doygun malzemenin sudaki ağırlığı belirlenmiştir. Suda tartım yapılan numune geniş bir tepsiye konularak sabit kütleyle gelene kadar etüvde 110 ± 5 °C'de kurutularak kuru ağırlığı belirlenmiştir (Şekil 3.9d). İri agreganın kuru ağırlığı (M_1), DYK ağırlığı (M_2) ve sudaki ağırlığı (M_3) belirlendikten sonra aşağıdaki denklemler kullanılarak karışımların özgül ağırlık ve su emme oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Kuru Özgül Ağırlık } (\rho_k) = \frac{M_1}{M_2 - M_3} \quad (3.1)$$

$$\text{Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık } (\rho_d) = \frac{M_2}{M_2 - M_3} \quad (3.2)$$

$$\text{Görünen Özgül Ağırlık } (\rho_{ig}) = \frac{M_1}{M_1 - M_3} \quad (3.3)$$

$$\text{Su emme oranı (m)} = \left[\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right] * 100 \quad (3.4)$$

Burada,

M_1 : Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g)

M_2 : Numunenin doymun kuru yüzey durumdaki ağırlığı (g)

M_3 : Numunenin sudaki ağırlığı (g)



a)



b)



c)



d)

Şekil 3.9. a) İri agreganın ince tanelerden temizlenmesi, b) 24 saat suda bekletilmesi, c) Suyu doymun kuru yüzey agregası, d) etüvde kurutulmuş agregası

İnce Agregalarda Özgül Ağırlık ve Su Emme Tayini

İnce agregalarda özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi ASTM C128 “İnce Agregası için Yoğunluk, Bağıl Yoğunluk (Özgül Ağırlık) ve Su Emme Oranı” Standardına uygun

olarak yapılmıştır. No. 200 (0,075 mm) –No. 4 (4,75 mm) tane boyutlarındaki agregalar için özgül ağırlığı ve su emme değerleri piknometre yöntemi ile belirlenmiştir.

Deney için gereken malzeme miktarı agreganın tane büyüklüğüne bağlı olarak ASTM C128 Standardına göre hazırlanmıştır. Alınan numuneyi yüzeyine yapışmış ince tozlardan temizlemek için 0,075 mm elek üzerinde yıkanmıştır. Temizlenen ince agregalar suya doygun hale gelinceye kadar 24 ± 4 ve 48 ± 4 saat suda bekletilmiştir. Daha sonra test numunesi taneleri kaybolmayacak şekilde suyu süzülerek geniş bir tepsi içine yayılmıştır. İnce agreganın DYK ağırlığının belirlenmesi için sıcak hava akımı oluşturan ısıtıcı ile üflenerek kurutulmuştur. Numunelerin homojen bir şekilde kurumasını sağlamak için agrega karışımı sürekli olarak bir kaşık yardımı ile karıştırılmıştır. Numunenin DYK hali kesik huni yöntemine göre belirlenmiştir. DYK haline geldiği düşünülen numune kesik huninin geniş yüzeyi alta gelecek şekilde huninin içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.10a). Silindirik 25 ± 3 mm çapında sıkıştırma çubuğu ile ince agreganın yüzeyinden 5 mm yukardan serbestçe düşürülerek hafifçe sıkıştırılmıştır. Kesik huni çıkarıldığında sıkıştırılmış numunenin konikliği bozulduğunda ince agregaların DYK hale geldiği anlaşılmış ve kütlesi belirlenmiştir (Şekil 3.10b). DYK hale getirilmiş numune, kütlesi belli olan piknometrenin içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlemden sonra piknometrenin 2/3'üne kadar su ilave edilmiş ve taneler arasındaki hava kabarcıklarının giderilmesi için hafifçe çalkalanmıştır (Şekil 3.10c). Daha sonra piknometre üzerindeki referans çizgisine kadar su ile doldurulup tartılmıştır (Şekil 3.10d). Piknometre içindeki numune kaybolmayacak şekilde çıkarıp ve 24 ± 2 saat boyunca etüvde kurutularak kuru ağırlığı belirlenmiştir. Son aşamada piknometrenin su dolu ağırlığının belirlenmesi için referans çizgisine kadar su doldurulup, tartılmıştır. Aşağıdaki denklemler kullanılarak ince agrega içeren karışımların özgül ağırlık ve su emme oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Kuru Özgül Ağırlık } (\rho_k) = \frac{M_1}{M_2 + M_4 - M_3} \quad (3.5)$$

$$\text{Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık } (\rho_d) = \frac{M_2}{M_2 + M_4 - M_3} \quad (3.6)$$

$$\text{Görünen Özgül Ağırlık } (\rho_{ig}) = \frac{M_1}{M_1 + M_4 - M_3} \quad (3.7)$$

$$\text{Su emme oranı (m)} = \left[\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right] * 100 \quad (3.8)$$

Burada;

M_1 : Numunenin etüv kurusu kütlesi (g)

M_2 : Numunenin doymun kuru yüzey durumdaki ağırlığı (g)

M_3 : Piknometre + Numune + Su ağırlığı (g)

M_4 : Piknometre + Su ağırlığı (g)



a)



b)



c)



d)

Şekil 3.10. a) İnce agreganın doymun kuru yüzey hale getirilmesi, b) Doymun kuru yüzey agrega, Piknometre + Numune + Su ağırlığının belirlenmesi (c) ve Piknometre + Su ağırlığının belirlenmesi

3.3.2. Los Angeles Aşınma Direnci Tayini

Los Angeles (LA) aşınma direnci, darbe ve aşındırma etkilerinin agrega taneleri üzerinde oluşturduğu bozulmanın bir ölçüsüdür (ASTM C131 2016). Bilindiği gibi agreganın aşınmaya karşı dirençli olması sürekli tekrarlı yüklere maruz kalan yol gibi projelerde daha çok ön plana çıkmaktadır. Buna ilaveten, kaplama tabakasının yerleştirilmesi ve sıkıştırılması sırasında agregalar kırılma ve aşınmaya maruz kalmaktadır (Vicroads 2009, KGM 2013). Bu amaçla, granüler yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin tekrarlı tekerlek yüklerine karşı darbe ve aşınma direncinin belirlenmesi için LA aşınma deneyi yapılmaktadır. Agregaya yüzeyindeki ve bünyesindeki deformasyonlar LA aşınma deneyi ile saptanarak aşınma direncinin yeterli olup olmadığı araştırılmaktadır. Pratikte daha uzun sürede meydana gelecek aşınma veya parçalanma, laboratuvarında yapılan aşınma deneyi ile kısa sürede belirlenebilmekte ve agrega buna göre değerlendirilmektedir. KTŞ'ye göre temel tabakası için aşınma direnci değerinin %35'ten, alttemel tabakası için ise %45'den az olması gerekmektedir.

LA aşınma direnci ASTM C131 "İri Agregaların Los Angeles Makinesinde Aşınma ve Darbe ile Parçalanma Direnci Tayini" Standardına uygun olarak belirlenmiştir. Darbeli aşınma kaybı esas olarak, bir silindir içinde iri agregaların çelik bilyelerle birlikte dönme sırasında yukarıda toplanıp, serbest düşme esnasında çarpmaları sonucu oluşan darbelerle parçalanma veya küçük parçaların kopması prensibine dayanmaktadır. Hazırlanan 5 farklı karışımın 3/8 in. (9,5 mm)-1 1/2 in. (37,5 mm) ve 1/2 in. (12,5 mm)-3/4 in. (19 mm) tane boyutları için LA aşınma direnci belirlenmiştir,

ASTM C 131 Standardına göre maksimum agrega tane çapına bağlı olarak deney için gereken agrega numunesi ağırlığı ve bilye sayısı değişmektedir. ASTM C131 Standardında belirtilen agrega gradasyonuna bağlı olarak deneyde kullanılacak minimum test numunesi ağırlıkları ve bilye sayıları Çizelge 3.1'de verilmektedir. 5 farklı karışım için A ve B gronülometri sınıfına uygun olacak şekilde Çizelge 3.1'de belirtilen miktarlarda agregalar tartılmıştır. Hazırlanan agrega taneleri üzerinde bulunan toz parçaları yıkanarak temizlenmiştir. Yıkanmış agrega numuneleri 24 saat boyunca 110 ± 10 °C'de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra kurutulmuş numuneler iç çapı 711 ± 5 mm

ve eni 508 ± 5 mm olan Şekil 3.11’de gösterilen LA aletine yerleştirilmiştir. Standarda göre A sınıfı gronölometriye göre hazırlanmış numuneler için çapı 468 mm ve ağırlığı 410 g olan çelik küresel bilyelerden 12 adet, B sınıfı için ise 11 adet kullanılmıştır. Numune ve bilyeler Los Angeles aletine yerleştirildikten sonra kapak sıkıca kapatılarak tambur dakikada 31-33 devir hızla 500 devir döndürülmüştür.

Çizelge 3.1. Los Angeles Deneyi gerekli numune miktarları ve kullanılacak bilye sayısı (ASTM C131 2006)

Elek Açıklığı		Kullanılacak Numune Miktarları (g)			
		Karışımlar			
Geçen	Kalan	A	B	C	D
37,5 mm (1 1/2 in.) - 25 mm (1 in.)		1250 $\pm$ 25			
25 mm (1 in.) - 19 mm (3/4 in.)		1250 $\pm$ 25			
19 mm (3/4 in.) - 12,5 mm (1/2 in.)		1250 $\pm$ 10	2500 $\pm$ 10		
12,5 mm (1/2 in.) - 9,5 mm (3/8 in.)		1250 $\pm$ 10	2500 $\pm$ 10		
9,5 mm (3/8 in.) - 6,3 mm (1/4 in.)				2500 $\pm$ 10	
6,3 mm (1/4 in.) - 4,75 mm (No. 4)				2500 $\pm$ 10	
4,75 mm (No. 4) - 2,36 mm (No. 8)					5000 $\pm$ 10
Kullanılacak Küre Sayısı		12	11	8	6

Daha sonra, agrega numuneleri 1,60 mm’lik elekten elenmiş ve tane kaybı olmaksızın elek üzerinde kalan malzeme ağırlığı ölçülmüştür. Agrega karışımlarının aşınma değeri Denklem 3.9’da da gösterildiği gibi, elek üstünde kalan numune ağırlığının ilk ağırlığa oranı hesaplanarak yüzde cinsinden elde edilmiştir. Bu değerin küçük olması agreganın aşınma direncinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 3.12’de 50GDBA karışımının Los Angeles aşınma deneyi öncesi ve sonrası bilye darbeleri ve serbest düşü nedeniyle kırılmış ve parçalanmış hali örnek olarak verilmektedir.

$$\text{LA Aşınma Değeri (\%)} = \frac{M_1 - M_{1,6}}{M_1} \quad (3.9)$$

Burada;

M_1 : Numunenin etüv kurusu ilk ağırlığı (g)

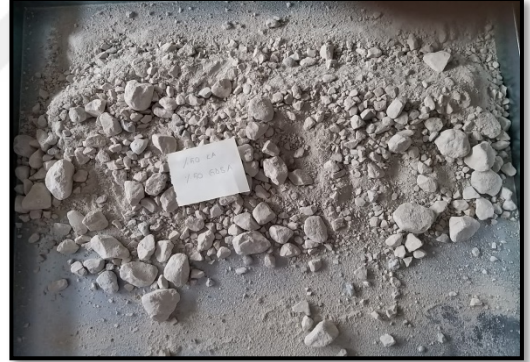
M_{1,6}: Numunenin 1,6 mm elek üzerinde kalan ağırlığı (g)



Şekil 3.11. LA aşınma aleti ve deney için hazır hale getirilmesi



a)



b)

Şekil 3.12. 50GDBA karışımının a) LA aşınma deneyi öncesi, b) LA aşınma deneyi sonrası görünümü

3.3.3. Agrega Darbe Değer Tayini

Agrega darbe değeri deneyi agreganın ani şok veya darbeye karşı direncinin göreceli olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu deney, 10-14 mm arasında tane çapına sahip agregalar için uygulanmaktadır. Daha büyük tane çapına sahip agregalar için bu deneyin uygun olmadığı ilgili standartta belirtilmektedir.

Agrega darbe değeri deneyi BS 812-112 “Agrega Darbe Değeri” Standardına uygun olarak yapılmıştır. Malzemeyi temsil eden deney numunesi 10 mm ve 14 mm eleklerinden elenmiştir. Numuneler 4 saatten fazla olmayacak şekilde yüzey neminin giderilmesi için 105 ± 5 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur. Ardından agregalar silindir kaba yerleştirilip sıkıştırma çubuğu ile 25 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Agregalar sıkıştırılırken sıkıştırma çubuğunun agregaya yüzeyinden yaklaşık 5 cm yükseklikten serbestçe düşürülmesine ve sıkıştırma işleminin tüm numuneye eşit olacak şekilde uygulanmasına özen gösterilmiştir. 25 darbe ile sıkıştırılan numune hiçbir kayıp olmadan alt çapı 300 mm, iç çapı 102 mm, iç derinliği 50 mm silindir biçimli bir hücre içine yerleştirilmiştir. Daha sonra 14 kg ağırlığındaki çekiç 380 mm yükseklikten agregaya taneleri üzerine 15 kez serbestçe düşürülmüştür. Darbeye maruz kalan agregaya karışımları 2,36 mm elekten elenerek elekten geçen malzeme ağırlığı tartılmıştır. Agregaların darbe dayanım direnci denklem 3.10 kullanılarak hesaplanmıştır. Deneyde kullanılan agregaya darbe değeri tayini aleti ve hazırlanan 100GDBA karışımına ait görsel Şekil 3.13’te gösterilmektedir.



a)



b)

Şekil 3.13. a) Agregaya darbe değeri deney aleti, b) 100GDBA karışımının deneye hazır hale getirilmesi

$$\text{Agrega Darbe Değeri (\%)} = \left[\frac{M_2}{M_1} \right] * 100 \quad (3.10)$$

Burada;

M₁: Numunenin ilk ağırlığı(g)

M₂: 2,36 mm test eleğinden geçen numune ağırlığı (g)

3.3.4. Yassılık Endeksi Tayini

En küçük boyutu nominal boyutunun 0,6'sından daha küçük olan iri agrega taneleri yassı olarak adlandırılmaktadır (BS 812-105.2 2006). Yassılık endeksi deneyi yolun kullanım ömrü ve kalitesi açısından önemli olduğu ifade edilmiştir (Cruz ve ark. 2021, Lukman ve ark. 2020). Yassı tanelerden oluşturulan bir yapı, trafik yükü gibi tekrarlı yükler altında stabil olmadığı, bu tanelerin yük altında kolaylıkla kırıldığı böylece karışımın mukavemetinin azaldığı vurgulanmıştır (Entes ve Fensome 2014). KTŞ'ye göre alttemel tabakası için kullanılacak malzemenin yassılık endeksi değerinin %30'dan, temel tabakası için ise %25'ten az olması gerektiği belirtilmiştir.

Yassılık Endeksi Değeri TS EN 933-3 "Agregaların Geometrik Özellikleri için Tane Şekli Tayini - Yassılık Endeksi" Standardı kullanılarak belirlenmiştir. Bu standarda göre D_i (agreganın geçtiği en büyük elek göz açıklığı) ≤ 80 mm ve d_i (agreganın üzerinde kaldığı en küçük elek göz açıklığı) ≥ 4 mm olmak üzere d_i/D_i arasında tane çapına sahip iri taneli malzemeler için yassılık endeksi deneyi yapılmaktadır. Tez kapsamında ise kullanılan maksimum tane çapı 37,5 mm olduğu için tüm karışımlarının 4 mm-37,5 mm boyutlarındaki tane fraksiyonlarında yassılık endeksi değerleri hesaplanmıştır.

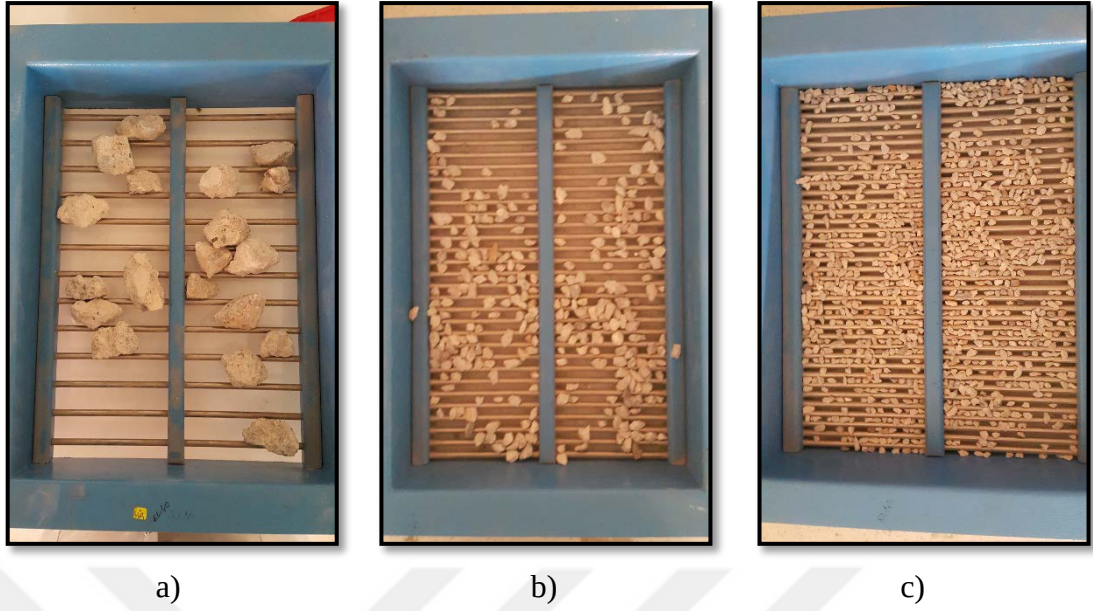
Alttemel ve temel tabakası için seçilen tane çapı dağılımındaki oranlar dikkate alınarak 5 farklı karışım için 4 mm-37,5 mm arasındaki numuneler hazırlanmıştır. TS EN 933-3 Standardına göre hazırlanan karışımlar Çizelge 3.2'de belirtilen 4mm ile 40 mm arasındaki kare gözlü eleklerden elenmiş ve elek üstünde kalan agregalar tartılmıştır (Şekil 3.14). Daha sonra elek üstü kalan malzemeler her d_i/D_i fraksiyona karşılık gelen çubuk elekten elenmiş ve silindirik çubuklu eleklerden geçen malzemeler ayrı ayrı tartılmıştır. Şekil 3.15'te kullanılan 2,5 mm, 3,15 mm ve 16 mm silindirik çubuk elekler verilmektedir.

Çizelge 3.2. Yassılık endeksi deneyi için di/Di kare gözlü elek aralığına karşılık gelen silindirik çubuklu elekler (TS EN 933-3 2012)

Kare Gözlü Elek	Silindirik Çubuklu Elek
Tane Büyüklüğü Fraksiyonu di/Di (mm)	Çubuklu Eleklerin Anma Açıklığı (mm)
63 / 80	40
50 / 63	31,5
40 / 50	25
31,5 / 40	20
25 / 31,5	16
20 / 25	12,5
16 / 20	10
12,5 / 16	8
10 / 12,5	6,3
8 / 10	5
6,3 / 8	4
5 / 6,3	3,15
4 / 5	2,5



Şekil 3.14. Yassılık endeksi belirlenmek için hazırlanan 100GDBA karışımı ve kare gözlü elek üzerinde kalan numuneler



Şekil 3.15. Yassılık endeksi deneyinde kullanılan silindirik çubuk elekler; a) 16 mm, b) 3,15 mm, c) 2,5 mm

3.3.5. Magnezyum Sülfat Direnci Tayini

Bu deney agregaların donma-çözülme direncini ölçmek için yapılan hızlı bir yöntemdir. Deneyde sodyum veya magnezyum sülfat çözeltisi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, magnezyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Agregaların magnezyum sülfat direnci ASTM C88/C88M-18 “Sodyum Sülfat veya Magnezyum Sülfat Kullanımıyla Agregaların Sağlamlığı için Standart Test Yöntemi” Standardına uygun olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında hazırlanan 5 farklı karışımın 3/4 in. (19,5 mm)-1 1/2 in. (37,5 mm) ve 3/8 in. (9,5 mm)-3/4 in. (19 mm) tane boyutları için magnezyum sülfat direnci değeri belirlenmiştir. KTŞ’ye göre karayolu üstyapısında kullanılacak malzemelerin magnezyum sülfat direncinin temel tabakası için %20’den, alttemel tabakası için ise %25’ten az olması gerektiği belirtilmiştir.

Çalışmada kullanılan doygun magnezyum sülfat çözeltisi, ASTM C88/C88M-18 Standardına göre, magnezyum sülfat heptahidratın ($MgSO_4$) damıtık su içerisinde çözülmesi ile elde edilmiştir. Çözelti bir litre su için 1500 gram kristal tuzun yavaş yavaş ilave edilmesi ile hazırlanmış ve her karışım için yaklaşık 3 lt çözelti kullanılmıştır. Hazırlanan çözelti 12 saatte bir karıştırılarak 48 ± 1 saat boyunca 20 ± 2 °C’de muhafaza

edilmiştir. Hazırlanan çözeltinin yoğunluğunun 1,295–1,308 g/cm³ arasında sabit tutulmasına özen gösterilmiştir. Daha sonra, hazırlanan numune ince malzemelerden temizlemek amacıyla önceden yıkanmış ve 110 ± 5 °C etüvde kurutularak sabit kütleye getirilmiştir. Kuru karışım, tel örgü içerisine yerleştirilerek hazırlanan magnezyum sülfat çözeltisinin içerisine 17 saat boyunca bekletilmiştir. Çözeltiden çıkarılan agregalar 15 dk. boyunca süzildükten sonra etüvde değişmez kütleye gelene kadar 110 ± 5 °C etüvde kurutulmuştur. Bu işlem beş kez tekrarlanmıştır. Şekil 3.16’da 100KA ve 100GDBA karışımlarının magnezyum sülfat çözeltisine tabi tutulduktan sonraki görüntüleri örnek olarak verilmiştir. 5. döngünün sonunda kurutulan 19,5 mm-37,5 mm arasındaki agrega numuneleri 16 mm kare gözlü elekten ve 9,5 mm-19 mm arasındaki agregalar ise 8 mm göz açıklıklı elekten yıkanmıştır. Magnezyum sülfat çözeltisinden temizlenen elek üstünde kalan agregalar etüvde sabit kütleye gelene kadar kurutulmuş ve tartılmıştır. Agregaların magnezyum sülfat direnci kütlece yüzde olarak Denklem 3.11 kullanılarak belirlenmiştir.



a)



b)

Şekil 3.16. Magnezyum sülfat çözeltisine daldırılan agregaların kurutulduktan sonraki görüntüleri a) 100KA karışımı, b)100GDBA karışımı

$$\text{Magnezyum Sülfat Direnci (\%)} = \left[\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right] * 100 \quad (3.11)$$

Burada;

M₁: Numunenin ilk kütlesi (g)

M₂: 16 mm ve 8 mm’lik elekte kalan magnezyum sülfattan temizlenen agregaların nihai kuru kütlesi (g)

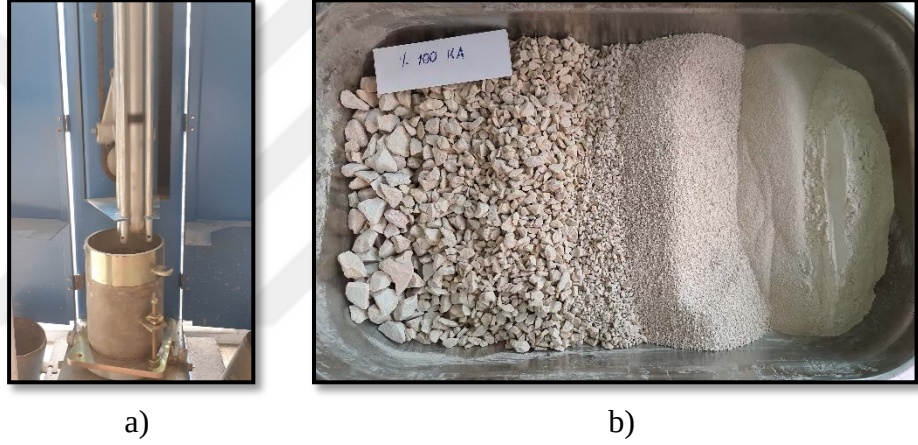
3.3.6. Kompaksiyon Parametrelerinin Tayini

Kompaksiyonun, agregaların mukavemet özelliklerini arttırmak ve deformasyon potansiyellerini azaltmak için uygulanan bir iyileştirme tekniği olduğu bilinmektedir. Kompaksiyon deneyinin amacı arazide maksimum sıkışmayı sağlayan kuru yoğunluk ve bu andaki optimum su içeriği değerinin belirlenmesi ve uygulanan yükler altında malzemelerin mekanik davranışı açısından arazi performansını doğru bir şekilde temsil eden numuneler hazırlayabilmektir (Yagyoubi ve ark. 2018).

Hazırlanan karışımların kompaksiyon parametrelerini belirlemek için Modifiye Proktor deneyi ASTM D-1557, Standart Proktor deneyi ise ASTM D-698 Standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Modifiye Proktor ve Standart Proktor deneyleri yapılırken kullanılacak kalıp çapı, tabaka sayısı ve her bir tabaka için uygulanacak düşürme sayısı standartlarda belirtilen 3 farklı yöntemden agrega gradasyonuna uygun olan seçilerek belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların tane çapı dağılımına bağlı olarak 9,5 mm elek üzerinde kalan agrega miktarı toplam malzemenin ağırlıkça %20’sinden ve 19 mm elek üzerinde kalan agrega miktarı toplam malzemenin %30’undan az olduğu için Modifiye ve Standart Proktor deneyleri Metot C’ye uygun olarak yapılmıştır. Bu yöntemle göre Modifiye Proktor deneyi maksimum tane çapı 19 mm olacak şekilde hazırlanan karışımların, 5 tabaka halinde 152 mm çaplı kalıp kullanılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi her tabakaya 56 vuruş olacak şekilde, 4,5 kg ağırlığındaki tokmağın 46 cm’den düşürülmesiyle 2700 kNm/m sıkıştırma enerjisi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında hazırlanan kuru karışımlara eklenen su kontrollü bir şekilde arttırılarak 4 farklı su muhtevası değerinde kompaksiyon eğrisi oluşturulmuştur. Kuru karışımlara ilave edilecek ilk su muhtevası değeri agregaların su emme değerleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Hazırlanan karışımlarda tabakaların homojen bir şekilde sıkışmasının gerçekleştirilebilmesi için otomatik sıkıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.17). Sıkıştırma

esnasında her tabakaya eşit miktarda malzeme koyulmasına özen gösterilmiştir. Ardından sıkıştırılan numunenin ağırlığı belirlenmiş ve karışımın su muhtevası değerinin belirlenmesi için sıkıştırılan numunenin üst ve alt kısmından örnek alınarak etüve konulmuştur. Deney artan su muhtevası değerlerinde 5 defa tekrarlanmıştır. Taneli malzemelerde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, tokmak yükü altında tanelerin parçalanarak karışımdaki ince miktarını arttırmasıdır. Bu nedenle, bu tez çalışması kapsamında karışımların maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri belirlenirken her su muhtevası değeri için yeni bir karışım hazırlanmıştır. Böylece su muhtevası değerinin bir önceki numune sıkıştırma işlemi sırasında oluşabilecek parçalanmadan etkilenmesi önlemiştir.



Şekil 3.17. a) Otomatik sıkıştırma aleti, b) %100 Kırma kireçtaşı agregası içeren karışım

Standart Proktor deneyinde ise maksimum tane çapı 19 mm olacak şekilde hazırlanan karışımlar 152 mm çaplı kalıp kullanılarak, 3 tabaka halinde, 4,5 kg ağırlığındaki tokmağın 46 cm'den düşürülmesiyle sıkıştırılmıştır. Modifiye Proktor deneyinde uygulanan yöntem Standart Proktor deneyinde de uygulanmıştır.

3.3.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Tayini

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi, kayma deformasyonuna maruz kalan sıkıştırılmış malzemelerin, kayma mukavemetinin bir göstergesidir (Voung ve ark. 2008). Bu nedenle CBR değeri, yol endüstrisinde, yapısal tasarım amaçları için çeşitli yol

malzemeleri arasında göreceli bir mukavemet, elastik modül ve nem dayanıklılığı ölçümü sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Papagiannakis ve Masad 2008).

Temel ve alttemel tabakalarında GDBA ve KA karışımlarının trafik yükleri altındaki yük-deformasyon ilişkisi ASTM D-1883 “Laboratuvarda Sıkıştırılmış Zeminlerin Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)” Standardına uygun olarak belirlenmiştir. Karışımların CBR değeri malzemede 2,5 ve 5 mm penetrasyon elde edilmesi için uygulanan yük okumalarının standart malzemeye uygulanan yük değerlerine bölünmesi ile belirlenmektedir. Genellikle 2,5 mm’lik penetrasyon değeri olmakla birlikte, 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon değerlerinden büyük olan CBR değeri olarak kabul edilmektedir.

Hazırlanan kuru karışımlar Modifiye Proktor deneyinden elde edilen kompaksiyon parametreleri kullanılarak iç çapı 152,4 mm ve yüksekliği 177,8 mm olan CBR kalıbı içerisinde sıkıştırılmıştır. Numunelerin sıkıştırılarak CBR deneyine hazır hale getirilmesi için sıkıştırmadan önce kalıbın tabanına yüksekliği yaklaşık 50 mm olan düztaban plakası yerleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi Modifiye Proktor deneyinde olduğu gibi otomatik sıkıştırıcıda 5 tabaka halinde ve her tabakaya 56 vuruş olacak şekilde yapılmıştır. Sıkıştırılarak deneye hazır hale getirilen numune kuru CBR deneyinin belirlenmesi için CBR aletine yerleştirilmiştir (Şekil 3.18). 50 mm çaplı yükleme pistonu numune yüzeyine yerleştirildikten sonra 1,3 mm/dk hızla numune içine batırılmıştır. Deney esnasında belirli deformasyon değerleri için penetrasyon okumaları alınmış ve 5 mm’lik penetrasyon tamamlandığında deney sonlandırılmıştır. Deney esnasında okunan bu veriler kullanılarak çizilen yük-penetrasyon eğrisinde ASTM D-1883’e göre gerekli düzeltmeler yapıp, 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen yük değerleri bulunmuştur. Daha sonra bu değerler iyi derecelenmiş standart kırmataş malzemesi için belirlenen yük değerlerine oranlanarak karışımların CBR değeri belirlenmiştir.



a)



b)

Şekil 3.18. a) Kaliforniya Taşıma Oranı Deney aleti, b) 50GDBA karışımının CBR deneyi sonrası görünümü

Islak CBR deneyi için ise sıkıştırılarak hazırlanan numunenin üst ve alt yüzeyine filtre kâğıdı konularak delikli taban plakası üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra numunenin üst yüzeyine sürsaj ağırlıklar yerleştirilerek 4 gün boyunca suda bekletilmiştir. Bu durum, üstyapı kaplama katmanlarının sınırlayıcı etkisini ve aynı zamanda bir temel ve alttemel tabakaları için olası en kötü hizmet-içi senaryoyu simüle etmektedir (VicRoads 1998). Ayrıca numunenin yüzeyine yerleştirilen deformasyon ölçer ile karışımların kabarma veya çökme miktarı belirlenmiştir. 4. günün sonunda sudan çıkarılan numune suyunun süzülmesi için 20dk bekletildikten sonra CBR aletine yerleştirilerek yük-deformasyon okuması alınmıştır.

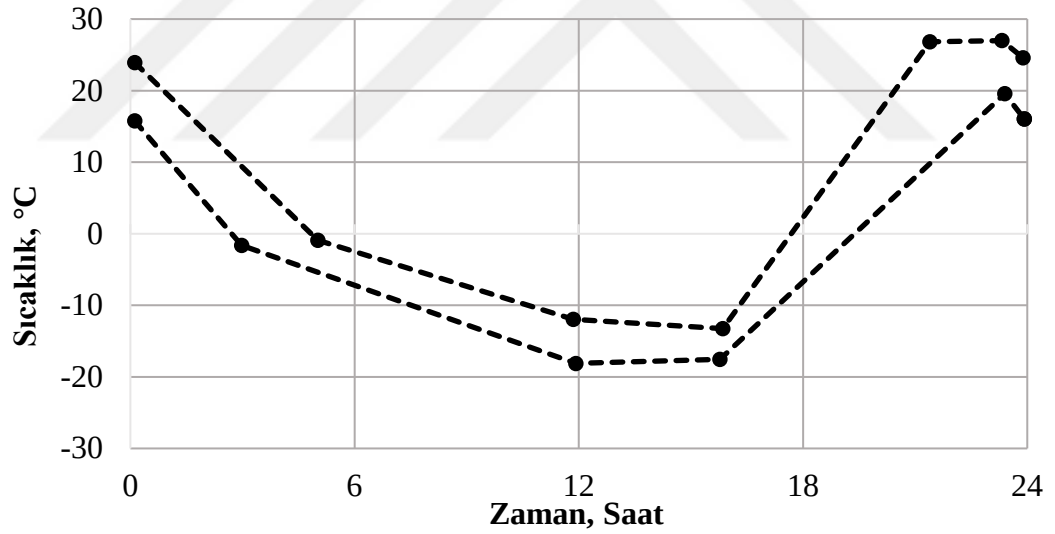
3.3.8. Donma-Çözülme Tayini

Yol yapımı uygulamalarında donma-çözülme hasarının en büyük problemlerden biri olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Rosa ve ark. 2017). Bilindiği gibi, ülkemizde de kış aylarında donma-çözülme olayı sık sık görülmektedir. Bu çalışmada, temel ve alttemel tabakaları için hazırlanan karışımların donma-çözülme direnci, donma-çözülme çevrim sonrası karışımların CBR değişimi dikkate alınarak irdelenmiştir. Bu amaçla, hazırlanan karışımlar 2, 5, 10 ve 20 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Bu doğrultuda, karışımlar Modifiye Proktor sıkılığında, CBR kalıbında otomatik sıkıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Ardından hazırlanan karışımlar donma-çözülme kabineye yerleştirilmiştir (Şekil 3.19). Hazırlanan numunelere uygulanan süre-sıcaklık

grafiği Şekil 3.20’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 1 donma-çözülme çevrimi 24 saatte tamamlanmıştır. Donma-çözülme çevrimine tabi tutulan numuneler kabininden çıkarıldıktan sonra CBR deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.19. Donma-Çözülme kabineye yerleştirilen 100GDBA karışımları



Şekil 3.20. Donma-Çözülme numunelerine uygulanan süre-sıcaklık çevrimi

3.3.9. Geçirimsizlik Tayini

Agregaların hidrolik özellikleri, kaplamanın uzun vadeli performansını ve hizmet ömrünü etkilemektedir (Cedergren 1994). Üstyapıya giren su, boşluk suyu basınçlarının artışına neden olarak üstyapı bozulmasına yol açan temel ve alttemel tabakalarının mukavemetini

ve rijitliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Huang 2004). Bu nedenle GDBA ve KA'nın geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır.

Karışımların geçirimsizlik özellikleri ASTM D-2434 "Granüler malzemelerin geçirimsizliği" Standardı kullanılarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların 19 mm maksimum tane çapı dikkate alınarak 152 mm çaplı permeabilite kalıbı kullanılmıştır. Yaklaşık 6 kg kuru numune Modifiye Proktor deneyinde belirlenen optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde otomatik kompaktör kullanılarak permeabilite kalıbında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılmış numunenin alt ve üst yüzeyine filtre kâğıdı yerleştirilmiş ve numunenin üst kapak vanaları sıkılarak sabitlenmiştir. Ardından, sıkıştırılmış numunenin içerisinde oluşabilecek hava kabarcıklarını önlemek için vakum uygulanmıştır. Sıkıştırılmış numune üzerinde kararlı akış sağlanana kadar su akışına izin verilmiştir. Daha sonra, sıkıştırılmış numune üzerindeki hidrolik yük deney süresince sabit tutularak, belirli bir t süresinde numuneden geçen su miktarı ölçekli kapta toplanmıştır. Şekil 3.21'de permeabilite deney düzeneği ve örnek olarak 100GDBA karışımı gösterilmiştir. Karışımların permeabilite katsayısı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.21. Permeabilite deney düzeneği ve 100GDBA karışımı için hazırlanan numune örneği

$$\text{Permeabilite Katsayısı (k)} = \frac{Q * L}{A * \Delta h * t} \quad (3.12)$$

Burada;

k: Permeabilite katsayısı (cm/s)

Q: t sürede numune içinden geçen su hacmi(cm³)

L: Numune yüksekliği (cm)

A: Permeabilite kalıbı içindeki numunenin kesit alanı (cm²)

Δh : Hidrolik yük

t: Deney süresi (s)

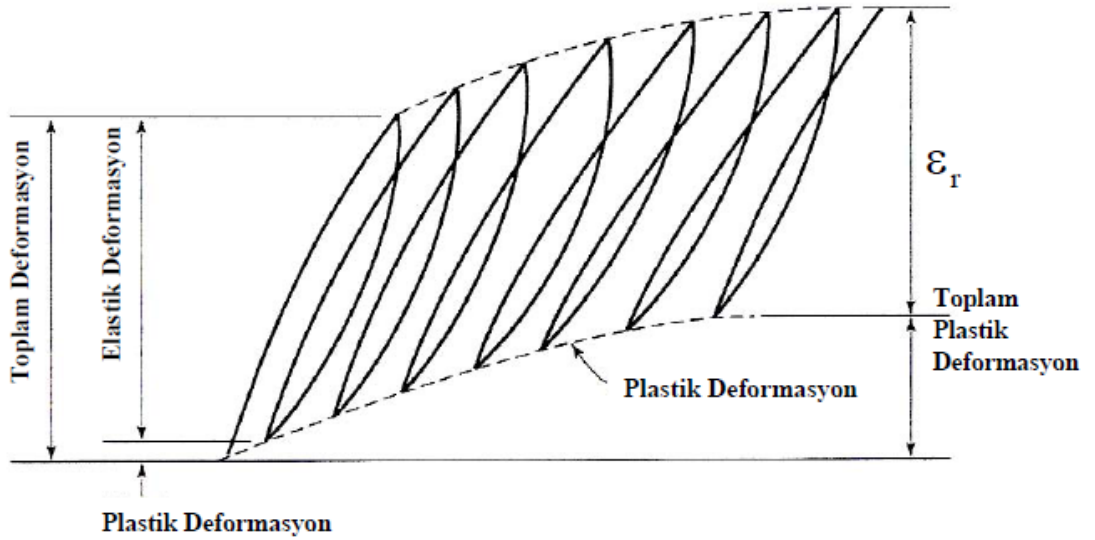
3.3.10. Esneklik Modülü Tayini

Karayolu üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri ve davranışları, esnek üstyapıların performansını etkilemektedir. Bu amaçla, temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin gerçek saha koşulları ve trafik yükleri altındaki davranışlarını gerçekçi şekilde modellenmesini sağlayan esneklik modülü deneyi yapılmaktadır. Esneklik modülü, malzemelerin rijitliğini gösteren ve dinamik tekerlek yükleri altındaki davranışını en gerçekçi şekilde modelleyen bir deneydir (AATSHO T-307 2012). Bu deneyde numuneye uygulanan yükleme dalgası formu, hizmet koşulları sırasında üstyapılardaki gerçek yükleri simüle etmektedir. Bir araç yol üzerinde belirli bir noktaya yaklaşırken yük miktarı sıfırdan maksimum değere doğru artış göstermektedir. Pseudon Enerji Modeline göre araç lastiğinin kenarı referans noktasının hemen üzerinde olduğunda maksimum yük seviyesine ulaşılacaktır (Sousa ve ark. 1994, Monismith ve ark. 2000). Bu nedenle haversine yük formu, bir tekerlek yükü altında temel ve alttemel tabakalarında oluşacak gerilme durumlarını en uygun modelleyen yükleme şekli olarak kabul edilmektedir.

Bir malzemenin tekrarlanan yükleme altındaki gerçek esneklik tepkisi, yükleme durumu ilk aşamalarında önemli ölçüde kalıcı deformasyon olacağından, belirli sayıda yük uygulamasının ardından belirlenebilmektedir. Yük uygulama sayısı arttıkça yük tekrarından kaynaklanan plastik şekil değiştirme azalmaktadır (Huang 1993). Böylece, belirli bir dizi için esneklik modülü değeri, her 100 yüklemenin son 5 ölçümü dikkate

alınarak belirlenmektedir. Esneklik modülü, uygulanan deviator gerilmenin, düşey elastik (geri dönüşümlü) gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlanan yükler altındaki elastik ve plastik şekil değiştirmeleri Şekil 3.22’de gösterilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, artan tekrar sayısı ile kalıcı deformasyon değişiminin sıfıra yaklaştığı görülmektedir.

Tez kapsamında hazırlanan karışımların esneklik modülü deneyleri AASTHO T 307 Standardına uygun olarak Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Toprak ve Stabilizasyon laboratuvarlarında yapılmıştır. Esneklik modülü deney aleti Şekil 3.23’te gösterildiği gibi Servo-Valf, E/P kontrol ünitesi, sinyal şartlandırma ünitesi, deformasyon ölçerler, hidrolik güç ünitesi, bilgisayar, yük ve deney hücresinden oluşmaktadır.



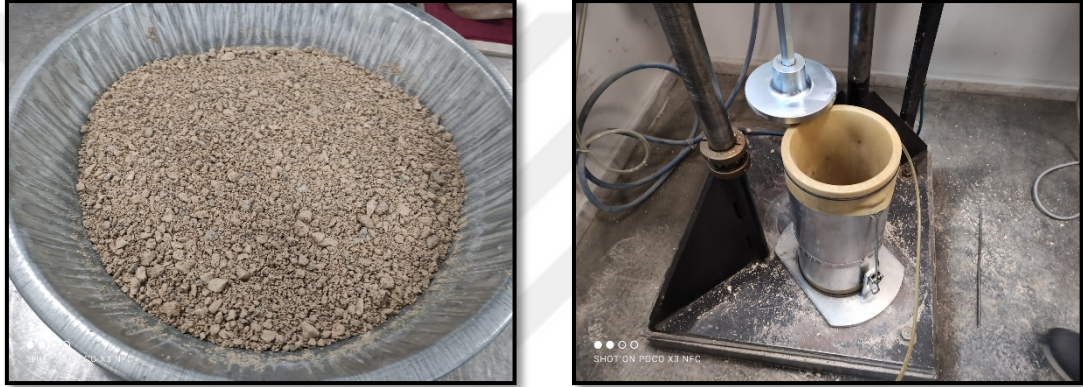
Şekil 3.22. Tekrarlı yükler altında elastik ve plastik deformasyonlar (Huang 1993)



Şekil 3.23. Esneklik modülü deneyi cihaz sistemi

AASTHO T 307 Standardına göre hazırlanan malzemeler Tip-1 ve Tip-2 olarak ikiye ayrılmaktadır. Standarda göre, No. 10 (2 mm) elekten geçen miktarı %70'ten, No. 200 (0,075 mm) elekten geçen miktarı %20'den ve Plastisite indeksi değeri 10'dan daha az olan malzemeler Tip-1 olarak sınıflandırılmaktadır. Tip-1 sınıfına girmeyen tüm üstyapı malzemeleri ise Tip-2 olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan numuneler belirtilen gradasyon ve kıvam limiti şartlarına uyum sağladığı için Tip-1 sınıfı olarak belirlenmiştir. Numunelerin sıkıştırılacağı minimum kalıp çapı, maksimum tane çapının en az 5 katı, kalıbın yüksekliği ise çapının en az 2 katı olması gerekmektedir. Deneyde kullanılacak maksimum tane çapı 19 mm olduğu için numuneler 150 mm çap ve 315 mm yüksekliğe sahip, ortadan ayrılabilen silindirik kalıplarda titreşimli tokmak kullanılarak hazırlanmıştır. Esneklik Modülü deneyi için numunelerin sıkıştırılması ve deneye hazır hale getirilmesi için yapılan işlemler Şekil 3.24'te gösterilmektedir. GDBA ve KA taneleri kohezyonsuz bir yapıya sahip olduğundan numunelerin taşınması ve kalıptan çıkarılması esnasında yaşanabilecek zorlukları önlemek amacıyla malzemeler sıkıştırılmadan önce membran yerleştirilmiştir. Kalıbın iç kısmına yerleştirilen membran

O-ring kullanılarak kalıbın üst ve alt başlıklarına sabitlenmiştir. Sabitleme işleminin ardından, deney boyunca membrana vakum uygulanarak kalıp ve membran arasında hava kabarcıklarının oluşması önlenmiştir. Numuneler Modifiye Proktor deneyinden elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerinde 6 tabaka halinde sıkıştırılmıştır (Şekil 3.24). Sıkıştırma işleminin homojen bir şekilde yapılabilmesi ve tabaka yoğunluklarının mümkün olduğunca birbirine yakın olabilmesi amacı ile tabaka yükseklikleri elektronik kumpas ile kontrol edilmiştir. Numune 6 tabaka halinde sıkıştırıldıktan sonra numunenin üst kısmının düz ve boşluksuz olmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Esneklik modülü deneyi için optimum su muhtevasına sahip kuru karışımın hazırlanması ve sıkıştırılması



Şekil 3.25. Esneklik modülü deneyi numunenin deney hazır hale getirilmesi ve deney hücresine yerleştirilmesi

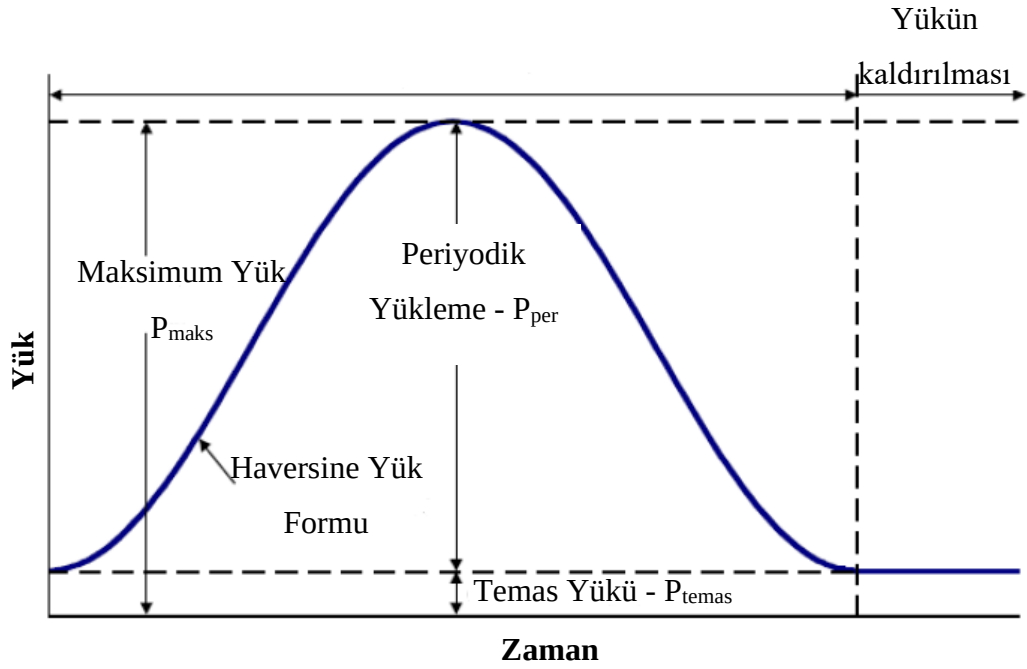
Deneye hazır hale getirilen sıkıştırılmış numunenin üst kısmına sırasıyla poroz taşı ve üst plaka yerleştirilmiştir. Esneklik Modülü deneyi drenajlı gerçekleştirilen bir deney olduğu için üst yükleme plakasına drenaj kanalları bağlanmış ve sıkıştırılmış numune deney hücresine yerleştirilmiştir (Şekil 3.25). Hücrenin cihaza yerleştirilmesi esnasında yükleme pistonu ve yük hücresi arasında merkezleme sağlanmış ve çevre basıncı kontrolü yapıldıktan sonra numune deneye başlamaya hazır hale getirilmiştir.

Esneklik Modülü deneyi, haversine yük formunun kullanıldığı 16 farklı yükleme serisini öngörmektedir. Bu yükleme serilerinin ilki şartlandırma evresidir. Şartlandırma evresinde, numune başlığı ve numune arasında teması sağlamak amacıyla 1000 adet yükleme gerçekleştirilmiştir. Ön koşullandırma sonucunda numunede oluşan kalıcı deformasyonlar %5'i geçmediği için deneye devam edilerek numuneye 15 yükleme serisi uygulanmıştır. Her bir yükleme serisinde sıkıştırılmış numuneye uygulanan deviatör gerilme ve hücre basıncı farklılık göstermekte olup, AASTHO T-307 Standardına göre Tip-1 sınıfı numunelere uygulanması gereken yükleme serisi Çizelge 3.3'te verilmiştir. Bu yükleme serilerinin her birinde yük 100 tekrar olarak numuneye uygulanmıştır.

Çizelge 3.3. Tip-1 Numunelerine ait yükleme tablosu (AASHTO T307 2012)

Yükleme Seri Numarası	Hücre Basıncı σ_3 (kPa)	Maksimum Deviatör Gerilme $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	Çevrimsel Gerilme $\sigma_{\text{çevrimsel}}$ (kPa)	Sabit Gerilme $0,1 \sigma_{\text{maks}}$ (kPa)	Serilerdeki Yükleme Sayısı
0	103,4	103,4	93,1	10,3	500-1000
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100
2	20,7	41,4	37,3	4,11	100
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100
4	34,5	34,5	31	3,5	100
5	34,5	68,9	62	6,9	100
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100
7	68,9	68,9	62	6,9	100
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100
10	103,4	68,9	62	6,9	100
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100
12	103,4	206,8	186,1	20,7	100
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100
15	137,99	275,8	248,2	27,6	100

Deney esnasında uygulanan Haversine yük formu sinüzoidal olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.26). Her bir yük uygulanmasında, düşey yük 0,1 s numuneye uygulanmış ve 0,9 s boyunca ise numune yüzeyinden kaldırılmıştır. Deney süresince numune dinamik periyodik gerilmeye tabi tutulmuştur. Deney sonunda numunenin toplam eksenel geri dönüşümlü deformasyonları ölçülerek esneklik modülü değeri hesaplanmıştır.



Şekil 3.26. Esneklik Modülü deneyinde numunelere uygulanan yükleme dalgası formu (NCHRP 2004)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışma kapsamında gerçekleşen deney sonuçları çizelge ve grafikler kullanılarak ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar literatür bilgileri ile kıyaslanmıştır.

4.1. Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı

Özgül ağırlık değerleri kuru, doymuş kuru yüzey ve görünen özgül ağırlık olmak üzere 3 farklı şekilde belirlenmiştir. Bir agreganın özgül ağırlığı, kalitesi ve içerdiği boşluk hacmi hakkında bilgi vermektedir. Özgül ağırlık değerinin yüksek olması agreganın daha dolu bir yapıya sahip olduğu anlamına gelmektedir (Gambihir 2004). İnce ve iri agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı deney sonuçları sırasıyla, Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Ayrıca, kıyaslamak amacı ile %100 kireçtaşı agregası içeren karışıma göre bağıl su emme oranları Şekil 4.1’de ve 48 saatlik su emme oranı sonuçlarına göre 24 saatlik bağıl su emme oranları Şekil 4.2’de sunulmuştur. İri agregalardan (> 4,75 mm) oluşan karışımlar dikkate alındığında, %100 kireçtaşı agregası içeren 100KA karışımının özgül ağırlık değeri 2,68 olarak ölçülmüştür. GDBA agregası ikame oranı arttıkça karışımların özgül

ağırlık değerinde azalma gözlemlenmiştir. %100 geri dönüştürülmüş agregaya içeren 100GDBA karışımının özgül ağırlığı 2,42 olarak elde edilmiştir. Benzer durum ince agregalardan oluşan karışım için de gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, 100KA karışımının özgül ağırlık değeri 2,62 iken 100GDBA karışımının 2,32 olarak ölçülmüştür. Bilindiği gibi GDBA taneleri, agregaya, çimento harcı veya her ikisinden oluşan heterojen bir yapıya sahiptir (Giwangkara ve ark. 2019, Wang ve ark. 2020). Beton üretiminde kullanılan maksimum tane çapı 20–25 mm olan iri GDBA ($> 4,75$ mm) agregaya ve bir miktar yapışık çimento harcından oluşurken ince agregalar (0,075 mm–4,75 mm) genellikle çimento harcının parçalanmasından elde edilmektedir. Bunun nedeni beton atıklarının geri dönüşümü sırasında parçalanma, kırılma ve ezilme olaylarının her zaman agregaya göre daha zayıf bölge olan çimento hamuru-agrega ara yüzlerde gerçekleşmesidir. Agregaya tanelerine yapışık harçlar sürtünmenin ve aşınmanın etkisiyle kolayca ayrılabilir (Barbuda ve ark. 2012). Çimento harcının özgül ağırlığı genel olarak 1,0–1,60 arasında değişmekle birlikte, agreganın özgül ağırlığından (yaklaşık olarak 2,60) daha düşük olmaktadır (Oklahoma Devlet Üniversitesi 2006, Tam ve Lee 2007). Bu durum GDBA'nın KA'ya göre düşük olan özgül ağırlık değerlerinin nedenini açıklamaktadır.

Çizelge 4.1. İri agregaya özgül ağırlık ve su emme oranı deney sonuçları

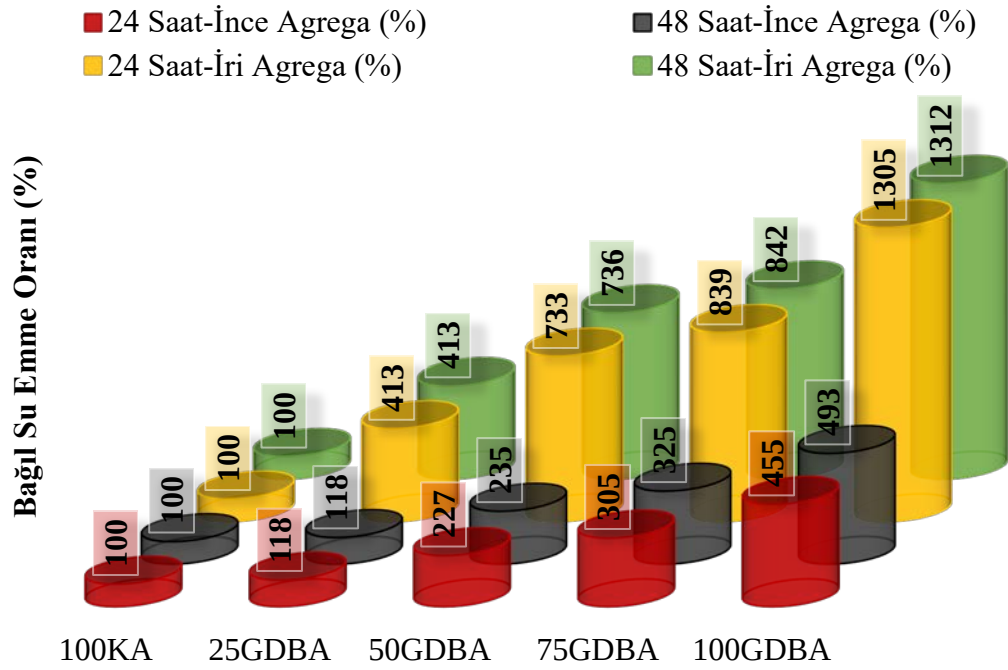
	Numune Adı	100KA	25GDBA	50GDBA	75GDBA	100GDBA
24 saat suda bekletme	Su Emme Oranı (%)	0,50	2,07	3,68	4,20	6,54
	Kuru Özgül Ağırlık	2,67	2,54	2,45	2,41	2,27
	Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2,68	2,59	2,54	2,51	2,42
	Görünen Özgül Ağırlık	2,71	2,68	2,69	2,68	2,67
48 saat suda bekletme	Su Emme Oranı (%)	0,50	2,07	3,69	4,22	6,57
	Kuru Özgül Ağırlık	2,67	2,54	2,45	2,41	2,25
	Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2,68	2,59	2,54	2,51	2,40
	Görünen Özgül Ağırlık	2,71	2,68	2,69	2,68	2,64

Çizelge 4.2. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme oranı deney sonuçları

	Numune Adı	100KA	25GDBA	50GDBA	75GDBA	100GDBA
24 saat suda bekletme	Su Emme Oranı (%)	2,11	2,48	4,78	6,43	9,58
	Kuru Özgül Ağırlık	2,56	2,53	2,40	2,31	2,13
	Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2,62	2,59	2,52	2,46	2,33
	Görünen Özgül Ağırlık	2,71	2,70	2,71	2,71	2,67
48 saat suda bekletme	Su Emme Oranı (%)	2,13	2,52	5,01	6,91	10,49
	Kuru Özgül Ağırlık	2,56	2,52	2,38	2,30	2,14
	Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2,61	2,58	2,50	2,46	2,36
	Görünen Özgül Ağırlık	2,71	2,70	2,70	2,74	2,76

GDBA ikame oranından bağımsız olarak 24 ve 48 saatlik suda bekletilen karışımların özgül ağırlık değerlerinde kayda değer değişikliğin olmadığı sonuçlardan anlaşılmıştır. Ancak, %100 GDBA içeren karışımların suda bekletilme süresine bağlı olarak özgül ağırlık değerlerinde bir miktar değişiklik söz konusu olmuştur. Bu durumun ince taneli agrega içeren karışımlarda daha baskın olduğu gözlemlenmiştir. İnce agregadan oluşan ve 48 saat suda bekletilen 100GDBA karışımının özgül ağırlığı 24 saatlik bekletilme durumuna kıyasla %3 daha fazla olmuştur. Bu durum GDBA tanelerinin daha derin boşluklar içermesinden kaynaklanmaktadır. Daha önce de vurgulandığı gibi, ince GDBA’lar iri tanelere kıyasla daha boşluklu bir yapıya sahip olmaktadır.

Özgül ağırlık değerlerinin aksine GDBA ikame oranı arttıkça karışımların su emme değerlerinin arttığı Çizelge 4.1 ve 4.2’den anlaşılmıştır. GDBA’nın su emme özelliğinin içerdiği harç fazının miktarına bağlı olarak ciddi mertebede değişkenlik gösterdiği bilinmektedir (Etxeberria ve ark. 2007). %100 iri GDBA içeren karışımın 24 saatlik su emme oranı %100 kireçtaşı içeren karışıma kıyasla yaklaşık 13 kat daha fazla olduğu Şekil 4.1’den anlaşılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan GDBA agregalarının kireçtaşı agregasına kıyasla daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu daha önce de vurgulanmıştır (Şekil 3.6).

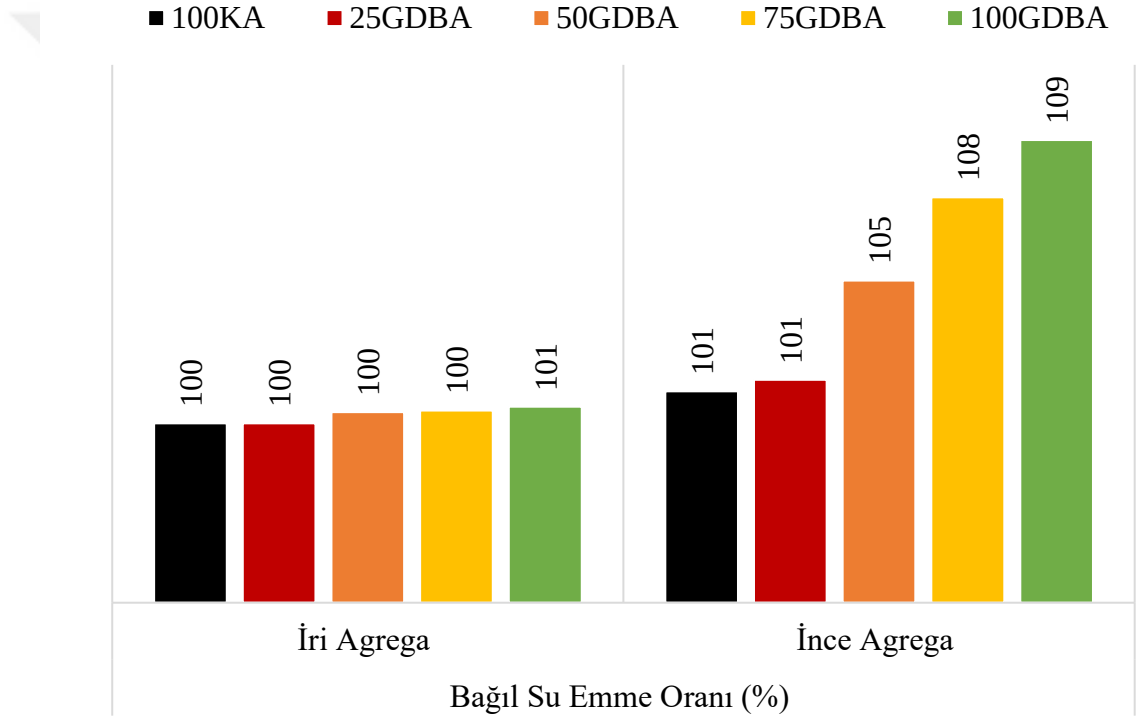


Şekil 4.1. 100KA karışımına kıyasla bağıl su emme oranı değerleri (%)

İnce agregaların su emme oranının iri agregaya kıyasla daha yüksek bir değer olduğu sonuçlardan da anlaşılmaktadır. Bu durum GDBA karışımlarında daha bariz olmuştur. Daha önce de vurgulandığı gibi GDBA tane çapındaki azalma ile birlikte içerdiği harç fazı miktarı artmaktadır (Poon ve ark. 2004; Juan ve Gutierrez 2009, Abdulla 2015). Harç fazı miktarı artışıyla boşluk hacmi artacağı için ince GDBA'ların su emme oranı iri GDBA'lardan daha yüksek olarak ölçülmektedir (Rodrigues ve ark. 2013, Barbudo ve ark. 2012).

İri agregalardan oluşan 100GDBA, 75GDBA, 50GDBA, 25GDBA ve 100KA karışımların 24 saatlik su emme oranı değerleri sırasıyla, %6,54, %4,20, %3,68, %2,07 ve %0,50 olarak ölçülmüştür. Bu değerler 48 saatlik ölçüm için kayda değer mertebede değişmediği sonuçlardan da anlaşılmıştır. İnce agregalar içeren 100GDBA, 75GDBA, 50GDBA, 25GDBA ve 100KA karışımlarının 24 saatlik su emme oranı değerleri sırasıyla, %9,58, %6,43, %4,78, %2,48 ve %2,11 olarak elde edilmiştir. Bu oranların 48 saatlik ölçümler için sırasıyla, %1, 1, 5, 8 ve 9 artış gösterdiği Şekil 4.2'den anlaşılmaktadır. GDBA kullanım oranının artışı ile karışımların su emme değerlerinin

suda bekletilme süresinden daha fazla etkilendiği sonuçlardan da anlaşılmıştır. GDBA tanelerinin içerdiği derin boşluklar nedeniyle doğal agregaların su emme oranı değerinin belirlenmesi için standartlarda belirtilen 24 saatlik sürenin ince agregalar için yeterli olmadığı sonuçlardan görülmüştür. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da vurgulanmıştır (Tam ve Le 2007, Tam ve ark. 2008). İnce ve iri GDBA karışımlarının 24 ve 48 saatlik su emme değerleri arasındaki fark iri agregalara kıyasla ince agregalar daha küçük çaplı ve derin boşluklar içermesinden kaynaklanmaktadır. Sonuçlar, iri GDBA'nın tam doygunluğa ulaşması için 24 saatlik suda bekletilme süresinin yeterli olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.2. 48 saatlik su emme oranı sonuçlarına kıyasla bağl su emme oranı değerleri (%)

KTŞ'ye göre temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak agregaların su emme oranının sırasıyla, %3 ve %3,5'ten daha az olması gerektiği belirtilmiştir. GDBA tanelerinin gözenekli yapısından dolayı sadece 100KA ve 25GDBA karışımları bu şartı sağlamaktadır.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde GDBA'nın özgül ağırlığı iri ve ince agregalar için sırasıyla; Arulrajah ve arkadaşları (2014) 2,76 ve 2,65; Park (2003) 2,53 ve 2,54; Rahman ve arkadaşları (2015) 2,7 ve 2,6; Jimenez ve arkadaşları (2012) 2,59 ve 2,14 olarak belirlemiştir. GDBA'nın su emme oranı ise; Shehata ve arkadaşları (2010) %5,1; Arulrajah ve arkadaşları (2012) %4,66 - %9,75; Bestgen ve arkadaşları (2016) %4,19 - %9,23 olarak bildirilmiştir. Bu tez kapsamında hazırlanan karışımların özgül ağırlık ve su emme oranı değerlerinin mevcut çalışmalarla benzerlik gösterdiği anlaşılmıştır.

4.2. Los Angeles Aşınma Direnci

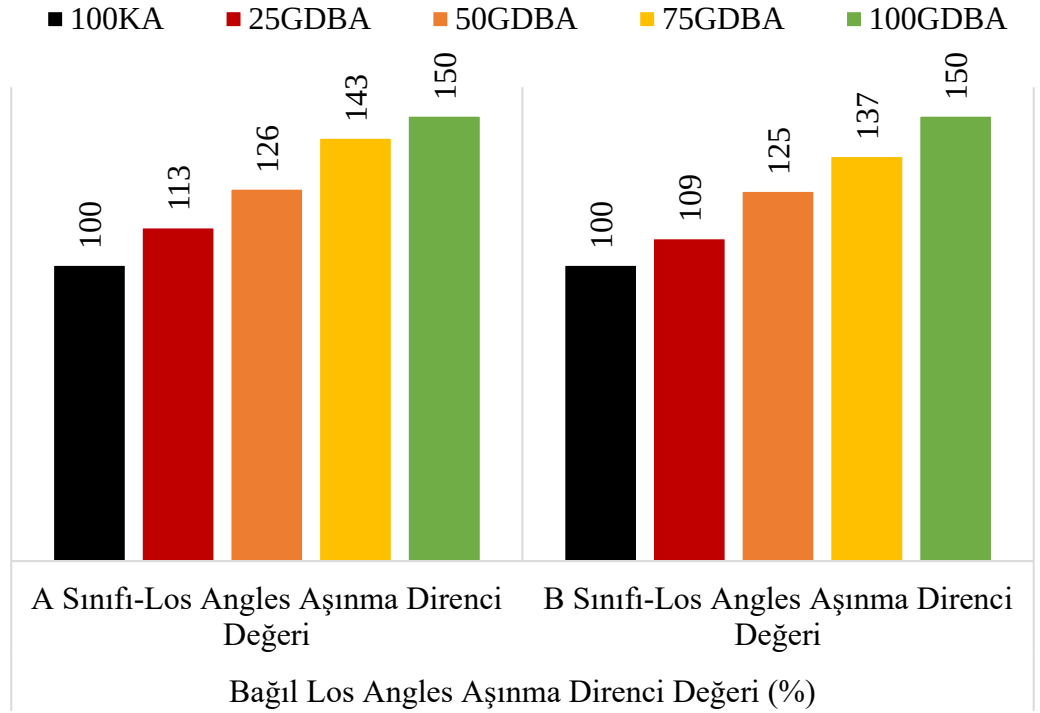
Hazırlanan karışımların LA aşınma direnci sonuçları Çizelge 4.3 verilmiştir. Ayrıca, GDBA içeren karışımların 100KA karışımına kıyasla bağlı LA aşınma direnci değerleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. 19-37,5 mm (A-Sınıfı) tane çapına sahip 100KA, 100GDBA, 75GDBA, 50GDBA ve 25GDBA karışımlarının LA aşınma direnci değerlerinin sırasıyla, %24,4, %36,7, %34,9, %30,7 ve %27,5 olarak ölçüldüğü sonuçlardan anlaşılmıştır. Bu değer, 12,5-25 mm (B -Sınıfı) tane çapına sahip agregalar kullanılarak hazırlanan karışımlarda ise sırasıyla, %25,7, %38,7, %35,2, %32,2 ve %28,1 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Agregaların Los Angeles aşınma direnci sonuçları

A-Sınıfı					
	100KA	25GDBA	50GDBA	75GDBA	100GDBA
Toplam Numune	5018,7	5007,5	5007,1	5024,49	5004,6
1,6 Nolu Elek Üstü	3793,38	3630	3469,6	3271,5	3167,2
Los Angeles Aşınma Direnci (%)	24,4	27,5	30,7	34,9	36,7
B-Sınıfı					
	100KA	25GDBA	50GDBA	75GDBA	100GDBA
Toplam Numune	5008	4991,1	5008,9	5009	5007
1,6 Nolu Elek Üstü	3718,6	3589,77	3396,2	3245	3068,3
Los Angeles Aşınma Direnci (%)	25,7	28,1	32,2	35,2	38,7

KA'nın GDBA ile ikamesiyle karışımların LA aşınma direncinin azaldığı Şekil 4.3'ten anlaşılmıştır. Bu davranışın GDBA ikame oranının artışıyla daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Agregalar tane çapından bağımsız olarak, GDBA kullanım oranının

artışıyla karışımların LA aşınma direnci 100KA karışımına kıyasla %9-%50 arasında azaldığı Şekil 4.3'ten anlaşılmıştır. GDBA içeriğinin artışıyla LA aşınma direnci değerlerindeki azalmanın GDBA'da zayıf bölge olan çimento hamuru-agrega ara yüzeyi fazının varlığından kaynaklandığını düşünülmektedir. Edil'e (2012) göre, GDBA'daki bu zayıf faz darbe ve aşınmanın etkisiyle kolaylıkla agregadan ayrılabilir. Bunlara ilaveten, atık betonların geri dönüşümü sırasında tanelerin içyapısında meydana gelen çatlakların da LA aşınma direnci değerinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, daha küçük tane çapına sahip GDBA'lar üretim aşamasında en erken kırılan parçalar olmaktadır (en zayıf parçalardır). Benzer durum bu deneyde de söz konusu olmuştur. Daha ince olan 12,5-25 mm GDBA'ların LA aşınma direncinin 19-37,5 mm tanelere kıyasla daha düşük olduğu sonuçlardan da anlaşılmaktadır. Benzer sonuçlar Barbuda ve arkadaşları (2012) tarafından da bildirilmiştir. Yazarlara göre GDBA tane çapının azalmasıyla etrafındaki harç fazı miktarı artabilmekte dolayısıyla LA aşınma direnci değeri azalmaktadır.



Şekil 4.3. Karışımların 100KA karışımına kıyasla bağıl Los Angeles Aşınma direnci değerleri (%)

KTŞ'ye göre temel tabakası için LA aşınma direnci değerinin %35'den, alttemel tabakası için ise %45'den az olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan 100GDBA ve 75GDBA karışımlarının şartnamede belirtilen <%35 değerini sağlamadığından temel tabakasında kullanılabilirliğinin uygun olmadığı anlaşılmıştır. Ancak, tüm karışımların alttemel tabakası için gerekli olan <%45'lik LA aşınma direnci şartını sağladığı ve alttemel tabakalarında kullanılmak için elverişli olduğu saptanmıştır.

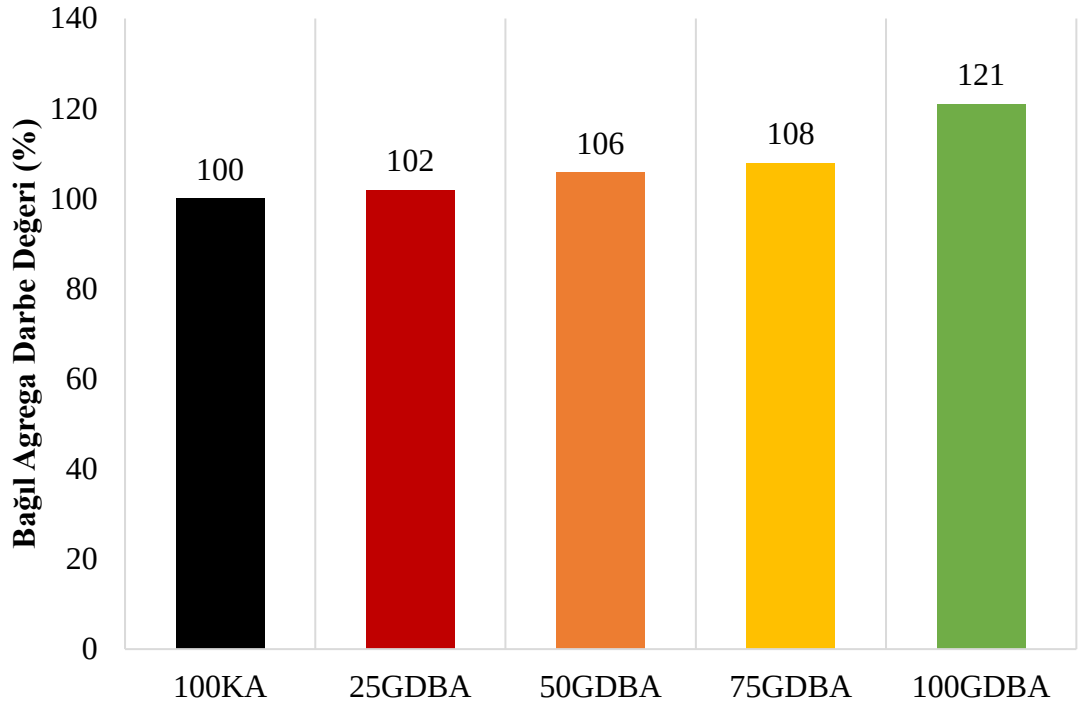
Mevcut çalışmalar incelendiğinde; %100 GDBA içeren karışımların LA aşınma direnci değerini Blankenagel and Geuthrie (2006) %31, Barbuda ve arkadaşları (2012) %34, Arulrajah ve arkadaşları (2013) %28 olarak belirlemişlerdir. Ayan ve arkadaşları (2016) tarafından yapılan çalışmada LA aşınma direnci %100 GDBA karışımında %31, %80GDBA+%20KA ve %50GDBA+%50KA karışımında %30, %20GDBA+%80KA karışımında %28 ve %100KA içeren karışımın ise %24 olarak ölçülmüştür. Chini ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada GDBA ve KA için LA aşınma direnci değerleri sırasıyla, %33,9 ve %32, Gabr ve Cameron (2012) ise bu değerleri sırasıyla, %39 ve %25 olarak hesaplamıştır. Aurstat ve arkadaşları (2001) ise 10-14 mm ve 31,5-50 mm tane çapına sahip iki farklı karışım üzerinde yaptıkları LA aşınma direnci deneyi sonucunda sırasıyla %27,3 ve %25,7 değerlerini elde etmiştir. Sonuçlar, yapılan tez çalışmasıyla benzer LA aşınma direnci değeri göstermektedir.

4.3. Agrega Darbe Değeri

Agrega darbe değeri, agreganın ani darbeye karşı direncini göstermektedir (BS 812 Part 112 2012). Agrega darbe değeri deney sonuçları Çizelge 4.4'de verilmektedir. Ayrıca, GDBA kullanımının karışımların agregada darbe değeri etkisini kıyaslamak amacıyla karışımların 100KA karışımına kıyasla bağlı agregada darbe değeri sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 100KA, 25GDBA, 50GDBA, 75GDBA ve 100GDBA karışımlarının agregada darbe değerinin sırasıyla, %28,9, %29,4, %30,5, %31,1 ve %34,9 olduğu anlaşılmıştır. GDBA'nın KA ile ikamesiyle karışımların agregada darbe değerinin %2 ile %21 arasında azaldığı Şekil 4.4'ten anlaşılmaktadır. Karışımlarda GDBA miktarının artışıyla darbe direnci değerleri azalmıştır. Bu etkinin GDBA yüzeyindeki zayıf harç parçalarının varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.4. Agrega darbe değeri deney sonuçları

Numune Adı	100K A	25GDB A	50GDB A	75GDB A	100GDB A
Numune kütlesi (g)	313,2	312,3	303,6	299,9	263,4
2,36 mm elekten geçen numune kütlesi (g)	90,4	91,8	92,7	93,4	92,0
Agrega Darbe Değeri (%)	28,9	29,4	30,5	31,1	34,9



Şekil 4.4. Karışımların 100KA karışımına kıyasla bağıl agregada darbe değeri sonuçları (%)

Temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin agregada darbe değeri için KTŞ’de herhangi bir limit değeri belirtilmemiştir. Ancak, araştırmacılar yol temel ve alttemel tabakası için agregada darbe değerinin %35’den küçük olması gerektiğini vurgulamıştır (Kenyon 2001, Tam ve Tam 2007, BS 882 1992 2012). Tez kapsamında hazırlanan tüm agregada karışımlarının bu değeri karşıladığı anlaşılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde agregada darbe değerini, Rahman ve arkadaşları (2009) GDBA ve KA karışımları için %28,33 ve %16,33, Yap ve arkadaşları (2018) ise sırasıyla, %5,28 ve %1,67 olarak belirlemiştir. Rakshvir ve Barai (2006) ise farklı kaynaklardan

temin ettikleri üç tip GDBA'nın darbe değerini %30,2-32 arasında değiştiğini vurgulamıştır.

4.4. Yassılık Endeksi

Agrega parçacıklarının şeklini tanımlamak için kullanılan en temel iki parametrenin "küresellik" ve "yuvarlaklık" olduğu ifade edilmiştir (Hossain ve ark. 2000). Bu parametrelerin daha iyi anlaşılabilmesi için çalışma kapsamında kullanılan küresel, yassı ve uzun GDBA tanelerine ait görünüm Şekil 4.5'te örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.5. Geri dönüştürülmüş beton agregası tane şekilleri

Hazırlanan karışımların yassılık endeksi deney sonuçları Çizelge 4.5-4.9'da verilmektedir. 100KA, 25GDBA, 50GDBA, 75GDBA ve 100GDBA karışımlarının yassılık endeksi değerlerinin sırasıyla, %10,8, %10,7, %9,8, %9 ve %8,7 olduğu sonuçlardan anlaşılmıştır. Karışımda GDBA miktarının artmasıyla yassılık endeksi değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. KA'nın yerine %100 GDBA kullanımıyla karışımın yassılık endeksi değerinin %20 oranında azaldığı tespit edilmiştir. KA'nın yassılık endeksi değerinin daha düşük olmasının, kırma işlemi sırasında GDBA'ya kıyasla daha az işleme tabi tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Chidiroglu ve arkadaşları (2018), GDBA'nın geri dönüşüm sürecinde iki farklı kırma işlemine tabi tutulduğunda kırma işlemi sayısı artışına bağlı olarak yassılık ve uzama endeksi değerlerinin azaldığını bildirmişlerdir. Kırılma işlemine maruz kalma süresi artışı ile yassı ve uzun agregalardaki zayıf parçalar koparak agregatanelerinin küreselleşme eğilimi gösterdiği düşünülmektedir. Böylece kusurlu olarak gösterilen agrega miktarı azalmaktadır. Benzer ifadeler Cardoso ve arkadaşları (2016) tarafından da bildirilmiştir. Yazarlar, iki veya daha

fazla kırma işlemine tabi tutulan agregaların tipik olarak daha yuvarlak ve daha az köşeli olduğunu beyan etmiştir. Ayrıca araştırmacılar, sadece bir kırma işlemine tabi tutulan GDBA'ların doğal agregaya kıyasla daha yüksek şekil ve yassılık endeksi göstereceğini bildirmiştir.

KTŞ'ye göre temel tabakası için yassılık endeksi değerinin %25'den, alttemel tabakası için ise %30'dan az olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan tüm karışımların KTŞ'de belirtilen yassılık endeksi şartını sağladığı ve temel ve alttemel tabakalarında kullanılmak için elverişli olduğu saptanmıştır.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, Cerni ve Colagrande (2012), geri dönüştürülmüş agregaların şekil indeksi değerini %28 olarak belirlemiştir. Benzer şekilde GDBA'nın yassılık endeksi değerinin, Del Rey ve arkadaşları (2016) %12,8-24, Nataatmadja ve Tan (2001) %6-14 ve Jiminez ve arkadaşları (2012) %8-19 arasında değiştiğini bildirmiştir. Tez çalışması kapsamında hazırlanan agregalar karışımlarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. 100KA karışımı yassılık endeksi deney sonucu

Deney Kısımının Kütlesi				15000		
M ₀ (g)						
Numune Adı				100KA		
Deney Elekleriyle Eleme				Silindirik Çubuklu Eleklerle Eleme		
Tane büyüklüğü fraksiyonu d _i /D _i (mm)		d _i /D _i Tane büyüklüğü fraksiyonu (R _i)(g)		Çubuklu eleklerin anma açıklığı (mm)	Çubuklu elekten geçen malzeme kütlesi (m _i)	Fi=m _i /R _i *100
31,5	/	40	152,4	20	0	0
25	/	31,5	1836	16	193,5	11
20	/	25	2497,2	12,5	293,4	12
16	/	20	1869,6	10	148,2	8
12,5	/	16	708,9	8	104,4	15
10	/	12,5	1182	6,3	154,2	13
8	/	10	1651,2	5	177,6	11
6,3	/	8	1698	4	186,3	11
5	/	6,3	1102,8	3,15	127,2	12
4	/	5	804,9	2,5	72,9	9
M ₁ = ∑R _i			13503	M ₂ = ∑m	1457,7	
FI = M ₁ /M ₂ *100				FI = %10,8		

Çizelge 4.6. 25GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu

Deney Kısımının Kütlesi $M_0(g)$				15000		
Numune Adı				25GDBA		
Deney Elekleriyle Eleme				Silindirik Çubuklu Eleklerle Eleme		
Tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i (mm)		d_i/D_i Tane büyüklüğü fraksiyonu $(R_i)(g)$		Çubuklu eleklerin anma açıklığı (mm)	Çubuklu elekten geçen malzeme kütlesi (mi)	$Fi=mi/R_i*100$
31,5	/	40	1005,9	20	45	4
25	/	31,5	1352,5	16	127,4	9
20	/	25	2229,4	12,5	78,7	4
16	/	20	1750,9	10	175,3	10
12,5	/	16	602	8	53,7	9
10	/	12,5	1024,7	6,3	186,6	18
8	/	10	1878,4	5	249,6	13
6,3	/	8	1754,1	4	255,7	15
5	/	6,3	1136,2	3,15	173,1	15
4	/	5	687,2	2,5	89	13
$M_1 = \sum R_i$		13421,3	$M_2 = \sum m$		1434,1	
$FI = M_1/M_2*100$				FI = %10,7		

Çizelge 4.7. 50GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu

Deney Kısımının Kütlesi $M_0(g)$				15000		
Numune Adı				50GDBA		
Deney Elekleriyle Eleme				Silindirik Çubuklu Eleklerle Eleme		
Tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i (mm)		d_i/D_i Tane büyüklüğü fraksiyonu (Ri)(g)		Çubuklu eleklerin anma açıklığı (mm)	Çubuklu elekten geçen malzeme kütlesi (m _i)	$F_{i=m_i/R_i*100}$
31,5	/	40	802,9	20	0	0
25	/	31,5	1489	16	273,3	18
20	/	25	2639,2	12,5	213,8	8
16	/	20	1227,2	10	125,1	10
12,5	/	16	776,7	8	34,7	4
10	/	12,5	1396	6,3	145,4	10
8	/	10	1499,3	5	167,7	11
6,3	/	8	1623,3	4	170,6	11
5	/	6,3	1133,8	3,15	108,3	10
4	/	5	855,7	2,5	76	9
$M_1 = \sum R_i$		13443,1		$M_2 = \sum m$	1314,9	
$FI = M_1/M_2*100$				FI = %9,8		

Çizelge 4.8. 75GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu

Deney Kısımının Kütlesi $M_0(g)$			15000			
Numune Adı			75GDBA			
Deney Elekleriyle Eleme			Silindirik Çubuklu Eleklerle Eleme			
Tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i (mm)		d_i/D_i Tane büyüklüğü fraksiyonu (R_i)(g)	Çubuklu eleklerin anma açıklığı (mm)	Çubuklu elekten geçen malzeme kütlesi (m_i)	$FI_i = m_i/R_i * 100$	
31,5	/	40	319,4	20	106,8	33
25	/	31,5	1971,5	16	188,5	10
20	/	25	2714,6	12,5	212,8	8
16	/	20	1298,3	10	70,7	5
12,5	/	16	688	8	52,5	8
10	/	12,5	1336,6	6,3	122,9	9
8	/	10	1581,5	5	111,4	7
6,3	/	8	1517,3	4	126,2	8
5	/	6,3	1219,9	3,15	103,4	8
4	/	5	756,5	2,5	60,3	8
$M_1 = \sum R_i$		13403,6	$M_2 = \sum m$		1155,5	
$FI = M_1/M_2 * 100$			FI = %9			

Çizelge 4.9. 100GDBA karışımı yassılık endeksi deney sonucu

Deney Kısımının Kütlesi $M_0(g)$				15000		
Numune Adı				100GDBA		
Deney Elekleriyle Eleme				Silindirik Çubuklu Eleklerle Eleme		
Tane büyüklüğü fraksiyonu d_i/D_i (mm)	d_i/D_i Tane büyüklüğü fraksiyonu (R_i)(g)	Çubuklu eleklerin anma açıklığı (mm)	Çubuklu elekten geçen malzeme kütlesi (mi)	$Fi=mi/R_i*100$		
31,5 / 40	716,3	20	0	0		
25 / 31,5	1522,4	16	116	8		
20 / 25	2605,6	12,5	173,9	7		
16 / 20	1361,2	10	105,3	8		
12,5 / 16	840,9	8	68	8		
10 / 12,5	1172,7	6,3	129,4	11		
8 / 10	1637,9	5	168,9	10		
6,3 / 8	1670,9	4	199,6	12		
5 / 6,3	1057,6	3,15	124,2	12		
4 / 5	912,6	2,5	91,2	10		
$M_1 = \sum R_i$		13498,1	$M_2 = \sum m$		1176,5	
$FI = M_1/M_2*100$			FI = %8,7			

4.5. Magnezyum Sülfat Direnci

Magnezyum sülfat deneyi, farklı iklim şartları altında yol uygulamalarında kullanılacak agregaların donma-çözölmeye karşı direncini hızlı belirlemek için uygulanan bir metottur. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların magnezyum sülfat direnci Çizelge 4.10'da verilmektedir. Ayrıca, sonuçların kıyaslanmasının daha kolay yapılabilmesi için karışımların 100KA karışımına kıyasla bağıl magnezyum sülfat direnci sonuçları Şekil 4.6'da verilmektedir. 9,5-19,5 mm tane çapına sahip agregaları içeren 100KA, 25GDBA, 50GDBA, 75GDBA ve 100 GDBA karışımlarının magnezyum sülfat direnci değerleri sırasıyla, %2,52, %2,85, %4,07, %5,24 ve %6,75 olarak ölçölmüştür. Bu değerin 19-37,5 mm tane çapına sahip agregalardan oluşarı karışımlar için sırasıyla, %2,28, %2,76, %3,59, %3,81 ve %4,48 olduğu tespit edilmiştir. Agregalı tane boyutundan bağımsız olarak 100GDBA ve 100KA karışımlarının donma-çözölmeye karşı sırasıyla, en düşük ve en iyi performansı sergilediği sonuçlardan anlaşılmıştır. KA'nın yerine %100 GDBA kullanımıyla 19-37,5 mm ve 9,5-19 mm tane çapı durumları için karışımların donma-

çözülme direncinin sırasıyla, %21-97 ve %13-168 arasında azaldığı tespit edilmiştir. Bu olayın GDBA'nın daha yüksek geçirgenliğe sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer sonuçlar Mardani-Aghabaglou ve arkadaşları tarafından da bildirilmiştir (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2016). Ayrıca 37,5–19 mm tane boyutundaki agrega karışımlarına kıyasla 19–9,5 mm tane boyutundaki agregalarda magnezyum sülfat tuzunun etkisiyle daha fazla parçalanma ve dökülme meydana geldiği sonuçlardan anlaşılmaktadır. Bu durumun, daha önce de vurgulandığı gibi daha küçük tane çapına sahip GDBA'nın daha yüksek geçirgenliğe ve daha zayıf yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (Tuyan ve ark. 2014, Mardani-Aghabaglou ve ark. 2015).

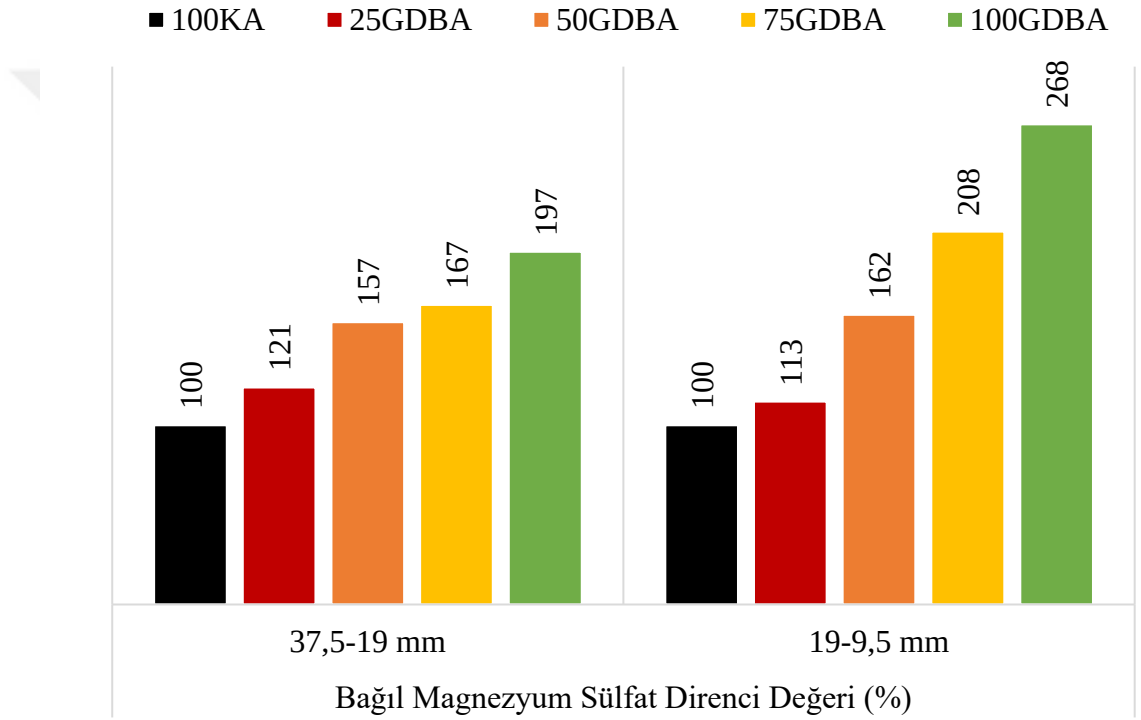
Çizelge 4.10. Hazırlanan karışımların magnezyum sülfat direnci sonuçları (%)

Elek Açıklığı	Magnezyum Sülfat Direnci (%)				
	100KA	25GDBA	50GDBA	75GDBA	100GDBA
37,5 mm - 19 mm	2,28	2,76	3,59	3,81	4,484
19 mm - 9,5 mm	2,52	2,85	4,07	5,24	6,75

KTŞ'ye göre temel ve alttemel tabakaları için magnezyum sülfat direnci limit değerleri sırasıyla, %20 ve %25 olmaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde, bu çalışma kapsamında hazırlanan karışımların magnezyum sülfat direnci değerinin KTŞ'de belirtilen limit değerlerin çok altında olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, sülfat saldırısına maruz kalabilecek bölgelerde temel ve alttemel tabakalarında GDBA'nın kullanılmasında herhangi bir sakınca olmayacağı düşünülmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, tez çalışmasına benzer sonuçlar elde eden Kuo ve arkadaşları (2002), GDBA içeren karışımların magnezyum sülfat direncinin %4 ile %9 arasında değiştiğini rapor etmiştir. Đoki'c ve arkadaşları (2020) ise GDBA'nın magnezyum sülfat direncini %10 olarak belirlerken doğal agreganınkini ise %5 olarak hesaplamıştır. Bu çalışmaların aksine, Strand (2007) tarafından yapılan bir araştırmada, doğal agreganın magnezyum sülfat direncinin (%5) GDBA'dan (%3) daha yüksek olduğu bildirmiştir. Kobayashi ve Kawano (1999) tarafından yapılan benzer bir araştırma,

GDBA'da %22,7 ile %31,5 arasında değişen oranlarda biraz daha yüksek bir kayıp yüzdesi belirtilmiştir. BCSJ (2000), 15 farklı dayanım sınıfına sahip betondan elde edilen GDBA'lar için sodyum sülfat direncinin %18,4 ila %58,9 arasında değiştiğini bildirmiştir. Ancak, araştırmacılar, beton elemanının geri dönüştürülmeden önce sahada maruz kaldığı kimyasal saldırılar nedeniyle GDBA karışımları için sülfat testinin gerçeği yansıtmayabileceğini bildirmiştir (Kou ve ark. 2002). Benzer şekilde, Saeed ve Hammons (2008), sodyum veya magnezyum sülfat tuzlarının sülfat bileşeninin çimento harcı ile reaksiyona girerek hatalı sonuçlara yol açtığı ifade etmiştir.



Şekil 4.6. 100KA karışımına kıyasla bağıl magnezyum sülfat direnci sonuçları (%)

4.6. Kompaksiyon Parametreleri

Agreganın birim hacim ağırlığı boşluk hacmi hakkında bilgi vermektedir. Bu doğrultuda, karışımın su muhtevası–kuru birim hacim ağırlık eğrisi mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu bilinmektedir. Temel ve alttemel tabakalarının kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Modifiye Proktor ve Standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda çizilen kompaksiyon eğrisi grafikleri

Modifiye Proktor ve Standart Proktor için sırasıyla, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Bu şekillerden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri Çizelge 4.11’de özetlenmiştir. Sıkıştırma enerjisinden bağımsız olarak karışımlardaki GDBA miktarı artışıyla optimum su muhtevası (w_{opt}) değeri artmış ancak, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ($\gamma_{k_{maks}}$) azalmıştır. Bu davranışın KA’ya kıyasla GDBA’nın özgül ağırlık ve su emme değerlerinin sırasıyla daha düşük ve daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer sonuçlar Jimenez ve arkadaşları (2012) tarafından da bildirilmiştir. Yazarlara göre, GDBA tanelerinin içerdiği heterojen harç fazına bağlı olarak daha boşluklu yapıya sahip olduğundan daha düşük birim hacim ağırlık değerleri ölçülmüştür. Buna ilaveten, GDBA’nın gözenekli yapısından dolayı GDBA içeren karışımların optimum su muhtevası değerlerinin fazla olduğu Arm ve arkadaşları (2001) tarafından beyan edilmiştir.

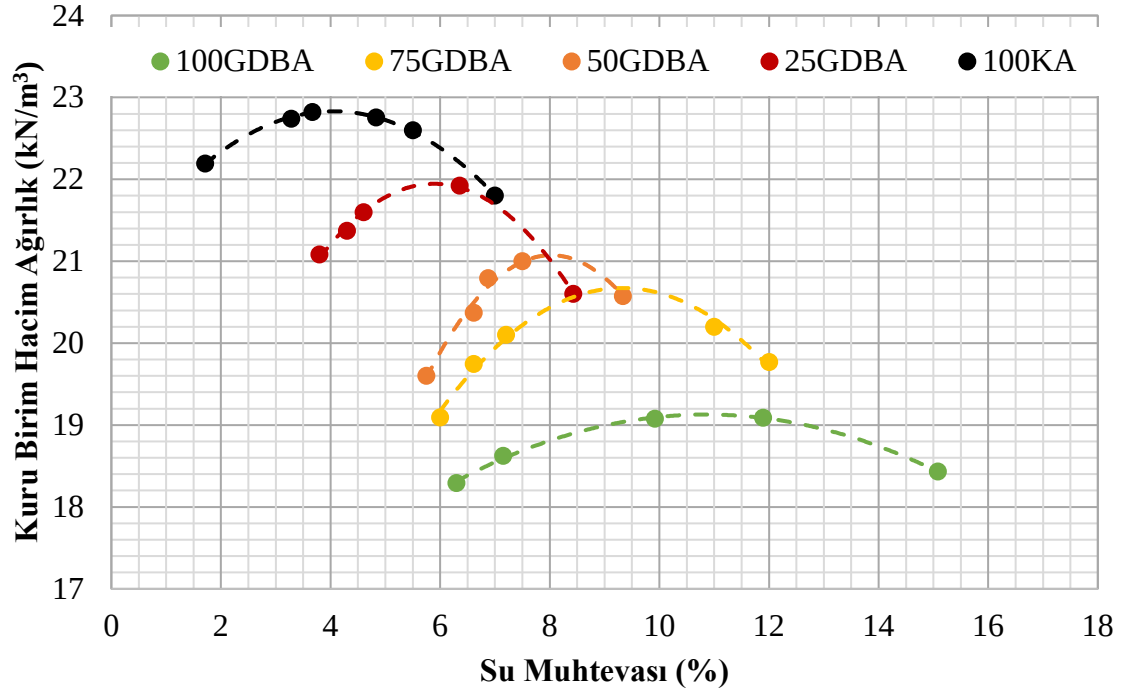
Modifiye Proktor deneyi için 100KA karışımının maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri $22,8 \text{ kN/m}^3$ ve optimum su muhtevası değeri %4,2 olarak belirlenirken bu değerlerin 100GDBA karışımı için sırasıyla, $19,18 \text{ kN/m}^3$ ve %11 olarak tespit edilmiştir. Standart Proktor deneyine tabi tutulan agrega karışımlarının kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinin sırasıyla, $22,25 - 18,80 \text{ kN/m}^3$ ve %5,20 - %12,40 arasında değiştiği anlaşılmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, Modifiye Proktor deneyine tabi tutulan agrega karışımlarının Standart Proktor deneyine kıyasla maksimum kuru birim hacim değerlerinin daha düşük ve optimum su muhtevası değerlerinin ise daha yüksek ölçüldüğü anlaşılmıştır. Bu davranış, Modifiye Proktor deneyinde karışımı sıkıştırmak için uygulanan enerjinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’den anlaşıldığı gibi, karışımdaki GDBA içeriğinin artmasıyla karışımın kompaksiyon eğrisi daha basık bir şekil almıştır. Bu olay, GDBA tanelerinin daha yüksek su emme oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle, su muhtevası değerlerinin çok geniş bir alanda değişmesine rağmen kuru birim hacim değerlerinde kayda değer bir değişiklik olmamıştır. Bu özelliğin saha uygulamalarında KA içeren karışımlara göre avantaj olmaktadır. Arazideki karışımların su muhtevasını, laboratuvar şartlarında belirlenen optimum değerde ayarlamak oldukça zor olmaktadır. Dolayısıyla, geniş bir su muhtevası aralığında aynı maksimum kuru birim hacim

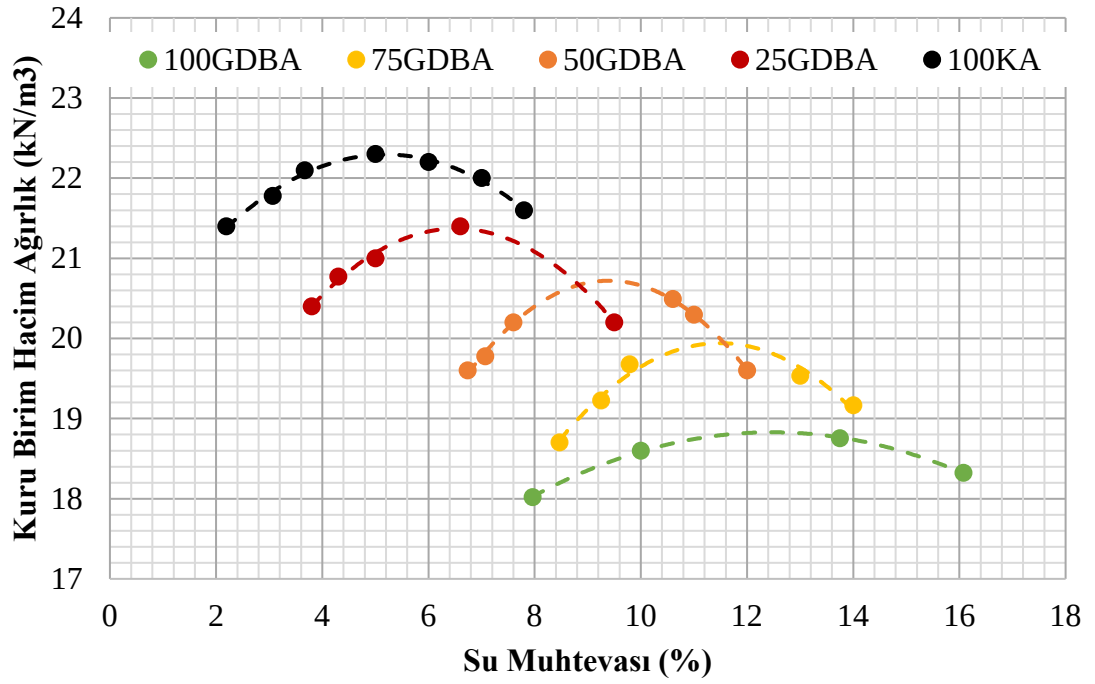
değerlerini elde etmek saha uygulamalarında avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Bu görüşü destekler nitelikte Poon ve Chan (2006), yol mühendisliği uygulamalarında sıkıştırma eğrisinin basık olmasının malzemelerin kararlı sıkıştırma davranışını ve farklı su içeriklerinde iyi işlenebilirliğini temsil ettiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 4.11. Hazırlanan temel ve alttemel karışımlarının kompaksiyon deneyi sonuçları

Karışım	Modifiye Proktor		Standart Proktor	
	$\gamma_{k_{maks}}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)	$\gamma_{k_{maks}}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)
100KA	22,80	4,20	22,25	5,20
25GDBA	21,96	6,00	21,40	6,80
50GDBA	21,10	8,00	20,70	9,50
75GDBA	20,65	9,50	19,98	11,60
100GDBA	19,18	11,00	18,80	12,40



Şekil 4.7. Hazırlanan karışımların Modifiye Proktor eğrileri



Şekil 4.8. Hazırlanan karışımların Standart Proktor eğrileri

Mevcut çalışmalar incelendiğinde GDBA'nın maksimum kuru yoğunluk ve su muhtevası değerlerini sırasıyla; Arulrajah ve arkadaşları (2013) 19,1 kN/m³ ve %11,5, Jayakody ve arkadaşları (2014) 1,74 t/m³ – 1,856 t/m³ ve %13,2 – %14,2 arasında, Park (2003) 18,1 kN/m³ ve %12, Chidiroglu ve arkadaşları (2008) 18,64 kN/m³ ve %5,3, Giwankara ve arkadaşları (2019) 19,52 kN/m³ ve %9,38 olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmalarda, GDBA içeren karışımlar için elde edilen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri tez çalışması kapsamında elde edilen değerlerle tutarlılık göstermektedir.

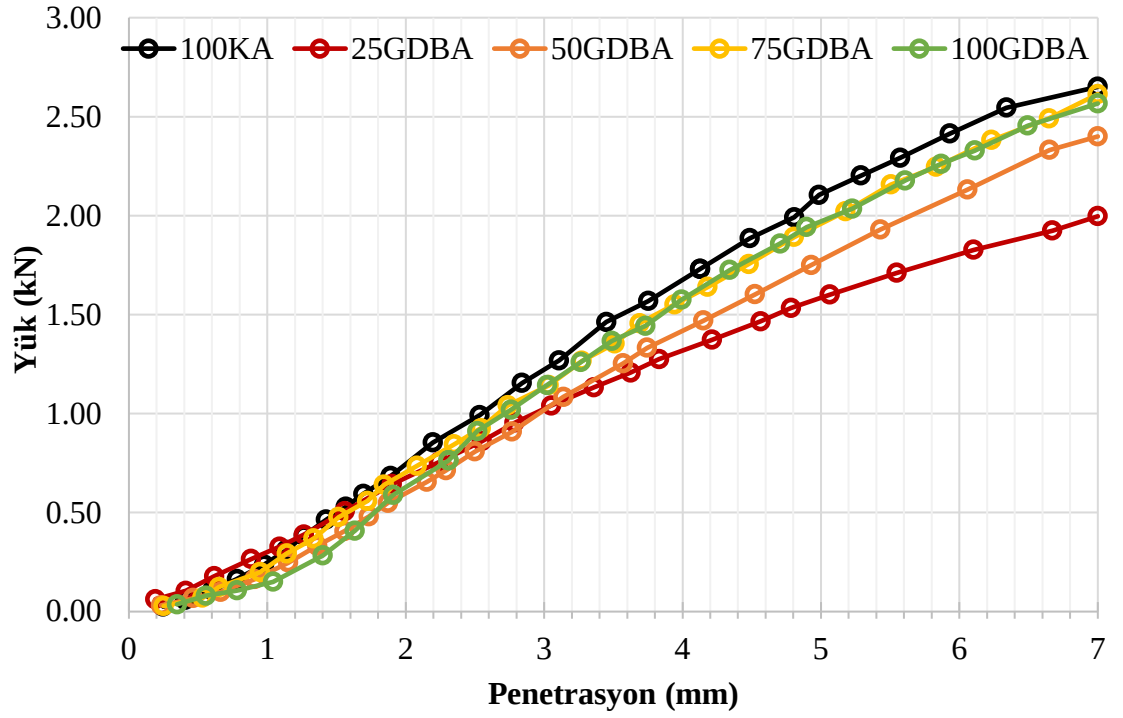
4.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Çalışma kapsamında, optimum su muhtevasında ve Modifiye Proktor sıkılığında hazırlanan karışımlar üzerinde CBR deneyi yapılmıştır. CBR deneyi hem kuru hem de 4 gün suda kürlenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Agregat karışımlarının kuru ve ıslak CBR deney sonuçları sırasıyla, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. En yüksek kuru CBR değeri %225,5 olarak %100 kırma kireçtaşı agregası içeren 100KA karışımında ölçülmüştür. 25GDBA, 50GDBA, 75GDBA ve 100GDBA karışımlarının

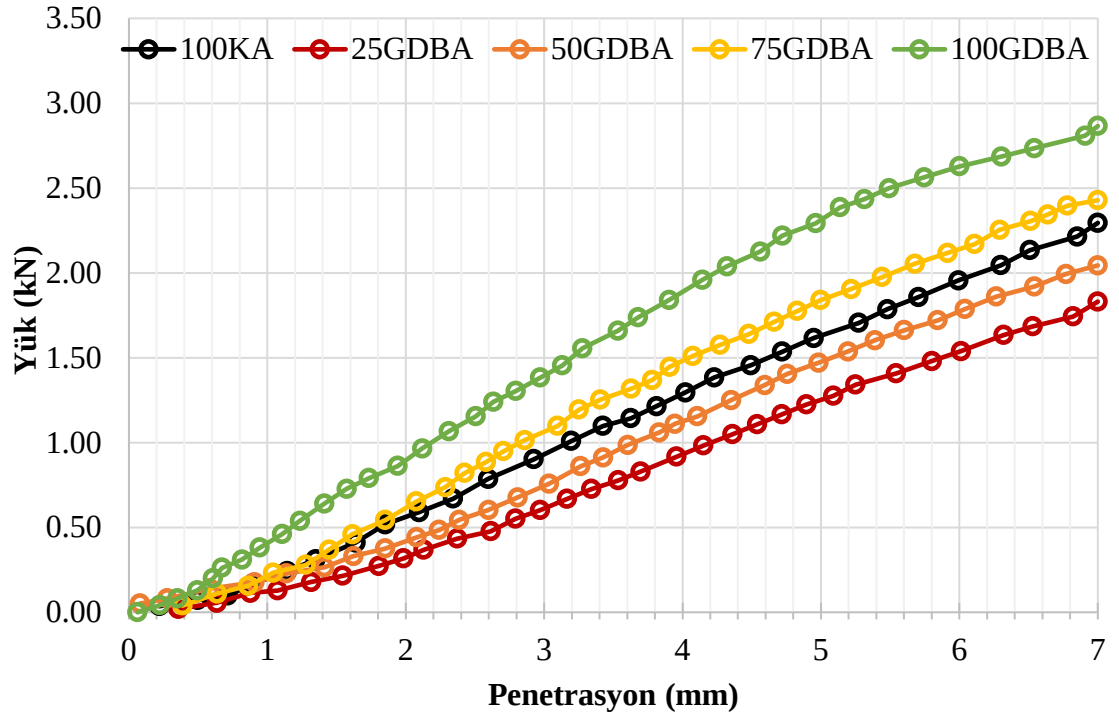
kuru CBR değerleri ise sırasıyla, %172,6, %193,1, %211,4 ve %215,3 olarak belirlenmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, GDBA kullanımıyla karışımların CBR değeri azalmıştır. Ancak, 100KA karışımına kıyasla oluşan CBR değerindeki fark GDBA kullanım oranının artışıyla azalmıştır. 100KA ve 100GDBA karışımları CBR performansı açısından hemen hemen benzer davranışlar sergilemiştir. CBR deney sonuçları agregaların mukavemet ve yüzey özelliklerinden oldukça etkilendiği bilinmektedir (Jimenez ve ark. 2011, Arulrajah ve ark. 2012; Barbudo ve ark. 2012). Burada iki farklı zıt etki söz konusu olmuştur. Bir taraftan, KA, GDBA'ya kıyasla daha yüksek mukavemete sahip olduğundan KA oranı yüksek olan karışımlarda penetrasyon değerinin daha düşük olması beklenmektedir. Diğer taraftan, daha pürüzlü ve köşeli GDBA tanelerinde agregalar arasındaki kenetlenme daha güçlü olacağından penetrasyon değerinin düşük olması öngörülmektedir. GDBA'nın daha düşük mukavemete sahip olmasına rağmen, karışımdaki miktarının artışıyla CBR değerlerinin artması GDBA içeren karışımlarda ikinci parametrenin daha baskın olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, GDBA'nın yassılık endeksi değerinin KA'dan daha düşük olduğu daha önce de vurgulanmıştır. GDBA'nın bu özelliği nedeniyle taneler arasında daha iyi bir yerleşme meydana gelmekte ve böylece karışımların CBR değerinin GDBA ikame oranına bağlı olarak artacağı beklenmektedir. Toka (2019), kırma kireçtaşı agregasının yüksek yassılık endeksi değerinin taneler arasında anizotrop bir davranışa neden olduğunu ve bu durumun KA içeren karışımların CBR değerini düşürdüğünü bildirmiştir. Ayrıca, karışımlarda GDBA karışımlarının %100'den fazla bir CBR değerine sahip olması referans malzemeye kıyasla daha yüksek kalitesini göstermektedir.

Literatürden elde edilen sonuçlar tez çalışması kapsamında ölçülen sonuçlar ile benzer nitelikte olduğu anlaşılmıştır. Doğal agrega ve GDBA'nın CBR değerini sırasıyla, Poon ve arkadaşları (2006) %85 ve %66; Jimenez ve arkadaşları (2011) %152 ve %97-138; Barbudo ve arkadaşları (2012) %36-152 ve %55-138 olarak belirlemiştir. Yaghoubi ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada GDBA içeren karışımların CBR değeri %169-184 arasında bulunurken, Vegas ve diğerleri (2011) GDBA'nın CBR dayanımını %198 olarak hesaplamıştır. Bu çalışmaların aksine, Bennert ve Maher (2005) tarafından yapılan çalışmada GDBA içeren karışımların CBR dayanımının (%205), doğal agregaya (%195) kıyasla daha yüksek ölçülmüştür. Yazarlar bu durumun GDBA tanelerinin

pürüzlü ve köşeli bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığını bildirmiştir. Ölçülen CBR değerindeki geniş aralık GDBA'nın elde edildiği beton elemanının değişken özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, karışımların hazırlanması sırasındaki sıkıştırma yöntemi, karışımların doygunluk derecesi ve uygulanan standartlar CBR değerlerinin geniş bir aralıkta değişmesinin nedeni olabilmektedir.



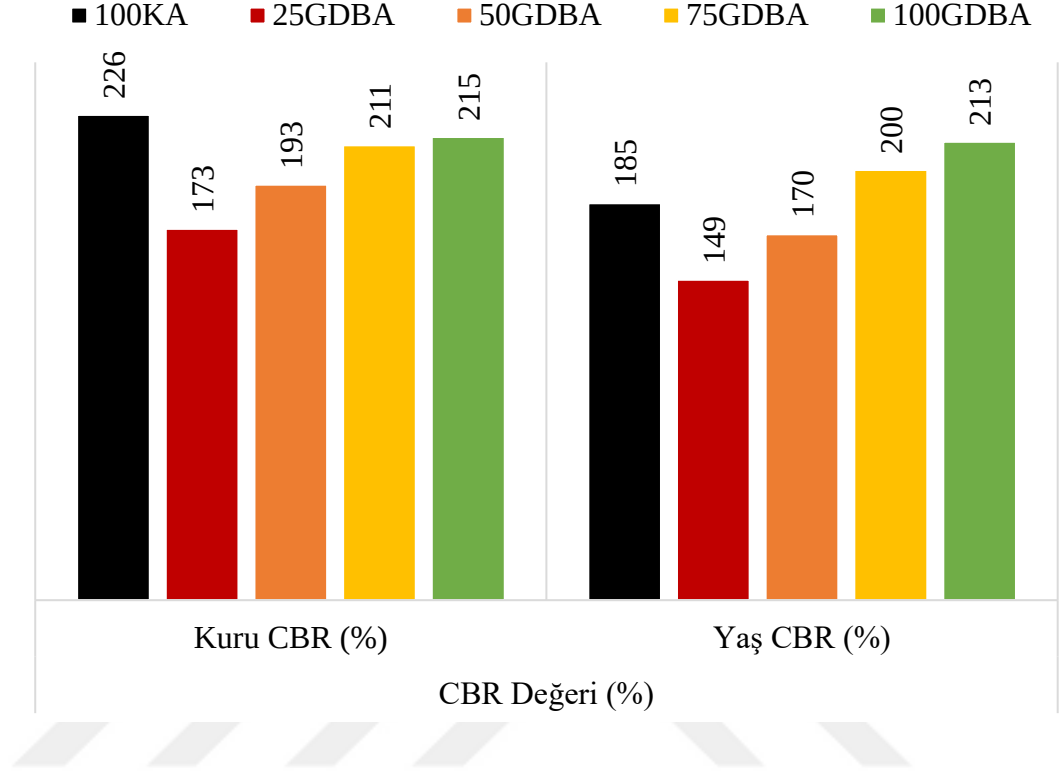
Şekil 4.9. Karışımların kuru CBR deneyi sonuçları



Şekil 4.10. Karışımların ıslak CBR deneyi sonuçları

Hazırlanan karışımların yaş ve kuru CBR değerleri Şekil 4.11’de birlikte verilmiştir. Kuru ve ıslak CBR değeri sonuçları incelendiğinde 100KA, 25GDBA, 50GDBA, 75GDBA ve 100GDBA karışımlarının değişim oranları sırasıyla, %18, %14, %12, %5 ve %1 olarak belirlenmiştir. Islak karışımlar deneye tabi tutulduğunda GDBA içeren karışımların yüzey özelliği sebebiyle daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, GDBA taneleri boşluklu bir yapıya sahip olduğundan suya doymun bir şekilde deneye tabi tutulduğunda boşlukların tamamen suyla dolu olması sebebiyle CBR deneyinde yüklemeye karşı bir hidrostatik basınç söz konusu olabilmektedir. Bu sebeple ıslak durumda 100GDBA ve 75GDBA karışımlarının yüksek GDBA içeriğinden dolayı daha üstün performans gösterdiği bariz bir şekilde anlaşılmıştır. Ayrıca, sonuçlar 4 günlük suda bekletme süresinin, GDBA içeriği yüksek olan karışımların CBR değeri üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ancak, kuru ve ıslak CBR değerleri arasındaki farkın 100KA, 50GDBA ve 25GDBA karışımlarında en yüksek olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu karışımlardaki agrega boşluklarında suyun varlığı, agrega taneleri arası sürtünmeyi azaltmaktadır. Böylece, CBR değerinde azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca, tüm karışımlar için kaydedilen şişme değerleri, 4 günlük kürlenme

süresinin sonunda %0,06'dan daha az olduğu belirlenmiş ve bu değer ihmal edilebilir olarak kabul edilmiştir.



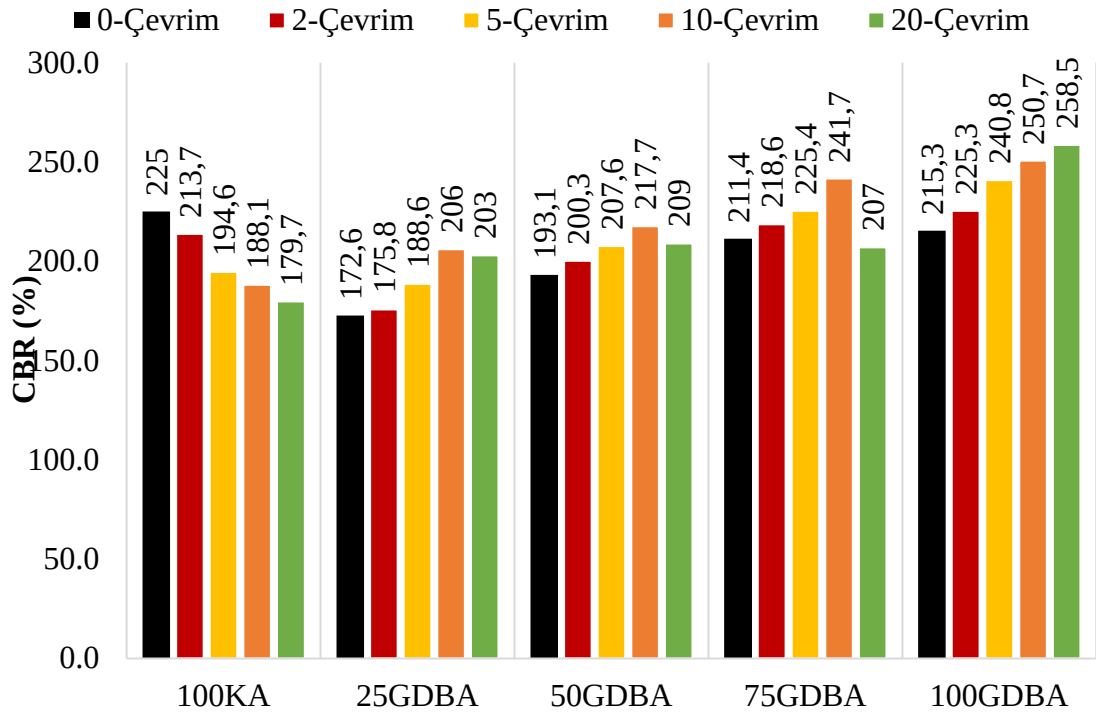
Şekil 4.11. Karışımların Kaliforniya Taşıma Oranı (%) ve Değişim yüzdesi

KTŞ'ye göre temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin kuru CBR değerleri ile ilgili herhangi bir limit değer belirtilmemekle birlikte ıslak CBR değeri için sırasıyla %100 ve %30'dan az olmaması şartı konulmuştur. Tez kapsamında hazırlanan tüm karışımların ıslak CBR değeri %149 ile %213,1 arasında olduğu için bu değerler KTŞ'nin belirttiği sınır değerlerin çok üzerindedir. Dolayısıyla, bu çalışmanın sonuçları, geri dönüştürülmüş beton agregası ve kırma kireçtaşı agregasının, temel ve alttemel tabakalarında kullanılmak amacıyla birlikte harmanlanabileceğini kanıtlamıştır.

4.8. Donma-Çözülme Direnci

Karışımların donmaya karşı direnci 2, 5, 10 ve 20 donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra CBR değerlerinde meydana gelen değişim incelenerek kıyaslanmıştır. Karışımların donma-çözülme çevrimi sonrası CBR deneyi sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

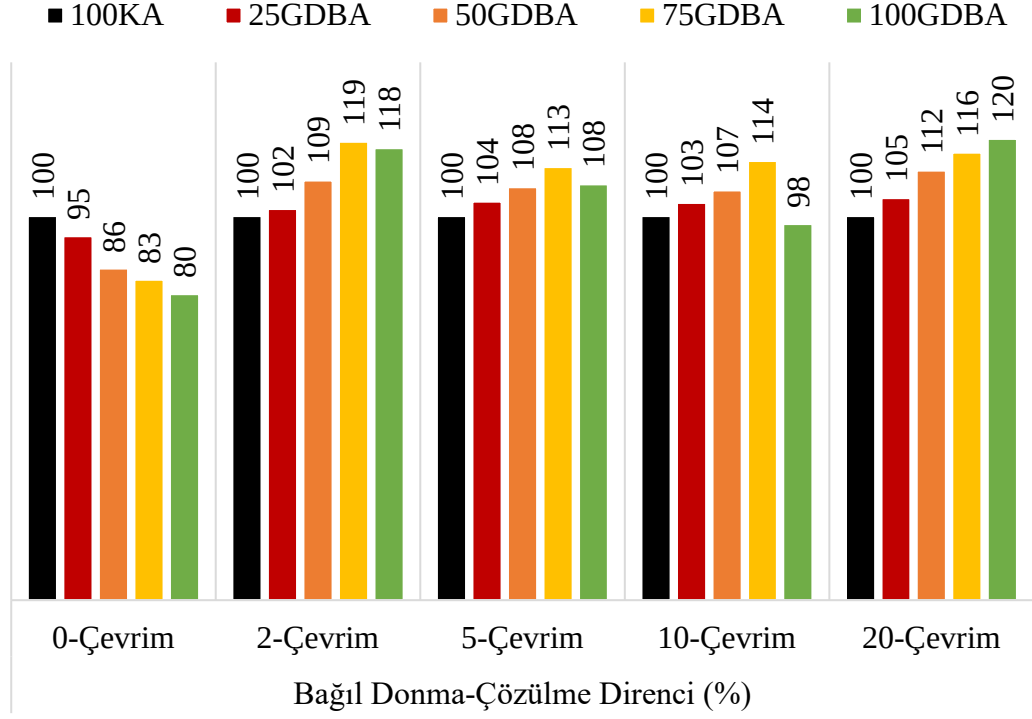
Ayrıca, donma-çözülme çevrimine bağlı olarak, her karışım için donma-çözünme çevrimine maruz kalmadan ölçülen CBR değerine kıyasla bağlı CBR değerleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, 100KA karışımının donma-çözülme çevrim sayısının artışıyla CBR değerleri %5-22 arasında azalmıştır. Ancak, GDBA kullanımı ile karışımların donma-çözölmeye karşı direncinde artış gözlemlenmiştir. 100GDBA karışımında 20 donma-çözölme çevrimi sonrası karışımların CBR değerinde %20'lik bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. Karışımların farklı donma-çözölme çevrimine maruz kaldıktan sonra CBR değeri değişimi (%)

GDBA içeren karışımların donma-çözünme performansı üzerinde iki farklı parametrenin etkili olduğu literatürde vurgulanmıştır (Tuyan ve ark. 2014). GDBA içeren karışımların su emme oranlarının daha yüksek olması (Şekil 4.1) suyun agregaya girişini kolaylaştıracağından donma-çözölme direncinin azalması beklenmektedir. Ancak, çalışma kapsamında hazırlanan karışımlarda bu durumun tersi gözlemlenmiştir. Bir diğer yandan, GDBA taneleri boşluklu bir yapıya sahip olduğundan donma esnasında suyun kaçması için ekstra bir hacim oluşturarak donma-çözünme direncinin artması

beklenmektedir. GDBA kullanım oranının artışıyla karışımların donma-çözölmeye karşı performansının iyileşmesi ikinci parametrenin daha baskın olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.13. Her karışım için donma-çözünme çevrimine maruz kalmadan ölçölen CBR değerine kıyasla bağıl CBR değerleri (%)

Temel ve alttemel tabaklarının CBR değeriindeki değışikliklerin ana nedeninin, donma-çözölme döngöleri sırasında karışım matrisindeki nemin yeniden düzenlenmesi olduğu düşünölmektedir. Donma esnasında, bir sıcaklık gradyanı nedeniyle karışım içerisindeki donmayan su donmuş bölgelere doğru hareket etmektedir. Suyun donması sonucu hacim artışına bağılı olarak karışımındaki boşluk hacmi artmaktadır. Çözölme esnasında ise donan suyun çözölmesiyle karışım içerisinde belirli kısımlarında su birikmesine neden olduğundan geçici olarak tünemiş su haline gelmektedir. Bu durum, karışımların homojenliğini bozmakta ve belirli bölgelerde su içeriğinin yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca, araştırmacılar, donma-çözölme sonrası karışımların rijitliklerindeki değışimin, sıcaklık değışim hızına, karışımın permeabilitesine ve su muhtevasına bağılı olduğunu bildirmiştir (Kaloop ve ark. 2019). KA içeren karışımlarda donma-çözölme döngüsü sırasında suyun hareketi, karışımın nem içeriğinin değışmesine ve bölgesel

olarak farklı nem içeriğine sahip bir karışıma yol açmaktadır. GDBA oranı yüksek olan karışımlarda GDBA'nın su emme oranı daha yüksek olduğu için bu durumun söz konusu olmadığı düşünülmektedir.

GDBA içeren karışımlarda 10 donma-çözülme döngüsüne kadar CBR değerinin arttığı gözlemlenmiştir. CBR değerlerindeki bu artışın su ve hidrate olmamış çimento tanelerinin reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen sertleşmeden kaynaklandığı düşünülmektedir (Kaloop ve ark. 2019, Poon ve Chan 2006). Ayrıca, daha önce de bahsedildiği gibi, donma olayı sonucunda oluşan buz mercceklerinin çözülme sırasında eriyerek neden olabileceği lokal yüksek su içeriği, GDBA tanelerinin yüksek su emme değerlerinden dolayı elimine edilmekte ve suyun karışım içerisinde homojen dağılımı sağlanmaktadır.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların donma-çözülme çevrimi sonucunda GDBA'nın esneklik modülü ve kalıcı deformasyon davranışına etkisi üzerine yoğunlaştıkları anlaşılmıştır. Rosa ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada, GDBA'nın esneklik modülünün 5 donma-çözülme çevrimine kadar arttığı ve sonraki donma-çözülme döngülerinde azaldığı bildirilmiştir. Bassani ve Tefa (2015) tarafından yürütülen çalışmada ise artan donma-çözülme döngülerinin esneklik modülü değerini olumsuz etkilediği bildirilmiştir.

4.9. Geçirimsizlik

Hazırlanan karışımların sabit seviyeli permeabilite deneyi sonuçları Çizelge 4.12'te verilmiştir. En düşük permeabilite katsayısı $1,036 \times 10^{-5}$ m/s olarak 100KA karışımında belirlenmiştir. GDBA ikamesiyle ve ikame oranının artışıyla karışımların permeabilite katsayısı değerlerinin arttığı sonuçlardan anlaşılmıştır. En yüksek permeabilite katsayısı $2,042 \times 10^{-5}$ m/s olarak 100GDBA karışımında ölçülmüştür. Bu değer %100 KA içeren karışımlara kıyasla yaklaşık 2 kat daha fazla olmuştur. 25GDBA, 50GDBA ve 75GDBA karışımlarının permeabilite katsayıları ise sırasıyla, $1,045 \times 10^{-5}$ m/s, $1,085 \times 10^{-5}$ m/s ve $1,152 \times 10^{-5}$ m/s olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.12. Permeabilite deney sonuçları

Karışım	Permeabilite Katsayısı m/s
100KA	$1,036 \times 10^{-5}$
25GDBA	$1,045 \times 10^{-5}$
50GDBA	$1,085 \times 10^{-5}$
75GDBA	$1,152 \times 10^{-5}$
100GDBA	$2,042 \times 10^{-5}$

Karışımın permeabilite katsayısının içerdiği agreganın su emme kapasitesi, boşluk yapısı ve gradasyonu gibi agrega özelliklerinden etkilendiğinin yanı sıra karışımın sıkıştırma derecesi, yoğunluk ve su içerinden de ciddi mertebe etkilendiği bildirilmiştir (Głuchowski ve ark. 2018, Chapuis 2012). Daha önce de vurgulandığı gibi, GDBA taneleri birbirlerine bağlı büyük boşluklar içerdiğinden geçirgen bir yapıya sahiptir (Deshpande ve Hiller 2011). Bu sebeple bu agregayı içeren karışımların geçirgenlik katsayısı KA içeren karışımlara kıyasla daha yüksek değer ölçülmüştür. KTŞ’de temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin hidrolik özellikleri ile ilgili herhangi bir limit değer belirtilmemiştir. Ancak, AASHTO (1993)’e göre kaplama tasarımı yapılırken temel ve alttemel tabakalarında kullanılan malzemelerin drenaj katsayıları doğrudan kalınlık hesabında kullanılmaktadır.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, Poon ve diğerleri (2006) ve Poon ve Chan (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, GDBA’nın permeabilite katsayısının $2,04 \times 10^{-3}$ ile $2,67 \times 10^{-3}$ m/s arasında ölçüldüğü bildirilmiştir. Głuchowski ve diğerleri (2018) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, 0,05-16, 0-16 ve 0-8 mm olmak üzere 3 farklı agrega gradasyonuna sahip karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların permeabilite katsayısının sırasıyla, $1,018 \times 10^{-4}$, $1,89 \times 10^{-5}$ ve $2,08 \times 10^{-5}$ m/s olarak ölçüldüğü vurgulanmıştır. Arulrajah ve arkadaşları (2012) tarafından yapılan çalışmada, %100 KA ve GDBA içeren karışımların permeabilite katsayısı sırasıyla, $3,3 \times 10^{-8}$ ve 1×10^{-9} m/s olarak ölçülmüştür. Bu çalışmaların aksine Toka (2019), KA içeren karışımların permeabilite katsayısının ($1,411 \times 10^{-5}$ m/s), GDBA içeren karışımlara ($9,09 \times 10^{-6}$ – $1,035 \times 10^{-5}$ m/s) göre daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Toka, bu durumun GDBA

tanelerinde bulunan yapışık çimento harcı nedeniyle hidrofil hale gelmesi ve suyu tutma eğiliminden kaynaklandığını ifade etmiştir. Literatüre göre temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin hidrolik özellikleri hakkında çok fazla bilginin mevcut olmadığı ve var olan sonuçların geniş bir yelpazede değiştiği anlaşılmıştır. Bu davranışın çalışmalarda kullanılan agrega gradasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.10. Esneklik Modülü

Granüler malzemelerin trafik yükü altında yol tabakalarının rijitliğinin belirlenmesi amacıyla esneklik modülü deneyi yapılmıştır. Temel ve alttemel tabakalarında kullanılacak malzemelerin esneklik modülü değerinin belirlenebilmesi için farklı araştırmacılar tarafından nonlinear modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellerde esneklik modülü farklı gerilme değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, esneklik modülü değerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan 3 farklı model seçilmiştir. Bu modeller; AASHTO modeli (Toplam Gerilme Modeli), Mekanistik-Ampirik Kaplama Dizayn Yöntemi (MEPDG) ve Uzan modeli (Universal, 1985) olmaktadır. AASTHO modelinde toplam gerilme dikkate alındığından numuneye uygulanan hücre basıncı ve deviator gerilmelerin değişiminin ayırt edilemediği bilinmektedir. MEPDG ve Uzan modelinde ise malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel eşitliklere bağlı kalmadan doğrudan yol tasarımında kullanılabilmesine imkân vermektedir. Bu yönüyle MEPDG ve Uzan modelleri sadece toplam gerilmeleri dikkate alan AASTHO modelinden ayrılmaktadır. Kullanılan modeller denklem 4.1-4.3'te verilmiştir.

$$\text{AASHTO Model } (M_R) = k_1(\theta)^{k_2} \quad (4.1)$$

$$\text{MEPDG Modeli } (M_R) = k_1 \sigma_{\text{atm}} \left(\frac{\theta}{\sigma_{\text{atm}}} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\sigma_{\text{atm}}} + 1 \right)^{k_3} \quad (4.2)$$

$$\text{Uzan Model } (M_R) = k_1 \sigma_{\text{atm}} \left(\frac{\theta}{\sigma_{\text{atm}}} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{\text{atm}}} \right)^{k_3} \quad (4.3)$$

Burada:

M_R : Esneklik Modülü

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

k_1, k_2, k_3 : Regresyon katsayıları

σ_d : Deviator gerilme

σ_{atm} : Atmosfer basıncı

τ_{oct} : Oktahedral gerilme ($\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$)

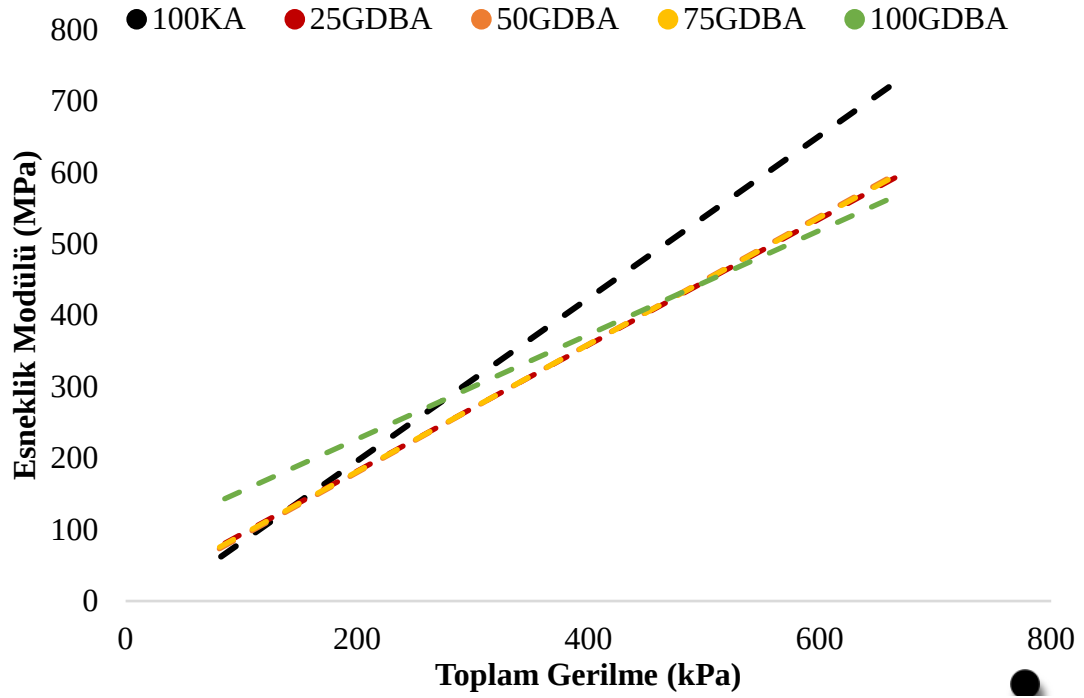
σ_2 ve σ_3 çevre gerilmeleri birbirine eşit olup toplam gerilme değeri $\sigma_1 + 2\sigma_3$ şeklinde belirlenebilmektedir. AASTHO modelinde k_1, k_2 regresyon katsayıları her bir yükleme aşaması sonucunda elde edilen veriler kullanılarak çizilen esneklik modülü - toplam gerilme grafiği doğru denkleminde elde edilmektedir. Uzan ve MEPDG modellerinde esneklik modülü değeri farklı gerilme değerlerinden elde edildiğinden AASTHO modelinde kullanılan grafik yöntemi k_1, k_2, k_3 regresyon katsayılarının belirlenmesi için kullanılamamaktadır. Bu modellerde, 15 yükleme serisinden elde edilen değerler Excel programında regresyon analizi çözümlemesi yapılarak belirlenmiştir. Regresyon katsayılarının belirlenmesinin ardından Denklem 4.1-4.3 kullanılarak Çizelge 4.13'te gösterilen modeller oluşturulmuştur. Ayrıca, deneysel çalışma sonucunda elde edilen esneklik modülü değerlerinin literatürde önerilen model denklemler kullanılarak hesaplanan esneklik modülü değeri kıyaslanmıştır. Bu amaçla deneysel ve modelsel olarak elde edilen esneklik modülü verilerinin R^2 değerleri hesaplanmıştır. Bu R^2 değerlerinin ne mertebede yakın olduğu incelenmiştir. AASTHO, MEPDG ve Uzan modeli için oluşturulan ve Çizelge 4.13'te gösterilen denklemler kullanılarak esneklik modülü değerleri hesaplanmıştır. Bu modeller için hesaplanan esneklik modülü-toplam gerilme grafikleri sırasıyla, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da sunulmaktadır.

Çizelge 4.13. Esneklik modülü için oluşturulan model denklemleri ve regresyon katsayıları

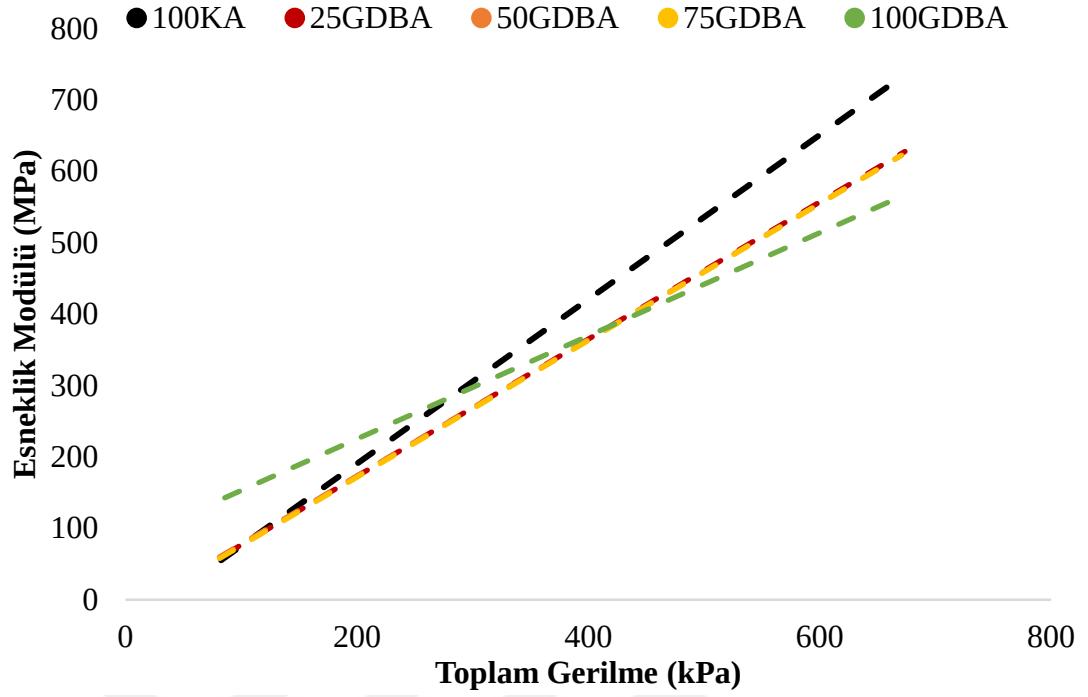
Karışım	AASTHO Modeli	MEPG Modeli	Uzan Modeli
100GDBA	$M_R = 5468,8 \times \theta^{0,707}$	$M_R = 1512,28 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{0,8346} \times (T_{oct}/\sigma_{atm} + 1)^{-0,5427}$	$M_R = 1160,26 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{0,8635} \times (\theta/\sigma_d)^{-0,1757}$
R2	0,815	0,9211	0,9155
75GDBA	$M_R = 534,5 \times \theta^{1,0869}$	$M_R = 908,51 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,3121} \times (T_{oct}/\sigma_{atm} + 1)^{-0,9767}$	$M_R = 604,33 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,3092} \times (\theta/\sigma_d)^{-0,2538}$
R2	0,854	0,9565	0,9311
50GDBA	$M_R = 573,6 \times \theta^{1,0758}$	$M_R = 898,28 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,2468} \times (T_{oct}/\sigma_{atm} + 1)^{-0,7407}$	$M_R = 645,93 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,2612} \times (\theta/\sigma_d)^{-0,2113}$
R2	0,9307	0,983	0,9716
25GDBA	$M_R = 556,9 \times \theta^{1,081}$	$M_R = 865,38 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,2415} \times (T_{oct}/\sigma_{atm} + 1)^{-0,6117}$	$M_R = 687,02 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,2293} \times (\theta/\sigma_d)^{-0,1297}$
R2	0,9259	0,9785	0,9552
25GDBA	$M_R = 416,20 \times \theta^{1,1519}$	$M_R = 929,73 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,3339} \times (T_{oct}/\sigma_{atm} + 1)^{-0,7857}$	$M_R = 618,65 \times \sigma_{atm} \times (\theta/\sigma_{atm})^{1,3947} \times (\theta/\sigma_d)^{-0,2765}$
R2	0,8851	0,943	0,9364

Çizelge 4.13'ten de anlaşıldığı üzere Uzan ve MEPDG modeline göre AASTHO modeli için daha düşük R^2 değerleri hesaplanmıştır. AASTHO modeli, bu modellerden farklı olarak numuneye uygulanan yanal ve düşey gerilmeleri ayrı ayrı ele almamakta ve toplam gerilme olarak birlikte değerlendirmektedir. MEPDG ve Uzan modelinde yüksek bir R^2 değerinin ($> 0,91$) elde edilmesinde bu model denklemlerde düşey ve yanal gerilmelerin $(\tau_{oct}/\sigma_{atm})$ ve (θ/σ_d) bağımsız değişkenleri vasıtasıyla ayrı ayrı değerlendirilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, tüm model denklemlerde regresyon katsayılarının pozitif değer almasının sıkıştırılan numunenin granüler malzeme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uzan Modelinde negatif k_3 regresyon

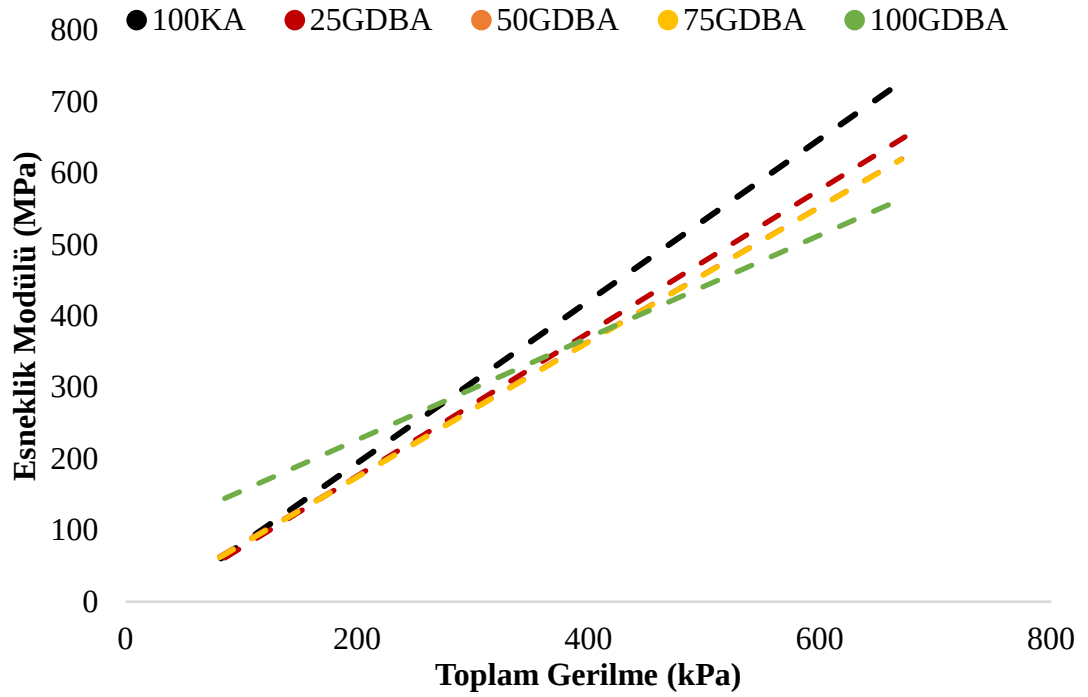
katsayısı, agregaların yumuşama davranışı gösterdiğini ifade etmektedir. Agregasistemlerinin esneklik modülü değerleri, daha fazla toplam gerilmeye maruz kaldığında yumuşama davranışı göstermektedir. Araştırmacılar, negatif k_3 regresyon katsayısına sahip agregasistemlerinin, yüksek gerilme durumlarında tekerlek izi oluşumuna daha yatkın olduğunu bildirmiştir (Kim ve ark. 2004, Kim ve ark. 2005, Ashtiani 2008).



Şekil 4.14. Karışımların AASTHO modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri

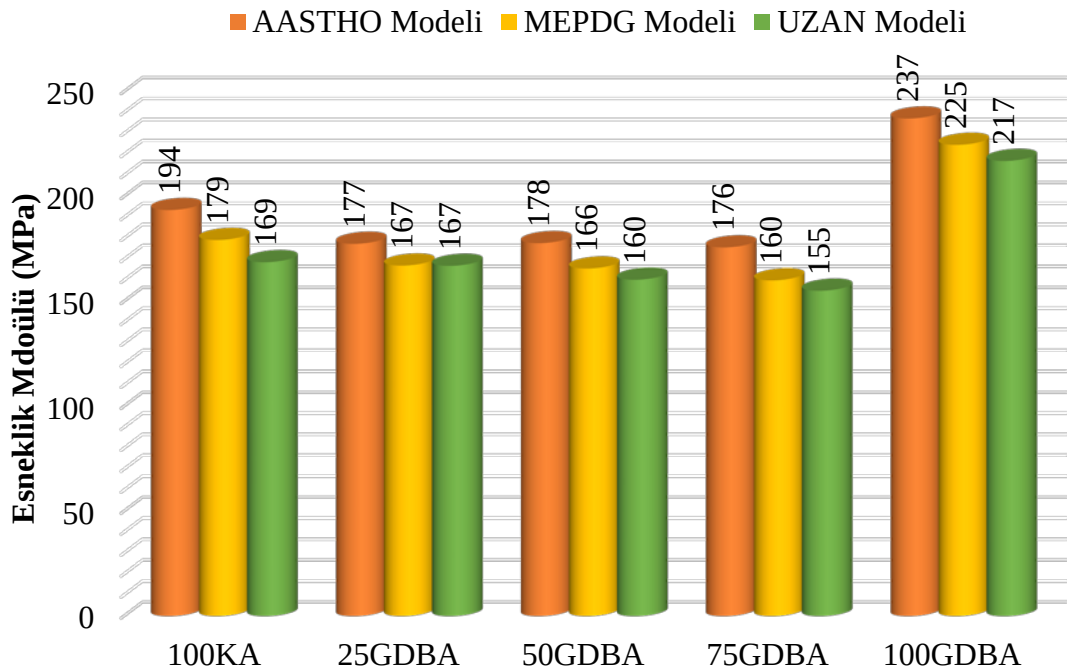


Şekil 4.15. Karışımların MEPDG modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri



Şekil 4.16. Karışımların Uzan modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri

Temel ve alttemel tabakalarının projelendirilmesinde kullanılan esneklik modülü değeri, 34,5 kPa çevre basıncı ve 103,4 kPa deviator gerilmeye göre belirlenmektedir. Bu amaçla, tez çalışması kapsamında belirtilen gerilme değerlerinde AASTHO, MEPDG ve Uzan model denklemleri kullanılarak esneklik modülü değerleri belirlenmiştir. Böylece, aynı çevre basıncı ve toplam gerilme değerlerinde farklı model denklemleri kullanılarak hesaplanan esneklik modülü değerleri karşılaştırılmıştır. AASTHO, MEPDG ve Uzan modellerinde bulunan esneklik modülü değerleri Şekil 4.17’de verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere en yüksek esneklik modülü değerleri AASTHO modelinde elde edilmiş olmakla birlikte bu değerin Uzan ve MEPDG modellerinde ciddi mertebede değişmedi gözlemlenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu durumun AASTHO modelinin sadece toplam gerilmeleri dikkate almasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 100GDBA karışımın esneklik modülü değerleri AASTHO, MEPDG ve Uzan modeli için sırasıyla, 237, 225 ve 217 MPa olarak belirlenirken 100KA karışımı için aynı değerler sırasıyla 194, 179, 169 MPa olarak ölçülmüştür. 75GDBA, 50GDBA ve 25GDBA karışımlarının tüm modeller için esneklik modülü değerleri birbirine benzer olmakla birlikte yaklaşık 170 MPa olarak hesaplanmıştır.

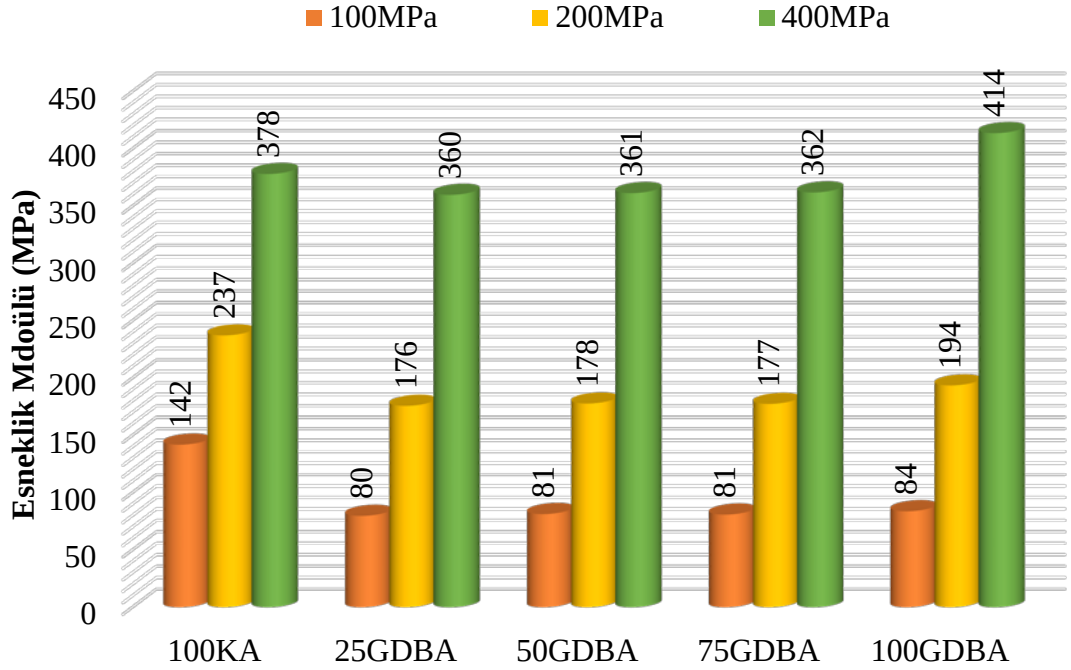


Şekil 4.17. AASTHO, MEPDG ve Uzan modeli esneklik modülü değerleri

GDBA tanelerinin, doğal agregalara kıyasla daha köşeli olduğu bilinmektedir (Edil 2012). Bu durum, GDBA içerikli karışım matrisinde daha düşük tane yoğunluğuna yol açmıştır. Bu durumun, GDBA'nın KA'dan daha yüksek esneklik modülü değerlerine sahip olmasının nedeni olabileceği düşünülmektedir. Taneli malzemelerin rijitliğinin tanelerin açısallığı ile artma eğiliminde olduğunu gösteren çalışmalar elde edilen sonuçlarla tutarlı olmaktadır (Stolle ve ark. 2009). Ayrıca, GDBA yüzeyinde mevcut harç fazına bağlı olarak artan agrega pürüzlülüğü GDBA içeren karışımların esneklik modülü değerlerinde artışa neden olmaktadır (Kuo ve ark. 2002). Bunlara ilaveten, daha önceki çalışmalar granüler malzemelerin esneklik modülü değerinin belirlenmesinde en önemli parametrelerden birinin yassılık endeksi olduğunu göstermiştir. Yassılık endeksi değerinin ise %10'nun altında tutulması gerektiği bildirilmiştir (Nataatmajda ve Tan 2001). 100KA karışımının 100GDBA karışımına kıyasla daha düşük performansının içerdiği yassı tanelerden de kaynaklandığı düşünülmektedir.

%100 GDBA ve %100 KA içeren karışımların, GDBA-KA karışımlarından daha yüksek esneklik modülüne sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.17). Sonuçlar, KA matrisine GDBA'ların dahil edilmesinin KA karışımlarının rijitliğini iyileştirmede göstermektedir. KA ve GDBA'nın birlikte kullanılması, aynı gradasyona sahip olmalarına rağmen, KA ve GDBA tanelerinin farklı şekil ve yüzey özellikleri nedeniyle ölçülen esneklik modülü değerlerinde bir azalmaya neden olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar, Tutumluer ve Pan (2008) ve Kazmee ve diğerleri (2012) tarafından da bildirilmiştir. Yazarlar, bu davranışı tanelerin zayıf paketlenmesine ve iki farklı malzemenin karıştırılmasından kaynaklanan gradasyon parametrelerindeki değişikliklerle ilişkilendirmişlerdir. Bunlara ilaveten, Edil (2012) granüler malzemelerin esneklik modülünün su emme değerinin artışıyla düşebileceğini öne sürmüştür. Mevcut çalışmada, GDBA malzemelerinin su emme değeri, KA'ya kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğu Çizelge 4.1'den anlaşılmıştır. GDBA'ların KA matrisine dahil edilmesi, GDBA-KA karışımlarının su muhtevası değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu durumun esneklik modülü değerlerinde azalmaya neden olduğu düşünülmektedir.

Tez çalışması kapsamında artan toplam gerilme değerlerine karşı esneklik modülü değerinin değişimini belirlemek amacıyla 100, 200 ve 400 olmak üzere 3 farklı toplam gerilme değeri seçilerek AASTHO modele göre esneklik modülü değerleri hesaplanmıştır. AASTHO modeline göre belirlenen esneklik modülü değerlerinin toplam gerilme değerinin artışına bağlı olarak değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir. Beklenildiği gibi, gerilme değeri artışıyla esneklik modülü değerleri artmaktadır. Arulrajah ve arkadaşları (2013), bu durumun granüler malzemelerin pekleşme göstermelerinden kaynaklandığını bildirmiştir. Artan toplam gerilme değerleriyle birlikte özellikle GDBA taneleri arasındaki hava boşluğu miktarı azalmakta ve GDBA’nın pürüzlü yüzeyinin de etkisiyle daha iyi bir sürtünme meydana gelmektedir. Böylece, karışımların esneklik modülü değerleri artan toplam gerilme değerleri ile birlikte artış göstermiştir.



Şekil 4.18. Farklı toplam gerilme değerleri için AASTHO modeline göre hesaplanan esneklik modülü değerleri

Mevcut çalışmalar incelendiğinde; Arm (2003) tarafından gerçekleştirilen tekrarlı yük üç eksenli deney sonuçları, GDBA'nın başlangıçta doğal agrega ile benzer esneklik modülü değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, zamanla, hem laboratuvar hem

de saha çalışmaları sonuçları, GDBA içeren karışımlarda temel ve alttemel tabakalarının esneklik modülü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, esneklik modülünde ki artışın, GDBA'nın içerdiği hidrate olmamış çimento tanelerinin hidratasyonundan kaynaklanabildiğini bildirmiştir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da beyan edilmiştir (Lancieri ve ark. 2006, Soleimanbeigi ve ark. 2015). Rahman ve diğerleri (2014), iki ve üç eksenli geogridlerle güçlendirilmiş GDBA karışımlarının esneklik modülünü ve kalıcı deformasyon özelliklerini araştırmıştır. Geogrid takviyeli GDBA'nın esneklik modülünün, takviyesiz malzemeye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Esneklik modülü değerleri, takviye edilmemiş GDBA ile karşılaştırıldığında, GDBA + iki eksenli numunede %24 ve GDBA + üç eksenli numunede %34 arttığı bildirilmiştir. Gabr ve ark. (2012) bir dizi dinamik üç eksenli deney yaparak GDBA'nın esneklik modülünü belirlemiştir. Numuneler Modifiye Proktor sıkılığında %60, %80 ve %90 su içeriğinde hazırlanmıştır. GDBA'nın esneklik modülü 340 ile 715 MPa, KA'nın ise 270 ile 450 MPa arasında değiştiği bildirilmiştir. Esneklik modülü değerlerinin hem nem içeriğine hem de uygulanan gerilmeye bağlı olduğu yazarlar tarafından vurgulanmıştır. Ancak, araştırmacılar, nem içeriğinin KA üzerindeki etkisi öneminin geri dönüştürülmüş malzemelere göre daha az olduğunu ifade etmiştir. Bu görüşü destekleyen başka bir çalışma ise Jayakody ve diğerleri (2019) tarafından gerçekleştirilmiştir. %68 optimum su içeriğinde hazırlanan karışıma ilaveten %60, %75 ve %80 nem içeriğine sahip karışımlar hazırlanmıştır. Numuneler kapalı kaplarda 4 gün süreyle bekletilmiştir. Dinamik üç eksenli test sonuçlarına göre, su içeriği arttıkça karışımların esneklik modülü değerinin azaldığı ve kalıcı deformasyon değerinin ise arttığı bildirilmiştir. En iyi performansın, en düşük su içeriğinde hazırlanan karışımda gözlemlendiği vurgulanmıştır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) temel ve alttemel katmanlarında granüler malzeme olarak kullanılabilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kırma kireçtaşı agregası (KA), GDBA ile ikame edilerek 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların dayanım, dayanıklılık ve hidrolik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada, kullanılan malzemeler ve uygulanan metotlar sonucu aşağıda sıralanan bulgular elde edilmiştir;

- GDBA içeren karışımların bazı durumlarda KA'lı karışımlara kıyasla üstün performans sergilemesine rağmen bu malzemenin kullanımı ile ilgili birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde malzeme özelliklerine dayalı herhangi bir Standardın olmadığı anlaşılmıştır. Bu doğrultuda, GDBA kullanımı ile ilgili geleneksel test yöntemlerine dayalı şartnameleri kullanmak yerine yeni standartların hazırlanmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.
- Mikro-yapı analizi sonucu GDBA'nın KA'ya kıyasla daha gözenekli ve pürüzlü bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır.
- İri agregalardan oluşan 100KA karışımının özgül ağırlık değeri 2,68 olarak belirlenmiştir. GDBA ikamesi ile karışımın özgül ağırlık değerinin azaldığı tespit edilmiştir. %100 GDBA içeren 100GDBA karışımının özgül ağırlık değeri 2,42 olarak ölçülmüştür. Benzer durumun ince agregalar için de geçerli olduğu sonuçlardan anlaşılmıştır. 100KA karışımının özgül ağırlık değeri 2,62 olarak belirlenirken bu değer, 100GDBA karışımı için 2,32 olarak ölçülmüştür. Bu durumun, GDBA tanelerinin, çimento harcı fazı içerdiğinden dolayı KA kıyasla daha boşluklu ve heterojen bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- GDBA'nın su emme oranının KA kıyasla yaklaşık 13 kat daha fazla olarak belirlenmiştir. GDBA yüzeyine yapışan çimento harcı, gözenekli yapısı nedeniyle agrega tanelerinin su emme oranını arttırmıştır. GDBA tane çapının azalması ile

yüzeyindeki harç miktarı artmaktadır. Bu nedenle ince GDBA içeren karışımların su emme kapasitesi iri agregaya göre çok daha yüksek olarak belirlenmiştir. İri agregaların su emme oranı değerleri %0,5-6,54, ince agregaların ise %2,13-10,49 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, iri agregaların 48 saatlik su emme oranı değerlerinin 24 saatlik değerlere kıyasla ciddi mertebede değişmediği anlaşılmıştır. Benzer durumun ince GDBA için geçerli olmadığı gözlemlenmiştir. İnce GDBA tanelerinin su emme oranının belirlenmesinde agreganın tamamen suya doygun hale gelebilmesi için suda bekletilme süresinin en az 48 saat olması gerektiği anlaşılmıştır.

- Los Angeles (LA) aşınma direnci, A-Sınıfı (19-37,5 mm) karışımlar için %24,4-36,7 ve B-Sınıfı karışımlar (9,5-19 mm) için %25,7-38,7 olarak belirlenmiştir. Karışımların LA aşınma direnci GDBA ikame oranına bağlı olarak azalmıştır. Bu olayın GDBA'da zayıf bölge olan çimento hamuru-agrega ara yüzeyi fazından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, GDBA agregası üretimi sırasında tanelerin içyapısında meydana gelen çatlaklar da LA aşınma direnci değerinin azalmasına neden olmaktadır. Karışımların temel tabakasında kullanılabilirliği incelendiğinde 100GDBA ve 75GDBA karışımlarının şartnamede belirtilen <%35 değerini sağlamadığı, ancak tüm karışımların alttemel tabakası için gerekli olan <%45'lik LA aşınma direnci şartını sağladığı ve alttemel tabakalarında kullanılmak için elverişli olduğu anlaşılmıştır.
- GDBA'nın KA ile ikamesiyle karışımların agrega darbe değerinin %28,9 ile %34,9 arasında değiştiği anlaşılmıştır. Karışımlarda GDBA miktarının artışıyla darbe direnci değerleri azalmıştır. Bu etkinin GDBA yüzeyindeki zayıf harç parçalarının varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Karışımında GDBA miktarının artmasıyla yassılık endeksi değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. KA'nın yerine %100 GDBA kullanımıyla karışımın yassılık endeksi değerinin %20 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun, kırma işlemi sırasında KA'nın GDBA'ya göre daha az işleme tabi tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Agregatane boyutundan bağımsız olarak 100GDBA ve 100KA karışımlarının magnezyum sülfat direnci açısından sırasıyla, en düşük ve en iyi performansı

sergilediği anlaşılmıştır. KA'nın %100 GDBA ile ikame edilmesi sonucu 19-37,5 mm ve 9,5-19 mm tane çapı durumları için karışımların magnezyum sülfat direncinin sırasıyla, %62 ve %50 azaldığı tespit edilmiştir. Bu olayın GDBA'nın daha yüksek geçirgenliğe sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. GDBA içeren karışımların %3-7 arasında değişen magnezyum sülfat direnci değerinin KTŞ'de belirtilen limit değerlerin çok altında olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, sülfat saldırısına maruz kalabilecek bölgelerde temel ve alttemel tabakalarında GDBA'nın kullanılmasında herhangi bir sakınca olmayacağı düşünülmektedir.

- Sıkıştırma enerjisinden bağımsız olarak GDBA içeriği arttıkça karışımların optimum su muhtevası (w_{opt}) değeri artarken maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri (γ_{kmaks}) azalmıştır. Bu davranışın KA'ya kıyasla GDBA'nın özgül ağırlık ve su emme değerlerinin sırasıyla daha düşük ve daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Modifiye Proktor deneyine tabi tutulan agrega karışımlarının Standart Proktor deneyine kıyasla maksimum kuru birim hacim değerlerinin daha düşük ve optimum su muhtevası değerlerinin ise daha yüksek ölçüldüğü anlaşılmıştır. Bu olay, Modifiye Proktor deneyinde karışımı sıkıştırmak için uygulanan enerjinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, karışımdaki GDBA içeriğinin artmasıyla karışımın kompaksiyon eğrisi daha basık bir şekil almıştır. Bu durum, GDBA tanelerinin daha yüksek su emme oranına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- GDBA'nın KA ile ikamesiyle karışımların CBR değerinde azalmalar tespit edilmiştir. Ancak, oluşan bu CBR değerindeki farkın GDBA kullanım oranının artışıyla azaldığı anlaşılmıştır. GDBA ve KA tanelerinin mukavemet ve yüzey özelliklerinin CBR değeri üzerinde iki farklı etkisi söz konusu olmuştur. Bir taraftan, KA, GDBA'ya kıyasla daha yüksek mukavemete sahip olduğundan KA oranı yüksek olan karışımlarda penetrasyon değerinin daha düşük olması beklenmektedir. Diğer taraftan, daha pürüzlü ve köşeli GDBA tanelerinde agregalar arasındaki kenetlenme daha güçlü olacağından penetrasyon değerinin düşük olması öngörülmektedir. GDBA'nın daha düşük mukavemete sahip olmasına rağmen, karışımdaki miktarının artışıyla CBR

değerlerinin artması GDBA içeren karışımlarda ikinci parametrenin daha baskın olduğu anlamına gelmektedir.

- Boşluklu bir yapıya sahip olan GDBA taneleri suya doygun bir şekilde deneye tabi tutulduğunda boşlukların suyla dolu olması sebebiyle CBR deneyinde yüklemeye karşı bir hidrostatik basınç söz konusu olmuştur. Bu sebeple ıslak durumda 100GDBA ve 75GDBA karışımlarının yüksek GDBA içeriğinden dolayı daha üstün performans gösterdiği bariz bir şekilde anlaşılmıştır. Ayrıca, sonuçlar, 4 günlük suda bekletme süresinin, GDBA içeriği yüksek olan karışımların CBR değeri üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ancak 100KA ve 25GDBA karışımlarında suyun varlığı taneler arası sürtünmeyi engellemiş ve CBR değerinde azalmaya neden olmuştur.
- 100KA karışımının donma-çözülme çevrim sayısının artışıyla CBR değerleri %5-22 arasında azalmıştır. Ancak, GDBA kullanımı ile karışımların donma-çözülme karşı direncinde artış gözlemlenmiştir. 100GDBA karışımında 20 donma-çözülme çevrimi sonrası karışımların CBR değerinde %20'lik bir artış ölçülmüştür. GDBA taneleri boşluklu bir yapıya sahip olduğundan donma esnasında suyun kaçması için ekstra bir hacim oluşturarak donma-çözünme direnci değerlerinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca, CBR değerlerinde meydana gelen artışın su ve hidrate olmamış çimento tanelerinin reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen sertleşmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Hazırlanan karışımların permeabilite katsayısı 10^{-5} m/s mertebesinde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek permeabilite katsayısı $2,042 \times 10^{-5}$ m/s olarak 100GDBA karışımında ölçülmüştür. Bu değer %100 KA içeren karışımlara kıyasla yaklaşık 2 kat daha fazla olmuştur. GDBA ikamesiyle ve ikame oranının artışıyla karışımların permeabilite katsayısı değerlerinin arttığı sonuçlardan anlaşılmıştır. GDBA taneleri birbirlerine bağlı büyük boşluklar içerdiğinden geçirgen bir yapıya sahip olmaktadır. Bu sebeple GDBA içeren karışımların geçirgenlik katsayısı KA içeren karışımlara kıyasla daha yüksek bir değer olarak ölçülmüştür.

- Yürütülen tez çalışması kapsamında, esneklik modülü değerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan AASHTO, Mekanistik-Ampirik Kaplama Dizayn Yöntemi (MEPDG) ve Uzan modelleri kullanılmıştır. AASTHO modeli, numuneye uygulanan yanal ve düşey gerilmeleri toplam gerilme olarak tek bir parametrede değerlendirdiği için bu modelde elde edilen R^2 değerleri MEPDG ve Uzan modeline göre çok daha düşük olarak belirlenmiştir. 100GDBA karışımının esneklik modülü değeri 100KA karışımına kıyasla daha yüksek ölçülmüştür. Bu durumun agregaların şekilsel ve yüzey dokusu özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, KA ve GDBA'nın birlikte kullanıldığı karışımlarda ise tanelerin farklı şekilsel özellikleri nedeniyle tam bir kenetlenme gerçekleşmemiş ve esneklik modülü değerleri 100GDBA karışımına göre azalmıştır.
- Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre GDBA kullanımı ile karışımların geçirgenlik özellikleri hariç diğer özelliklerinin ciddi mertebede olumsuz etkilenmediği hatta yassılık endeksi, ıslak CBR, donma-çözülme çevrimi sonrası CBR dayanımı ve esneklik modülü açısından daha üstün performans sergilediği anlaşılmıştır. Ayrıca, GDBA'nın granüler yol temel ve alttemel tabakalarında kullanılmak üzere Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen limit değerlerinin sağlandığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

AASHTO. 2003. "AASHTO: T307-99 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials." *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA* 99.

AASHTO T 307-99, 2012. "Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. " *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA* 99

ABRELPE (Brazilian Association of Public Cleaning and Waste Companies). 2015. *Panorama of Solid Waste in Brazil. Brazilian Association of Public Cleaning and Waste Companies Press, Santo Paulo (in Portuguese).*

Abdulla, N. A. 2015. Effect of recycled coarse aggregate type on concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10), 04014273.

Acar, A. 2013. "*Kentsel Dönüşüm ve Çevre*", İzolasyon Dünyası, İstanbul. 99, 14-16.

Aghililoft, M., Palassi, M., & Ramezaniapour, A. M. 2019. Mechanical and durability assessment of unconfined recycled concrete aggregates and natural aggregates used in road constructions. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-13.

Agrela, F., González-Gallardo, F., Rosales, J., Tavira, J., Ayuso, J., & Cabrera, M. 2020. Complete Real-Scale Application of Recycled Aggregates in a Port Loading Platform in Huelva, Spain. *Materials*, 13(11), 2651.

Ağar, E. ve Umar, F. 1985. Yol üstyapısı. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.

Albayati, A., Wang, Y., Wang, Y., & Haynes, J. 2018. A sustainable pavement concrete using warm mix asphalt and hydrated lime treated recycled concrete aggregates. *Sustainable Materials and Technologies*, 18, e00081.

Andrews, B., Sharp, K., & Robinson, P. 2009. *Report on Construction and Demolition Waste Recycled Materials Workshop*. Draft Report, Zero Waste, South Australia, Australia.

Ashtiani, S. R. and Saeed A. 2012. *Laboratory Performance Characterization of Pavements Incorporating Recycled materials*, American Society of Civil Engineers (ASCE) Geo-Congress- 2012 proceeding, Vol.3 Auckland, CA, pp. 1582-1591.

Ardalan, N., Wilson, D., & Larkin, T. 2017. *Laboratory Performance of Recycled Concrete Aggregate as Base-course Material*. In Australasian Transport Research Forum (ATRF), 39th, 2017, Auckland, New Zealand.

Arabani, M., & Azarhoosh, A. R. 2012. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 35, 1-7.

Arm, M. 2001. Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. *Waste Management*, 21(3), 235-239.

Arioğlu, E. 2003. *General outlook to aggregate sector: evaluation-proposals*. 3rd International Aggregate Symposium & Exhibition, İstanbul, 3-4 December.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M. M. Y., & Bo, M. W. 2012. Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Geotechnical Testing Journal*, 35(5), 743-751.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M., & Bo, M. W. 2013. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1077-1088.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., & Disfani, M. M. 2014. Reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate blends in pavement subbases: laboratory and field evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 349-357.

ASTM. 1994. "D2434- Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)." *Astm D2434* 4.

ASTM. 2012. "ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-Lbf/Ft³ (600 KN-m/M³))." *ASTM International* 3.

ASTM C 128. 2003. "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate." *Annual Book of ASTM Standards* 88(October 2001).

ASTM C127. 2004. *Annual Book of ASTM Standards Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.

ASTM C88/C88M – 18. 2018. "Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate." *American Society for Testing and Materials* 04.

ASTM D1557-12. 2012. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 Ft-Lbf/Ft³(2,700 KN-m/M³))." *ASTM International*.

ASTM D1883-16. 2016. "Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils." *Astm International* 04.08.

ASTM 131-C131M. 2006. "Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. " *Astm International*.

ASTM D1883-16. 2016. “Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils.” ASTM International.

Atık Depolama Sınıflandırması ve Atık Tanımları Yönetmeliği. (2009). Aralık 2009 tarih ve 25406 sayılı Resmi Gazetede yayınlanmıştır.

Australian Road Research Board (ARRB). 2009. Recycled aggregates bring carbon reduction benefits. *Construction and Building Materials*, 25(1), 123-130.

Aurstad, J., Aksnes, J., Dahlhaug, J. E., Berntsen, G., & Uthus, N. 2005. *Unbound crushed concrete in high volume roads: A field and laboratory study.* In Proceedings of the international conferences on the bearing capacity of roads, railways and airfields.

Ayan, V., Khavandi, A., Omer, J. R., & Limbachiya, M. C. 2015. Toughness performance of recycled aggregates for use in road pavement. *Transportation research record*, 19(1), 40-47.

Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J. R., & Poon, C. S. 2012. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, 28(1), 129-138.

Bassani, M., & Tefa, L. 2018. Compaction and freeze-thaw degradation assessment of recycled aggregates from unseparated construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 160, 180-195.

Blankenagel, B. J., & Guthrie, W. S. 2006. Laboratory characterization of recycled concrete for use as pavement base material. *Transportation research record*, 1952(1), 21-27.

Bestgen, J. O., Hatipoglu, M., Cetin, B., & Aydilek, A. H. 2016. Mechanical and environmental suitability of recycled concrete aggregate as a highway base material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9), 04016067.

Bennert, T., & Maher, A. 2005. The development of a performance specification for granular base and subbase material (No. FHWA-NJ-2005-003). New Jersey. *Dept. of Transportation*, 4(5) 49-65.

Bergsdal, H., Bohne, R. A., & Brattebø, H. 2007. Projection of construction and demolition waste in Norway. *Journal of Industrial Ecology*, 11(3), 27-39.

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2017. *Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2014-2017.* İstanbul: Pres.

BMVBS, W. B., & Stölzle, W. 2008. Verkehrspolitische Handlungsfelder für eine effiziente Logistik. *Zeitschrift für Verkehrswissenschaft*, 79(1), 1-34.

British Standard Institutions. 1998. “Testing Aggregates-Part 105: Methods for Determination of Particle Shape-Section 105.2 Elongation Index of Coarse Aggregate.” Bs 812 - 105.2 (105.2).

British Standards Institution (BSI) 812. 1990. *Testing Aggregates-Part 112: Methods for Determination of Aggregate Impact Value (AIV).*

B.C.S.J. 2000. “Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete.” *Building Contractors Society of Japan, Committee on Disposal and Reuse of Conc. Const. Waste, Summary in Conc J, Japan*, 16(7), 18-31.

Cardoso, R., Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. 2016. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste management*, 49, 131-145.

Clark, C., Jambeck, J., & Townsend, T. 2006. A review of construction and demolition debris regulations in the United States. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(2), 141-186.

Cedergren, H.R. 1994. “America’s Pavements: World’s Longest Bahtubs,” *Civil Engineering. American Society of Civil Engineering*, pp. 56-58.

Cerni, G., & Colagrande, S. 2012. Resilient modulus of recycled aggregates obtained by means of dynamic tests in a triaxial apparatus. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 475-484.

Chapuis, R. P. 2012. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 71(3), 401-434.

Chidioglou, I., Goodwin, A. K., Laycock, E., & O’Flaherty, F. 2007. Physical Properties of Demolition Waste Material. *Transportation research record*, 52(1), 120-130.

Chini, A. R., Kuo, S. S., Armaghani, J. M., & Duxbury, J. P. 2001. Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. *Journal of Transportation Engineering*, 127(6), 486-492.

Cruz, O. G. D., Mendoza, C. A., & Lopez, K. D. 2021. International Roughness Index as Road Performance Indicator: A Literature Review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 822, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. 2016. *Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı 2023.* İstanbul: Pres.

Del Rey, I., Ayuso, J., Galvín, A. P., Jiménez, J. R., & Barbudo, A. 2016. Feasibility of using unbound mixed recycled aggregates from CDW over expansive clay subgrade in unpaved rural roads. *Materials*, 9(11), 931.

De Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A. 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*, 23(2), 872-877.

Demir, İ. 2009. İnşaat yıkıntı atıklarının beton üretiminde kullanımı ve beton özelliklerine etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 105-114.

Deshpande, Y. S., & Hiller, J. E. 2012. Pore characterization of manufactured aggregates: recycled concrete aggregates and lightweight aggregates. *Materials and structures*, 45(1), 67-79.

Dilbas, H. & Cakır, O. 2018. Enhancement of Recycled Aggregate Concrete Properties With Mechanical Grinding Method. *Turkish Ready Mixed Concrete Association*, 80-86.

Đokić, O., Radević, A., Zakić, D., & Đokić, B. 2020. Potential of Natural and Recycled Concrete Aggregate Mixtures for Use in Pavement Structures. *Minerals*, 10(9), 744.

Edil, T. 2012. *Recycled unbound materials, Final Report*, Minnesota Department of Transportation, Minnesota.

Estes, B. & Fensome, G. 2014. Crushing for particle shape. *Aggregates Manage Magazine*, 19 (11).

Eurostat. 2019. Waste Statistics. Eurostat, Luxembourg. Retrieved from: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics.

EPA, 2015. United States Environmental Protection Agency, Global Greenhouse Gas Emissions by Economic Sector, [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.

EPA, 2020. Sustainable Management of Construction and Demolition Materials. Retrieved from :<https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials#America>, erişim tarihi: Mayıs 2020.

European Union. 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. *Official Journal of the European Union*, 22/11/2008.

Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.

FHWA. 2014. *Advancing, a Sustainable Highway System: Highlights of FHWA Sustainability Activities*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Natural Environment Sustainable Transport and Climate Change Team Washington, DC.

Gabr, A. R., & Cameron, D. A. 2012. Properties of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 754-764.

Gabr, A. R., Mills, K. G., & Cameron, D. A. 2013. Repeated load triaxial testing of recycled concrete aggregate for pavement base construction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(1), 119-132.

Gambhir, M. L. 2004. *Concrete Technology. 3rd. Edition, Tata McGraw Hill Companies. BS*

Galli, A., Wackernagel, M., Iha, K., & Lazarus, E. 2014. Ecological footprint: Implications for biodiversity. *Biological Conservation*, 173, 121-132.

Garach, L., de Oña, J., López, G., & Baena, L. 2016. Development of safety performance functions for Spanish two-lane rural highways on flat terrain. *Accident Analysis & Prevention*, 95, 250-265.

Gao, M. A. 2006. *Construction & Demolition Waste Management: From Japan to Hong Kong. Griffin's View on International and Comparative Law*, <https://ssrn.com/abstract=1131984>

Gao, Q. S., Lei, Q. C., & He, H. 2012. The reason and countermeasure of the slow development of construction waste recycling industry in China. *Ecol. Econ*, 12, 128-135.

Gao, M. Z. A. 2018. Construction & demolition waste management: from Japan to Hong Kong. *Griffin's View on International and Comparative Law*, 21(3), 140-150.

Giwangkara, G. G., Mohamed, A., Khalid, N. H. A., Nor, H. M., Hainin, M. R., Jaya, R. P., ... & Aziz, M. M. A. 2019. Recycled concrete aggregate as a road base material. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 527, No. 1, p. 012061). IOP Publishing.

Gluchowski, A., Sas, W., Dzięcioł, J., Soból, E., & Szymański, A. 2019. Permeability and leaching properties of recycled concrete aggregate as an emerging material in civil engineering. *Applied Sciences*, 9(1), 81.

Gruzen Samton LLP. 2003. *Demolition Waste Manual. New York, (May).* <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.91130.2008>.

Guedes, M., Evangelista, L., De Brito, J., & Ferro, A. C. 2013. Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates. *Microscopy and Microanalysis*, 19(5), 1222-1230.

Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T. C., ... & Wang, Y. 2018. Durability of recycled aggregate concrete—a review. *Cement and concrete composites*, 89, 251-259.

Hafriyat Toprağı ve İnşaat / Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği. 2004. 18 Mart 2004 tarih ve 25406 sayılı Resmi Gazetede yayınlanmıştır.

Hafez, M. A., Asmani, M. D., & Nurbaya, S. 2010. Comparison between static and dynamic laboratory compaction methods. *EJGE*, 15, 1641-1650.

Hossain, M. S., Parker, F., & Kandhal, P. S. 2000. Comparison and evaluation of tests for coarse aggregate particle shape, angularity, and surface texture. *Journal of testing and Evaluation*, 28(2), 77-87.

HQ AFCEE, Construction and Demolition Waste Management Guide. 2004. *Pocket Guide*, www.afcee.brooks.af.mil/green/resources/resources.asp, United States of America, 25(1), 44-52

Huang, Y. H. 1993. *Pavement Design and Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall.

Huang, Y. 2004. *Pavement analysis and design*, Prentice-Hall Yayınları, New Jersey Englewood Cliffs.

Huang, B., Wang, X., Kua, H., Geng, Y., Bleischwitz, R., & Ren, J. 2018. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 36-44.

<https://pavementinteractive.org/> (erişim tarihi 20 Mayıs 2021)

<https://en.wikipedia.org/wiki/ACPA> (erişim tarihi 17 Eylül 2019)

İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., & Eren, K. 2001. *Asfalt ve uygulamaları*, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, İsfalt, İstanbul: Seçil Ofset.

Jayakody Arachchige, S. P., Gallage, C., & Kumar, A. 2014. Assessment of recycled concrete aggregates as a pavement material. *Geomechanics and Engineering*, 6(3), 235-248.

Jayakody, S., Gallage, C., & Ramanujam, J. 2019. Performance characteristics of recycled concrete aggregate as an unbound pavement material. *Heliyon*, 5(9), e02494.

Jiménez, J. R., Agrela, F., Ayuso, J., & López, M. 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.

Jimenez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., & Galvín, A. P. 2012. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 88-97.

Jin, Y.F. & Zhao, J. 2008. The influence of construction waste on the environment and the Countermeasures. *Henan Science and Technology*, 11, 36-37.

Jin, R., & Chen, Q. 2019. Overview of concrete recycling legislation and practice in the United States. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(4), 05019004.

JRC. 2011. Supporting Environmentally Sound Decisions for Construction and Demolition (C&D) Waste Management. A Practical Guide to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA). European Commission Joint Research Centre e Institute for Environment and Sustainability. EUR 24918 EN e 2011. <http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/assessment/publications#w> (erişim tarihi: 10.2020).

Kalooop, M. R., Gabr, A. R., El-Badawy, S. M., Arisha, A., Shwally, S., & Hu, J. W. 2019. Predicting resilient modulus of recycled concrete and clay masonry blends for pavement applications using soft computing techniques. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(6), 1379-1392.

Karayolu Teknik şartnamesi. 2013. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Ankara.*

Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, 2008. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.*

KAYA, Z., Cetin, A., Cetin, B., & Aydılek, A. 2013. Effects of Compaction Method and Aggregate Properties on Mechanical Behavior of Granular Base Layer. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(1), 100-120.

Kazmee, H., Tutumluer, E., & Mishra, D. 2012, January. Effects of material blending on strength, modulus and deformation characteristics of recycled concrete aggregates. *In Transportation Research Board Meeting*, 2(2), 95-112.

Kenyon SC. 2001. *Market development study for recycled aggregate products. Waste Reduction Advisory Committee, Thurber Engineering Ltd.*

Kikuchi, T., & Kuroda, Y. 2011. Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(1), 115-124.

Kim, S. H. 2004. *Determination of aggregate physical properties and its effect on cross-anisotropic behavior of unbound aggregate materials. Texas A&M University.*

Kim, S. H., Little, D. N., Masad, E., & Lytton, R. L. 2005. Estimation of level of anisotropy in unbound granular layers considering aggregate physical properties. *The International Journal of Pavement Engineering*, 6(4), 217-227.

Korre, A., & Durucan, S. 2009. "Life cycle assessment of aggregates, EVA025–Final report: Aggregates industry life cycle assessment model: Modelling tools and case studies." *Waste and Resources Action Programme, Oxon.*

Kuo, S. S., Mahgoub, H. S., & Nazef, A. 2002. Investigation of recycled concrete made with limestone aggregate for a base course in flexible pavement. *Transportation research record*, 1787(1), 99-108.

Kobayashi, S. & Kawano, H. 1999. "Properties and Usage of Recycled Aggregate Concrete." *Proc. of Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry-2*, Japan, 547-556.

Lancieri, F., Marradi, A., & Mannucci, S. 2006. C&D waste for road construction: long time performance of roads constructed using recycled aggregate for unbound pavement layers. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 92.

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall -LAGA- 1997, 2003. *Anforderungen an die Stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen /Abfällen. Technische Regeln, Stand November 2003.*

Lennon, M. 2005. *Recycling construction and demolition wastes: a guide for architects and contractors (pp. 1-38).* Boston, MA, USA: Commonwealth of Massachusetts, Department of Environmental Protection.

Lin, D., Hanscom, L., Murthy, A., Galli, A., Evans, M., Neill, E., ... & Wackernagel, M. 2018. Ecological footprint accounting for countries: updates and results of the National Footprint Accounts, 2012–2018. *Resources*, 7(3), 58.

Lu, W. 2014. "Estimating the amount of building-related construction and demolition waste in China." *In Proceedings of the 18th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate* (pp. 539-548). Springer, Berlin, Heidelberg.

Lukman, M., Halim, H., & Saing, Z. 2020. The flatness levels of flexible road based on roadroid software in Perintis Kemerdekaan Street Makassar. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 419, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.

Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., & Ramyar, K. 2016. Freeze-thaw resistance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates. *12th International Congress on Advances in Civil Engineering. Istanbul, Turkey*

Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., & Ramyar, K. 2015. Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates. *Materials and Structures*, 48(8), 2629-2640.

Mcdonald, B., & Smithers, M. 1998. Implementing a waste management plan during the construction phase of a project: a case study. *Construction Management & Economics*, 16(1), 71-78.

Monier, V., Hestin, M., Trarieux, M., Mimid, S., Domröse, L., Van Acoleyen, M., Hjerp, P. & Mudgal, S. 2011. *Study on the Management of Construction and Demolition Waste in the EU. Contract 07.0307/2009/540863/SER/G2, Final report for the European Commission (DG Environment).*

Nataatmadja, A., & Tan, Y. L. 2001. Resilient response of recycled concrete road aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 127(5), 450-453.

National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. 2015. *China Statistical Yearbook*. China Statistics Press, Beijing.

Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., & Hisada, M. 2004. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and concrete research*, 34(6), 965-971.

Nayana, A. Y., & Kavitha, S. 2017. Evaluation of CO₂ emissions for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment. *International Journal of Civil Engineering Technology*, 8, 703-708.

Nedeljković, M. 2019. Carbonation mechanism of alkali-activated fly ash and slag materials: In view of long-term performance predictions. *Cement and concrete research*, 32(6), 65-74.

Oikonomou, N. D. 2005. Recycled concrete aggregates. *Cement and concrete composites*, 27(2), 315-318.

Ok, B., & Demir, A. O. 2018. Yapım Yıkım Atıklarının Yol Temellerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 224-236.

Ozturk, C. A., Nasuf, E., Fisne, A. & Erkan, M. 2003. "Aggregate Organization and Functions in Turkey and the world." *3rd International Aggregate Symposium & Exhibition*, İstanbul, 3-4 December.

Ozsoy, C. E., 2015. Low-carbon economy and carbon footprint of Turkey. *HAK -İŞ International Journal of Labor and Society*, 4(4), 198-215.

Park, T. 2003. Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 129(5), 558-563.

Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. 2017. *Pavement design and materials*. London, John Wiley & Sons.

Paz, D. H., & Lafayette, K. P. 2016. Forecasting of construction and demolition waste in Brazil. *Waste Management & Research*, 34(8), 708-716.

Pihl, K. A., Milvang-Jensen, O., & Berg, F. 2003. Crushed Concrete From Building Demolition Is A High Quality Material For Road Construction. *Waste Management & Research*, 4(7), 71-85.

- Poon, C. S., & Chan, D. 2006.** Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and building materials*, 20(8), 578-585.
- Poon, C.-S.; Qiao, X. & Chan, D. 2006.** The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Management*. 26, 1166–1172.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. 2004.** Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468.
- Rahman, I. A., Hamdam, H., & Zaidi, A. M. A. 2009.** Assessment of recycled aggregate concrete. *Modern Applied Science*, 3(10), 47-54.
- Rahman, M. A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., & Imteaz, M. A. 2014.** Resilient modulus and permanent deformation responses of geogrid-reinforced construction and demolition materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(3), 512-519.
- Rahman, M. 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.
- Rakshvir, M., & Barai, S. V. 2006.** Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research*, 24(3), 225-233.
- Rao, A. 2005.** *Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete*. Civil Engineering, Department of Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.
- Rodrigues, F., Evangelista, L., & Brito, J. D. 2013.** A new method to determine the density and water absorption of fine recycled aggregates. *Materials Research*, 16, 1045-1051.
- Rosado, L. P., Vitale, P., Penteado, C. S. G., & Arena, U. 2017.** Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. *Journal of cleaner production*, 151, 634-642.
- Rosa, M. G., Cetin, B., Edil, T. B., & Benson, C. H. 2017.** Freeze–thaw performance of fly ash–stabilized materials and recycled pavement materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 04017015.
- Saeed, A., & Hammons, M. I. 2008.** *Use of recycled concrete as unbound base aggregate in airfield and highway pavements to enhance sustainability*. In *Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future* (pp. 497-508).

Sağlık, A. & Güngör, A.G. 2008. *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, 147s. Ankara.

Sao Paulo (State). 2014. Solid Waste Plan of the State of Sao Paulo. Secretary of the Environment. *Modern Applied Science*, 3(10), 65-74

Schrager, M., Francioso, V., Kadakia, A., & Velay-Lizancos, M. 2018. High Performance Mortar with 100% Recycled Aggregate using Titanium Dioxide Nanoparticles. *Journal of Building Engineering*, 4, 36-40.

Serres, N., Braymand, S., & Feugeas, F. 2016. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 5, 24-33.

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

Slattery, K. 2014. *Global Developments in the Aggregate Industry*. Global Aggregates Information, Network.

Shehata, M. H., Christidis, C., Mikhael, W., Rogers, C., & Lachemi, M. 2010. Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 575-582.

Shi C.J., Li Y.K., Zhang J.K., Li W.G., Chong L.L. & Xie Z.B. 2016. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. *Journal of Cleaner Production*, 112 (1), 466–472.

Soból, E., Sas, W., Gluchowski, A., Gabryś, K., & Szymański, A. 2017. Application of recycled concrete aggregate in road engineering. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17(1.2), 55-62.

Soleimanbeigi, A., Shedivy, R. F., Tinjum, J. M., & Edil, T. B. 2015. Climatic effect on resilient modulus of recycled unbound aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 16(4), 836-853.

Sunke, N., & Schultmann, F. 2019. Requirements for sustainable construction materials and components. *Lifecycle Design of Buildings, Systems and Materials*, 24.

Schultmann, F., & Rentz, O. 2002. Scheduling of deconstruction projects under resource constraints. *Construction Management & Economics*, 20(5), 391-401.

Stolle, D., Guo, P., & Liu, Y. 2009. Resilient modulus properties of granular highway materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(4), 639-654.

Strand, D. L. 2007. *Designing for Quality Concrete Pavement Rehabilitation and Recycling on Wisconsin's Inter State Highways*. Proc. of Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, West Lafayette, USA.

Tam, V. W., & Le, K. N. 2007. Aggregate testing using 2nd-, 7th-and 10th-order interpolation polynomials. *Resources, conservation and recycling*, 52(1), 39-57.

Tam, V. W., & Tam, C. M. 2007. Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 21(4), 879-886.

Tam, V. W., Gao, X. F., Tam, C. M., & Chan, C. H. 2008. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and building materials*, 22(3), 364-369.

Tam, V. W., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. 2018. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272-292.

Tavira, J., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Sierra, M. J., & Ledesma, E. F. 2018. Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil. *Construction and Building Materials*, 164, 57-69.

Tayabji, S. D., Smith, K. D., Van Dam, T. J., & Tyson, S. S. 2010. Advanced high-performance materials for highway applications: A report on the state of technology. *Construction and Building Materials*, 12, 61-82.

The Cement Sustainability Initiative. 2009. Recycling Concrete, World Business Council for Sustainable Development, 42s. *Construction and Building Materials*, 144, 74-86.

The Western Australian Government. 2016. *Waste Authority Position Statement Construction and Demolition (C&D) Waste*. Australia.

Thomas, C., Setién, J., Polanco, J., Alaejos, P., & De Juan, M. S. 2013. Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054-1065.

Tmbbob Chamber of Environmental Engineers. 2018. *World environment day Turkey Report*. İstanbul, Tmbbob Pres.

Tosunoglu, B. T. 2014. Ekological footprint as an indicator of global sustainable welfare. *HAK -İŞ International Journal of Labor and Society*, 3(3), 132-149.

Toka, E. B., & Olgun, M. 2021. Performance of granular road base and sub-base layers containing recycled concrete aggregate in different ratios. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-14.

TS EN 933-3. 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tutumluer, E., & Pan, T. 2008. Aggregate morphology affecting strength and permanent deformation behavior of unbound aggregate materials. *Journal of materials in civil engineering*, 20(9), 617-627.

Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. 2014. Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983-991.

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

U.S. EPA, 2019a. Industrial, Construction and Demolition (C&D) Landfills, Electronic Code of Federal Regulations. https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID¼4b92eb3b1338742ce61c1f9a222450a2&mc¼true&node¼se40.27.258_12&rgn¼div8.

U.S. EPA, 2019b. Advancing Sustainable Materials Management. 2017 Fact Sheet United States Environmental Protection Agency Office of Land and Emergency Management (5306P) Washington, DC 20460/EPA530-F-19-007, pp. 1–22. https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-11/documents/2017_facts_and_figures_fact_sheet_final.pdf. (Erişim tarihi: 11. 2019).

Vegas, I., Ibañez, J. A., Lisbona, A., De Cortazar, A. S., & Frías, M. 2011. Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2674-2682.

VicRoads. 1998. Guide to general requirements for unbound pavement materials. *Technical Bulletin 39*, Melbourne, VIC, Australia.

VicRoads. 2009. “Crushed Concrete for Pavement Subbase and Light Duty Base,” Section 820, VicRoads Standards, Victoria, Australia, <http://webapps.vicroads.vic.gov.au/VRNE/csdspeci.nsf/webscdocs/F8A5CBF7F2DA525ACA257584001B5DA3?OpenDocument>. (Last erişim tarihi: 08. 2010).

Von Stein E.L. & Savage G.M. 1994. Current practices and applications in construction and demolition debris recycling. *Resource Recycling*, 85-93.

Vuono, C. E., Welch & L. D. 1988. *Standard Practice for Pavement Recycling*, Departments of the Army, and the Air Force, Washington, D.C.

Vuong, B., Jameson, G., Sharp, K. G., & Fielding, B. 2008. *Guide to pavement technology part 4A: Granular base and subbase materials* (No. AGPT04A/08).

Wang, R., Yu, N., & Li, Y. 2020. Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 242, 118164.

Weil, M., Jeske, U., & Schebek, L. 2006. Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. *Waste Management & Research*, 24(3), 197-206.

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, 155-165.

Yonetani, H. t.y. Construction and Demolition Waste Management in JAPAN. (Power Point Sunum).

Yaghoubi, E., Arulrajah, A., Wong, Y. C., & Horpibulsuk, S. 2017. Stiffness properties of recycled concrete aggregate with polyethylene plastic granules in unbound pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4), 04016271.

Yaghoubi, E., Disfani, M. M., Arulrajah, A., & Kodikara, J. 2018. Impact of compaction method on mechanical characteristics of unbound granular recycled materials. *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), 912-934.

Zega, C. J., Villagrán-Zaccardi, Y. A., & Di Maio, A. A. 2010. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures*, 43(1), 195-202.

Zhao, Wei, and Susanne Rotter. 2008. “The Current Situation of Construction & Demolition Waste Management in China.” In *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE 2008*,.

Zuo, H.K. & Fu, S.L. 2011. Research on the construction and distribution of construction waste generation and disposal facilities in beijing city. *Environmental Sanitation Enggineering*, 19 (2), 63–64.