



**İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ PLENT-MİKS
TEMEL TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Burak KILIÇ

Yüksek Lisans Tezi

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Perihan BIÇER**

2020

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ PLENT-MİKS TEMEL
TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

Burak KILIÇ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER

TEKİRDAĞ-2020

Her hakkı saklıdır.



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde eksiksiz biçimde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Burak KILIÇ

İMZA



Bu tez NKÜBAP tarafından NKUBAP.06.YL.19.228 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER danışmanlığında, Burak KILIÇ tarafından hazırlanan “İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Plent-Miks Temel Tabakasında Kullanılabilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması” başlıklı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından 04.12.2020 tarihinde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı : Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER

İmza:

Üye : Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ORDU

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç.Dr. Bahar UYMAZ
Enstitü Müdür

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ PLENT-MİKS TEMEL TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Burak KILIÇ

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER

Son yıllarda nüfus artışına ve ekonomik gelişmeye paralel olarak inşaat sektöründe büyüme gerçekleşmiştir. Bu büyüme sonucunda doğal agregaya olan talepte ciddi artış yaşanmıştır. Doğal agregaya olan bu talebin sonucunda birçok etki ortaya çıkmıştır. Bu etkilerin azaltılması için doğal agregaya alternatif bir malzeme arayışına başlanmıştır. Bu malzemelerin başında inşaat ve yıkım faaliyetleri sonucunda oluşan inşaat ve yıkıntı atıkları yer almaktadır. Dünya üzerinde çok çeşitli inşaat ve yıkıntı atıkları oluşmaktadır ancak bu atıklar genel olarak beton, tuğla, çelik vb. malzemelerden meydana gelmektedir. Oluşan bu atıklar çok miktarda üretildiği için depolanması ciddi çevresel ve ekonomik problemlere neden olmaktadır. Bu nedenle inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı hem çevresel hem de doğal kaynakların tüketiminin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında depolama alanında inşaat ve yıkıntı atığı olarak depolanan atık parke taşı (APT) ve atık tuğlanın (AT), doğal agrega (DA) yerine karayolu temel tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada temel tabakası olarak Karayolu Teknik Şartnamesi 2013’de (KTŞ 2013) belirtilen plent-miks temel Tip-1’e göre malzemelerin granülometri eğrisi belirlenmiş ve temel tasarımı bu gradasyon limitleri içerisinde kalınacak şekilde yapılmıştır. Tasarımı yapılan plent-miks temel tabakasında doğal agregaya alternatif olarak kullanılacak olan APT ve AT malzemeleri ve bu malzemelerin belirli oranlarda DA ile karıştırılması sonucunda elde edilen karışım numuneleri üzerinde fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için geleneksel laboratuvar deneyleri ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için modifiye Proktor, Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) ve esneklik modülü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları şartname limitleri ile karşılaştırılarak malzemelerin karayolu plent-miks temel tabakası için uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde AT malzemesinin plent-miks temel tabakası için KTŞ 2013’e göre tek başına yetersiz kaldığı belirlenmiştir. APT malzemesinin ise KTŞ 2013’e göre su emme değeri dışında diğer özellikleri bakımından yeterli olduğu ve karayolu plent-miks temel tabakası için doğal agregaya alternatif bir malzeme olabileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: İnşaat ve yıkıntı atığı, Plent-miks temel, Atık parke taşı, Atık tuğla, Doğal agrega

2020, 196 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

EXPERIMENTALLY INVESTIGATING THE USABILITY OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES IN THE PLANT-MIX BASE LAYER

Burak KILIÇ

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Perihan BİÇER

In recent years, there has been growth in the construction sector in the same direction with the population growth. As a result of this growth, there has been a serious increase in the demand for natural aggregate. Many affects have arisen as a result of this demand for natural aggregate. A search for an alternative material to natural aggregate begun to reduce these effects. Construction and demolition wastes generated as result of construction and demolition activities are at the top of these materials. A wide variety of construction and demolition wastes are produced in the world, but these wastes are generally consists of concrete, brick, steel, etc. materials. Since these wastes are produced in large quantities, their storage causes serious environmental and economic problems. For this reason, recycling and reuse of construction and demolition wastes are of great importance in terms of reducing the consumption of environmental and natural resources. Within the scope of this study, the highway base usability of waste interlocking concrete paver (ICP) and crushed brick (CB) stored as construction and demolition waste in landfill area instead of natural aggregate (NA) was investigated. In this study, the granulometry curve of the materials according to the plant-mix base Type 1 specified in the Turkey Highway Technical Specification 2013 (THTS 2013) as the base layer was determined and the base layer design was made to remain within these gradation limits. ICP and CB materials to be used as a result of mixing these materials with NA in certain proportions and for determining the mechanical properties modified Proctor, California bearing ratio (CBR) and resilient modulus experiments were performed. It was investigated whether the materials are suitable for the highway plant-mix base layer by comparing the test result with the specification limits. When the experimental results were examined, it has been determined that the CB material alone is insufficient for the plant-mix base layer according to THTS 2013. In agreement with THTS 2013, ICP material is sufficient in terms of other features other than water absorption value and it can be an alternative material to natural aggregate for the highway plant-mix base layer.

Key words: Construction and demolition waste, Plant-mix base, Waste interlocking concrete paver, Crushed brick, Natural aggregate

2020, 196 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	vi
ŞEKİL DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xii
TEŞEKKÜR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
3. KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISI	25
3.1. Taban Zemini.....	26
3.2. Alttemel Tabakası.....	26
3.3. Temel Tabakası.....	27
3.3.1. Granüler Temel Tabakası (GT)	27
3.3.2. Plent -Miks Temel Tabakası (PMT).....	28
3.3.3. Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) Tabakası.....	28
3.4. Kaplama Tabakası	28
4. KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISINDA KULLANILAN MALZEMELER	29
4.1. Agregalar	29
4.1.1. Agregaların Sınıflandırılması	29
4.1.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	31
4.1.3. Temel ve Alttemel Tabakasında Kullanılan Malzemeler	32
5. İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARI	39
5.1. Üretimi.....	39
5.2. Geri Dönüşümü.....	41
5.3. Geoteknik Uygulamaları ve Farklı Kullanım Alanları	42
5.4. Karayollarında Kullanımı	46
6. MATERYAL VE YÖNTEM	50
6.1. Materyal.....	50
6.1.1. Doğal Agregalar.....	50
6.1.2. Atık Parke Taşı	50
6.1.3. Atık Tuğla.....	52

6.2. Yöntem	53
6.2.1. Karayolları Teknik Şartnamesine Göre Plent-Miks Temel Tasarımı	53
6.3. Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Deney Yöntemleri	55
6.3.1. Elek Analizi	55
6.3.2. Kaba Agregalar İçin Su Emme ve Özgül Ağırlık Deneyi	56
6.3.3. İnce Agregalar İçin Su Emme ve Özgül Ağırlık Deneyi.....	57
6.3.4. Los Angeles Aşınma Deneyi	60
6.3.5. Yassılık İndeksi Deneyi.....	61
6.3.6. Organik Madde İçeriğinin Tayini	62
6.3.7. Kil Topakları ve Dağılabilen Dane Oranı Tayini	63
6.3.8. Hava Tesirine Karşı Dayanıklılık Deneyi.....	64
6.3.9. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi.....	65
6.3.10. Metilen Mavisini Deneyi	66
6.4. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Deney Yöntemleri	68
6.4.1. Modifiye Proktor Deneyi.....	68
6.4.2. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi.....	69
6.4.3. Esneklik Modülü (M_R) Deneyi	72
7. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	83
7.1. Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deneylerin Sonuçları	83
7.1.1. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi Sonuçları.....	83
7.1.2. Los Angeles Aşınma Deneyi Sonuçları.....	86
7.1.3. Yassılık İndeksi Deney Sonuçları.....	86
7.1.4. Organik Madde İçeriği Deney Sonuçları.....	87
7.1.5. Kil Topağı ve Dağılabilen Dane Oranı Deney Sonuçları	88
7.1.6. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları	88
7.1.7. Likit Limit ve Plastik Limit Deney Sonuçları	89
7.1.8. Metilen Mavisini Deney Sonuçları	89
7.2. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deneylerin Sonuçları	90
7.2.1. Modifiye Proktor Deney Sonuçları.....	90
7.2.2. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deney Sonuçları.....	102

7.2.1. Esneklik Modülü (M_R) Deney Sonuçları.....	131
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	151
KAYNAKLAR.....	157
EKLER.....	164
ÖZGEÇMİŞ.....	182



ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Geçmiş çalışmaların malzeme oranları ve fiziksel özellikleri.....	21
Çizelge 2.2. Geçmiş çalışmalarda mekanik özellikler.....	23
Çizelge 2.3. Geçmiş çalışmalarda kalıcı deformasyon ve esneklik modülü değerleri	24
Çizelge 4.1. Alttemel malzemesi gradasyon limitleri (KTŞ, 2013)	33
Çizelge 4.2. Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)	33
Çizelge 4.3. Alttemel sıkıştırma kriterleri (KTŞ, 2013)	34
Çizelge 4.4. Kaba agreganın fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013).....	35
Çizelge 4.5. İnce agreganın fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)	35
Çizelge 4.6. Granüler temel tabakası gradasyon limitleri (KTŞ, 2013)	36
Çizelge 4.7. Granüler temel tabakası sıkıştırma kriterleri (KTŞ, 2013).....	36
Çizelge 4.8. Plent-miks temel tabakası gradasyon limitleri	37
Çizelge 4.9. Plent-Miks temel tabakası sıkıştırma kriterleri (KTŞ, 2013)	37
Çizelge 4.10. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası gradasyon limitleri (KTŞ, 2013) .	38
Çizelge 5.1. Değişik türlerden oluşan inşaat ve yıkıntı atıkları için Avrupa Atık Kataloğu kodları (EC, 2000)	40
Çizelge 5.2. Geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak yürütülen vaka analizlerinin özeti (Obe vd., 2019).....	44
Çizelge 5.3. Geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilen malzemeler ve kullanıldığı alanlar (İpekçi vd., 2017)	45
Çizelge 5.4. Bağlayıcı olmayan yol katmanlarında geri dönüştürülmüş agrega kullanımı ile ilgili vaka analizleri (Ebo vd., 2019).....	47
Çizelge 6.1. Plent-miks temel tabakasında kullanılan karışım gradasyonu	54
Çizelge 6.2. Standart elek açıklıkları.....	55
Çizelge 6.3. Kil topağı ve dağılabilen dane oranı tayini için gerekli numune ağırlıkları ve elek açıklıkları.....	63
Çizelge 6.4. Temel/alttemel malzemeleri için yükleme sekansları (AASHTO T 307).....	81
Çizelge 7.1. Kaba ve ince agrega özgül ağırlık deney sonuçları.....	83
Çizelge 7.2. Su emme deney sonuçları.....	84
Çizelge 7.3. Karışımların su emme deneyi sonuçları	84
Çizelge 7.4. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları	86
Çizelge 7.5. Yassılık indeksi deney sonuçları	87
Çizelge 7.6. Organik madde içeriği deney sonuçları.....	87
Çizelge 7.7. Kil topağı ve dağılabilen dane oranı deney sonuçları	88

Çizelge 7.8. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları	89
Çizelge 7.9. Plastik limit deney sonuçları	89
Çizelge 7.10. Metilen mavisi deney sonuçları.....	90
Çizelge 7.11. Doğal agrega, atık parke taşı ve karışımlarının modifiye Proktor deney sonuçları	100
Çizelge 7.12. Atık tuğla ve karışımlarının modifiye Proktor deney sonuçları.....	102
Çizelge 7.13. %100 doğal agrega CBR verileri.....	103
Çizelge 7.14. %100 atık parke taşı CBR verileri.....	105
Çizelge 7.15. %100 atık tuğla CBR verileri	107
Çizelge 7.16. %85 DA + %15 APT CBR verileri	109
Çizelge 7.17. %75 DA + %25 APT CBR verileri	111
Çizelge 7.18. %50 DA + %50 APT CBR verileri	113
Çizelge 7.19. %25 DA + % 75 APT CBR verileri	115
Çizelge 7.20. %15 DA + %75 APT CBR verileri	117
Çizelge 7.21. %50 DA + %50 AT CBR verileri	119
Çizelge 7.22. %75 DA + %25 AT CBR verileri	121
Çizelge 7.23. %50 APT + %50 AT CBR verileri.....	123
Çizelge 7.24. %75 APT + %25 AT CBR verileri.....	125
Çizelge 7.25. %50 DA + %25 APT + %25 AT CBR verileri	127
Çizelge 7.26. CBR değerleri.....	129
Çizelge 7.27. Numunelerin AASHTO modeline göre belirlenmiş regresyon katsayıları	136
Çizelge 7.28. Numunelerin Uzan modeline göre belirlenmiş regresyon katsayıları	136

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Üç eksenli deney düzeneği (Molenaar ve van Niekerk, 2002).....	4
Şekil 2.2. 7 alttemel malzemesi için kuru birim hacim ağırlığı- su muhtevası eğrisi (Poon ve Chan, 2006)	5
Şekil 2.3. CBR değerleri (Poon ve Chan, 2006).....	6
Şekil 2.4. Kırılmış tuğla ile karıştırılmış kırmataşın CBR değerleri (Aatheesan vd., 2010).....	7
Şekil 2.5. Değerlendirilen 4 ana grup inşaat ve yıkıntı atığı: (a) çimentolu malzemeler, (b) yüksek gözenekli seramik malzeme, (c) az gözenekli seramik malzeme, (d) kırmataş (Leite vd., 2011).....	8
Şekil 2.6. RCA'nın esneklik modülünün belirlenmesi (Arulrajah vd., 2012a).....	9
Şekil 2.7. Bazalt atık kayasının esneklik modülü ve kalıcı deformasyonu (Arulrajah vd., 2012c)	11
Şekil 2.8. İnşaat ve yıkıntı atıklarının kalıcı deformasyon davranışı (Arulrajah vd., 2013a)...	14
Şekil 2.9. İnşaat ve yıkıntı atıklarının esneklik modülü ile çevrim sayısı arasındaki ilişki (Arulrajah vd., 2013a)	15
Şekil 2.10. Sıcaklık kontrollü bir boyutlu sıkıştırma hücresi (Soleimanbeigi ve Edil, 2015) ..	18
Şekil 2.11. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) ve geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) (Edil, 2018).....	20
Şekil 3.1. Yol üstyapısı tip kesiti (KGM, 2006).....	25
Şekil 5.1. İnşaat ve yıkıntı atığı	40
Şekil 5.2. Avrupa Birliğinde farklı sektörlerde üretilen atık değerleri (Eurostat, 2016).....	41
Şekil 5.3. İnşaat ve yıkıntı atığı geri kazanım akış şeması (Altındağ, 2011)	42
Şekil 5.4. Drenaj kanalı geri dolgusu olarak kullanımı (Mehus vd., 2003).....	43
Şekil 5.5. Beton agregasının üretimi (Aurstad vd., 2006).....	48
Şekil 5.6. Beton agregasının serilmesi ve sıkıştırılması (Aurstad vd., 2006).....	48
Şekil 5.7. Beton agregası kullanılan otoyolun yeni hali (Aurstad vd., 2006).....	49
Şekil 5.8. Geri dönüştürülmüş agregaların serilmesi ve sıkıştırılması (Neves vd., 2013).....	49
Şekil 6.1. Çorlu Karatepe taş ocakları uydu fotoğrafı	50
Şekil 6.2. Atık parke taşı	52
Şekil 6.3. Konkasör	52
Şekil 6.4. Harman tuğlası	53
Şekil 6.5. Plent- miks temel tabakası granülometri eğrisi	54
Şekil 6.6. 24 saat su içerisinde bekletilen numuneler.....	57
Şekil 6.7. Yüzey kuru suya doygun agrega elde etme.....	57

Şekil 6.8. Numunelerin 24 saat su içerisinde bekletilmesi ve sıcak hava kaynağı ile yüzey kuru suya doymun hale getirilmesi	59
Şekil 6.9. Deney sırasında kullanılan piknometreler	59
Şekil 6.10. Los Angeles aşınma makinası	60
Şekil 6.11. Farklı agrega boyutlarına göre numuneler	61
Şekil 6.12. Silindirik çubuklu elekler	62
Şekil 6.13. Organik madde içeriğinin tayini	63
Şekil 6.14. Kil topakları ve dağılabilen dane tayini	64
Şekil 6.15. Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi	65
Şekil 6.16. Metilen mavisi deney aleti	67
Şekil 6.17. Sıkıştırma işlemi sonrası yüzeyi düzeltilmiş numune	69
Şekil 6.18. Numunelerin suda bekletilmesi	70
Şekil 6.19. CBR deney aleti	71
Şekil 6.20. CBR deneyi (TS 1900-2)	72
Şekil 6.21. Kaplama tabakasına etki eden gerilmeler (Lekarp vd., 2000)	73
Şekil 6.22. Malzemelerin tekrarlı yükler altındaki davranışı (Huang, 2004)	74
Şekil 6.23. Malzemelerin esneklik modülü (Ping vd., 2003)	74
Şekil 6.24. Kalıp içerisine mebranın sabitlenmesi ve vakum uygulanması	75
Şekil 6.25. Titreşimli tokmak ve numune sıkıştırılması	76
Şekil 6.26. Numune hazırlanması ve yükseklik kontrolü	76
Şekil 6.27. Numunenin kalıptan çıkarılarak deney aletine yerleştirilmesi işlemleri	77
Şekil 6.28. Üç eksenli deney aleti	78
Şekil 6.29. Deformasyon ölçer (LVDT) ve yerleşimi	79
Şekil 7.1. %100 doğal agrega plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	91
Şekil 7.2. %100 atık parke taşı plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	92
Şekil 7.3. %100 atık tuğla plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	92
Şekil 7.4. %85 DA + %15 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	93
Şekil 7.5. %75 DA + %25 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	94
Şekil 7.6. %50 DA + %50 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	94
Şekil 7.7. %25 DA + %75 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	95
Şekil 7.8. %15 DA + %85 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	96
Şekil 7.9. %75 DA + %25 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	96
Şekil 7.10. %50 DA + %50 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	97
Şekil 7.11. %75 APT + %25 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	98

Şekil 7.12. %50 APT + %50 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi.....	98
Şekil 7.13. %50 DA + %25 APT + %25 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi	99
Şekil 7.14. Atık parke taşı içeriğine göre elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı- su muhtevası ilişkisi	100
Şekil 7.15. %100 doğal agrega yük-penetrasyon eğrisi.....	104
Şekil 7.16. %100 atık parke taşı yük-penetrasyon eğrisi.....	106
Şekil 7.17. %100 atık tuğla yük-penetrasyon eğrisi	108
Şekil 7.18. %85 DA + %15 APT yük-penetrasyon eğrisi	110
Şekil 7.19. %75 DA + % 25 APT yük-penetrasyon eğrisi	112
Şekil 7.20. %50 DA + %50 APT yük-penetrasyon eğrisi	114
Şekil 7.21. %25 DA + %75 APT yük-penetrasyon eğrisi	116
Şekil 7.22. %15 DA + %85 APT yük-penetrasyon eğrisi	118
Şekil 7.23. %50 DA + %50 AT yük-penetrasyon eğrisi	120
Şekil 7.24. %75 DA + %25 AT yük-penetrasyon eğrisi	122
Şekil 7.25. %50 APT + %50 AT yük-penetrasyon eğrisi.....	124
Şekil 7.26. %75 APT + %25 AT yük-penetrasyon eğrisi.....	126
Şekil 7.27. %50 DA + %25 APT + %25 AT yük-penetrasyon eğrisi	128
Şekil 7.28. Atık parke taşı içeriğine göre CBR değişim grafiği.....	130
Şekil 7.29. Ölçülen esneklik modülü değerleri ile toplam gerilme değerleri arasındaki ilişki	131
Şekil 7.30 Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği.....	132
Şekil 7.31. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği.....	133
Şekil 7.32. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği.....	133
Şekil 7.33. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği.....	134
Şekil 7.34. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği.....	134
Şekil 7.35. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği.....	135
Şekil 7.36. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki.....	137
Şekil 7.37. %100 DA için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki.....	137
Şekil 7.38. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki.....	138
Şekil 7.39. %75 DA + %25 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki	138
Şekil 7.40. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki.....	139
Şekil 7.41. %50 DA + %50 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki	139

Şekil 7.42. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki.....	140
Şekil 7.43. %25 DA + %75 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki	140
Şekil 7.44. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki.....	141
Şekil 7.45. %15 DA + %85 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki	141
Şekil 7.46. Ölçülen M_R değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen M_R değerleri arasındaki ilişki	142
Şekil 7.47. %100 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki.....	142
Şekil 7.48. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki	143
Şekil 7.49. %100 DA için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)	144
Şekil 7.50. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki	144
Şekil 7.51. %75 DA + %25 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)	145
Şekil 7.52. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki	145
Şekil 7.53. %50 DA + %50 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)	146
Şekil 7.54. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki	146
Şekil 7.55. %25 DA + %75 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)	147
Şekil 7.56. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki	147
Şekil 7.57. %15 DA + %85 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)	148
Şekil 7.58. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki	148
Şekil 7.59. %100 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)	149
Şekil 7.60. Numunelerin SM_R değerlerinin tahmin modellerine göre değişimi.....	150

SİMGELER VE KISALTMALAR

APT	: Atık parke taşı
AT	: Atık tuğla
BA	: Taban külü
c	: Kohezyon
CB	: Kırılmış tuğla
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CDRA	: İnşaat ve yıkıntından geri dönüştürülmüş agrega
CR	: Kırmataş
ÇBGT	: Çimento bağlayıcı granüler temel tabakası
DA	: Doğal agrega
FA	: Uçucu kül
FRG	: Geri dönüştürülmüş ince cam atığı
FSD	: Dökümhane kumu
FSG	: Dökümhane cürufu
GOS	: Buzul ovası kumu
GT	: Granüler temel tabakası
KTŞ	: Karayolu teknik şartnamesi
M_{Kuru}	: Kuru ağırlık
M_R	: Esneklik modülü
MRA	: Karışık geri dönüştürülmüş agrega
MRG	: Geri dönüştürülmüş orta cam atığı
M_{Su}	: Suda içindeki ağırlık
M_{YKSD}	: Yüzey kuru suya doymuş ağırlık
NA	: Doğal agrega
NaOH	: Sodyum hidroksit
PMT	: Plent-miks temel tabakası
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
RA	: Geri dönüştürülmüş agrega

RAP	: Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama
RAS	: Geri dönüştürülmüş asfalt şıngıl
RCA	: Geri dönüştürülmüş beton agrega
RPM	: Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama
SM _R	: Tasarım esneklik modülü
w	: Su muhtevası
w _{opt}	: Optimum su muhtevası
WR	: Atık kaya
γ _{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ _s	: Dane birim hacim ağırlığı
ε _p	: Kalıcı deformasyon
σ ₃	: Çevre basıncı (hücre basıncı)
σ _d	: Deviator gerilme
φ	: İçsel sürtünme açısı

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesi sırasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi, tecrübe ve önerileri ile katkıda bulunan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Perihan BİÇER'e teşekkürü bir borç bilirim. Deney malzemenin temin edilmesinde yardımlarından dolayı ve her türlü desteği için Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ORDU'ya teşekkür ederim. Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge Başkanlığı zemin mekaniği laboratuvarında esneklik modülü deneyinin gerçekleştirilebilmesinde yardımlarından dolayı Toprak ve Stabilizasyon Şefi Sayın Şenol ÇÖMEZ'e, Toprak ve Stabilizasyon Mühendisi Sayın Dr. Aykan MERT'e ve zemin mekaniği laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim. Karayolları Genel Müdürlüğü 1. Bölge Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Başmühendisi Sayın Mehmet TOKGÖZ'e, Yol ve Yapı Malzemeleri Şefi Sayın Neslinur Sinem KAVAK'a ve laboratuvar çalışanlarına yardımlarında dolayı teşekkür ederim. Deney malzemesinin temin edilmesinde yanımda olan ve yardımda bulunan arkadaşım merhum İnşaat Mühendisi İsmail AYAR'a teşekkür ederim. Numunelerin hazırlanması ve laboratuvar deneyleri sırasında yardımlarından dolayı bitirme öğrencileri Asil MAZAZ, Serkan LAÇİN ve Mert Hüseyin YILMAZ'a teşekkür ederim. Mali desteklerinden dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Kasım, 2020

Burak KILIÇ
İnşaat Mühendisi

1. GİRİŞ

Son yıllarda ekonomik gelişmelere ve nüfus artışına bağlı olarak inşaat sektöründe büyüme yaşanmıştır. Yaşanan bu büyüme sonucunda doğal kaynaklara olan talep artmıştır. Özellikle inşaat sektöründe doğal agrega ihtiyacı giderek artarak önemli seviyelere gelmiştir. Bu nedenle şu an mevcut olan doğal agrega kaynaklarının azalması, yeni kaynak arayışının başlayacağı anlamına gelmektedir. Ancak yeni kaynakların bulunması ve işletilmesi hem çevresel hem de ekonomik olarak birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Doğal agregalar için oluşan bu talebin sorunlarının giderilebilmesi için doğal agregalara alternatif olabilecek malzeme arayışına girilmiştir. İnşaat sektörünün gelişimi de göz önüne alındığında doğal agregalara alternatif olacak malzemelerin başında inşaat ve yıkım süreçleri sonucunda oluşan inşaat ve yıkıntı atıkları gelmektedir. Bu atıklar genel olarak beton, asfalt, tuğla vb. malzemelerden, büyük hacimlerde ve büyük miktarlarda oluşmaktadır. Bu malzemeler çevresel etkiler doğurduğu ve bertaraf için büyük depolama alanları gerektirdiği için geri dönüşümünün sağlanarak tekrar inşaat sektöründe kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle malzemelerin yeniden değerlendirilmesi için iyi bir şekilde çıkarılması, toplanması, ayrıştırılması ve geri dönüşümünün sağlanması gerekmektedir. Bu işlemlerin sürdürülebilir bir şekilde yapılması ile inşaat ve yıkıntı atıklarının hem çevreye verdiği zarar azaltılabilir hem de ekonomiye katkı sağlaması beklenebilir.

Bu çalışmanın amacı depolama alanlarında inşaat ve yıkıntı atığı olarak depolanan atık parke taşı ve atık tuğla malzemesinin plent-miks temel tabakasında kullanımının, mevcut doğal agrega ve şartname limitleri ile karşılaştırılarak, plent-miks temel tabakası için uygunluğu araştırılmıştır. Bu kapsamda; şartnameye uygun olarak plent-miks temel tasarımı yapılmıştır. Temel tasarımına uygun olarak atık parke taşı, atık tuğla malzemelerinin konkasörde kırımı gerçekleştirilmiş ve değişik boyutlarda agregalar elde edilmiştir. Tasarımı yapılan plent-miks temel tabakası için atık parke taşı, atık tuğla, doğal agrega numuneleri ve bunların karıştırılması ile oluşan numuneler üzerinde fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla geleneksel laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için; modifiye Proktor, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve esneklik modülü (M_R) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları şartname limitleri ile karşılaştırılarak malzemelerin karayolu plent-miks temel tabakası için uygun olup olmadığı araştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dünyada inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümünün yapılarak yeniden kullanılması için farklı alanlarda birçok çalışmalar yapılmaktadır. Çalışmalar incelendiğinde inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümünden elde edilen malzemelerin genel olarak yol temel ve alttemelleri için kullanılmasının uygun olup olmamasının araştırılması üzerine durulduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışmalarda inşaat ve yıkıntı atıkları üzerinde elek analizi, aşınma deneyi, su emme deneyi, Kaliforniya taşıma oranı deneyi (CBR), modifiye kompaksiyon, yassılık indeksi, esneklik modülü deneyi, tekrarlı üç eksenli deneyi, büyük ölçekli kesme kutusu deneyi gibi deneyler ile malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenerek mevcut doğal agregalarla karşılaştırılması yapılmıştır. Aşağıda yapılan çalışmaların özetleri verilmiştir.

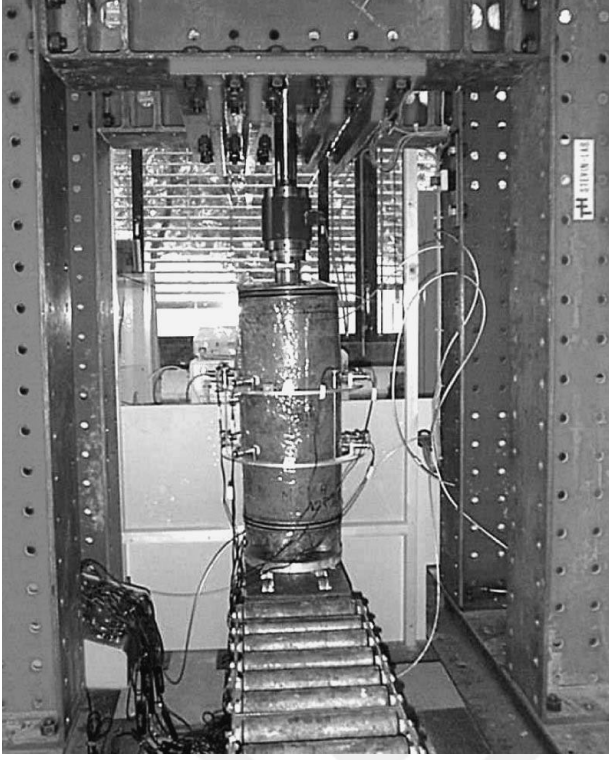
O'Mahony ve Milligan (1991) çalışmalarında genel olarak Britanya'da alttemel malzemesi olarak kullanılan kireç taşının yerine beton ve yıkımdan elde edilerek geri dönüştürülen agregaların kullanılabilirliğinin araştırmasını yapmışlardır. Kireç taşı yerine kullanılacak bu malzemelerin performansının araştırılabilmesi için agregalar üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler Kaliforniya taşıma gücü deneyi (CBR), sıkıştırma ve dona duyarlılık deneyleridir. Yaptıkları deneyler sonucunda geri dönüştürülmüş beton ve yıkıntı atıklarının performansının kireç taşı agregasına yakın sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Ancak, geri dönüştürülmüş beton ve yıkıntı atıklarının üretiminde bazı kurallara ve bu malzemelerin kalitesinin belirlenmesine gerek olduğunu belirtmişlerdir.

Bennert vd. (2000) geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) kullanarak bölgelerinde karayollarında kullanılan doğal agrega ile karşılaştırılmasını yapmak amacıyla bu malzemeleri ayrı ayrı ve belli oranlarda karıştırarak bir dizi laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Laboratuvar deneyleri olarak elek analizi, kompaksiyon, üç eksenli deney ve esneklik modülü deneyi yapmışlardır. Laboratuvar deneyleri sonucunda RAP, RCA ve doğal agregaların karıştırılmış şekilde hepsinin tek başına kullanılan doğal agregadan daha yüksek esneklik modülü değerleri verdiğini belirtmişlerdir. Kalıcı deformasyon sonuçları, RCA ile karıştırılan numunelerin 100.000 tekrarlı yük ile yüklendiğinde düşük kalıcı deformasyon miktarı elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Buna karşılık RAP ile karıştırdıkları numunelerde aynı sayıda tekrarlı yüklemeye daha yüksek kalıcı deformasyona ulaşmışlardır. Çalışma sonucunda bölgelerinde kullanılan doğal malzemenin %75'i ile %25 RCA karışımının veya bölgelerinde kullanılan doğal malzemenin %75'i ile

%25 RAP karışımının kalıcı deformasyon özelliklerinin doğal malzemeyi yakaladığını ve bu atıkların karayolu dolgularında kullanılmasının uygun olacağını belirtmişlerdir.

Nataatmadja ve Tan (2001) yaptıkları çalışmada basınç mukavemeti 15 kPa ile 75 kPa arasında değişen dört farklı geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) kullanarak bu agregaların esnek davranışını etkileyen parametreleri araştırmak için bu dört farklı geri dönüştürülmüş beton agregası üzerinde geleneksel laboratuvar deneylerini (elek analizi, Los Angeles aşınma deneyi, yassılık indeksi deneyi) ve esneklik modülü deneyini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda iyi dereceli RCA'nın düşük deviator gerilimler altında daha yüksek bir esneklik modülü oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca geri dönüştürülen betonun mukavemeti, yassılık indeksi ve içerdiği yumuşak malzeme miktarının malzemenin esneklik davranışını etkilediğini belirtmişlerdir. Genel bir sonuç olarak ise geri dönüştürülmüş beton agregası standartlara uygun bir şekilde üretilebiliyorsa, yol temel ve alttemel dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir.

Molenaar ve van Niekerk (2002) çalışmalarında Hollanda'da 1970'lerin sonlarından beri yollar için temel malzemesi olarak kullanılmakta olan inşaat ve yıkıntı malzemelerinin bileşimlerinin, dane boyutlarının ve kompaksiyon derecelerinin malzemelerin mekanik davranışına etkilerini incelemişlerdir. Bu faktörler hakkında bilgi edinilmesi gerektiğini çünkü geri dönüştürülmüş malzemelerin niteliğinin bölgesel olarak değiştiğini ve kalitesinin kontrol edilmesinin zor olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun için gradasyon, bileşim ve diğer faktörlerin incelenebilmesi için geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atıklarından yapılan bağlayıcısız temel üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sırasında incelenen malzemelerin mekanik davranışının belirlenmesi için statik ve tekrarlı yüklerde üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.1'de deneyde kullandıkları üç eksenli deney aleti gösterilmiştir. Statik deneyler ile kohezyon ve içsel sürtünme açıları ile ilgili bilgileri ve ayrıca tekrarlı yük deneyleri ile esneklik modülü ve kalıcı deformasyon ile ilgili bilgileri elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda bu tür faktörlerin mekanik özellikler üzerinde etkili olduğunu ve kompaksiyon derecesinin uygulama sırasında diğer faktörlere göre kolaylıkla gerçekleştirilebileceğini ve kontrol edilebileceğini ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra çalışmalarının sonucunda inşaat ve yıkıntı atıkları ile kaliteli yol temel dolgularının inşa edilebileceğini belirtmişlerdir.

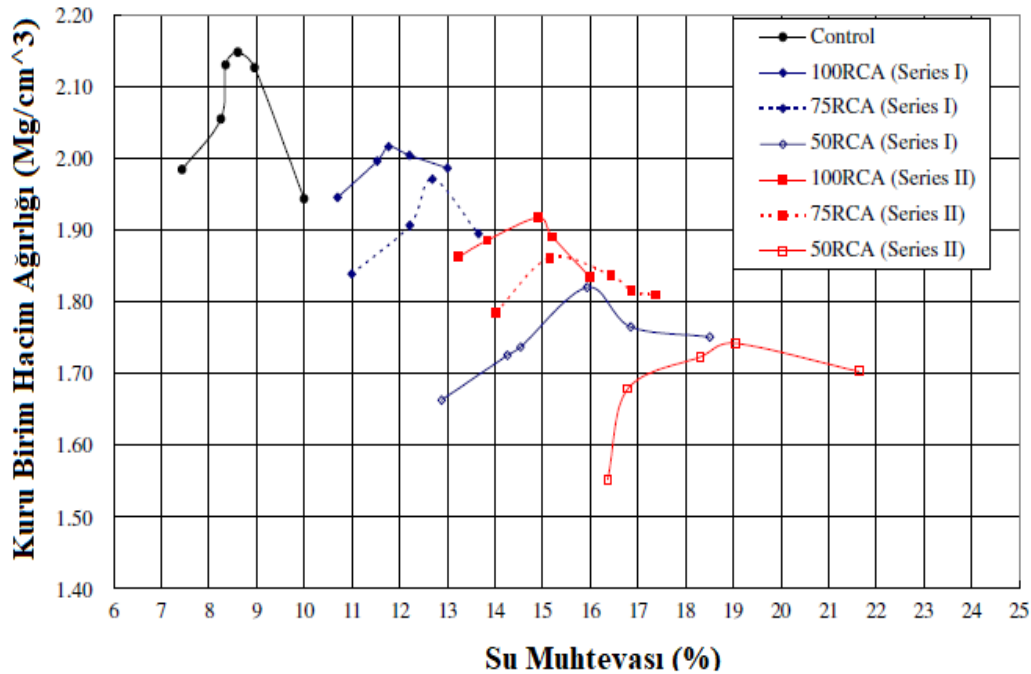


Şekil 2.1. Üç eksenli deney düzeneği (Molenaar ve van Niekerk, 2002)

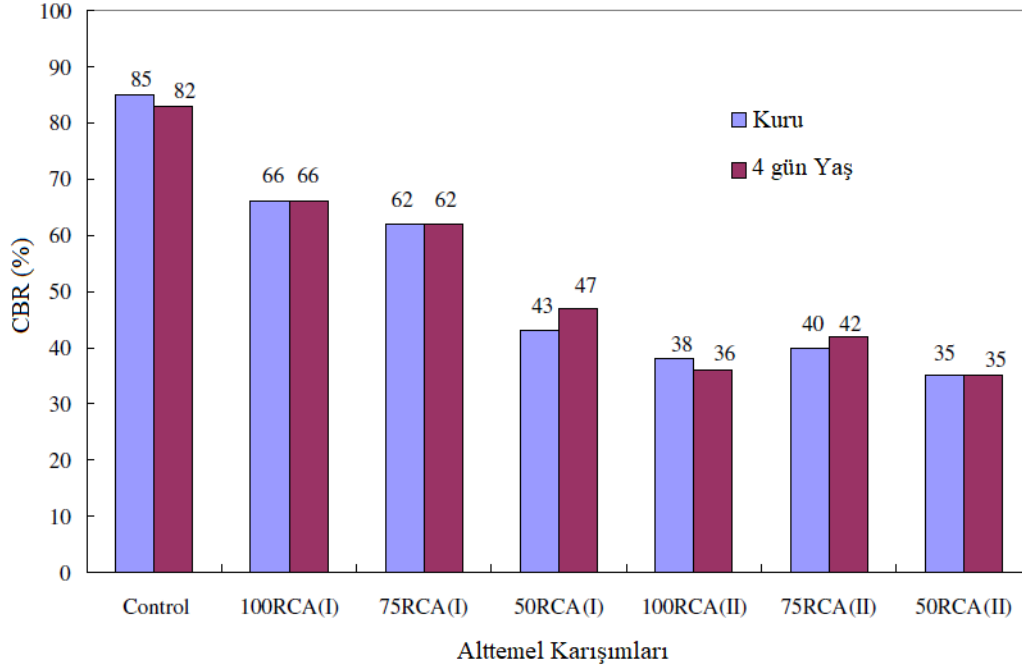
Sivakumar vd. (2004) çalışmalarını her ikisi inşaat ve yıkıntı atığı olarak değerlendirilen parçalanmış beton ve inşaat molozu (tuğla) üzerinde gerçekleştirmiştir. Bu iki malzeme ile karşılaştırmasını yapabilmek için genel olarak kullanılan bazalt kırma taşını kullanmışlardır. Malzemeler üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deney aletinde tekrarlı yüklemeli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Numune örneklerini 60-300 kPa'lık ön yüklemeler altında 305mm x 305 mm boyutlarında kesme kutusu kullanarak sekiz döngü yapacak bir şekilde tekrarlı olarak test etmişlerdir. Çalışma sonucunda doğal agreganın içsel sürtünme açısı ilk yüklemelerde 47°'den sekizinci yüklemelerde 45°'ye düştüğü, geri dönüştürülmüş betonun tekrarlı yüklemeye maruz kaldığında içsel sürtünme açısının 43°'den 38°'ye düştüğü ve geri dönüştürülmüş tuğlanın ise yaklaşık olarak içsel sürtünme açısının 43°'den 39°'ye düştüğünü ifade etmişlerdir. Özellikle geri dönüştürülmüş malzemelerde gerçekleşen sürtünme direncindeki düşüşler büyük ölçüde tekrarlanan yüklemeler sonucunda meydana gelen danelerin parçalanmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca yüklemeler koşullarının yoğun ve tekrarlı olduğu inşaat mühendisliği uygulamalarında bu tür malzemeleri kullanırken bu malzemelerin uygunluğuna dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Poon ve Chan (2006) Hong Kong'ta geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve kırılmış kil tuğlasını karayollarının alttemel dolgularında kullanılması olasılığı üzerine laboratuvar

çalışması yapmışlardır. Çalışmada %100 geri dönüştürülmüş beton agreganın yanı sıra, geri dönüştürülmüş beton agreganın ağırlıkça %25 ve %50' si kadar geri dönüştürülmüş kırılmış kil tuğlasını ekleyerek karışım elde etmişlerdir. Ayrıca bu malzemelerin performans değerlendirmesini doğal malzeme üzerinde yaptıkları deneyler ile kıyaslamışlardır. Deneylerin sonucunda elde ettikleri kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası eğrileri Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Elde ettikleri sonuçlar %100 geri dönüştürülmüş betondan oluşan bir agrega kullanımının, optimum su muhtevasının artmasına ve alttemel malzemenin maksimum kuru yoğunluğunun, hammadde değerlerine kıyasla azalmasına yol açtığını ortaya koymuştur. Ayrıca, geri dönüştürülmüş beton agregalarının yerine kırılmış kil tuğla kullanılması, optimum su muhtevasını daha da artırmış ve maksimum kuru yoğunluğunu azaltmıştır. Bu düşük tanecik yoğunluğundan ve kırılmış kil tuğlaların RCA'ya kıyasla daha yüksek su emiliminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca malzemeler üzerinde gerçekleştirdikleri CBR deneyinin sonuçları Şekil 2.3'de gösterilmiştir. CBR sonuçlarını değerlendirdiklerinde; %100 geri dönüştürülmüş beton agrega karışımının CBR değerleri (kuru ve yaş) doğal malzemelerinkinden düşük olduğunu bulmuşlardır. Buna rağmen, geri dönüştürülmüş tüm alttemel malzemeleri için yaş CBR değerlerinin %30'dan daha yüksek olduğunu bulmuşlardır.

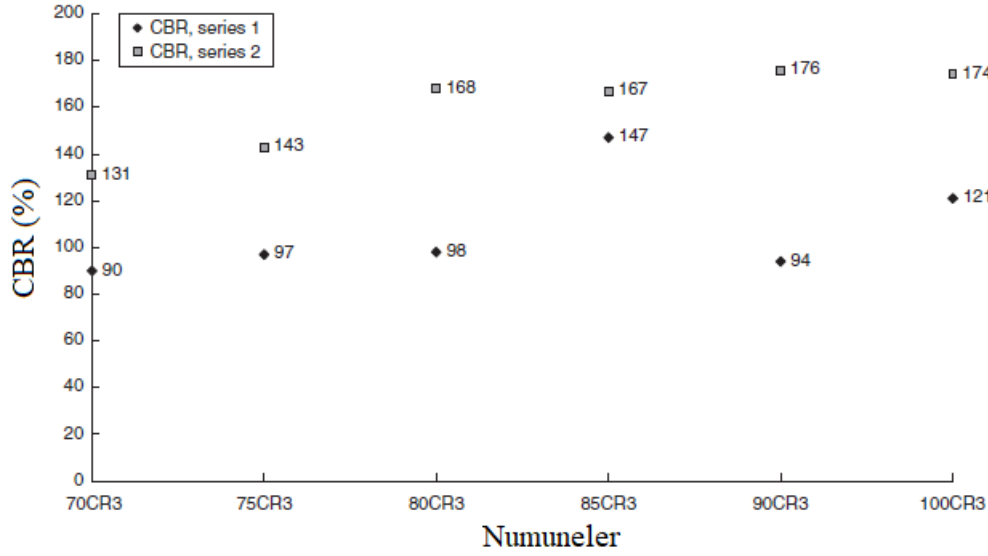


Şekil 2.2. 7 alttemel malzemesi için kuru birim hacim ağırlığı- su muhtevası eğrisi (Poon ve Chan, 2006)



Şekil 2.3. CBR değerleri (Poon ve Chan, 2006)

Aatheesan vd. (2010) bir inşaat ve yıkıntı atığı malzemesi olan kırılmış tuğlanın (CB) geoteknik özelliklerini ortaya koymuşlardır ve alttemel uygulamalarında kullanımını önermişlerdir. Deneysel çalışmalarında kullanmak için malzemeyi Avustralya, Victoria'daki bir geri dönüşüm tesisinden almışlardır. Doğal agrega olarak bazalt agregası kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada, çeşitli oranlarda bazalt agregası ve CB karışımlarını geniş kapsamlı deneysel testlerden elde edilen mühendislik özelliklerini göstermişlerdir. Karışımlar üzerinde yaptıkları CBR deneyleri sonucunda karışımların CBR değerlerinin %90'ın üzerinde olduğunu ve bu şartnamede öngörülen %80 CBR değerinin üzerinde olduğunu belirlemişlerdir. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi deneylerini iki farklı seri üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneylerini iki farklı seride gerçekleştirerek agregaların kalitesine bağlı olarak değişim olabileceğini belirlemişlerdir. Yaptıkları laboratuvar deneyleri sonucunda kırılmış tuğlanın bazalt agregasıyla karıştırılması doğal malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin çok düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca CB karışımlarının potansiyel kullanımını belirlemek için elde edilen mühendislik özellikleri, yol alttemel veya drenaj sistemleri için hafif yapı malzemesi için geçerli olan 24 yol otoritesi spesifikasyonu ile karşılaştırmışlardır. Buna göre, yol alttemel uygulamaları için kırma taş kombinasyonlarında %30'a kadar CB'nin güvenle eklenebileceğini ifade etmişlerdir.

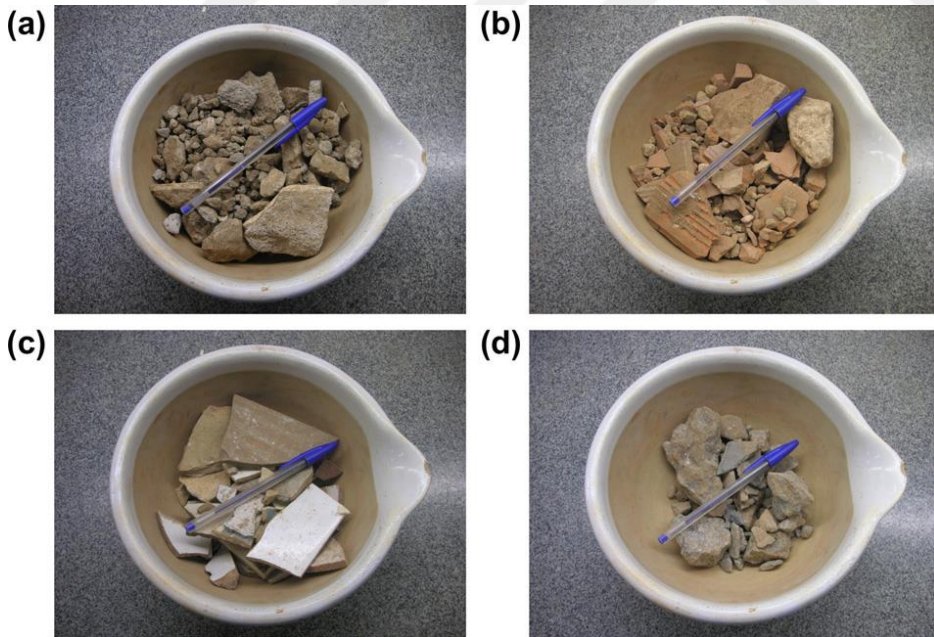


Şekil 2.4. Kırılmış tuğla ile karıştırılmış kırmataşın CBR değerleri (Aatheesan vd., 2010)

Arulrajah vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş kırılmış tuğlanın (CB) karakterizasyonunu ve yol alttemel malzemesi olarak performansının değerlendirilmesi üzerine bir laboratuvar çalışmasının bulgularını araştırmışlardır. Bir yol alttemel malzemesi olarak performansını değerlendirmek için geri dönüştürülmüş CB'nin özelliklerini, Avustralya'daki yerel devlet karayolu otoritesi standartlarına göre karşılaştırmışlardır. Deney çalışmaları olarak dane büyüklüğü dağılımı, dane yoğunluğu, modifiye Proktor deneyi, su emme deneyi, CBR, Los Angeles aşınma kaybı, statik üç eksenli ve tekrarlı üç eksenli deneyleri, pH ve organik içerik gibi deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Los Angeles aşınma kaybının değeri, yol alttemel malzemeleri için belirlenen sınırların üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir. Geoteknik test sonuçlarıyla, yol alttemel uygulamalarındaki performansını ve dayanıklılığını artırmak için CB'nin diğer dayanıklı geri dönüştürülmüş agregalarla karıştırılması gerekebileceğini belirtmişlerdir. CB'nin kayma mukavemetinin özellikle daha yüksek nem oranı seviyelerinde, kabul edilebilir sınırların ötesinde azaldığını bulmuşlardır. Tekrarlı yük üç eksenli deneyiyle, CB'nin %65 nem oranı seviyesinde tatmin edici bir şekilde performans göstereceğini ortaya koymuşlardır. Bu deney sonucuna göre sadece %65 su muhtevasına sahip geri dönüştürülebilir CB'nin yol alttemel uygulamalarında kullanım için uygun bir malzeme olduğunu ifade etmişlerdir.

Leite vd. (2011) Şekil 2.5'de gösterilen inşaat ve yıkıntı atıklarını 4 ana grup şeklinde ayırarak bu malzemelerin düşük hacimli yollarda temel/alttemel malzemesi olarak uygulanabilirliğini araştırmışlardır. İnşaat ve yıkıntı atık malzemelerinin fiziksel ve mekanik

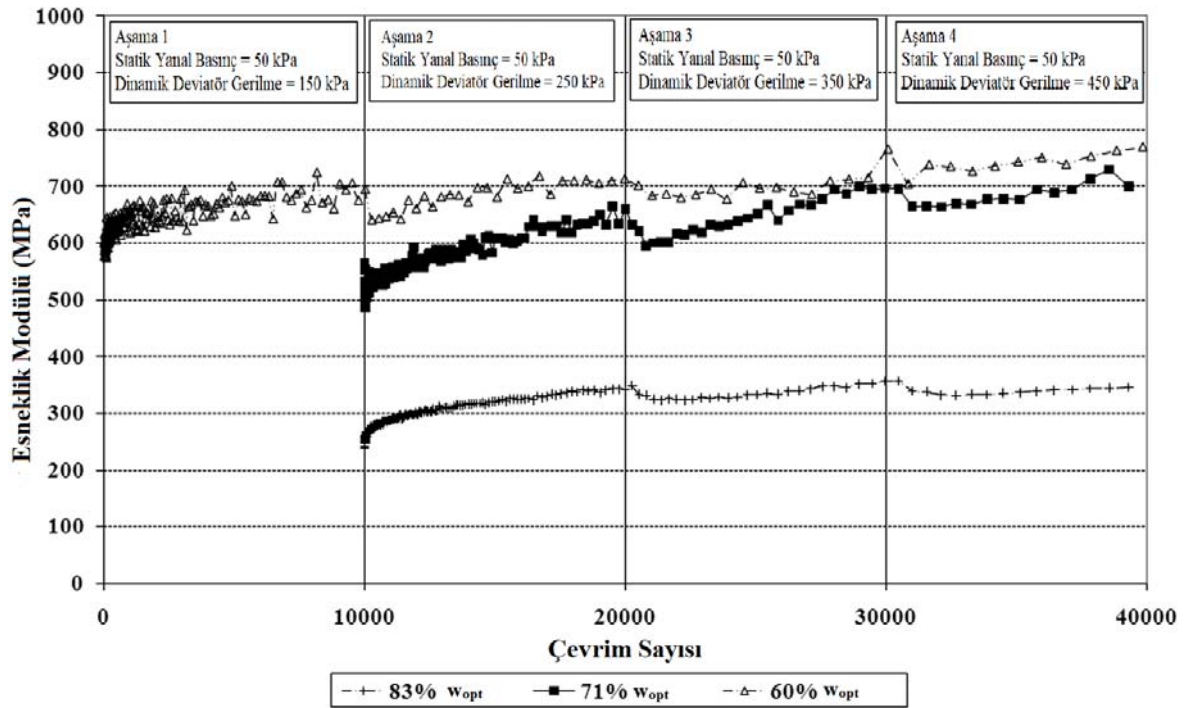
özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri (Su emme deneyi, elek analizi, dane şekli, CBR, tekrarlı üç eksenli deneyi) yapmışlardır. Malzemenin esneklik modülünün ve kalıcı deformasyonlarını belirlemek amacıyla geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atıklarından elde ettikleri agregaları optimum su muhtevasında sıkıştırmışlar ve 150mm çapında ve yüksekliği 300mm olan numuneler elde etmişlerdir. Daha sonra numuneleri tekrarlı üç eksenli deney aletinde 300 kPa deviator gerilme ve 50 kPa çevresel basınç altında, 180.000 tekrarlı yüklemeye maruz bırakmışlardır. Bunun yanı sıra farklı gerilme oranlarında da deneyler yaparak malzemenin kalıcı deformasyonlarını test etmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atıklarının su emmesinin içerisinde tuğla, kiremit ve seramik gibi gözenekli malzemelerin oluşundan dolayı artabileceğini, sıkıştırma süresince inşaat ve yıkıntı atık malzemelerinin dane büyüklüğü dağılımının oldukça bozulduğu ve bozulmanın sıkıştırma enerjisi arttıkça daha da arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca inşaat ve yıkıntı atık malzemelerinin CBR ve esneklik modülü değerlerinin standart iyi derecelendirilmiş kırma taş benzer olduğunu belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak sıkıştırma enerjisi geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atık agregalarının kalıcı deformasyonunun direncini etkilediğini ve bu durumun gerilme seviyelerine de bağlı olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.5. Değerlendirilen 4 ana grup inşaat ve yıkıntı atığı: (a) çimentolu malzemeler, (b) yüksek gözenekli seramik malzeme, (c) az gözenekli seramik malzeme, (d) kırmataş (Leite vd., 2011)

Arulrajah vd. (2012a) çalışmalarında geri dönüştürülmüş beton agregaların (RCA) geoteknik özelliklerinin bulunması için bir dizi laboratuvar deneyleri yapmışlardır. RCA'nın

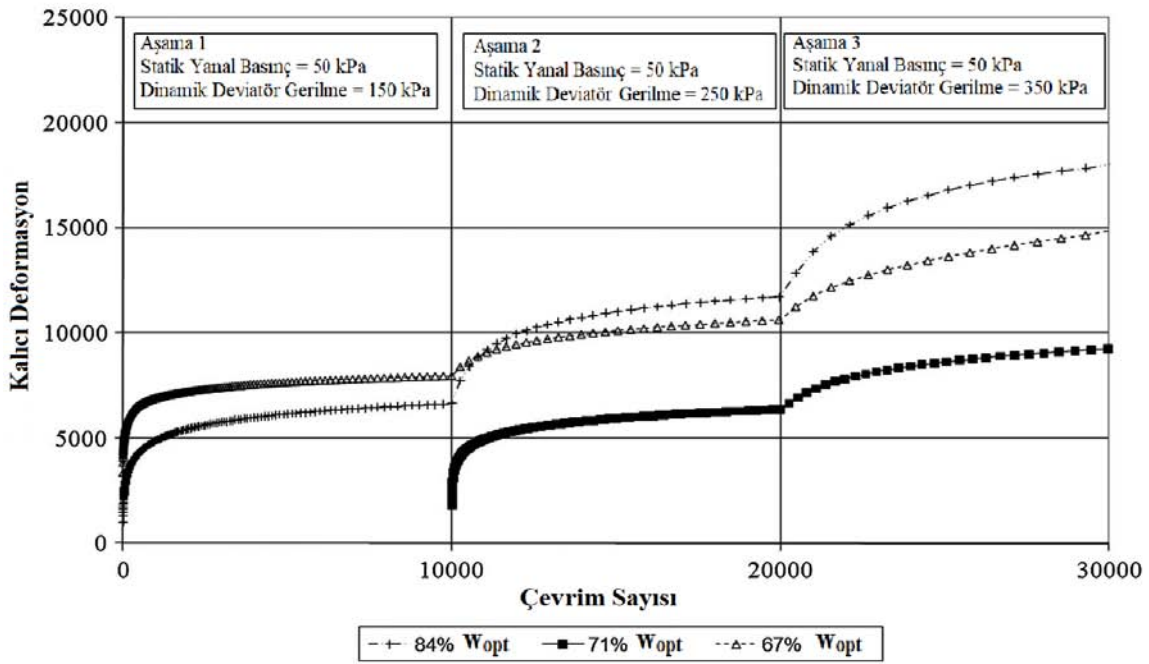
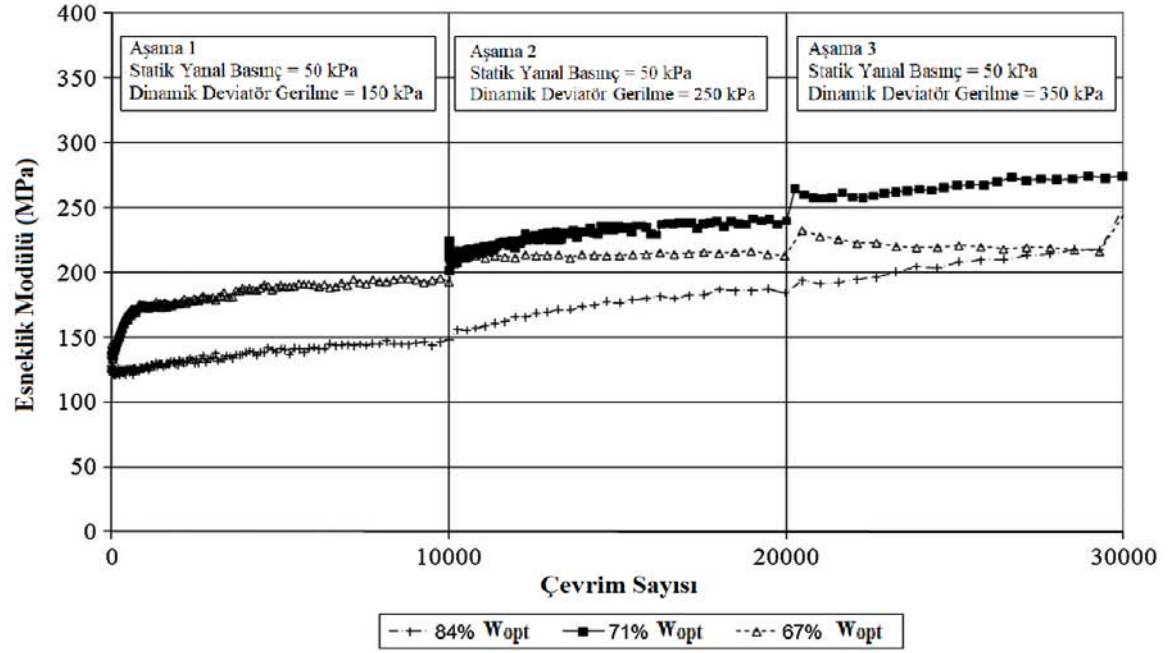
özelliklerinin bir karayolu alttemel malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için devlet yol otoritesi gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını araştırmışlardır. Geleneksel laboratuvar deneyleri olarak, elek analizi, modifiye Proktor deneyi, dane yoğunluğu ve su emme deneyleri, CBR, Los Angeles aşınma deneyi, pH, organik içerik, statik ve tekrarlı üç eksenli deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Aşınma deneyinin sonucunda RCA'nın aşınmaya karşı dayanıklı olduğunu bulmuşlardır. CBR değerlerinin ise alttemel malzemesi olarak yerel devlet karayolu şartlarını karşıladığını belirtmişlerdir. Tekrarlı yük üç eksenli deneyi sonucunda elde ettikleri, tekrar sayısına bağlı olarak esneklik modülünün değişimini gösteren eğri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu deneyden yola çıkarak RCA'nın alttemel malzemesi olarak tatmin edici bir şekilde performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. RCA'nın modifiye Proktor deneyi ve su muhtevasının %60'ına bağlı olarak %98'lik bağıl sıkıştırma işleminde gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte, bazı malzemelerin su muhtevasına karşı duyarlılık gösterdiği ve daha yüksek kalıcı deformasyonlar ve daha düşük esneklik modülü sınırları oluşturduğunu ve bunun özellikle %71 ve %83 optimum su muhtevalarının daha yüksek su içeriğinde oluştuğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.6. RCA'nın esneklik modülünün belirlenmesi (Arulrajah vd., 2012a)

Arulrajah vd. (2012b) yaptıkları çalışmada yol alttemel uygulamaları için kırmataş (CR) ve geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ile karıştırıldığında kırılmış tuğlanın (CB) özellikleri üzerine bir dizi laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma, dane büyüklüğü dağılımı, dane yoğunluğu, modifiye Proktor deneyi, su emme deneyi, CBR, Los Angeles aşınma deneyi, tekrarlı yük üç eksenli deneyleri, pH ve organik içerik testlerini içermektedir. %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 CB, kırmataş veya RCA ile karıştırılmış ve laboratuvar testleri bu karışımlara uygulanmıştır. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş beton agrega ve kırmataşın %25 CB'ye kadar yol alttemel uygulamalarında güvenle karıştırılabilir olduğunu göstermiştir. Tekrarlı yük üç eksenli sonucu, CB içeriğinin, kalıcı deformasyon ve esneklik modülü ile ilgili mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin, kuru yoğunluk ve su muhtevası üzerindeki etkilere kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir.

Arulrajah vd. (2012c) çalışmalarında atık kazı kayalarının geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir ve sonuçları yerel karayolu şartnamelerine göre karşılaştırmışlardır. Atık kazı kayası olarak yüzey kazısından elde edilen bazalt kayasını kullanmışlardır. Malzemenin mühendislik özelliklerini belirlemek için elek analizi, modifiye Proktor deneyi, dane yoğunluğu, su emme deneyi, CBR, Los Angeles aşınma deneyi, pH, organik madde içeriğinin tayini, statik ve tekrarlı üç eksenli deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda kırılmış bazalt atık kayanın aşınmaya karşı dirençli, yassılık indeksi olarak şartnameye uyduğunu belirtmişlerdir. Tekrarlı yük üç eksenli basınç deneyinde numunelere 50 kPa yanıl basınç ve 150 kPa, 250 kPa ve 350 kPa deviator gerilmeler uygulamışlar ve 10.000 devir yapacak şekilde deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucunda Şekil 2.7'de gösterilen esneklik modülü değerlerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yük üç eksenli basınç deneyi sonucunda kırılmış bazalt atık kayasının uygulamada tatmin edici bir şekilde çalışacağını ifade etmişlerdir. Atık kazı kayasının %98 maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ve %67-71 su muhtevalarında iyi bir performans gösterdiğini belirlemişlerdir. Ancak atık kazı kayasının su içeriğine karşı duyarlılık gösterdiğini ve %84 optimum su muhtevasında yüksek kalıcı deformasyon ve daha düşük esneklik modülüne sahip olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucu olarak kırılmış bazalt atık kayasının yol alttemel malzemesi olarak kullanılmasının yerel karayolu şartnamelerine uygun olduğunu ama başka bir yerden alınacak atık kaya malzemesinin yol alttemel malzemesi olarak kullanılacaksa benzer araştırma ve testlerin gerek olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.7. Bazalt atık kayasının esneklik modülü ve kalıcı deformasyonu (Arulrajah vd., 2012c)

Barbudo vd. (2012) çalışmalarında çok çeşitli ticari olarak elde edilebilen agregaları kullanmışlardır. Kullandıkları agregaların %13'ü doğal malzemeler, %13'ü geri dönüştürülmüş beton agregaları ve %74'ü geri dönüştürülmüş karışık agregalardan oluşmaktadır. Bu agregaların çoğunluğu Akdeniz bölgesinden çok miktarda elde edilen karışık (beton, duvar) geri dönüştürülmüş agregalardır. Bu nedenle karışık geri dönüştürülmüş agregaların farklı bileşenleri için yollarda olası uygulamalarının mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Bu

amaçla 31 tip agrega (4 doğal ve 11 farklı dönüşüm tesisinden 27 geri dönüştürülmüş agrega) üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bütün agregalar üzerinde mekanik davranış deneyleri (Los Angeles aşınma deneyi, CBR ve modifiye Proktor deneyi) gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları istatistiksel olarak analiz etmişlerdir ve sonuçlarını paylaşmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre geri dönüştürülmüş agregalar arasında geri dönüştürülmüş beton agregaların aşınmaya karşı daha fazla direnç gösterdiğini ifade etmişlerdir. Çalışmaları, çözünür sülfat içeriğinin hem su hem de asit testlerinde geri dönüştürülmüş agregalardaki alçı ve kırılmış tuğla oranından önemli bir şekilde etkilendiğini göstermiştir. Doğal agregalar, geri dönüştürülmüş agregalara göre daha düşük Los Angeles katsayısı, modifiye Proktor ile birlikte düşük su muhtevası ve yüksek kuru birim hacim ağırlığı göstermiştir. Araştırmacılara göre %25'den az duvar işlenmiş agregalar, karayolu alttemellerinde kullanılabilir. Dahası, karışık geri dönüştürülmüş agregalar ve seramikler, özellikle CBR indeksi ile ölçülen yüksek taşıma kapasitesine sahip olduklarından, düşük trafikli yollarda kullanım için iyi bir mekanik performans göstermiştir.

Cerni vd. (2012) yaptıkları çalışmada inşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen malzemenin yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında tekrarlı üç eksenli yükleme altında inşaat ve yıkıntı atığı malzeme karışımının kalıcı deformasyon davranışını araştırmışlar ayrıca referans malzeme olarak seçtikleri iki doğal granül malzeme karışımı ile karşılaştırmışlardır. Bunun yanı sıra malzemelerin uzun süreli kalıcı deformasyon birikiminin belirlenmesi için bir analitik model kullanmışlardır. Agregalar üzerinde hem optimum hem de doygun su muhtevalarında tekrarlı üç eksenli deneyler yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda inşaat ve yıkıntı atığı malzemesinin yerel şartnamelere göre Los Angeles aşınma sonucu hariç genel fiziksel özelliklerinin yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması için uygun olduğunu belirlemişlerdir. Sonuçlar ile, modelin malzemelerinin farklı yapılarına bağlı olarak mekanik davranıştaki değişimi öngörme yeteneğini göstermesinin yanı sıra inşaat ve yıkıntı atık karışımının geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında belirli gerilme ve su muhtevalarında nasıl daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

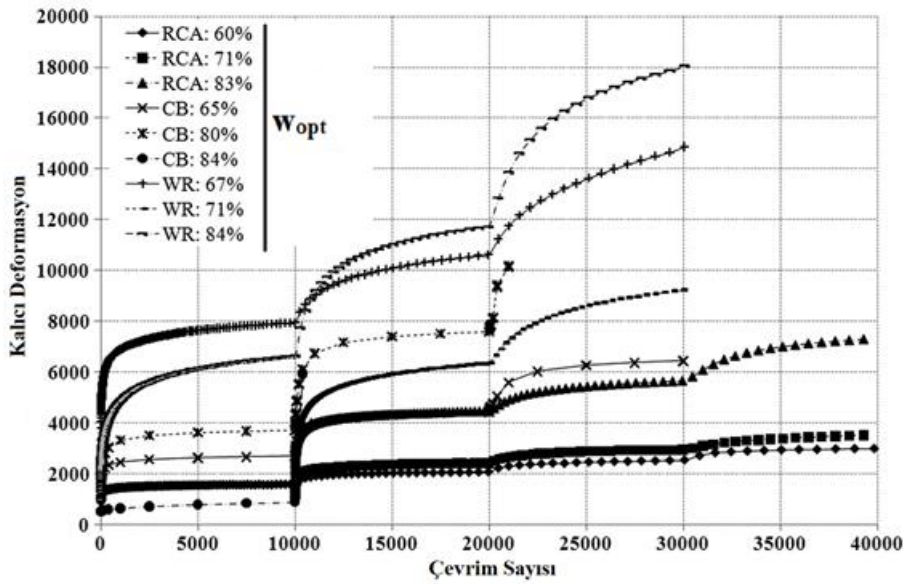
Gabr ve Cameron (2012) kırılmış beton veya geri dönüştürülmüş beton agreganın (RCA) yol temel ve alttemel dolgularında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında üç farklı çeşit temel malzemesi kullanmışlardır. Bu malzemelerden ikisi geri dönüştürülmüş beton agrega, diğeri ise doğal agrega (kuvarsit) olarak kullandıkları malzemedir. Bu

malzemelerin üzerinde genel mühendislik özelliklerini belirlemek için geleneksel laboratuvar deneyleri ve tekrarlı üç eksenli deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca malzemenin esneklik modülü ve kalıcı deformasyonlarını bulmak için farklı su muhtevalarında deneylerini yapmışlardır. Sonuç olarak beton agrega malzemesinin kalıcı deformasyonunun su muhtevasına bağlı olarak değiştiğini ve bu malzemenin hem esneklik hem de kalıcı deformasyonun bölgesel standartlara göre kabul edilebilir olduğunu ayrıca doğal agregaya göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

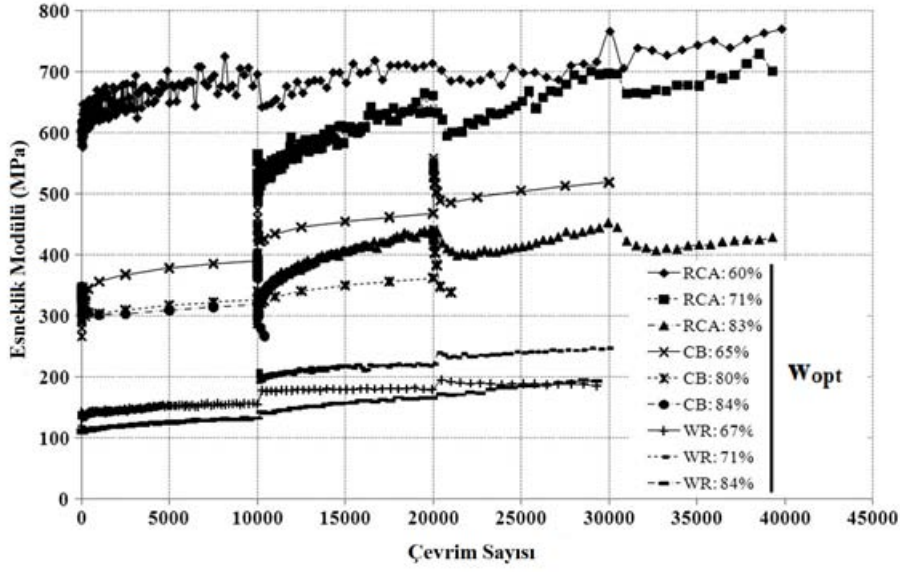
Jimenez vd. (2012) yaptıkları çalışmada İspanya'nın güneyinde yer alan Cordoba kentinde geri dönüştürülmüş agregaların saha koşullarında performansını değerlendirebilmek için asfalt bulunmayan 100 m uzunluğunda ve 2 bölüm olacak şekilde kırsal alanda yer alan bir deney yolu inşa etmişlerdir. Bölümleri taban zemini ve iki yapısal katman olacak şekilde oluşturmuşlardır. 1. bölümde temel malzemesi olarak 20 cm kalınlığında karışık geri dönüştürülmüş agrega ve yüzey tabakası için 15 cm kalınlığında geri dönüştürülmüş beton agregası kullanmışlardır. 2. bölümde ise geri dönüştürülmüş agregalara referans olarak kırma kireçtaşı agregası kullanmışlardır. Oluşturdukları yol için kullanılacak malzemelerin özelliklerini daha önce yaptıkları laboratuvar deneyleri ile belirleyerek, deney sonuçlarını İspanya teknik şartnamesine göre değerlendirmişlerdir. Saha alanında ise yaptıkları sıkıştırma kontrolü sonucunda, malzemelerin doğru bir şekilde sıkıştırıldığını belirlemişlerdir. Ayrıca dolgu katmanlarının her birinin taşıma gücü ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Tabakaların yapısal performansını düşen ağırlık deflektometresi kullanılarak belirlemişlerdir. Buna ek olarak uluslararası yol yüzey düzgünlüğü endeksinde ve taşıma gücünde zaman içinde meydana gelen değişiklikleri incelemişlerdir. Sonuç olarak geri dönüştürülmüş agregaların asfaltsız kırsal yol yapımında çevresel etki riski olmaksızın doğal agregalara alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Arulrajah vd. (2013a) yaptıkları çalışmada beş ana inşaat ve yıkıntı atıklarının bunlar; geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA), kırma tuğla (CB), atık kaya (WR), geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) ve geri dönüştürülmüş ince cam atığı (FRG) geoteknik özelliklerini, bağlayıcısız yol alttemel dolgularında kullanımlarını ele almak üzere kapsamlı bir dizi geoteknik laboratuvar deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca bu malzemelerin çevresel etki özelliklerinin uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Yaptıkları geoteknik laboratuvar deneyleri; dane büyüklüğü dağılımı, dane yoğunluğu, su emme deneyi, sıkıştırma, Los Angeles aşınma deneyi, sıkıştırma sonrası elek analizi, yassılık indeksi deneyi, hidrolik iletkenlik deneyi

ve CBR deneyleridir. Ayrıca malzemelerin kayma mukavemeti özelliklerini bir dizi üç eksenli deney yardımıyla incelemişlerdir. Atık malzemelerin çevresel etkilerini değerlendirebilmek için pH değeri, organik içeriği ve sızıntı suyu konsantrasyonu analizlerini yapmışlardır. Geri dönüştürülmüş malzemeler üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deneylerden, geri dönüştürülmüş FRG ve RAP hariç, 41 kPa ile 46 kPa arasında değişen drenajlı kohezyona ve 49° ile 51° arasında değişen bir içsel sürtünme açısına sahip olduğunu göstermiştir. FRG atık malzemesinin drenajlı kohezyonununun 0 kPa, RAP atık malzemesinin drenajlı kohezyonununun 53 kPa olduğunu ve bu iki malzemenin içsel sürtünme açısını 37° olduğunu belirtmişlerdir. Tekrarlı üç eksenli deney sonuçları RCA, WR ve CB'nin maksimum kuru yoğunluğunun %98 olduğunu ve optimum su muhtevasının %70'inde yol alttemellerinde kullanmak için iyi sonuçlar elde edildiğini ancak su muhtevası arttıkça kalıcı deformasyonların arttığı esneklik modülünün ise azaldığını belirtmişlerdir. Bu durum Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Çevresel deneyler olarak ise pH, organik içerik, bir dizi kirletici bileşen için malzemenin toplam ve sızıntı suyu konsantrasyonunu bulmuşlar ve bu deneylerin sonucunda testlerde kullanılan inşaat ve yıkıntı atıklarının alttemel dolgularında güvenle kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Yapılan bu deneylerin sonucunda yol alttemel kullanımı açısından RCA ve WR'nin geoteknik mühendislik özelliklerinin tipik taş ocağı alttemel malzemelerine eşdeğer veya üstün olduğunu bulmuşlardır. Optimum su muhtevasının %70'inin daha düşük hedef su muhtevastaki CB'nin tipik granüler alttemel malzemelerine benzer özellikler gösterdiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.8. İnşaat ve yıkıntı atıklarının kalıcı deformasyon davranışı (Arulrajah vd., 2013a)



Şekil 2.9. İnşaat ve yıkıntı atıklarının esneklik modülü ile çevrim sayısı arasındaki ilişki (Arulrajah vd., 2013a)

Arulrajah vd. (2013b) üç ana geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atığı malzemesinde, çeşitli su muhtevalarında ve gerilme seviyelerinde kapsamlı tekrarlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirerek sonuçları yol alttemel performansını belirlemek için analizini gerçekleştirmişlerdir. Üç ana geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atığı malzemesi olarak; maksimum dane boyutu 20 mm olan geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA), kırılmış tuğla (CB) ve atık kaya (WR) kullanmışlardır. Tekrarlı üç eksenli basınç deneyleri için 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde numuneler hazırlamışlardır. Tekrarlanan yükleme ile ortaya çıkan kalıcı deformasyonun gelişimi ve esneklik modülünün belirlenmesi deneylerini iki fazda gerçekleştirmişlerdir. Kalıcı deformasyonların tespitinin yapıldığı fazda, WR için farklı yükleme aşamaları (150 kPa, 250kPa, 350kPa deviator gerilme) kullanmışlardır. WR'nin 350 kPa deviator gerilme altında ve 50 kPa çevre basıncında hızlı bir şekilde başarısız olduğunu belirtmişlerdir. Aynı şekilde RCA için dört farklı yükleme aşaması (150 kPa, 250 kPa, 350 kPa ve 450 kPa deviator gerilme) uygulamışlar ve RCA'nın 450 kPa deviator gerilme ve 50 kPa çevresel basıncı taşıyabileceğini ifade etmişlerdir. Esneklik modülü test aşamasında ise 20 ile 150 kPa arasında çevresel basınç ve 100 ile 600 kPa arasında ise deviator gerilme uygulanarak 50 tekrarlı 66 yükleme aşaması gerçekleştirmişlerdir. Deney çalışmalarının sonucunda CB, RCA ve WR'nin optimum su muhtevasının %70 hedef su içeriği etrafında tatmin edici bir şekilde performans gösterdiğini ve daha yüksek su muhtevalarında bu malzemelerin mukavemetinin azalacağını ve muhtemelen başarısız olacaklarını belirtmişlerdir. Ayrıca geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin doğal granüler alttemel malzemelerine

göre daha az kalıcı deformasyon gösterdiğini ve çok daha yüksek esneklik modülü ürettiğini ifade etmişlerdir.

Arulrajah vd. (2014) geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atık malzemelerinin yol dolgularında kullanılabilmesi için fiziksel ve kayma mukavemeti özelliklerini Los Angeles aşınma deneyi, CBR, serbest basınç deneyi, direk kesme ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deneylerini kullanarak bulmuşlar ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Araştırmada çok çeşitli inşaat ve yıkıntı atığı kullanmışlardır. Bunlar; geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA), geri dönüştürülmüş kırılmış tuğla (CB), atık kaya (WR), geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP), geri dönüştürülmüş ince cam atığı (FRG) ve geri dönüştürülmüş orta cam atığı (MRG) olarak gruplandırılmıştır. Deneylerinde maksimum dane çapı 20 mm olan RCA, CB, WR ve RAP malzemeleri için büyük ölçekli kesme kutusu (305 mm x 305 mm x 205 mm) deney aleti kullanmışlardır. Çalışmalarında geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı malzemelerinin kesme mukavemeti tepkilerini iki gruba ayırmışlardır. Birinci grupta RCA, WR, CB malzemelerinin, maksimum dilatasyon oranında pik kesme mukavemeti değeri gösterdiği sonrasında artan yatay deformasyonlarda kesme mukavemetinin düştüğünü belirtmişlerdir. RAP, FRG ve MRG'nin ise dilatasyonu ortak pekleşme malzemeleri olduğunu ve nispeten daha yüksek dilatasyon bile olsa pekleşme davranışı sergilediğini belirtmişlerdir. Özellikle RCA, CB ve WR malzemelerinin yol temel ve alttemel uygulamalarındaki agregalar için fiziksel özelliklerini kayma mukavemeti değerlerinde gereksinimleri karşıladıklarını ifade etmişlerdir.

Ayan vd. (2014) yaptıkları çalışmada yol alttemel malzeme karışımlarında, geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) malzemelerinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kullanılabilirliğini karşılaştırabilmek için doğal agrega olarak kalker kullanmışlar ve bu üç malzeme üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında değişik oranlarda RCA, RAP ve doğal agrega kullanmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda %100 geri dönüştürülmüş agrega kullandıklarında doğal agregaya kıyasla optimum su muhtevasının arttığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca alttemel malzemesi olarak %100 RCA kullanıldığında CBR değerleri %100 doğal agrega içeren alttemel karışımlarından daha düşük değerde olduğunu belirtmişlerdir ve çalıştıkları oranlarda en düşük CBR değerini %50 RAP ile birlikte %50 RCA içeren karışımda elde etmişlerdir.

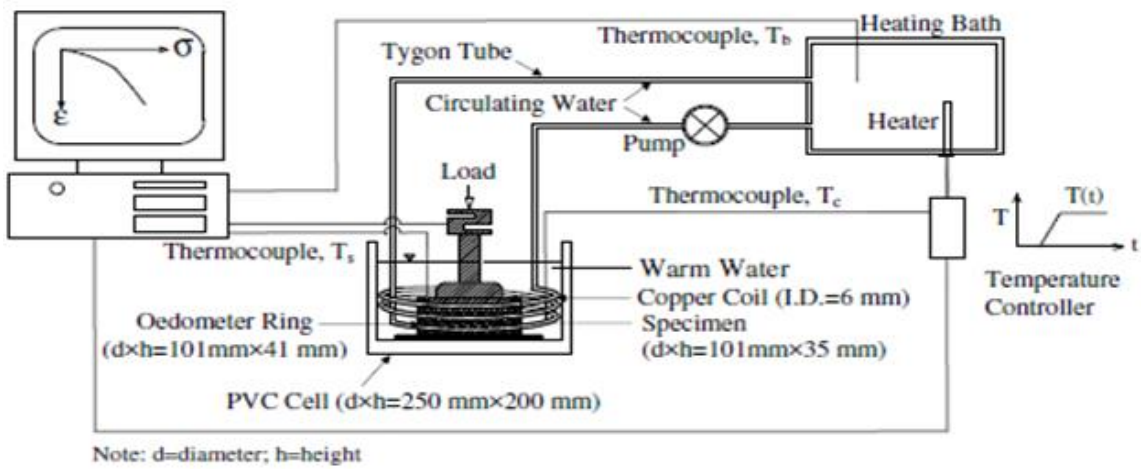
Disfani vd. (2014) yaptıkları çalışmada %3 çimento ile iyileştirilmiş geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve kırılmış tuğla (CB) üzerinde laboratuvar deneyleri (pH, plastisite indisi,

yabancı madde içeriği, elek analizi, CBR, modifiye Proktor deneyi), tekrarlı üç eksenli basınç deneyi, serbest basınç deneyi ve kiriş eğilme deneyi yapmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda, serbest basınç deneyinde 7 günlük kür süresinin minimum gereksinimleri karşıladığını eğer 28 günlük bir kür yapılırsa dayanımı büyük ölçüde artırdığını bulmuşlardır. Kiriş eğilme deneylerinden elde ettikleri sonuçlar geçmişte çimento ile karıştırılan taş ocağı kırma taşı ile yapılan çalışmalarla tutarlı olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda %3 çimento ile iyileştirilmiş %50'ye kadar kırılmış tuğla bulunduran inşaat ve yıkıntı atığı malzemesinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin yerel karayolu standartlarına uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Mohammadinia vd. (2015) çimento ile iyileştirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin mühendislik özelliklerinin, yol temel ve alttemel uygulamalarındaki performansını değerlendirmek için çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda inşaat ve yıkıntı atığı olarak geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP), geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve kırılmış tuğla (CB) kullanmışlardır. Kür süresinin inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin mukavemetine etkisini incelemek amacıyla, serbest basınç mukavemet deneyleri ve tekrarlı üç eksenli basınç deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Serbest basınç mukavemeti sonuçlarına göre yerel karayolu şartnamesini yerine getirmek için RAP'ın ağırlıkça %2 çimento ve 7 gün kür süresi olması gerektiği, RCA ve CB'nin ise ağırlıkça %4 çimento ve 28 gün kür süresinin olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca RAP'ın aynı çimento içeriğinde ve aynı kür süresinde tüm durumlarda RCA ve CB'den fazla mukavemete sahip olduğunu ve RCA'nın ise CB'den daha mukavemetli olduğunu ifade etmişlerdir. Tekrarlı üç eksenli basınç deneyleri sonucunda ise inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin esneklik modülünün çimento iyileştirmesi ile geliştiğinin ve çevre basıncının arttıkça esneklik modülünün çimento iyileştirmesi ile geliştiğinin ve çevre basıncının arttıkça esneklik modülünün arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda çimento ile iyileştirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin yol temel ve alttemel uygulamaları için alternatif malzemeler olduğunu belirtmişlerdir.

Soleimanbeigi ve Edil (2015) yaptıkları çalışmada dökümhane cürufu (FSG), taban külü (BA), dökümhane kumu (FSD), geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA), geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesi (RPM) ve geri dönüştürülmüş asfalt şingil (RAS) dahil olmak üzere geri dönüştürülmüş malzemelerin sıkıştırılabilirliğini buzul ovası kumu (GOS) ile karıştırarak Şekil 2.10'da gösterilen sıcaklık kontrollü bir boyutlu sıkıştırma hücresi ile bir boyutlu sıkıştırma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deney sonucunda RCA dışındaki geri

dönüştürülmüş tüm malzemeler sıkıştırılmış GOS'a göre daha yüksek sıkıştırma kabiliyeti sergilediğini gözlemişlerdir. RAP, RPM, RAS, GOS ve RAS-FA karışımlarını içeren bitümlü geri dönüştürülmüş malzemeler, BA, FSG ve FSD içeren bitüm içermeyen geri dönüştürülmüş malzemelere göre daha sıkıştırılabilir olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca BA ve FSG'nin sıkıştırılabilirliği dane kırılması ve yüzey aşınması, dane hasarına bağlı olduğunu, RAP ve RPM'nin sıkıştırılabilirliği dane temas yüzeylerinde asfalt bağlayıcı kaplamaların deforme olabilirliliğine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Sıkıştırmanın gerilme katsayısının, malzemenin içinde asfalt bağlayıcının yanı sıra artan dane parçalanmasının artmasıyla arttığını ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.10. Sıcaklık kontrollü bir boyutlu sıkıştırma hücresi (Soleimanbeigi ve Edil, 2015)

Jayakody vd. (2017) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş beton agregaların (RCA) içerisine karıştırarak RCA'nın özelliklerinde tutarsızlığa yol açabilecek ana malzemelerden birisi olan geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesinin (RAP) bağlayıcı bulunmayan bir kaplama tabakasının karakteristik özelliklerine etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla ağırlıkça farklı RAP yüzdeleri karıştırarak beş farklı RCA numunesi ve üç farklı deney serisi oluşturmuşlardır. Her numune üzerinde bir dizi standart laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneylerin sonuçlarını Avustralya'daki teknik şartnamede belirtilen granüler kaplama tabakası malzemesi özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda RCA'da %15'e kadar bileşen olarak RAP malzemesinin bulunması bağlayıcı bulunmayan kaplama malzemesi olarak kullanılacak olan RCA'nın fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varmışlardır.

Mohammadinia vd. (2017) yaptıkları çalışmada kırılmış tuğla (CB) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) yol alttemel ve temellerinde kullanılan bu geri dönüştürülmüş malzemelerin mukavemet özelliklerini geliştirmek için düşük karbonlu bir alternatif bağlayıcı olarak %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül (FA) ile stabilize etmişlerdir ve yerel yol şartname gereksinimleriyle karşılaştırmışlardır. Geoteknik deneylerde kullandıkları numuneleri 7 gün boyunca nem kontrollü bir şekilde kür yapmışlar ve daha sonra testlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca sıcaklıkla kürleşmenin stabilize edilmiş numunelerin mukavemet gelişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Geoteknik araştırmaların sonuçları CB ve RAP'ın esneklik modülü ve serbest basınç mukavemetlerinde önemli bir artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. CB ve RAP temel ve alttemel malzemeleri olarak kullanım için uygun bulunmuştur. Bu yüzden mukavemet ve dayanımları FA stabilizasyonu ile artmıştır. Stabilize CB ve RAP agregalarının serbest basınç mukavemeti ve esneklik modülü gelişimi, oda sıcaklığında ve 40°C'lik yüksek sıcaklıklarda incelemiştir. Atomik silika içeriğinin analizi, silika ve alümina kristalin miktarı arttığında, zemin yapı matrisinin bozulduğunu ve mukavemet azalmasına yol açtığını ifade etmişlerdir. FA'nın stabilize edilmiş CB ve RAP agregalarının serbest basınç mukavemeti ve esneklik modülü deneylerinin sonuçları ile, FA'nın geri dönüştürülmüş CB ve RAP'ın dengelenmesi için uygun bir bağlayıcı olduğunu göstermişlerdir. %15 FA ile stabilize edilmiş CB ve RAP hem oda sıcaklığında hem de 40°C'de en yüksek serbest basınç mukavemetini gösterdiğini sonuçlarında göstermişlerdir. Ayrıca daha yüksek sıcaklıkta iyileşmenin daha yüksek mukavemetle sonuçlandığını bulmuşlardır.

Edil (2018) yaptığı çalışmada karayolu inşaatı için temel tabakası olarak, Şekil 2.11'de gösterilen geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) ve geri dönüştürülmüş beton agreganın (RCA) kullanımını kapsamlı deneyler yaparak incelemiştir. Bunun için ABD'nin sekiz eyaletinden toplamda on beş geri dönüşüm malzemesi toplamıştır. Ayrıca şartnamelerine göre geleneksel temel tabakası malzemesini karşılaştırma için kullanmıştır. Malzemeler üzerinde dane boyutu dağılımı, ince dane içeriği, RAP için asfalt içeriği, RCA için harç içeriği, özgül ağırlık deneyi, su emme deneyi gibi deneylerin yanı sıra modifiye Proktor deneyi, esneklik modülü ve büyük ölçekli model deneylerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca RAP ve RCA'nın mekanik özelliklerinin farklı iklim koşullarında değerlendirmesini yaparak donma-çözülme döngüsünün esneklik modülü üzerindeki etkilerini, ıslak-kuru döngünün dane bozulması üzerine etkilerini ve sıcaklığın esneklik modülü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmanın sonucu olarak RCA ve RAP'ın rijitlik, donma-çözülme ve ıslak-kuru dayanıklılık, sağlamlık açısından doğal agregalara eşit veya üstün performans gösterdiklerini belirtmiştir. RCA ve

RAP'ın bağlayıcısız temel tabakaları uygulamaları için uygun bir malzeme olabileceğini göstermiştir. Buna ek olarak geri dönüşüm malzemelerinin akıllıca kullanılması daha uzun ömürlü yapılar ve maliyette azalma olabileceğini ancak RAP'ın sıcaklık hassasiyeti ve RCA'nın sızıntı suyunun yüksek pH'ı gibi spesifik özelliklerin dikkate alınmasının gerektiğini belirtmiştir.



Şekil 2.11. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) ve geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) (Edil, 2018)

İnşaat ve yıkıntı atıkları ile ilgili literatür incelendiğinde inşaat ve yıkıntı atığı malzemesi olarak genellikle beton agregası (RCA), kırılmış tuğla (CB) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) kullanıldığı görülmüştür. Çalışmalarda bu malzemeler tek başlarına veya birbirleriyle belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin çalışmalarda hangi oranlarda kullanıldıkları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu malzemelerin yanı sıra ayrıca bazı çalışmalarda uçucu küller, cam, mermer gibi malzemelerde kullanılarak literatürde bu malzemelerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

İnşaat ve yıkıntı atıkları ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında genel olarak atık malzemelerinin karayolu temel/alttemel tabaklarında kullanımının incelenmesi yerel karayolu şartnameleri ile karşılaştırılarak açıklanmaya çalışılmıştır. Bu nedenle malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bunun için geleneksel laboratuvar deneylerinin yanı sıra esneklik modülü deneyi, statik ve tekrarlı üç eksenli deneyi, büyük ölçekli kesme kutusu deneyi gibi deneylerde kullanılmıştır. Çizelge 2.1'de çalışmaların fiziksel özellik deney sonuçları verilmiştir. Çizelge 2.2'de ise çalışmaların mekanik özellik deney sonuçları ve Çizelge 2.3'de ise çalışmalarda elde edilen esneklik modülü sonuçları verilmiştir. Çalışmalarda inşaat ve yıkıntı atıkları ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler incelenmiş, şartnameler ile

karşılaştırılarak inşaat ve yıkıntı atıklarının özellikle karayolu temel/alttemel malzemesi olarak doğal agrega çok iyi bir alternatif olabileceği görülmüştür.

Çizelge 2.1. Geçmiş çalışmaların malzeme oranları ve fiziksel özellikleri

Geçmişte Yapılan Çalışmalar	No	Malzeme Oranları			Fiziksel Özellikler					
		RCA (%)	CB (%)	RAP (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	γ_s (kN/m ³)	Aşınma (%)	Su Emme (%)	Yassılık İndeksi
Arulrajah vd. (2011)		-	100	-	19,82	10,7	26,19 ^k -25,8 ⁱ	36	6,15 ^k -6,87 ⁱ	14
Arulrajah vd. (2012a)		100	-	-	19,6	12	27,6 ^k -26,5 ⁱ	28	4,66 ^k -9,75 ⁱ	11
Arulrajah vd. (2012b)	1	0	100	-	20,2	10,7	26,7 ^k -26,3 ⁱ	36	6,15 ^k -6,87 ⁱ	14
	2	50	50	-	19,9	11	26,9 ^k -26,3 ⁱ	33	5,36 ^k -8,03 ⁱ	14
	3	60	40	-	19,9	11,5	26,8 ^k -25,9 ⁱ	32	5,91 ^k -8,69 ⁱ	13
	4	70	30	-	19,5	12,5	26,7 ^k -26,5 ⁱ	30	5,56 ^k -7,97 ⁱ	13
	5	75	25	-	19,4	12	27,1 ^k -24,3 ⁱ	28	5,32 ^k -6,90 ⁱ	13
	6	80	20	-	19,5	11,7	27,0 ^k -26,0 ⁱ	30	5,33 ^k -7,50 ⁱ	11
	7	85	15	-	19,9	11,7	27,1 ^k -24,1 ⁱ	31	5,43 ^k -8,70 ⁱ	12
	8	90	10	-	19,5	12	24,7 ^k -26,7 ⁱ	32	5,69 ^k -8,98 ⁱ	11
	9	100	-	-	19,6	12	27,6 ^k -26,5 ⁱ	28	4,66 ^k -9,75 ⁱ	11
Jimenez vd. (2012)		100	-	-	18,4	11,6	-	34	6,7 ^k -8,8 ⁱ	8
Arulrajah vd. (2013a)	1	100	-	-	19,13	11	27,1 ^k -26,0 ⁱ	28	4,7 ^k -9,8 ⁱ	11
	2	-	100	-	19,73	11,2	26,2 ^k -25,8 ⁱ	36	6,2 ^k -6,9 ⁱ	14
	3	-	-	100	19,98	8	23,5 ^k -23,4 ⁱ	42	2,2 ^k -2,4 ⁱ	23

Çizelge 2.1. Geçmiş çalışmaların malzeme oranları ve fiziksel özellikleri (devam)

Arulrajah vd. (2014)	1	100	-	-	19,6	12	27,1 ^k - 26,0 ⁱ	28	4,7 ^k - 9,8 ⁱ	-
	2	-	100	-	20,2	10,7	26,2 ^k - 25,8 ⁱ	36	6,2 ^k - 6,9 ⁱ	-
	3	-	-	100	20	8,1	23,5 ^k - 23,4 ⁱ	42	2,2 ^k - 2,4 ⁱ	-
Ayan vd. (2014)	1	100	-	-	18,4	13,71	-	-	-	-
	2	50	50	-	18,9	10,53	-	-	-	-
Disfani vd. (2014)		100	-	-	20,38	11,75	-	28	-	-
Gabr ve Cameron (2012)	1	100	-	-	19,2	11,5	26	39	8,9	-
	2	100	-	-	19,9	11	25,5	37	5,5	-
Mohammadinia vd. (2015)	1	100	-	-	19,6	12,49	26,9 ^k - 26,5 ⁱ	30,8	6,05 ^k - 13,6 ⁱ	16,44
	2	-	100	-	19,9	11,38	26,8 ^k - 26,4 ⁱ	35,47	7,02 ^k - 10,6 ⁱ	25,9
	3	-	-	100	20,6	6,59	26,4 ^k - 25,2 ⁱ	20,81	3,47 ^k - 5,22 ⁱ	10,63
Poon ve Chan (2006)	1	100	-	-	20,2	11,8	-	-	-	-
	2	75	25	-	19,7	12,7	-	-	-	-
	3	50	50	-	18,2	16	-	-	-	-
Jayakody vd. (2017)		100	-	-	17,3	9,4	-	-	6,5 ^k - 7,35 ⁱ	11
Edil (2018)	1	100	-	-	19,4- 20,9	8,7- 11,8	22,0- 24,0	-	5,5- 6,9	-
	2	-	-	100	19,4- 21,5	5,2- 8,8	23,4- 25,7	-	0,6- 3,0	-

^k: İri Dane, ⁱ: İnce Dane

Çizelge 2.2. Geçmiş çalışmalarda mekanik özellikler

Geçmişte Yapılan Çalışmalar	No	Üç Eksenli Deneç			CBR Deneç	Serbest Basınç Deneç
		c (kPa)	ϕ (°)	σ_3 (kPa)	CBR (%)	q_u (MPa)
Arulrajah vd. (2011)		41,1	48,8	50-100-200	123-138	-
Arulrajah vd. (2012a)		45	49	50-100-200	118-160	-
Arulrajah vd. (2012b)	1	41	49	50-100-200	123-138	-
	2	51	49	50-100-200	103-131	-
	3	80	43	50-100-200	98-134	-
	4	49	49	50-100-200	117-190	-
	5	76	44	50-100-200	88-141	-
	6	59	45	50-100-200	104-177	-
	7	50	50	50-100-200	132-169	-
	8	53	47	50-100-200	97-177	-
	9	45	49	50-100-200	118-160	-
Arulrajah vd. (2013a)	1	44	49	50-100-200	118-160	-
	2	41	48	50-100-200	123-138	-
	3	53	37	50-100-200	30-35	-
Arulrajah vd. (2014)	1	0	47	50-100-200	118-160	0,310-0,378
	2	0	49	50-100-200	123-138	0,086-0,130
	3	0	43	50-100-200	30-35	0,100-0,117
Ayan vd. (2014)	1	-	-	-	47	-
	2	-	-	-	29	-
Disfani vd. (2014)		-	-	-	505*	4 ^{7g} -5,35 ^{28g}
Gabr ve Cameron (2012)	1	-	-	-	-	0,69 ^{28g} -0,88 ^{28g}

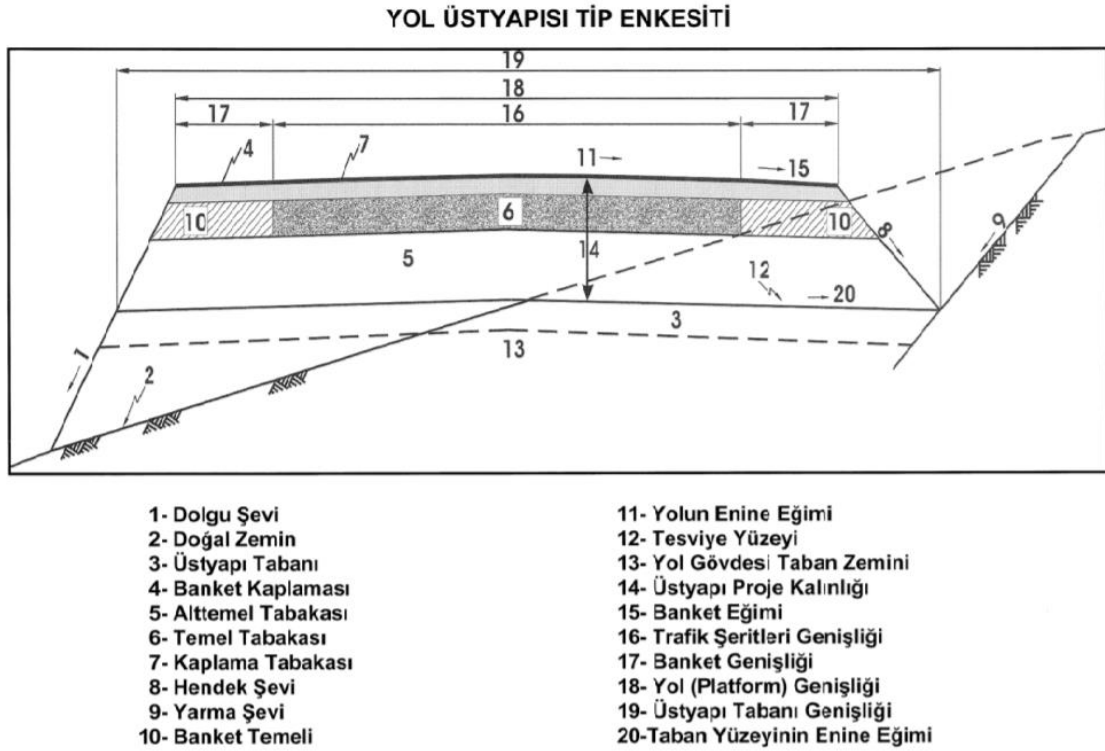
^{7g}: 7 günlük kür, ^{28g}:28 günlük kür, *: Çimento ile güçlendirilmiş

Çizelge 2.3. Geçmiş çalışmalarda kalıcı deformasyon ve esneklik modülü değerleri

Geçmişte Yapılan Çalışmalar	No	Kalıcı Deformasyon			Esneklik Modülü			Tekrar Sayısı, N	w (%) w _{opt}
		ϵ_p (microstrain)	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	M _R (MPa)	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)		
Arulrajah vd. (2011)		6445	50	150-350	280-519	50	150-350	30000	%65 w _{opt}
Arulrajah vd. (2012a)		2995	50	150-450	575-769	50	150-450	40000	%60 w _{opt}
Arulrajah vd. (2012b)	9	2995	50	150-350	769	50	150-350	30000	%60 w _{opt}
	8	4854	50	150-350	674	50	150-350	30000	%71 w _{opt}
	7	5577	50	150-350	474	50	150-350	30000	%74 w _{opt}
	6	2388	50	150-350	897	50	150-350	30000	%67 w _{opt}
	5	5111	50	150-350	883	50	150-350	30000	%70 w _{opt}
Disfani vd. (2014)		1180-1500	50	350-550	324,5-498,3	50	350-550	30000	%70 w _{opt}
Gabr ve Cameron (2012)	1	-	-	-	300-700	196	25-460	50000	%90- %60 w _{opt}
	2	-	-	-	490-1020	196	25-460	50000	%90- %60 w _{opt}

3. KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISI

Karayolu esnek üstyapısı: “Yolun, trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde taban yüzeyine dağıtmak üzere altyapı üzerine inşa olunan ve alttemel ile temel ve kaplama tabakalarından oluşan kısmı üstyapı olarak tanımlanır” (Yayla, 2004, s. 16). Şekil 3.1’de karayolu esnek üstyapısına ait tabakalar gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yol üstyapısı tip kesiti (KGM, 2006)

Karayollarında esnek üstyapı taşıtlar için sürüş konforu ve emniyetini sağlayabilecek ayrıca taşıtların oluşturduğu gerilmelere karşı yeterli stabiliteye sahip olacak şekilde farklı tabakalardan oluşur. Esnek üstyapıların sürüş konforu ve emniyeti aynı zamanda stabilitesi; sürüş konforu için pürüzsüz ve düzgün yüzeyli, emniyet için yeterince kayma direncine sahip, trafik yüklerinden en az şekilde etkilenecek yani gerekli mukavemete ve zeminin taşıma gücünü aşmayacak biçimde yayabilecek, trafik ve çevre koşullarının aşındırıcı etkilerinden en az biçimde etkilenecek, kaplama üzerindeki yüzeysel suların temel ve alttemel tabakalarına ulaştırmayacak şekilde geçirimsiz olması ile sağlanabilecektir (Tunç, 2007).

3.1. Taban Zemini

Taban zemini: “Yol üstyapısı ve banketlerin oturduğu altyapı zeminin üst yüzeyi olan tesviye yüzeyi altında kalan, yarma veya dolgularda üstyapının taşıma gücüne etkisi olabilecek bir derinliğe kadar (25~85 cm) devam eden tabakadır” (Kaya, 2014, s. 10). Taban zeminin taşıma gücü değeri üstyapıyı oluşturacak tabakaların kalınlıklarının belirlenmesi için kullanılan en önemli faktörlerden birisidir (Kaya, 2014).

Taban zemini kaplamaların temelini oluşturan ve tabakalar arasında en önemli tabakadır. Çünkü yol kaplamalarının performansı, ömrü ve bakım masrafları, vb. hususlara bağlı olduğu kadar üzerine oturduğu zeminin özelliklerine ve stabilitesine de bağlıdır. Taban zemini kaplamanın ve trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere emniyetle karşı koyabilmelidir. Çevre ve iklim koşullarından ötürü kabarma, büzülme, don kabarması, oturma, su içeriğinde ve benzeri zemin özelliklerinde değişimler, taşıma gücünde azalmalar, ilave gerilmeler gibi problemlerin oluşmaması veya oluşursa da kaplamada olumsuz etkiler yaratmaması gerekir (Tunç, 2007).

“Zemin değişik dane çapındaki mineral ve organik maddeleri içeren su – katı - gaz fazlarından oluşan, değişik orijinlere sahip, çeşitli kompozisyon ve özellikler arzeden, yer kürenin dış kabuğunu oluşturan ve kayaların fiziksel ve kimyasal etkilerle parçalanmasından meydana gelen malzemedir” (Tunç, 2007, s. 472). Yol üstyapısı inşa edilmeden önce yol güzergahındaki taban zeminin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yol güzergahındaki zemin uygun özelliklere sahip değilse; uygun özelliklere sahip olan zemin bulunarak taban zemini olarak kullanılmalıdır. Eğer uygun özelliklerde zemin getirilemiyorsa mevcut güzergahtaki zeminin iyileştirilmesinin yapılarak taban zemini olarak kullanılması sağlanmalıdır. Böylece yol üstyapısının stabilitesi sağlanmış olacaktır.

3.2. Alttemel Tabakası

Karayolları teknik şartnamesinde alttemel tabakası: “Üstyapı temel tabakasını taşımak üzere taban zemini üzerine yerleştirilen, belirli fiziksel özelliklere sahip granüler malzemeden oluşmuş üstyapı tabakasıdır” şeklinde tanımlanmaktadır (Karayolu Teknik Şartnamesi [KTŞ], 2013, s. 1).

Alttemel tabakası kaplama tabakasından gelen trafik yüklerinin taban üzerine yayılmasını sağlayarak temel tabakasına yardımcı olmanın yanı sıra, su ve don tesirlerine karşı

tampon bölge vazifesi de görmektedir. Ayrıca zeminlerin şişme ve büzülme gibi hacim değişimlerine kaşı koymak, kaplama altındaki gerekli drenajı sağlamak, kaplamanın taşıma gücünü artırmak vb. için inşa edilen tabakadır. Kaplamalarda en altta bulunan alttemel tabakası üst tabakalara göre daha az gerilme etkisi altında kalacağı için daha düşük kaliteli ancak drene olabilecek granüler malzemelerden inşa edilmektedir (Tunç, 2007; Yayla, 2004).

3.3. Temel Tabakası

Karayolları teknik şartnamesinde temel tabakası: “Kaplama tabakası ile ince tesviye yüzeyi veya alttemel tabakası arasında bağlantıyı, yük dağılımını ve düzgünlüğü sağlayan, yola gelen yükleri taşıyan ve alttemel veya yol tabanına aktaran tabakadır” şeklinde tanımlanmaktadır (KTŞ, 2013, s. 9). “Temel tabakası, kaplamaya ve banketlere temel teşkil etmek üzere granüler malzemelerden bağlayıcılı ve bağlayıcısız olarak farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar halinde yapılır” (Tunç, 2007, s. 6). Temel tabakası kaplamalar için hem drenajı hem de stabiliteyi sağlamak zorundadır. Böylece kaplamalarda oluşacak olan şişme, büzülme gibi sorunlara karşı koyulmaktadır. Karayollarında uygulanmakta olan üç farklı temel tabakası mevcuttur.

- Granüler Temel Tabakası (GT)
- Plent-Miks Temel Tabakası (PMT)
- Çimento Bağlayıcı Granüler Temel Tabakası (ÇBGT)

3.3.1. Granüler Temel Tabakası (GT)

Granüler temel tabakası, “belirli fiziksel özelliklere ve gradasyona sahip agreganın optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serildikten sonra silindirler (kompaktörler) ile maksimum kuru yoğunluğa kadar sıkıştırılması sonucu elde edilen stabil bir temel tabakasıdır” (Tunç, 2007, s. 127). Granüler temel tabakası diğer temel tabakalarına göre daha az stabil fakat daha ekonomik olarak imal edilebilmektedir. Granüler temel tabakasında ince ve kaba olmak üzere farklı boyutlarda ve oranlarda kırmataş, çakıl taşı veya cüruf kullanılabilir. Bu malzemelerin uygun oranlarda karıştırılarak belirli gradasyon limitlerinde kalınması sağlanmaktadır. Granüler temel tabakasının kalınlığı minimum 15 cm olmalıdır (Yar, 2019).

3.3.2. Plent -Miks Temel Tabakası (PMT)

Plent-miks temel, “belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelenmiş bir gradasyona sahip agreganın plentde optimum su içeriğinde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılması ile elde edilir” (Tunç, 2007, s. 128). Plent-miks temel tabakalarında en az iki ayrı agrega grubu kullanılır. Plent-miks temel tabakasında cüruf, kırılmış çakıl, kırmataş ve ince agrega kullanılabilir. Temelin kalınlığı minimum 15 cm olacak şekilde tasarlanır (Yar, 2019).

3.3.3. Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) Tabakası

Çimento bağlayıcı granüler temel, “belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelenmiş bir gradasyona sahip agregaya belirli oranda plentde çimento katılarak optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serildikten sonra yeterince sıkıştırılması ile elde edilir” (Tunç, 2007, s. 128). Çimento bağlayıcı granüler temel tabakasında, kırılmış çakıl, kırmataş ve cüruf gibi en az iki ayrı agrega grubu kullanılmalıdır. Çimento bağlayıcı granüler temel minimum 20 cm kalınlığında olmalıdır (Yar, 2019).

3.4. Kaplama Tabakası

Kaplama tabakası, “asfalt betonu, sathi kaplama, beton, parke vb. malzemeden oluşan ve kaymaya, trafiğin aşındırmasına ve iklim koşullarının ayrıştırma etkisine karşı koyan üstyapının en üst tabakasıdır” (KTŞ, 2013, s. 5). Kaplama tabakası taşıtlara sürüş konforu ve emniyeti sağlamak amacıyla aşınma ve binder olmak üzere iki farklı tabaka olarak temel tabakasının üzerine serilir (Tunç, 2007).

4. KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISINDA KULLANILAN MALZEMELER

Esnek üstyapı, kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan ve bu tabakalarının üzerinde oluşan trafik yüklerini taban zeminine dağıtmakla görevli olan yapıdır. Esnek üstyapı sadece agregalar kullanılarak veya hidrokarbonlu bağlayıcılar ile agregaların karıştırılıp serilmesiyle oluşturulmaktadır. Üstyapının tamamında değişik oranlarda bu malzemeler kullanılmaktadır ve üstyapının dayanıklılığı bu malzemelerin özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle üstyapıda kullanılacak malzemelerin özellikleri, malzemeler üzerinde yapılacak deneyler ve elde edilen sonuçların karayollarında kullanılıp kullanılmayacağına değerlendirilmesi şartnameler aracılığı ile yapılmaktadır.

4.1. Agregalar

Agrega, “belirli gradasyona ve kaliteye sahip kayaç parçaları, çakıl, kırmataş, kum vb. gibi mineral malzeme veya bunların karışımıdır” (KTŞ, 2013, s. 1).

Agregalar karayolu kaplamalarının yapımında en çok kullanılan malzemedir. Bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarının %100’ünde, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %90-%95’ini ve hacimce %80-%85’ini, beton kaplamaların ağırlıkça %70-%80’ini ve hacimce %60-75%’ini agregalar oluşturmaktadır. Bu nedenle yol kaplamalarının yapımında kullanılacak agreganın zayıf daneler içermeyen, basınç, aşınma ve kimyasal etkilere karşı mukavemetli ayrıca yassı ve boşluklu daneler içermeyen agregalar olması istenmektedir. Kullanılacak agrega özelliğindeki herhangi bir bozukluk karayolunda önemli etkilere yol açabilmektedir. Bu nedenle agreganın çok iyi tanımlanması ve karayolu yapımında uygun olup olmadığı belirlenmelidir (Tunç, 2007).

4.1.1. Agregaların Sınıflandırılması

Agregaların sınıflandırılması agreganın doğru bir şekilde tanımlanması ve bu tanımlamalara göre agregaların sınıflandırılarak daha doğru bir kullanımın sağlanması için yapılmaktadır.

Kökenlerine göre agregalar; doğal agregalar, yapay agregalar ve geri kazanılmış agregalar olmak üzere üç gruptan oluşmaktadır. Doğal agregalar; nehir, deniz, çöl, göl, dere yatakları ve taş ocakları gibi alanlardan elde edilirler. Doğal kayaçlardan kırılmamış veya kırılmış olarak elde edilen yoğun yapıya sahip olan doğal agregalar genellikle konkasörler

yardımıyla daha küçük boyutlara getirilmekte ve istenilen agrega boyutlarının sağlanması için eleme işlemi yapılmaktadır. Yapay agregalar; yüksek fırın cürufu taşı, izabe cürufu vb. sanayi ürünü olan kırılmamış veya kırılmış olarak bulunan yoğun yapılı agregalardır. Geri kazanılmış agregalar; önceden başka bir yapıda kullanılmış ve işlemde geçirilerek yeniden kullanıma kazandırılan agregalardır (Uçar, 2008).

Boyutlarına göre agregalar; kaba agregalar, ince agregalar ve filler olmak üzere üç gruptan oluşmaktadır. Kaba agregalar; 4 no'lu (4,75 mm) eleğin üzerinde kalan agregalardır. İnce agregalar; 4 no'lu elekten geçen 200 no'lu (0,075 mm) eleğin üzerinde kalan agregalardır. Filler; 200 no'lu elekten geçen taş tozu vb. malzemelerdir (Tunç, 2007).

Diğer bir sınıflandırma ise gradasyon sınıflandırmasıdır. Gradasyon agrega yığınının içerisindeki danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder. Karışımı oluşturacak agregalar farklı boyutlarda ve miktarlarda kullanılarak karışımın stabilitesi ve işlenebilirlik gibi özelliklerini belirler. Karışımın ideal bir şekilde oluşturulması için şartnamelerde maksimum dane boyutu ve farklı boyutlardaki agrega danelerinin ağırlıkça yüzdeleri belirli limitlerde tutularak verilmektedir. Agregalar gradasyon sınıflandırılması olarak dört farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlar; kesikli gradasyon, yoğun-sürekli gradasyon, boşluklu-sürekli gradasyon, tek boyutlu (üniform) gradasyondur. Kesikli gradasyon; belirli bir çapta agrega içermeyen gradasyon tipidir. Bu nedenle boşluk miktarı fazla olduğundan dolayı karayolu yapımında kullanılmaz. Yoğun-sürekli gradasyon; bu tip gradasyon en ince agrega danesinden en kaba agrega danesine kadar olan bütün agrega çaplarını içermektedir. Bundan dolayı minimum boşluğa sahiptir. Boşluklu-sürekli gradasyon; ince agrega danelerini içermedikleri için fazla boşluğa sahiptir. Tek boyutlu gradasyon; aynı agrega boyutlarından oluşan gradasyondur. Bu tip gradasyon düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır (Tunç, 2007).

Agregalar için diğer bir sınıflandırma yöntemi olan özgül ağırlık sınıflandırması ile kaba, ince ve filler agregaların özgül ağırlık değerleri saptanır. Bu değerler kullanılarak agrega hakkında bilgi edinilebilir ve ayrıca gradasyon oranlarının belirlenmesi yapılabilmektedir.

Agrega dane biçimlerinin sınıflandırılması iki boyutlu sınıflandırma ve üç boyutlu sınıflandırma olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. İki boyutlu sınıflandırmada agregalar; yuvarlak, yarı yuvarlak, yarı köşeli ve köşeli olarak ayrılmaktadır. Üç boyutlu sınıflandırmada ise agregalar; küresel, kübik, yassı ve ince uzun olarak ayrılmaktadır. Karayolu yapımında kullanılacak olan agrega danelerinin biçimlerinin köşeli olması istenmektedir.

Agrega danelerinin köşeli olması ile karışım içerisindeki agrega danelerinin birbirleriyle olan kenetlenme ve içsel sürtünme açılarının daha fazla olmaktadır (Tunç 2007).

Diğer bir agrega sınıflandırması ise yüzey yapısı sınıflandırmasıdır. Bu sınıflandırmaya göre agregalar; çok pürüzlü, pürüzlü, düzgün ve cilalı olarak ayrılmaktadır. Agregalarda pürüzlülük arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır. Ancak içsel sürtünme açısı, kayma mukavemeti ve kenetlenme artmaktadır (Tunç, 2007).

Agrega danelerin porozitesi, su emme yeteneğine sahip olan boşluk miktarıdır. Karışımda kullanılan agrega çok poroz ise stabilite düşmektedir. Ayrıca asfalt gibi malzemelerin daha fazla kullanılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle karışımda kullanılacak olan agregaların yeterli bir poroziteye sahip olması istenmektedir (Tunç, 2007).

4.1.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri karayolu kaplamalarının özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Agregaların stabilitesi, durabilitesi ve adezyonu bu özelliklerin değişmesinde doğrudan veya dolaylı olarak etki eder.

Agregaların stabilitesi, “trafik yüklerinden veya zeminin hacim değiştirmesinden dolayı oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak” tanımlanır (Tunç, 2007, s. 35). Kayma mukavemeti, CBR ve esneklik modülü ile stabilite belirlenmektedir. Agregaların diğer bir fiziksel özelliği durabilitesidir. Agregalar kırılma, aşınma ve parçalanma gibi etkilere karşı gösterdiği direnç durabilite olarak tanımlanmaktadır. Agregaların kırılması, sıkıştırma ve trafik yüklerinin etkisi ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle üst tabakalarda kullanılan agregaların alt tabakalara göre daha az kırılma göstermesi gerekmektedir. Aşınma ise tekrarlı yükler altında agrega danelerinin küçük parçalara ufalanmasıdır. Aşınma sonucunda malzeme boyutu küçüleceği için gradasyon bozulmaktadır. Agregaların diğer bir fiziksel özelliği ise parçalanmadır. Parçalanma, sıkıştırma veya trafik yüklerinin etkisinden daha çok fiziko-kimyasal etkilerle agreganın parçalanmasıdır. Parçalanma genellikle, agregaların su emmesi ve agreganın içerisindeki suyun donması ile hacim genişmesi sonucunda oluşan gerilmeler sonucunda parçalanması şeklinde olmaktadır (Tunç, 2007).

4.1.3. Temel ve Alttemel Tabakasında Kullanılan Malzemeler

Temel ve alttemel tabakaları kaplama tabakasının altında inşa edilen ve kaplama tabakasından gelen trafik yüklerini zemine yaymak, drenaj sağlamak, zemin etkilerine karşı koymak, don etkilerini önlemek vb. görevleri gerçekleştirmektedir. Temel ve alttemel tabakalarının görevlerini yerine getirebilmesi için, kullanılacak agregaların; yüksek dayanıklılığa, maksimum yoğunlukta sıkışmış, yüksek CBR ve içsel sürtünme açısına sahip, yoğun gradasyonlu, filler miktarı az ve non-plastik, kübik, köşeli şekilli ve pürüzlü yüzeye sahip, durabilitesi yüksek, don duyarlılığı düşük olması gerekmektedir (Tunç, 2007).

Alttemel yapımında kullanılacak malzeme; kum, çakıl, teras çakılı, ayrılmış, bozuşmuş kaya, cüruf, kırmataş, kazınmış asfalt ve benzeri malzemelerden tek tip veya kazınmış asfalt malzemesi kullanılması durumunda iki veya daha fazla malzemenin karışımından oluşacaktır. Alttemel malzemesi belirtilen şartlara uygun ve Çizelge 4.1’de verilen gradasyon limitleri dahilinde ve iyi derecelenmiş olacaktır (KTŞ, 2013).

Alttemel tabaka gradasyon limitleri Tip-A ve Tip-B’den oluşmaktadır. Alttemel malzemesi olarak kullanılacak agregalar, kum-çakıl ocaklarından sağlandığında, tüvenan malzemenin gradasyonu Tip-A gradasyon limitlerine uygun olacaktır. Eğer malzemenin gradasyonu Tip-A limitlerine uymuyorsa malzemeler elenerek gradasyonun ayarlanması gerekmektedir. Alttemel malzemesi olarak kullanılacak agregaların kum-çakıl veya taş ocaklarından kırılarak hazırlanması durumunda malzemenin gradasyonu Tip-B gradasyon limitlerine uygun olacaktır. Eğer malzeme kum-çakıl ocağından kırılarak hazırlanıyorsa 4,75 mm elek üzerinde kalan kısmının en az %50’sinin iki veya daha fazla yüzü kırılmış olması gerekmektedir (KTŞ, 2013).

Alttemel malzemesi olarak kullanılacak olan malzemenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için birçok deney yapılmaktadır. Yapılan deneylerin sonuçları şartname limitleri ile karşılaştırılarak malzemenin uygun olup olmadığının kontrolü sağlanır. Çizelge 4.2’de alttemel malzemesinin fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler ve şartname limitleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Alttemel malzemesi gradasyon limitleri (KTŞ, 2013)

Elek Açıklığı		TİP-A	TİP-B
mm	inc	%Geçen	%Geçen
75	3	100	
50	2	-	100
37,5	1 ½	85-100	80-100
25	1	-	60-90
19	¾	70-100	45-80
9,5	3/8	45-80	30-70
4,75	No.4	30-75	25-55
2,00	No.10	-	15-40
0,425	No.40	10-25	10-20
0,075	No.200	0-12	0-12

Çizelge 4.2. Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney Adı		Şartname Limitleri	Deney Standardı
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, %		≤ 25	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci, %		≤ 45	TS EN 1097-2
Yassılık İndeksi, %		35	BS 812
Su Emme, %		≤ 3,5	TS EN 1097-6
Likit Limit, %		≤ 25	TS 1900-1
Plastisite İndeksi, %		≤ 6	TS 1900-1
Kil Topağı ve Dağılabilen Dane Oranı, %		≤ 2 (İri Malzeme)	ASTM C 142
Organik Madde		Negatif	TS EN 1744-1
Metilen Mavisi g/kg	İnce agrega	≤ 4,0	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agrega	≤ 5,5*	

* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanmaması durumunda bu şart aranacaktır.

Modifiye Proctor Deneyi ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığın %98'sine kadar sıkıştırılan numunelerin yaş CBR değerleri Tip-A için minimum %30, Tip-B için ise minimum %50 olması gerekmektedir (KTŞ, 2013).

Alttemel tabakasının sıkıştırması için çalışma aralığı en az 11.000 kg statik çizgisel yükü 30 kg/cm'den büyük, iki frekanslı vibrasyon sistemli düz bandajlı silindirler ve/veya lastik başına düşen yükü 3.500 kg'dan az olmayan lastik tekerlekli silindirler kullanılması gerekmektedir. Alttemel malzemesi Çizelge 4.3'de gösterilen kriterlere uygun sıkıştırılacaktır (KTŞ, 2013).

Çizelge 4.3. Alttemel sıkıştırma kriterleri (KTŞ, 2013)

TİP-A	Sıkışma Minimum %	96	Modifiye Proctor (TS 1900-1, AASHTO T 180)
	Optimum Su İçeriği %	$W_{opt} \pm 2$	Modifiye Proctor (TS 1900-1, AASHTO T 180)
TİP-B	Sıkışma Minimum %	98	Modifiye Proctor (TS 1900-1, AASHTO T 180)
	Sıkışma Minimum %	95	Titreşimli Tokmak (TS 1900-1, BS 1377)
	Optimum Su İçeriği %	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$	Modifiye Proctor (TS 1900-1, AASHTO T 180)
	Optimum Su İçeriği %	$W_{opt} \pm 1$	Titreşimli Tokmak (TS 1900-1, BS 1377)

Taşıma gücü yeterli taban zemini veya alttemel tabakası üzerine uygulanacak olan temel tabakaları granüler temel, plent-miks temel ve çimento bağlayıcılı temel olmak üzere üç tipte inşa edilmektedir. Üç tip temel tabakasının yapımında kullanılacak olan agrega; çakıl, kırılmış çakıl, kırma taş, kum, cüruf veya benzeri malzemelerden hazırlanmalıdır. Temel tabakalarının yapımında kullanılacak olan bu malzemenin kaba kısmı yani 4,75 mm elek üzeri malzeme Çizelge 4.4'de belirtilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekmektedir. Kaba agregada donmuş malzeme ve herhangi bir nedenle karışmış yabancı malzeme bulunmayacaktır. Temel yapımında kullanılacak olan malzemenin ince kısmı doğal veya kırılmış çakıl, kırma kum,

doğal kum, cüruf kumu veya benzeri malzemeler ya da bunların karışımından oluşacaktır. İnce kısım olarak kullanılacak malzemeler yani 4,75 mm elekten geçen malzemelerin Çizelge 4.5’de verilen fiziksel özelliklere uygun olması gerekmektedir (KTŞ, 2013).

Çizelge 4.4. Kaba agreganın fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney Adı	Şartname	Deney Standardı
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, %	≤ 20	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci, %	≤ 35	TS EN 1097-2
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, %	≤ 1,0	ASTM C-142
Yassılık İndeksi, %	≤ 30	BS 812
	≤ 25	TS EN 933-3
Organik Madde	Negatif	TS EN 1744-1 (Madde 8)
Su Emme, %	≤ 3,0	TS EN 1097-6 (Madde 8)

Çizelge 4.5. İnce agreganın fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı	
Likit Limit, %	NonPlastik	TS 1900-1, AASHTO T 89	
Plastisite İndeksi, %	NonPlastik	TS 1900-1, AASHTO T 89	
Organik Madde	Negatif	TS EN 1744-1 (Madde 15.1)	
Metilen Mavisini, g/kg	İnce agrega	TS EN 933-9	
			≤ 3,0
			≤ 4,5*
	Öğütülmüş	≤ 4,5*	

* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanmaması durumunda bu şart aranacaktır.

Granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf veya kırmataş ile ince malzeme kullanılarak şartnamede belirtilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin, su ile karıştırılması ve taşıma gücü yeterli taban veya alttemel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. Granüler temel tabakasının oluşturulması için Çizelge 4.6’da gösterilen Tip A, Tip B ve Tip C olmak üzere üç tip gradasyon şartnamede belirtilmiştir. Asfalt betonu ile kaplanacak yollarda ve sathi kaplama yapılacak devlet yollarında Tip A veya Tip B

kullanılacaktır. Sathi kaplamalı il yollarında ise Tip A, Tip B veya Tip C tipi malzemelerinden biri kullanılabilir (KTŞ 2013).

Çizelge 4.6. Granüler temel tabakası gradasyon limitleri (KTŞ, 2013)

Elek Açıklığı		% Geçen		
mm	inc	Tip A	Tip B	Tip C
50	2	100		
37,5	1 ½	80-100	100	
25	1	60-90	70-100	100
19	¾	45-80	60-92	75-100
9,5	3/8	30-70	40-75	50-85
4,75	No. 4	25-55	30-60	35-65
2,00	No. 10	15-40	20-45	25-50
0,425	No. 40	8-20	10-25	12-30
0,075	No. 200	2-8	0-12	0-12

Granüler temel malzemesi Çizelge 4.7’de verilen değerler esas alınarak sıkıştırılacaktır.

Çizelge 4.7. Granüler temel tabakası sıkıştırma kriterleri (KTŞ, 2013)

Minimum Sıkışma, %	98	Modifiye Proctor	TS 1900-1, ASHTO T 180
	95	Titreşimli Tokmak	TS 1900-1, BS 1377
Optimum Su İçeriği, %	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$	Modifiye Proctor	TS 1900-1, ASHTO 180
	$W_{opt} \pm 1$	Titreşimli Tokmak	TS 1900-1, BS 1377

Plent-miks temel (PMT) tabakası kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak şartnamede belirtilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı dane boyutu grubunun uygun oranda su ile plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin şartnamede belirtildiği şekilde, yapımı ve düzeltmeleri tamamlanmış, gerekli eğim verilmiş alttemel tabakası üzerine projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak bir ya da birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakalardır. PMT tabakası yapımında kullanılacak olan malzeme, kaba agregalar için Çizelge 4.4 ve ince agregalar için Çizelge 4.5’de belirtilen fiziksel

özellikleri sağlayacak ve Çizelge 4.8’de belirtilen gradasyon limitlerinde, kaba ve ince agregadan oluşacaktır (KTŞ, 2013).

Üstyapı projelendirme veya üstyapı takviye raporlarında verilmiş olan plent-miks temel tabakası kalınlığının 15 cm ve üzerinde olması durumunda PMT Tip-1, plent miks temel tabakası kalınlığının 15 cm’den düşük olması durumunda ise PMT Tip-1 veya Tip-2 kullanılmalıdır (KTŞ, 2013).

Çizelge 4.8. Plent-miks temel tabakası gradasyon limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen	
mm	inc	Tip-1	Tip-2
37,5	1 ½	100	
25	1	72- 100	100
19	¾	60- 92	80-100
9,5	3/8	40- 75	50- 82
4,75	No. 4	30- 60	35- 65
2,00	No. 10	20- 45	23- 50
0,425	No. 40	8- 25	12- 30
0,075	No. 200	0- 10	2- 12

PMT için sıkıştırma, çalışma ağırlığı en az 11.000 kg, statik çizgisel yükü 30 kg/cm’den büyük, iki frekanslı vibrasyon sistemli düz bandajlı silindirler ve lastik başına düşen yükü en az 3.500 kg olan lastik tekerlekli silindirlerle yapılacaktır. Yeterli sıkıştırma ile erişmesi istenen minimum sıkışma yüzdeleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Plent-Miks temel tabakası sıkıştırma kriterleri (KTŞ, 2013)

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

Çimento bağlayıcı granüler temel (ÇBGT) tabakası çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak, şartnamede verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin uygun oranlarda çimento ve su ile plentte karıştırılmasıyla hazırlanan ve yeterli bir alttemel tabakası üzerine, bir veya birden fazla tabakalar halinde, serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. ÇBGT tabakasında kullanılacak olan agregalar kaba agrega için Çizelge 4.4 ve ince agrega için Çizelge 4.5’de belirtilen fiziksel özellikleri sağlayacaktır. Kullanılacak malzeme, sürekli gradasyona sahip olmalıdır ve Çizelge 4.10’da verilen gradasyon limitleri içerisinde kalacak şekilde gradasyonu oluşturulmalıdır.

Çizelge 4.10. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası gradasyon limitleri (KTS, 2013)

Elek Açıklığı		% Geçen
mm	inc	
37,5	1 ½	100
25	1	72- 100
19	¾	60- 92
9,5	3/8	40- 75
4,75	No. 4	30- 60
2,00	No. 10	20- 45
0,425	No. 40	8- 25
0,075	No. 200	0- 10

5. İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARI

İnşaat sektörü son yıllarda ekonomik gelişmelere ve nüfus artışına bağlı olarak büyümüştür. Bu nedenle Dünya üzerinde üretilen agregalara önemli bir talep olmuştur. Bu taleplerin sonucunda; doğal kaynakların tüketilmesinde ciddi artışlar yaşanmış ve doğal kaynakların kullanılması yıldan yıla artış göstermiştir. Ortaya çıkan bu talebin etkilerinin azaltılması ve inşaat sektörünün kullanımı için doğal agregaya alternatif olabilecek malzemeler bulunmaya çalışılmıştır. Bu malzemelerin başında inşaat ve yıkım faaliyetleri sonucunda oluşan inşaat ve yıkıntı atıkları yer almaktadır. İnşaat ve yıkıntı atıklarını oluşturan malzemeler genel olarak beton, tuğla, çelik vb. malzemelerden oluşmaktadır. Bu malzemelerin değerlendirilebilmesi için iyi bir şekilde çıkarılması, toplanması, ayrıştırılması ve geri dönüşümünün sağlanarak inşaat sektöründe yeniden kullanımı hem ekonomi hem de çevre için büyük önem taşımaktadır.

5.1. Üretimi

İnşaat ve yıkıntı atıkları genellikle yapıların ve diğer altyapıların inşaatı, yeniden inşası, genişletilmesi, değiştirilmesi, bakımı ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan atıklar olarak tanımlanmaktadır. Bu atıklar farklı tipte malzemelerden oluşur ve bir inşaat ya da altyapının parçası olan herhangi bir malzemeyi ve inşaat çalışmaları sırasında kullanılan diğer malzemeleri içerebilen heterojen bir atıktır (Vieira ve Pereira, 2015). Heterojen bir atık olması sebebi ile içerisinde çok çeşitli malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemelerin yıkım sürecinde birbirinden ayrı bir şekilde toplanması ve ayrıştırılması seçici yıkım uygulaması ile mümkün olabilmektedir. Böylece inşaat ve yıkıntı atıklarının birbirine karışması engellenecektir. Şekil 5.1’de birbirine karışmış malzemelerin oluşturduğu bir inşaat ve yıkıntı atığı örneği gösterilmiştir. İnşaat veya yıkım sırasında farklı türlere ayrılan inşaat ve yıkıntı atıkları ise Avrupa Atık Kataloğunda özel kodlarla liste şeklinde gösterilmiştir. Çizelge 5.1’de gösterilen listede inşaat ve yıkıntı atıklarında çok çeşitli türlerde atık malzemelerinden oluştuğu görülmektedir.

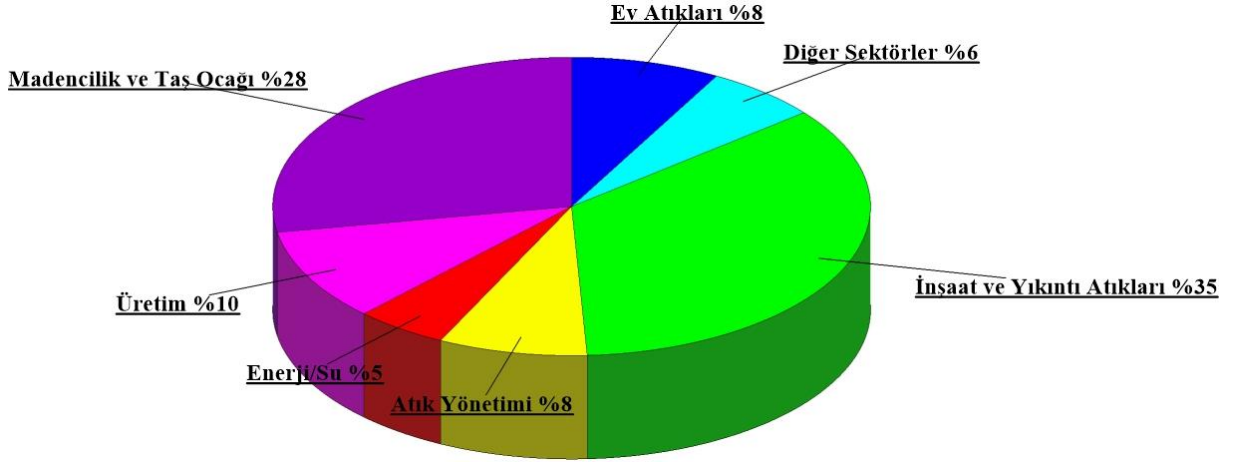
İnşaat ve yıkıntı atıklarının üretim miktarı diğer atıklara kıyasla daha çok gerçekleşmektedir. Şekil 5.2’de Avrupa Birliğinde çeşitli ekonomik sektörlerde üretilen atık miktarı gösterilmiştir. Ayrıca bu atıkların kontrolsüz bir şekilde bertaraf edilmesi bu miktarları daha da artırmaktadır. Bu nedenle bu tür atıkların; geri dönüşüm ile tekrar geri kazandırılması gerekmektedir.

Çizelge 5.1. Değişik türlerden oluşan inşaat ve yıkıntı atıkları için Avrupa Atık Kataloğu kodları (EC, 2000)

Avrupa Atık Kataloğu Kodu	Atık Türü
17 01	Beton, Tuğla, Fayans, Seramik ve Alçı Esaslı Malzemeler
17 01 01	Beton
17 01 02	Tuğla
17 01 03	Fayans ve Seramik
17 02	Ahşap, Cam ve Plastik
17 03	Asfalt, Katran ve Katranlı Ürünler
17 03 01	Katran İçeren Asfalt
17 03 02	Katran İçermeyen Asfalt
17 04	Metaller (Alaşımlar Dahil)
17 05	Toprak ve Tarama Atığı
17 06	Yalıtım Malzemeleri
17 07	Karışık İnşaat ve Yıkıntı Atıkları



Şekil 5.1. İnşaat ve yıkıntı atığı



Şekil 5.2. Avrupa Birliğinde farklı sektörlerde üretilen atık değerleri (Eurostat, 2016)

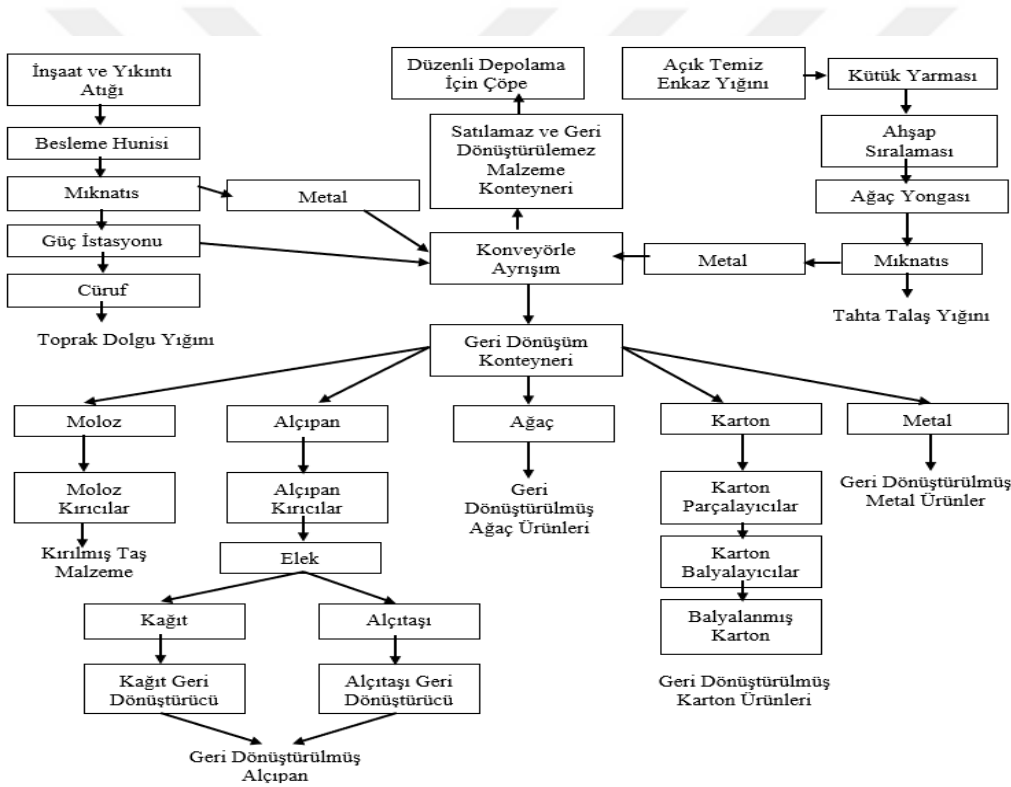
5.2. Geri Dönüşümü

Yapı malzemesi üretimi, yapıların yapım, yenileme, onarım ve yıkım uygulamaları gibi inşaat uygulamaları sonucunda kurtarılan ve tekrar kullanılabilir yapı malzemeleri ve bileşenleri elden geçirilip yeniden kullanılabilirliği gibi yeniden kullanım için uygun değilse, geri dönüşüm yöntemleriyle diğer ürünlerin üretiminde hammadde olarak da kullanılabilir. Geri kazanılmış bu yapı malzeme ve bileşenleri kullanıldıkları yapıya ekolojik olarak değer katmanın yanında ekonomik yarar da sağlayarak çevresel ve yapısal sürdürülebilirliği etkilemektedir (İpekçi, Coşkun ve Karadayı, 2017).

İnşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümünün önemi, doğal agregaların kıtlığı, büyük hacimli depolama alanlarının yanı sıra diğer çevresel kaygılar nedeniyle artmıştır. İnşaatların dünya genelinde artması büyük miktarlarda doğal agregaların tüketilmesine yol açmaktadır. Küresel nüfusun artan talepleri ile konut, ticari, tarımsal ve altyapı amaçlı olarak gittikçe daha fazla arazi kullanılmakta ve bu da uygun depolama alanlarının bulunmasında zorluklara yol açmaktadır. Ayrıca çevresel hususlar önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü atık maddelerin geri dönüşümü enerji tasarrufu sağlar, sera emisyonlarını azaltır ve daha sürdürülebilir bir gelecek sunar (Arulrajah vd., 2011).

İnşaat ve yıkım faaliyetleri sonucu ortaya çıkan malzemelerin geri dönüşümü genel olarak depolama tesislerinde yapılmaktadır. Depolama alanına getirilen atıklar incelendikten sonra depolama alanına sokulmaktadır. Böylece herhangi bir tehlikeli atık tespiti yapıldığında bu atıkların alana girmesi engellenmektedir.

Geri dönüşüm alanına getirilen malzemeler için belirli aşamalar uygulanmaktadır. İlk olarak kırıcıda kırılmayan büyük atıklar, darbeli kırım yapan, daha sonra ebatları küçültmek için farklı alanda toplanır. Yeterli ürünler paletli yükleyici ile kırıcıya taşınır. Kırılan ürünler konveyör bant yardımıyla eleme aracına getirilir. Kırılma neticesinde agregadan ayrıştırılan demir mıknatıslı alan aracılığıyla yeniden kullanılabilir. Eleme aracına konulan atıklar değişik büyüklüklere elenerek sınıflandırılır. Geri dönüştürülmüş ürünler lastik tekerlekli yükleyici aracılığıyla kamyonlara konularak yeniden değerlendirilmek için depolanır. Geri kazanım tesisine gelen atıkları farklı büyüklüklerdeki eleme aracını kullanarak 0- 12 mm, 12- 22 mm, 22- 38 mm olmak üzere ayrıştırılarak geçici olarak depolanması sağlanır. Şekil 5.3'deki akış şemasında yukarıda anlatılan inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümünün nasıl gerçekleştirildiği gösterilmiştir (Pamuk, 2018).



Şekil 5.3. İnşaat ve yıkıntı atığı geri kazanım akış şeması (Altındağ, 2011)

5.3. Geoteknik Uygulamaları ve Farklı Kullanım Alanları

Obe vd. (2019) yaptıkları vaka analizlerinde geri dönüştürülmüş agreganın (RA) doğal agrega (NA) yerine kullanımının yeni olmamasına rağmen geoteknik uygulamalarda kısıtlı olarak kullanıldığını belirtmiştir. 1997-2011 yılları arasında Hong Kong, İngiltere ve Amerika Birleşik Devletleri'nde RA'nın değişik geoteknik uygulamalarda kullanımına ilişkin bilgileri

araştırmışlardır. Araştırma sonucunda elde ettikleri vaka analizleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Vaka analizlerinde RA’nın kullanım alanı genellikle Şekil 5.4’de gösterildiği gibi geri dolgu veya dolgu malzemesi olarak kullanılması şeklinde olduğunu belirlemişlerdir. RA kullanımına ilişkin saha değerlendirilmesinin çok kısa veya mevcut olmadığını bu nedenle geçmiş deneyimlerden çok az ders çıkarılabildiğini belirtmişlerdir. Ancak, RA’nın performansının birkaç vaka çalışmasında NA’ya benzer olduğu sonucuna varmışlardır.

İnşaat yapımı ve yıkımı sonrası oluşan atıklar sadece beton ve çelikten ibaret değildir. Kapı, pencere, dolap, kiremit, elektrik malzemeleri, floresan lambaları, halıflexler, banyo aksesuarları gibi pek çok farklı malzeme başka inşaatlarda yeniden kullanılabilir. İnşaat ve yıkıntı atıklarının önemli bir kısmı geri dönüştürülebilir nitelikte olduğundan dolayı, geri dönüştürülen inşaat ve yıkıntı atıkları, aynı veya farklı sektörlerde tekrar kullanılarak ekonomik bir anlam kazanmaktadır (Ölmez ve Yıldız, 2008). Geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilen malzemeler ve kullanıldığı alanlar Çizelge 5.3’de belirtilmiştir.



Şekil 5.4. Drenaj kanalı geri dolgusu olarak kullanımı (Mehus vd., 2003)

Çizelge 5.2. Geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak yürütülen vaka analizlerinin özeti (Obe vd., 2019)

UYGULAMA					
Kaynak	Kullanım Alanı	Yıl	Ülke	Hacim (ton)	Açıklamalar
1)Kaba RCA					
Mehus vd. (2003)	Drenaj kanalı geri dolgusu	-	Norveç	1000	Deformasyonda değişiklik yok
2) Kaba ve İnce RCA Karışımı					
WRAP (2005)	Güçlendirilmiş toprak istinat duvarı	2004	İngiltere	20.000	RCA, NA ile karşılaştırıldığında benzer performans göstermiş
3) RCA (Boyutu Bilinmiyor)					
US Army Corps of Engineers (2014)	Yapısal dolgu	1997	Amerika Birleşik Devletleri	40.500	-
Addis (2006)	Dolgu malzemesi	1999	İngiltere	-	-
Acciona (2008)	Kanal ve istinat duvarı dolgu	2006	Hong Kong	15.000	-
US Army Corps of Engineers (2014)	Geri dolgu ve genel dolgu	-	Amerika Birleşik Devletleri	-	-
4) Kaba Karışık RA					
Aggregate Industries	Isı deposu dolgu malzemesi	2011	İngiltere	-	-
5) Bilinmeyen Tip ve Boyuttaki RA					
Reid vd. (2006)	Dolgu	2005	İngiltere	29.000	RCA, NA ile karşılaştırıldığında benzer performans göstermiştir

Çizelge 5.3. Geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilen malzemeler ve kullanıldığı alanlar (İpekçi vd., 2017)

Yapı Malzemeleri/Bileşenleri	Geri Dönüşüm İşlemi	Geri Dönüştürülmüş Ürün
Beton	Kırma, ufalama	Geri Dönüştürülmüş agrega, dolgu malzemesi, düşük dayanımlı beton bileşiminde agrega (grobeton), yol yapımında alt yapı malzemesi, parke taşı, sıva ve peyzaj
Tuğla/Kiremit	Harç artıklarının temizlenmesi, kırma, ufalama, yakılarak uçucu küle dönüştürme	Yeniden kullanılacak tuğla, dolgu malzemesi, tuğla/kiremit üretiminde hammadde
Doğal Taş	Kırma, ufalama	Geri dönüştürülmüş agrega, dolgu malzemesi
Mermer	Kırma, toz haline getirme	Beton ve asfalt uygulamalarında agrega, dolgu malzemesi, asfalt, çimento-beton harcında ve zemin iyileştirmede dolgu katkı malzemesi
Metaller	Doğrudan kullanım, eritme	Yeniden kullanılacak metal, yeni metal üretimi
Kağıt/Karton	Temizleme	Geri dönüştürülmüş kağıt
PVC Esaslı	Yıkama, kurutma, eritme, kırma, kesme, ufalama, toz haline getirme	Panel, geri dönüştürülmüş plastik, geri dönüştürülmüş agrega, alan drenajı, asfalt, sentetik toprak
Cam	Doğrudan kullanım, ikinci kalite cam üretimi, öğütme, ezme, eritme	Yeniden kullanılacak cam, geri dönüştürülmüş cam, cam lifli yalıtım malzemesi (cam yünü, cam elyaf), seramik, yol döşeme bloğu, yol kenarındaki yansıtıcı boya üretiminde
Seramik	Kırma, öğütme	Camlar ile birlikte de geri dönüştürülerek tezgah üretiminde, beton ve tuğla üretiminde katkı olarak
Ahşap	Doğrudan kullanım, temizleme, kesme, yeniden boyutlandırma, yüksek su buharı altında şekil verme, rendelenerek lif, talaş ve yonga haline getirme, yakma	Yeniden kullanılacak ahşap, mobilya ve mutfak elemanları, enerji kaynağı, ahşap kökenli malzemeler, yalıtım levhası, hafif yalıtım ve dolgu malzemesi, kağıt
Yalıtım Malzemeleri	Yıkama, kurutma, öğütme ve ezme, yakma	Yeniden üretilen yalıtım malzemesi, asfalt yapımında
Kapı/Pencere Mutfak Ekipmanları	Doğrudan kullanım, temizleme ve boyutlandırma	Yeniden kullanım

5.4. Karayollarında Kullanımı

Artan dünya nüfusu ile sürdürülebilir gelişme özel bir öneme sahip olmalı ve inşaat sektörü bu amaca katkıda bulunabilir. Bu hedefe ulaşmak için çözümün bir parçası, yol kaplama ve yol yapımında geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atıklarının kullanılmasıdır (Vieira ve Pereira, 2015).

Genel olarak, geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı malzemelerinin inşaat sektöründe uygulanması, Avrupa Birliğinin bazı ülkelerinde oldukça hızlı, ne yazık ki bazı ülkelerinde oldukça yavaş ilerlemektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar geri kazanılmış agrega olarak inşaat ve yıkıntı malzemelerinin olası kullanımını ve kabul edilebilir performansını göstermiştir. Farklı tipte inşaat ve yıkıntı malzemelerinin (geri dönüştürülmüş beton agregalar, kırma tuğlalar, geri kazanılmış asfalt kaplama) karayolları temel ve alttemel katmanlarında kullanılmasının, altyapı performansında büyük bir kayıp olmadan doğal agregalara mükemmel bir alternatif olduğunu kanıtlamıştır. Yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçlara göre; seçilen inşaat ve yıkıntı malzemeleriyle elde edilen CBR değerleri, genel olarak doğal agregalarla elde edilenlere benzer olduğu; kırılmış tuğlalar gibi bazı geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı malzemelerinin yol alttemel uygulamalarındaki performanslarını artırmak için diğer dayanıklı agregalarla karıştırılması gerekebileceği; karışık geri dönüştürülmüş agregalar düşük trafikli yollarda kullanım için iyi bir mekanik performans gösterdiği; geri dönüştürülmüş agregaların kalitesini iyileştirmek için etkili uygulamaların çok önemli olduğu bildirilmiştir (Vieira ve Pereira, 2015).

Ebo vd. (2019) yaptıkları vaka analizlerinde RA'nın yol tabakalarında kullanımının daha çok bağlayıcı kullanılmadan yapıldığını belirtmişlerdir. RA'nın genellikle Amerika Birleşik Devletlerinde kullanıldığını ve 1955 yılına kadar uzanan çok sayıda uygulama yapıldığını vaka analizlerinde görmüşlerdir. Çizelge 5.4'de yapılan çalışmalara ait bilgiler verilmiştir. Bağlayıcı olmayan uygulamaları incelediklerinde en çok kullanılan geri dönüştürülmüş agrega tipinin RCA olduğunu belirtmişlerdir. Yol katmanlarında kullanılan geri dönüştürülmüş agregaların maksimum dane boyutlarının genellikle 30-40 mm arasında olmasına rağmen boyutları 100 mm'ye kadar olan geri dönüştürülmüş agrega danelerinin kullanıldığını belirlemişlerdir. Ayrıca vaka analizlerinin sonucunda; geri dönüştürülmüş agregaların temel/alttemel tabakalarında bağlayıcısız bir şekilde doğal agregaların yerine kullanılmasının geri dönüştürülmüş agregaların saha performansının çoğunlukla kabul edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 5.4. Bağlayıcı olmayan yol katmanlarında geri dönüştürülmüş agrega kullanımı ile ilgili vaka analizleri (Ebo vd., 2019)

Kaynak	Ülke	Yıl	Tip	Maksimum Boyut	İçerik (%)
Arm, 2001	İsveç	2000	RCA	31,5	100
Arulrajah vd., 2014	Avustralya	2011	RCA	20	70-100
Aurstard vd., 2006	Norveç	2003	RCA	100	100
Beales ve Howell, 2006	İngiltere	1991	RCA	-	100
Ceylan vd., 2014	ABD	2007	RCA	-	100
Chai vd., 2009	ABD	1995	RCA	-	<50
Chini vd., 2001	ABD	1998	RCA	9,5	100
Dondi vd., 2014	İtalya	2010	CDRA	63	100
Neves vd., 2013	Portekiz	2010	RCA	63	100
Hampshire County Council,	İngiltere	2004	RCA	-	100
Herrador vd., 2012	İspanya	2008	CDRA	32	100
Jimenez vd., 2012	İspanya	2007	MRA	31,5	100
Kazmee vd., 2016	ABD	2014	CDRA	62,5	60
Kim vd., 2011	ABD	2007	RCA	-	100
Leek, 2008	Avustralya	2007	MRA,RCA	26,5	100
Park, 2003	Kore	2000	RCA	40	100
Pidwebesky, 2015	Yeni Zelanda	1955-69	RCA	32	100
Reid vd., 2006	İngiltere	2005	RCA	-	100
Sturtevant vd., 2007	ABD	2006	RCA	38	100
Phan, 2010	ABD	2009	RCA	40	100
White vd., 2008	ABD	2007	RCA	37,5	100

Çizelge 5.4’de verilen vaka analizlerinden, geri dönüştürülmüş agregaların karayollarında kullanımı ile ilgili olan iki vaka analizine ait bilgiler aşağıda anlatılmıştır.

Aurstad vd. (2006) yaptıkları çalışmada Norveç’te bulunan yoğun trafiğe göre tasarlanmış bir kaplamada alttemel tabakası için Şekil 5.5’de üretimi gösterilen kırılmış beton

agregası kullanmışlardır. Alttemel tabakası için iki test alanı inşa edilmiştir. Bu test alanlarında iki farklı dağılıma sahip olan beton agregalarını kullanmışlardır. Birinci test alanında 0-100 mm, ikinci test alanında ise 20-100 mm arasında değişen boyutlarda beton agregalarını kullanmışlardır. Bu malzemeleri Şekil 5.6'da gösterildiği şekilde serilip, sıkıştırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Malzemelerin davranışını incelemek için bir dizi saha deneyleri ve saha deneylerine paralel olarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Şekil 5.7'de son hali gösterilen otoyolda kullanılan beton agregasının bağlayıcısız temel tabakası için çok iyi bir performans gösterdiğini belirlemişlerdir.



Şekil 5.5. Beton agregasının üretimi (Aurstad vd., 2006)



Şekil 5.6. Beton agregasının serilmesi ve sıkıştırılması (Aurstad vd., 2006)



Şekil 5.7. Beton agregası kullanılan otoyolun yeni hali (Aurstad vd., 2006)

Neves vd. (2013) yaptıkları çalışmada bağlayıcısız granüler tabakaların deformasyon davranışının belirlenmesi amacıyla düşen ağırlık deformasyon ölçme aletini kullanarak yerinde yükleme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için 30 cm kalınlığında geri dönüştürülmüş malzemelerden oluşan granüler temel tabakası oluşturmuşlardır. Bu malzemeleri yaklaşık 6x15 m²'lik bir alanı kaplayacak şekilde ve her bölümde farklı malzemeler kullanarak Şekil 5.8'de gösterildiği gibi serilmesi ve sıkıştırılması işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda genel olarak kullandıkları tüm geri dönüştürülmüş agregaların daha yüksek bir deforme olabilirligine sahip olduğunu ancak bu durumun bile kabul edilebilir bir performans sergilediğini belirtmişlerdir.



Şekil 5.8. Geri dönüştürülmüş agregaların serilmesi ve sıkıştırılması (Neves vd., 2013)

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Materyal

6.1.1. Doğal Agregas

Çalışmada doğal agrega olarak bazalt agregası kullanılmıştır. Bazalt doğada en yaygın olarak bulunan volkanik kayalardan birisidir. Lav akıntısı olarak geniş alanlarda yayılıma sahiptirler, ayrıca bazen yüzlerce kilometrekarelik alanları kaplayacak şekilde (plato bazaltları) bulunabilirler. Ülkemizde Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Kastamonu, Kahramanmaraş, Sivas, Çorlu, Şanlıurfa, Manisa ve Ankara-Kızılcahamam bölgesinde bazalt yayılımları bulunmaktadır (Kahveci, 2008).

Çalışmada doğal agrega olarak kullanılacak bazalt agregası Şekil 6.1’de uydu fotoğrafı verilen Çorlu ilçesindeki Karatepe taş ocaklarından temin edilmiştir. Agregalar kırma taş tozu (0-5 mm), mıcır 1 (5-12 mm), mıcır 2 (12-19 mm), mıcır 3 (19-37,5 mm) olmak üzere dört elek grubu şeklinde temin edilmiştir.



Şekil 6.1. Çorlu Karatepe taş ocakları uydu fotoğrafı

6.1.2. Atık Parke Taşı

Beton parke taşları agrega, çimento, su ve bazı katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılması ve beton parke makinesi vasıtasıyla üretimi yapılan yapı elemanlarıdır. Beton

parke taşları çeşitli boyut ve şekillerde üretilmektedir. Üretim genel olarak fabrikalarda belirli standartlarda gerçekleştirilmektedir. Standartlara göre üretilen beton parke taşlarının belirli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması istenmektedir. Aşağıda bu özellikler belirtilmiştir;

- Basınç mukavemeti genel olarak en az 50 MPa olması gerekmektedir. 80 mm kalınlığa sahip olanlarda bu değer 63,6 MPa, 100 mm kalınlığa sahip olanlarda bu değer 63 MPa ve 120 mm kalınlığa sahip olanlarda ise 62 MPa olduğu, basınç deneyleri ile saptanmıştır.

- Çekme direnci en az 4 MPa'dır.
- Su emme yüzdesi en çok %6-%7 kadar olmalıdır.
- Aşınma dayanımı deneyi sonucunda kalınlıkta 0,3 cm'lik azalma gözlenmektedir (Semiz, 2006).

Beton parke taşları genel olarak ağır taşıt trafiğinin olmadığı şehir içinde bulunan cadde ve sokaklarda, kaldırımlarda vb. alanlarda kullanımı olan yapı malzemeleridir. Özellikle şehir içi yollarda yoğun trafiğe maruz kalan parke taşlarında deformasyonlar oluşmaktadır. Oluşan deformasyonun giderilmesi için deforme olmuş parke taşları sökülmekte yerine yeni parke taşları yerleştirilmektedir. Çıkan deforme olmuş parke taşları atık malzeme olarak depolama alanlarında depolanmaktadır. Beton parke taşlarında beton hacminin %75'i agrega olduğu düşünüldüğünde bu yapı malzemesinin yeniden değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevre açısından gereklidir. Bu nedenle çalışmada atık parke taşı kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan Şekil 6.2'de gösterilen 80 mm kalınlığında ve "I" şeklindeki atık parke taşları Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi Çorlu şantiyesinde atık olarak depolanan parke taşlarından temin edilerek Şekil 6.3'de verilen konkasörde kırımı gerçekleştirilmiştir. Konkasörde kırımı gerçekleştirilen atık parke taşları değişik elek gruplarında gruplandırılarak çalışmada kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.2. Atık parke taşı



Şekil 6.3. Konkasör

6.1.3. Atık Tuğla

Atık tuğla olarak harman tuğlası ya da diğer adıyla ateş tuğlası temin edilerek konkasörde kırımı gerçekleştirilmiştir ve belirli elek gruplarında ayrılarak çalışmada kullanılmıştır. Şekil 6.4’de gösterilen harman tuğlası genel olarak eski yapılarda sık kullanılan bir yapı malzemesidir. Günümüzde kentsel dönüşüm ile birlikte eski yapıların yıkımı sırasında harman tuğlalarına sıkça rastlanmaktadır. Bu tuğlaların inşaat ve yıkıntı atıklarından

ayrıştırılması yapılarak yeniden kullanımının sağlanması gerekir. Bu nedenle çalışmada atık tuğla olarak harman tuğlası kullanılmıştır.



Şekil 6.4. Harman tuğlası

6.2. Yöntem

6.2.1. Karayolları Teknik Şartnamesine Göre Plent-Miks Temel Tasarımı

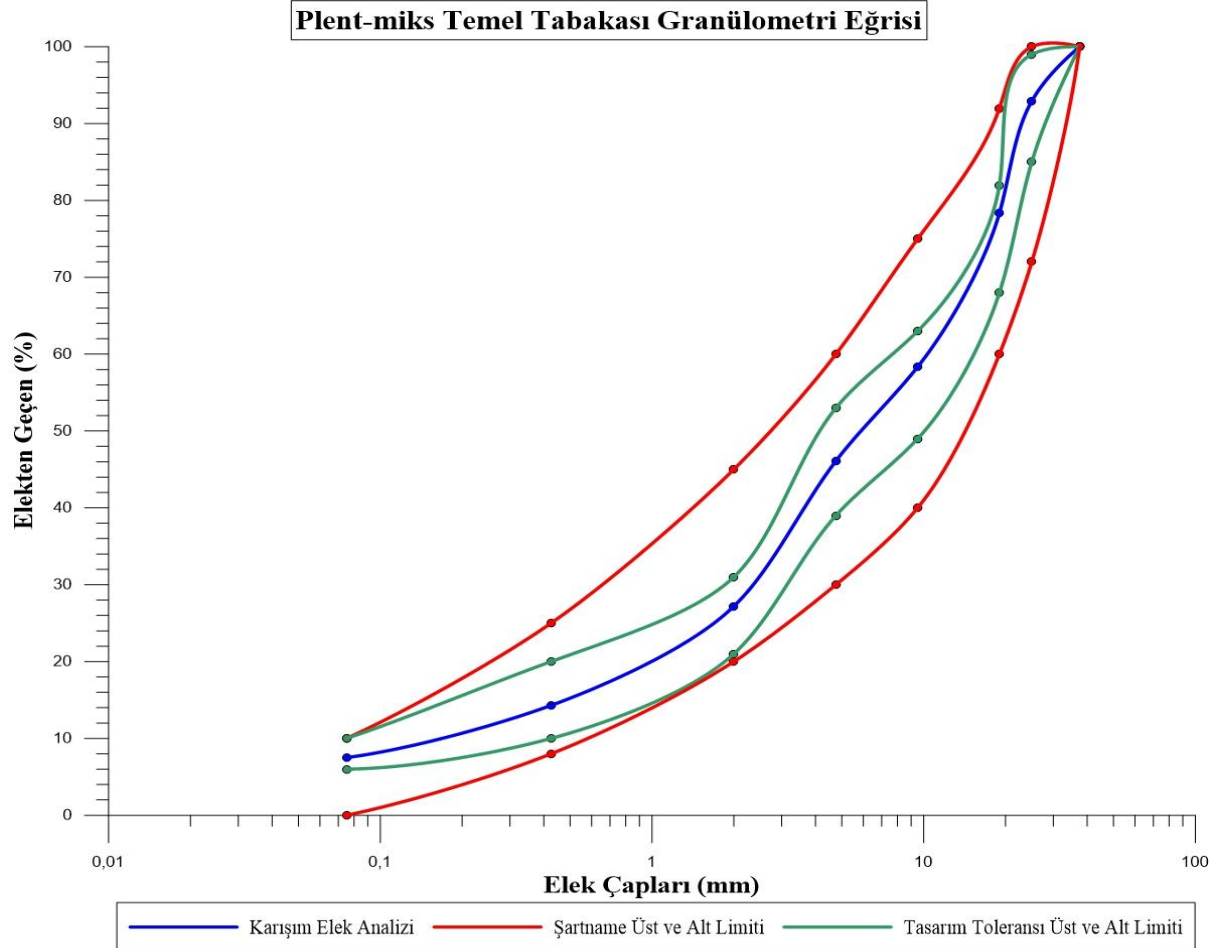
Agregaların gradasyonu, karayolu tabakalarının dayanıklılığına ve yoğunluğuna etki eden en önemli özelliktir. Bu nedenle, değişik boyuttaki agrega danelerinin hangi oranlarda bulunması gerektiği şartnamelerde alt ve üst limitler ile boyut dağılımı öngörülmektedir.

Laboratuvar çalışmaları için temin edilen doğal agrega 0-5 mm, 5-12 mm, 12-19 mm, 19-37,5 mm dane boyutu gruplarından oluşmaktadır. Doğal agreganın plent-miks temel tabakası tasarımı için dane boyutu dağılımları elde edilmiştir. Plent-miks temel tasarımı tip 1 yapımında; Çizelge 6.1'de verilen karışım gradasyonu esas alınarak, şartname limitleri içerisinde kalınmıştır. Şekil 6.5'de tasarımı yapılan plent-miks temel tabakasına ait granülometri eğrisi gösterilmiştir.

Konkasörde kırımı gerçekleştirilen atık parke taşı ve atık tuğla malzemeleri eleklerden elenerek belirli dane boyutlarına ayrılmıştır. Doğal agrega için tasarımı yapılan plent-miks temel karışım gradasyonu bu malzemeler içinde kullanılmıştır. Tüm malzemeler için deneyler bu tasarıma göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1. Plent-miks temel tabakasında kullanılan karışım gradasyonu

Elek Açıklığı		Plent- Miks Temel Tasarımı	Tasarım Toleransı	Karışım Gradasyonu
mm	inc			
37,5	1 ½	100	100-100	100
25	1	72-100	86-100	93
19	¾	60-92	71-85	78
9,5	3/8	40-75	52-66	58
4,75	No. 4	30-60	42-56	46
2	No. 10	20-45	27-37	27
0,425	No. 40	8-25	8-18	14
0,075	No. 200	4-8	0-10	8



Şekil 6.5. Plent- miks temel tabakası granülometri eğrisi

6.3. Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Deney Yöntemleri

6.3.1. Elek Analizi

Elek analizi deneyi agrega numunesi içerisindeki farklı büyüklüklerden oluşan danelerinin dane büyüklüklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Agregaların dane büyüklüklerine göre dağılımına granülometri, danelerin dağılımını gösteren eğriye granülometri eğrisi denilmektedir. Çizelge 6.2’de gösterilen standart elekler kullanılarak agrega numunesi içerisindeki kaba ve ince agreganın granülometrisi belirlenmektedir.

Çizelge 6.2. Standart elek açıklıkları

Elek Açıklığı	
mm	inc
37,5	1 ½
25	1
19	¾
9,5	3/8
4,75	No. 4
2,00	No. 10
0,425	No. 40
0,075	No. 200

Elek analizinin yapılabilmesi için ilk olarak bölgeç yardımıyla agregadan numune alınmıştır. Alınan numune etüvde 24 saat bekletilerek sabit ağırlığa gelmesi sağlanmıştır. Etüvden çıkarılan agrega numunesi 4 no’lu elekten elenerek ince ve kaba agrega olarak ayrılmıştır. 4 no’lu elek üzerinde kalan kaba agrega sırasıyla 1 ½, 1, ¾, 3/8 no’lu eleklerden elenmiş ve elek üzerinde kalan malzeme tartılmıştır. Aynı şekilde 4 no’lu elek altına geçen ince agrega 10, 40, 200 no’lu eleklerden elenmiş ve elek üzerinde kalan malzeme tartılmıştır. Eşitlik 6.1’den yararlanılarak elek üzerinde kalan malzemelerin oranı hesaplanmıştır.

$$Kalan \% = \frac{Elek \ Üzerinde \ Kalan}{Deney \ Numunesi \ Miktarı} \times 100 \quad (6.1)$$

6.3.2. Kaba Agregalar İçin Su Emme ve Özgül Ağırlık Deneyi

Doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğlanın; su emme ve özgül ağırlık değerinin belirlenmesi için TS EN 1097-6 standardına göre tasarımı yapılan plent-miks temel tabakası agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 4,75 mm elek üzerinde kalan agregalardan, her bir malzemeden iki adet numune olacak hazırlanmıştır. Hazırlanan agregaların üzerini geçecek şekilde su ilave edilmiştir. Şekil 6.6'da gösterildiği gibi agregalar 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. 24 saat sonra numuneler sudan çıkarılmıştır. Sudan çıkarılan agregalar kuru bir bez üzerine boşaltılarak, Şekil 6.7'de gösterildiği gibi bir bez yardımıyla yüzey kuru suya doymun hale getirilmiştir. Yüzey kuru suya doymun agregalar tartılmıştır (M_{YKSD}). Numuneler tel sepet yardımıyla su dolu kovaya koyularak sudaki ağırlığı tartılmıştır (M_{Su}). Sudaki ağırlığı tartıldıktan sonra agrega daneleri etüvde 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan agrega danelerinin kuru ağırlıkları belirlenmiştir (M_{Kuru}). Kaba agregaların özgül ağırlık değerleri ve su emme yüzdesi; Eşitlik 6.2, Eşitlik 6.3, Eşitlik 6.4 ve Eşitlik 6.5 kullanılarak hesaplanmıştır (TS EN 1097-6).

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlığı} = \frac{M_{Kuru}}{M_{Kuru} - M_{Su}} \quad (6.2)$$

$$\text{Kuru Özgül Ağırlığı} = \frac{M_{Kuru}}{M_{YKSD} - M_{Su}} \quad (6.3)$$

$$\text{Doymun Kuru Yüzey Özgül Ağırlığı} = \frac{M_{YKSD}}{M_{YKSD} - M_{Su}} \quad (6.4)$$

$$\text{Su Emme \% (Absorpsiyon)} = \frac{M_{YKSD} - M_{Kuru}}{M_{Kuru}} \times 100 \quad (6.5)$$



Şekil 6.6. 24 saat su içerisinde bekletilen numuneler



Şekil 6.7. Yüzey kuru suya doymun agrega elde etme

6.3.3. İnce Agregalar İçin Su Emme ve Özgül Ağırlık Deneyi

Agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 4,75 mm ile 0,075 mm arasında kalan agregalardan her bir malzeme için 1 kg numune tartılarak iki adet deney numunesi hazırlanmıştır. 1 kg olarak tartılan deney numune tepsilerine agreganın üzerini geçecek miktarda su ilave edilmiş ve 24 saat su içerisinde bekletilerek suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır. 24 saat sonunda tepsideki fazla su dökülmüştür. Sudan çıkarılan numuneler sıcak hava kaynağı yardımıyla yüzey kuru suya doymun hale getirilmiştir. Şekil 6.8’de numunelerin 24 saat su içerisinde bekletilmesi ve yüzey kuru suya doymun hale getirilmesi gösterilmiştir.

Yüzey kuru suya doymun agrega ağırlığı tespit edilmiştir. Yüzey kuru suya doymun hal koni yöntemiyle belirlenmiştir. Bunun için metal koni kalıp içerisine her seferinde 25 vuruş yapılacak şekilde 3 tabaka şeklinde numune konularak sıkıştırılmıştır. Koni içerisinde sıkıştırılan numune ters çevrilerek bir tepsiye konulmuştur. Mala yardımıyla ortadan ikiye ayrılmıştır. Numune şeklini koruyorsa kurutmaya devam edilmiştir. Yüzey kuru suya doymun durum sağlandıktan sonra kullanılacak piknometrenin boş ağırlığı ve piknometrenin referans çizgisine kadar saf su doldurularak ağırlığı belirlenmiştir. Ağırlıkları belirlenen piknometreler içerisine numuneler yerleştirilmiş ve tartılmıştır. Piknometre içerisindeki numune üzerine referans çizgisine kadar su ilave edilmiş ve hava boşluklarının kalmaması için sarsılmıştır ve sarsma işlemi hava boşlukları giderilene kadar devam etmiştir. Su yüzeyinde biriken köpük alınmıştır ve numuneler tartılmıştır. Daha sonra numune piknometre içerisinden çıkartılarak etüde kurutulmuştur. Numunenin kuru ağırlığı belirlenmiştir (TS EN 1097-6). Şekil 6.9'da kullanılan piknometreler gösterilmiştir.

İnce agregaların özgül ağırlıkları ve su emme oranları Eşitlik 6.6, Eşitlik 6.7, Eşitlik 6.8 ve Eşitlik 6.9 yardımıyla hesaplanmıştır. Burada;

M_1 : Piknometre ağırlığı (gr),

M_2 : Suyla dolu piknometre ağırlığı (gr),

M_3 : Piknometrenin yüzey kuru suya doymun numune ile birlikte ağırlığı (gr),

M_4 : Piknometrenin yüzey kuru suya doymun numune ve su ile dolu ağırlığı (gr),

M_5 : Kuru numune ağırlığı (gr).

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlık} = \frac{M_5}{(M_2 - M_4) + M_5} \quad (6.6)$$

$$\text{Kuru Özgöl Ağırlık} = \frac{M_5}{(M_2 - M_1) - (M_4 - M_3)} \quad (6.7)$$

$$\text{Doymun Kuru Yüzey Özgöl Ağırlık} = \frac{M_3}{(M_2 - M_1) - (M_4 - M_3)} \quad (6.8)$$

$$\text{Su Emme \%} = \frac{(M_3 - M_1) - M_5}{M_5} \times 100 \quad (6.9)$$



Şekil 6.8. Numunelerin 24 saat su içerisinde bekletilmesi ve sıcak hava kaynağı ile yüzey kuru suya doymun hale getirilmesi



Şekil 6.9. Deney sırasında kullanılan piknometreler

6.3.4. Los Angeles Aşınma Deneyi

Los Angeles aşınma deneyi ASTM C 131 deney standardına göre yapılmıştır. İlk olarak agregalar yıkanmış ve sabit ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulmuştur. Daha sonra standarda belirtilen B sınıfına göre 19,0- 12,5 mm ve 12,5- 9,5 mm dane boyutuna sahip agregaların her birinden 2500 gr alınarak toplam 5000 gr olacak şekilde tartılmıştır. Tartılan numune Şekil 6.10'da gösterilen Los Angeles makinasına toplam ağırlıkları 4580 gr olan 11 adet bilye ile birlikte konulmuştur. Los Angeles makinası 30- 33 devir/dakika hızda 500 devir yapacak şekilde ayarlanmıştır. Döndürülme işlemi bittikten sonra numuneler makinadan çıkarılarak 12 no'lu (1,68 mm) elekten elenmiştir. Elek üzerinde kalan kısım yıkanmış ve etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulan numune tartılarak ağırlığı not edilmiştir. Los Angeles aşınma kaybı yüzdesi Eşitlik 6.10 yardımıyla hesaplanmıştır (ASTM C 131).

$$\text{Los Angeles Aşınma Kaybı (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (6.10)$$

M₁: İlk Ağırlık

M₂: Son Ağırlık



Şekil 6.10. Los Angeles aşınma makinası

6.3.5. Yassılık İndeksi Deneyi

Yassılık indeksi deneyi BS 812-105 standardına göre en küçük boyutu en büyük nominal boyutun 0,6'sından daha küçük olan agregaların yassı olarak sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. Standartta belirtilen agrega boyutlarına göre alınması gereken numune miktarı kadar numune alınarak deney numuneleri yıkanmıştır ve 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Şekil 6.11'de agrega boyutlarına göre numuneler gösterilmiştir. Standartta belirtilen agrega boyutlarına göre numune miktarları ayrı ayrı tartılarak not edilmiştir. Daha sonra, ait olduğu agrega boyutlarına göre standartta belirtilen şablon genişliğindeki silindirik çubuklu eleklerden elenmiştir. Şekil 6.12'de silindirik çubuklu elekler gösterilmiştir. Eleme işlemi sonucunda silindirik çubuklu elekten geçen agrega miktarı her agrega grubu için ayrı ayrı tartılarak belirlenmiştir. Daha sonra Eşitlik 6.11 kullanılarak agregaların yassılık indeksi bulunmuştur (BS 812-105).

$$\text{Yassılık İndeksi (\%)} = \frac{M_s}{M_i} \times 100 \quad (6.11)$$

M_s : Silindirik eleklerden geçen agrega numunesinin ağırlığı

M_i : Agrega numunesinin ağırlığı



Şekil 6.11. Farklı agrega boyutlarına göre numuneler



Şekil 6.12. Silindirik çubuklu elekler

6.3.6. Organik Madde İçeriğinin Tayini

Bitkilerin ve hayvansal atıkların çürümesi ile oluşan zararlı maddeler organik madde olarak tanımlanır. Bu deney ile agrega içerisinde organik madde olup olmadığı tespit edilmiştir. TS EN 1744-1’de belirtilen deney yöntemleri izlenmiştir. İlk olarak $40 \pm 5^\circ \text{C}$ ’lik etüvde kurutulan numune 4 mm göz açıklıklı elekten elenerek elek altına geçen malzemeler alınmıştır. Daha sonra 1 lt su içerisinde 30 gr NaOH çözülerek %3’lük NaOH çözeltisi elde edilmiştir. Cam bir şişeye hazırlanan %3’lük NaOH çözeltisi yüksekliği 80 mm olana kadar eklenmiştir. Cam şişeye koyulan çözelti üzerine hazırlanan numune eklenmiş ve çözelti ile numune yüksekliği 120 mm olana kadar numune eklenmeye devam edilmiştir. Cam şişenin kapağı kapatılmış ve hava kabarcıklarının çıkması için 1 dk boyunca kuvvetli bir şekilde çalkalanmıştır. Daha sonra düz bir zemine hareket etmeyecek bir şekilde 24 saat beklemeye bırakılmıştır. 24 saat sonucunda cam şişedeki renk değişimine göre numunede organik madde olup olmadığının tespiti yapılmaktadır (TS EN 1744-1).

Standarda göre organik maddeler ile NaOH çözeltisi reaksiyona girerek koyu renk oluşturmaktadır. Rengin yoğunluğu organik madde miktarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle çözelti rengi berraksa veya hafif bir renk alırsa malzemede önemli bir miktarda organik madde olmadığı kabul edilmektedir. Tam tersi durumda yani çözeltide renk değişimi koyuya dönüyorsa malzemede organik madde olduğu kabul edilmektedir. Şekil 6.13’de organik madde içeriğinin tayini deneyinde kullanılan farklı malzemelerdeki renk değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Organik madde içeriğinin tayini

6.3.7. Kil Topakları ve Dağılabilen Dane Oranı Tayini

Deney, karayolları teknik şartnamesinde belirtildiği gibi ASTM C-142 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.3’de belirtilen agrega boyutlarında numuneler gerekli ağırlıklarda hazırlanmıştır ve numuneler 24 saat etüvde bekletilmiştir. Daha sonra kuru ağırlıkları tartılmıştır. Her bir agrega grubu ayrı ayrı tepsilere 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. Bekletilen numuneler Çizelge 6.3’de belirtilen elek açıklıklarındaki eleklerden elenerek yıkanmıştır. Şekil 6.14’de kil topakları ve dağılabilen dane oranının tespiti için yapılan işlemler gösterilmiştir. Elek üzerinde kalan numune etüvde kurutulmuş ve ağırlıkları belirlenmiştir (ASTM C-142).

Çizelge 6.3. Kil topağı ve dağılabilen dane oranı tayini için gerekli numune ağırlıkları ve elek açıklıkları

Agrega Boyutları	Numune Ağırlığı (gr)	Yıkamanın Yapılacağı Elek Açıklıkları
1,18-4,75 mm elek arası	150	0,85 mm (No. 20)
4,75-9,5 mm elek arası	1000	2,36 mm (No. 8)
9,5-19 mm elek arası	2000	4,75 mm (No.4)
19-37,5 mm elek arası	3000	4,75 mm (No. 4)

Eşitlik 6.12 kullanılarak kil topakları ve dağılabilen dane oranı hesaplanmış ve malzemelerin şartname limiti ile karşılaştırılması yapılmıştır.

$$\text{Dağılabilen Dane Oranı (\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (6.12)$$

A: İlk kuru ağırlık

B: Son kuru ağırlık



Şekil 6.14. Kil topakları ve dağılabilen dane tayini

6.3.8. Hava Tesirine Karşı Dayanıklılık Deneyi

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyinin amacı agrega danelerinin donma çözülme etkilerine karşı nasıl bir davranış gösterdiğinin belirlenmesi için yapılmaktadır. Deney standardı olarak TS EN 1367-2 kullanılmıştır. İlk olarak 10 mm ile 14 mm arasında agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 500 gr ağırlığında 2 numune alınmıştır. Alınan numuneler yıkanarak 24 saat etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numunelerin ağırlıkları tartılarak not edilmiştir. Hazırlanan her bir numune $17 \pm 0,5$ saat süre ile Şekil 6.15’de gösterildiği gibi magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde, numune üzerinde en az 5 cm çözelti olacak şekilde bekletilmiştir. Çözeltiden çıkarılan numuneler $2 \pm 0,25$ saat süre ile suyu süzölmüş ve $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ’lik etüvde 24 saat kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler $5 \pm 0,25$ saat oda sıcaklığında bekletilerek soğuması sağlanmıştır. Bu işlem 5 defa tekrarlanmıştır. Son döngü sonunda numune yıkanmış ve etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Daha sonra

10 mm'lik elekten elenmiş ve elek üzerinde kalan malzeme tartılmıştır. Eşitlik 6.13'de gösterildiği şekilde donma kaybı hesaplanmıştır (TS EN 1367-2).

$$\text{Donma Kaybı (\%)} = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 \quad (6.13)$$

W_i : İlk kuru ağırlık

W_s : Son kuru ağırlık



Şekil 6.15. Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi

6.3.9. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi

İnce daneli zeminler (kohezyonlu, silt/kil zeminler) su muhtevalarının değişmesi ile sıvı, plastik ve yarı katı malzeme davranışlarına sahip olabilmektedirler. İnce daneli zeminlerin bu değişik durumlarını belirleyen sınır su muhtevaları, kıvam deneylerinden elde edilmektedir (Kumbasar ve Kip, 1999).

Kıvam deneylerinden biri olan plastik limit deneyi için TS 1900-1 standardına göre 0,425 mm elekten geçen 20 gr numune hazırlanmıştır. 20 gr numune içerisine bir miktar su eklenerek yoğrulmuştur. Yoğrulan zemin numunesi cam bir levha üzerinde avuç içi ile yuvarlanarak 3 mm çapında ince silindir haline getirilir. Silindir 10 mm uzunluğunda parçalara ayrıldığı anda sahip olduğu su muhtevası zeminin plastik limiti olarak belirlenir.

Likit limit, zeminin sıvı gibi davranmaya başladığı minimum su muhtevasıdır. Likit limitin belirlenmesinde kullanılan deney aleti 1cm yükseklikten sert kauçuk tabana düşürülen küre parçası bir metal tasta oluşmaktadır. Deneyde bu tas içine konulan zemin numunesi içinde standart bıçağı ile açılan yarığın 1,25 cm boyunca kapanması için gereken düşme sayısı belirlenir ve kapanan bölümden alınan bir numune ile su muhtevası tespit edilir. Bu deney zeminin su muhtevası artırılarak en az üç defa tekrarlanır. Vuruş sayıları (N) ve su muhtevalarına (w) tekabül eden noktalar w/log N eksen takımında bir doğru üzerinde yer alırlar. Doğrunun çizilmesinden sonra 25 vuruş değerine karşılık gelen su muhtevası diyagramdan zeminin likit limiti olarak okunur (Kumbasar ve Kip, 1999).

6.3.10. Metilen Mavisi Deneyi

TS EN 933-9 standardına göre gerçekleştirilen metilen mavisi deneyinin amacı, malzemenin 0,063 mm göz açıklıklı elekten geçen ince danelerin içinde bulunan kil içeriğinin tespit edilmesidir. Metilen mavisi suda çözüldüğünde, çözelti içerisinde metilen mavisi kanyonları ve klorit anyonları oluşmaktadır. Kil numunesi karışım içerisine girdiğinde, klorit iyonları kil mineral yüzeyleri ile birleşmiş mevcut olan kanyonlar ile yer değiştirerek kil parçacıklarının yüzeyi metilen mavisi ile kaplanmaktadır (TS EN 933-9).

Deney için kullanılacak malzemelerden 0-2 mm dane büyüklüğünde 200 gr olacak şekilde 2 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden bir tanesi tartılmıştır (M) ve etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur (M'). Eşitlik 6.14 kullanılarak ilk olarak malzemelerin su içeriği hesaplanmıştır ve Eşitlik 6.15 kullanılarak hazırlanacak olan diğer numunenin kuru ağırlığı belirlenmiştir. Eşitlikte M_0 deney numunesinin ağırlığıdır (TS EN 933-9).

$$W(\%) = \frac{M - M'}{M'} \times 100 \quad (6.14)$$

$$M_1 = \frac{M_0}{1 + W/100} \quad (6.15)$$

Hazırlanan numune 500 ml su içerisine koyulmuş ve Şekil 6.16'da gösterilen karıştırıcı ile dakikada 600 devir/dakika hız ile 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Önceden hazırlanan metilen mavisi boya çözeltisi (10 gr/l) 5 ml olacak şekilde karışıma ilave edilmiştir. İlave edilen

çözültüden sonra karıştırıcı 400 devir/dakika hız ile 1 dakika boyunca çalıştırılarak malzeme karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra süzgeç kağıdı üzerine cam çubuk ile damla bırakılmıştır. Damlanın çapının 8mm ile 12 mm arasında olması gerekmektedir ve damlanın etrafında en az 1 mm açık mavi halka oluşması gerekmektedir. Açık mavi halka oluşana kadar karışıma çözelti eklemesi ve süzgeç kağıdına damla damlatılmasına devam edilmiştir. 5 dk boyunca kaybolmaması gereken halkayı oluşturmak için eklenen boya çözeltisinin hacmi belirlenmiştir ve Eşitlik 6.16 kullanılarak metilen mavisi değeri (MB) hesaplanmıştır (TS EN 933-9).

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (6.16)$$

V_1 : Eklenen boya çözeltisinin hacmi (ml)

M_1 : Deney numunesinin ağırlığı (gr)



Şekil 6.16. Metilen mavisi deney aleti

6.4. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Deney Yöntemleri

6.4.1. Modifiye Proktor Deneyi

Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’de belirtilen gradasyon limit değerlerine göre plent-miks temel tip 1 için tasarım yapılmıştır. Bu tasarıma göre hazırlanan doğal agrega, atık parke taşı, atık tuğla numuneleri ve bu malzemelerin birbirleriyle belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışım numuneleri üzerinde Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’de belirtilen TS 1900-1 standardına uygun olarak modifiye Proktor deneyi gerçekleştirilmiştir.

Optimum su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi için TS 1900-1 standardına uygun olarak modifiye Proktor deneyinde 19 mm elek altına geçen malzeme kullanılmaktadır. Bu nedenle karışımlarda 19 mm elek üstünde kalan malzemeler ile 19 mm elek altında kalan malzemeler arasındaki ikame oranı bulunarak ikame oranlarına göre ağırlıkları 19 mm elek altına dağıtılmıştır. Hazırlanan karışımlar etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Oda sıcaklığında soğutulan numuneler tartılarak ağırlığı belirlenmiş ve ağırlığı oranınca su ilave edilerek karıştırılmıştır. Karıştırılan numuneler çapı 152,4 mm olan kalıba 5 tabaka şeklinde koyularak her tabakaya 45 cm yükseklikten düşüş yapacak şekilde 4,5 kg’lık tokmak ile 56 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kalıbın yakası çıkarılarak yüzey spatula yardımıyla düzeltilmiştir ve ağırlığı deney föyüne kaydedilmiştir. Şekil 6.17’de sıkıştırma işlemi sonrası yüzeyi düzeltilen numune gösterilmiştir. Sıkıştırılan karışım kalıptan çıkarılarak su içeriğinin belirlenmesi için numune alınmış ve tartılarak ağırlığı not edilmiştir. Numune 24 saat etüvde bekletilerek kuru ağırlığı elde edilmiştir. Deney sonucunda karışımların su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.



Şekil 6.17.Sıkıştırma işlemi sonrası yüzeyi düzeltilmiş numune

6.4.2. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) bir penetrasyon deneyinden elde olunan ve yol ile hava meydanı üst yapı kalınlıkları hesabında kullanılan yarı ampririk bir sayıdır. Bu sayı bir bakıma deneye tabi tutulan zeminin mukavemet ve deformasyon özelliklerini standart olarak alınan kırma taşa göre relatif durumunu gösterir (Kumbasar ve Kip, 1999).

Çalışmada karayolları teknik şartnamesine uygun olarak AASHTO T 193 ve TS 1900- 2 standardı kullanılmıştır. Standarda göre 19 mm elek üstünde kalan malzemeler kullanılmayacağı için 19 mm elek üstünde kalan malzemeler ile 19 mm elek altında kalan malzemeler arasındaki ikame oranı bulunmuş ve ikame oranlarına göre ağırlıkları 19 mm elek altına dağıtılmıştır. Plent- miks tasarımına uygun olarak hazırlanan karışımlar etüvde kurutulmuştur. Daha sonra her bir karışım için modifiye Proktor deneyi ile elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıklarına karşılık gelen optimum su muhtevası kadar su ilave edilerek karıştırılmıştır. 152,4 mm çapında ve 177,8 mm yüksekliğine sahip olan standart CBR kalıbı tabanına metal disk yerleştirilmiş, metal disk üzerine süzgeç kağıdı koyulmuştur. Optimum su muhtevasındaki su ile karıştırılmış olan 2 adet CBR numunesi 5 tabaka halinde ve her tabakaya 45 cm yükseklikten 4,5 kg tokmak ile 56 vuruş olacak şekilde sıkıştırılmıştır.

CBR deneyi yaş veya kuru şekilde yapılabilir. Çalışmada karayolları teknik şartnamesine uygun olarak yaş CBR deneyi uygulanmıştır. Yaş CBR deneyi ile bütün boşlukların su ile dolu olduğu en düşük taşıma gücü belirlenebilmektedir. Yaş CBR deneyi için çalışmada sıkıştırılan numunelerin üzerine arazide zeminin üzerine gelecek yükü temsil edecek şekilde 4,5 kg'dan az olmamak şartıyla ağırlık eklenmiş ve ayrıca zeminin şişme yüzdesinin belirlenebilmesi için kalıbın uzatıcısı üzerine oturtulan üç ayaklı sehpa ile birlikte komparatör saati yerleştirilmiştir. Numuneler üzerine minimum 2,5 cm su gelecek şekilde 4 gün boyunca suda bekletilmiştir. Şekil 6.18'de numunelerin suda bekletilmesi gösterilmiştir. Suda bekletildikleri süre zarfında numunelerin şişme miktarları kontrol edilmiştir.



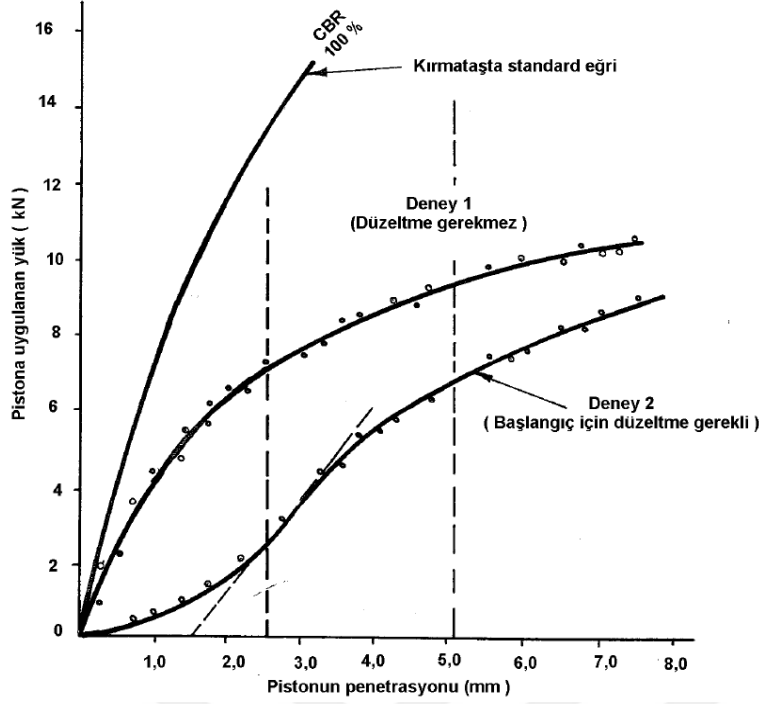
Şekil 6.18. Numunelerin suda bekletilmesi

4 günün sonunda numuneler sudan çıkarılarak 15 dk suyun süzülmesi beklenmiştir. Suyu süzülen numuneler Şekil 6.19'da gösterilen CBR deney aletine yerleştirilerek numunelerin üzerine ağırlık ve 4,95 cm çaplı piston yerleştirilmiştir. Piston 1,25 mm/dk hızla numuneye batarak belirli penetrasyon miktarlarındaki yük okunmuş ve deney föyüne yazılmıştır.



Şekil 6.19. CBR deney aleti

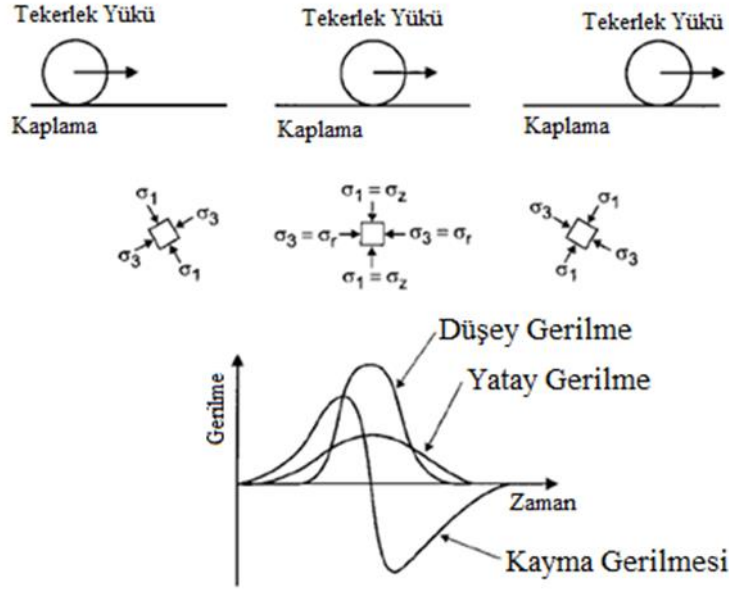
Deney sonuçlarının değerlendirilebilmesi için yük-penetrasyon eğrileri çizilmiştir. Şekil 6.20’de yük-penetrasyon eğrisi gösterilmiştir. Çizilen yük-penetrasyon eğrisi yukarıya doğru konveks ise eğri üzerinden 2.5 mm ve 5.0 mm penetrasyona tekabül eden değerler alınarak bunların standart değerlere oranı belirlenir. Birinci oranın daha büyük olması halinde bu değer aranan CBR değeridir. Aksi halde deney tekrarlanır. Bu deneyde de benzer sonuçlar elde olunursa 5.0 mm batma miktarına tekabül eden oran CBR değeri olarak seçilir. Eğer eğrinin baş tarafı yukarıya doğru konkav ise başlangıç noktası düzeltilir. Bunun için eğrinin doğru kısmı aşağıya doğru uzatılarak apsis eksenine kestirilir. Bu kesim noktası başlangıç kabul edilerek sağ tarafa doğru 2.5 mm ve 5.0 mm uzaklıktaki yeni noktalar belirlenir ve okumalar bu noktalardan geçen düşey doğrular üzerinden yapılır (Kumbasar ve Kip, 1999).



Şekil 6.20. CBR deneyi (TS 1900-2)

6.4.3. Esneklik Modülü (M_R) Deneyi

Karayolu tabakalarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi karayolu tabakalarının tasarımının doğru olarak yapılmasına ve karayolu tabakalarının performansında önemli etkilere sahiptir. Bu nedenle karayolu tabakalarının trafik yükü altında davranışının tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Ancak hareketli bir tekerlek yükü nedeniyle tabakalara aktarılan gerilme oldukça karmaşıktır. Şekil 6.21’de bir karayolu tabakasının maruz kaldığı yatay, düşey ve kayma gerilmeleri gösterilmiştir. Bağlayıcısız tabakalarda düşey ve yatay gerilmeler pozitifdir, kayma gerilmesi ise yük geçerken ters çevrilmekte ve böylece ana gerilme eksenlerinin dönmesine neden olur. Trafik yükü altındaki karayolu tabakalarının deformasyon tepkileri, esnek ve kalıcı deformasyon olmaktadır (Lekarp, Isacson ve Dawson, 2000).



Şekil 6.21. Kaplama tabakasına etki eden gerilmeler (Lekarp vd., 2000)

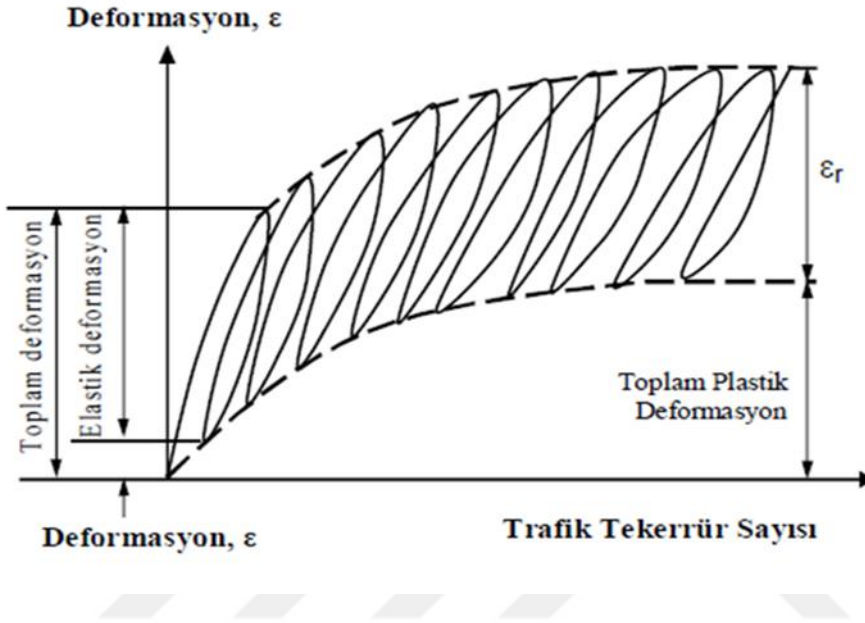
Esneklik modülü, malzemenin tekrar eden yük altındaki elastiklik modülü olup üstyapı tabakalarında yük dağıtma becerisinin ölçüsüdür. Esneklik modülü, kaplamanın altında trafik etkisiyle meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme gerilmelerinin ve üstyapı tabakalarında oluşan basınç gerilmesinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder (Güngör ve Sağlık, 2009). Çoğu üstyapı malzemesi ve zeminler, saf elastik malzeme değildir ancak elastik-plastik davranış gösterir. Bu, statik yük altında kısmen elastik oldukları ama bir miktar kalıcı deformasyon gösterdikleri anlamına gelmektedir. Tekrarlanan yükler altında başlangıçta statik bir yük altında olduğu gibi çalışırlar ve önemli bir miktarda kalıcı deformasyon gösterirler. Ancak belirli tekrarlardan sonra, her bir yük tekrarı altındaki kalıcı deformasyon neredeyse tam olarak geri kazanılabilir ve plastik deformasyonlar azalır. Bununla beraber, eğer tekrar eden yük malzemenin mukavemetine göre küçük ise, belirli sayıda yük tekrarından sonra malzeme elastik davranış gösterdiği kabul edilebilir, aksi takdirde zemin yapısı zarar görür (Ping, Xiong ve Yang, 2003). Şekil 6.22 ve Şekil 6.23’de tekrar eden yükler altındaki bir numunenin deformasyon eğrisi gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde başlangıçta plastik deformasyonların sık bir şekilde geliştiği ancak tekrar eden yük sayısı arttığında plastik deformasyonun giderek azaldığı ve elastik davranış gösterdiği görülmektedir. Üç eksenli ve tekrar eden yük altında test edilen malzemenin esneklik modülü Eşitlik 6.17’de gösterilmiştir.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (6.17)$$

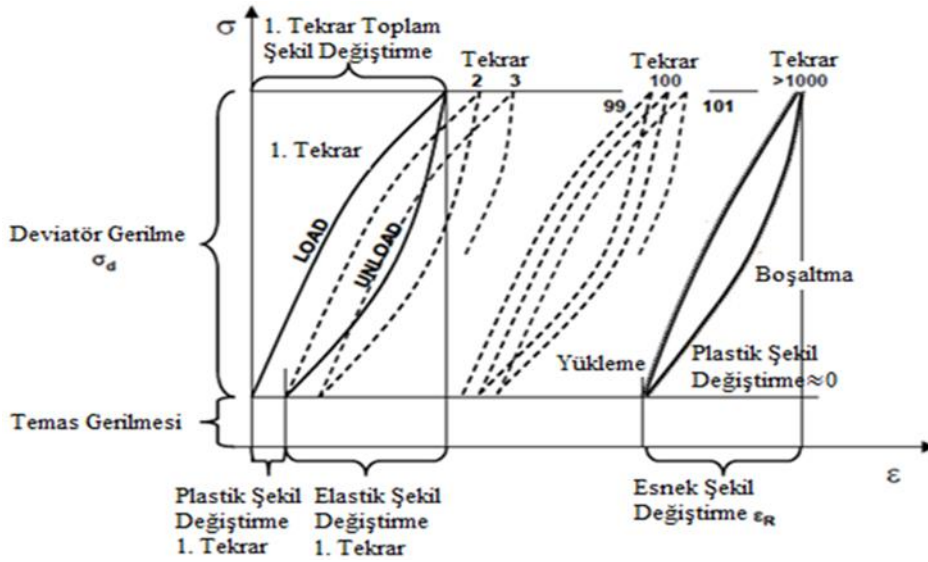
M_R : Esneklik modülü

σ_d : Deviator gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) = Toplam aksel gerilme-hücre basıncı

ϵ_r : Esnek şekil değiştirme (Eksenel yönde)



Şekil 6.22. Malzemelerin tekrarlı yükler altındaki davranışı (Huang, 2004)



Şekil 6.23. Malzemelerin esneklik modülü (Ping vd., 2003)

Esneklik modülünün belirlenmesi için kullanılan AASHTO T 307 standardına göre taban zemini ve temel/alttemel malzemeleri için farklı prosedürler uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında esneklik modülünün belirlenmesi için kullanılacak olan malzemeler temel malzemesi olarak değerlendirileceğinden, AASHTO T 307’de belirtilen temel/alttemel malzemeleri için uygulanan numune hazırlanması, sıkıştırılması ve esneklik modülü deneyinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan prosedürler anlatılacaktır.

Temel/alttemel malzemeleri kullanılarak hazırlanacak olan numunelerde karşılaşılan en büyük problem malzemelerin düşük kohezyonlu veya kohezyonsuz olmalarıdır. Bu durum numunelerin taşınmasında ve kalıptan çıkarılmasında sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle numunelerin sıkıştırılması sırasında membran kullanılarak bu durumun meydana gelmesi engellenmektedir. Membran, Şekil 6.24’de gösterildiği gibi 150 mm çapında, yüksekliği 315 mm olan ortadan ayrılabilen kalıbın içerisine yerleştirilir, kalıbın üst ve alt kısımlarında o-ring ile sabitlenir. Kalıp ile membran arasındaki havanın vakum yardımıyla çekilmesi gerçekleştirilir. Böylece membranın kalıba yapışması sağlanarak, havanın çıkması engellenir.



Şekil 6.24. Kalıp içerisine membranın sabitlenmesi ve vakum uygulanması

Sıkıştırma için hazırlanacak olan numunelerin yoğunluklarının uniform bir şekilde olması için numuneler 6 tabaka halinde sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi Şekil 6.25’de gösterilen titreşimli tokmak yardımıyla gerçekleştirilir. Şekil 6.26’da gösterildiği gibi kuru haldeki numunelere daha önce belirlenmiş olan optimum su muhtevasına karşılık gelecek şekilde su katılarak karıştırma işlemi yapılır. Daha sonra her tabaka için gerekli olan yaş numune miktarı hesaplanarak, kalıp içerisine ilk tabaka için hesaplanan miktarda numune konulur. Sıkıştırma

işlemine başlanır. Hazırlanan numunelerin sıkıştırma işlemi sırasında tabakaların yoğunluklarının birbirine eşit olması için sıkıştırılan her tabakanın yüksekliğinin ölçümü gerçekleştirilir. Son tabakanın üst kısmının boşluksuz ve düzgün bir yüzeye sahip olduğuna dikkat edilmelidir. Çünkü deney sırasında uygulanan yükün doğru bir şekilde aktarılması büyük bir önem arz etmektedir.



Şekil 6.25. Titreşimli tokmak ve numune sıkıştırılması



Şekil 6.26. Numune hazırlanması ve yükseklik kontrolü

Sıkıştırılan numune kalıptan çıkarılarak hücre tabanına yerleştirilir. Hücre tabanı ile numune arasına poroz taş yerleştirilir. Ayrıca numunenin üst kısmına poroz taşı ve poroz taşın

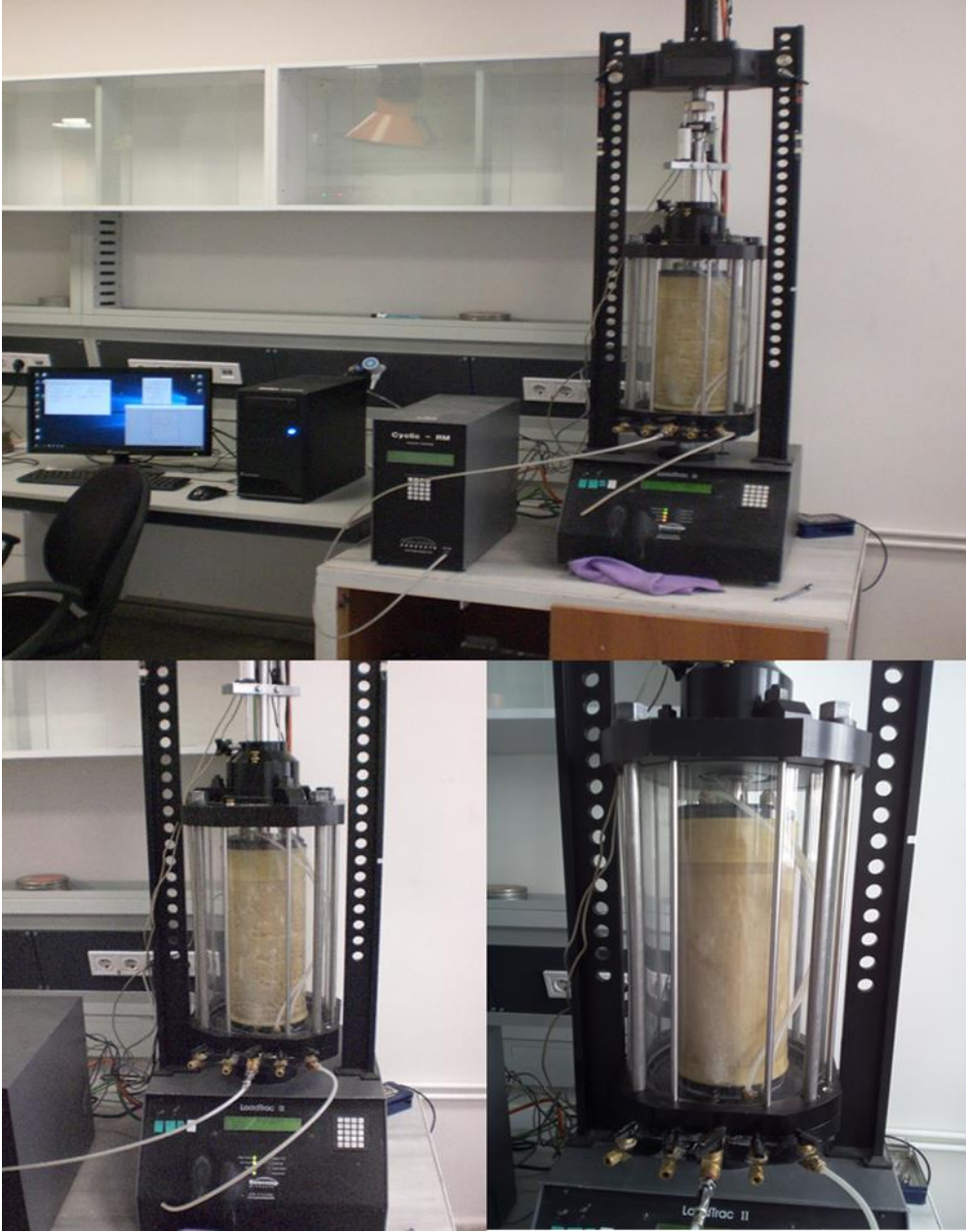
üzerine gelecek şekilde üst plaka yerleştirilir. Numune üzerindeki membran, o-ring yardımıyla hücre tabanı ve üst plakaya sabitlenir. Hücrenin drenaj kanalları bağlanarak camlı üst kısmı, taban plakası üzerine yerleştirilir ve sabitlenir. Deneye hazır hale getirilen hücre esneklik modülü deney cihazına yerleştirilir ve yükleme pistonu ile yük hücresi arasında tam bir merkezleme sağlanır. Bu aşamaların tümü Şekil 6.27’de gösterilmiştir.



Şekil 6.27. Numunenin kalıptan çıkarılarak deney aletine yerleştirilmesi işlemleri

Numune üç eksenli basınç hücresine yerleştirildikten sonra, hücreye basınç kaynağının borusu bağlanır. Deney sırasında hücreye yanal basınç verilir. Yanal basınç uygulamak için

hava kullanılabilir. Deney sırasında kullanılan üç eksenli deney aleti Şekil 6.28’de gösterilmiştir. Deformasyonlar, Şekil 6.29’da gösterilen 2 adet deformasyon ölçer (LVDT) kullanılarak ölçülür. Deformasyon ölçerler hücre dışı üst kısmına ve birbirine göre ters taraflara yerleştirilir. Bilgisayar üzerinden gerekli olan bilgiler ve ayarlamalar yapılarak esneklik modülü deneyi başlatılır.



Şekil 6.28. Üç eksenli deney aleti



Şekil 6.29. Deformasyon ölçer (LVDT) ve yerleşimi

Üç eksenli hücreye yerleştirilen ve gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra temel veya alttemel numunesi üzerinde aşağıda gösterilen adımlar uygulanarak esneklik modülü deneyi gerçekleştirilmektedir;

1. İlk sekansta yani şartlandırma aşamasında numuneye 103,4 kPa yanal basınç uygulanır. En az 500 defa, Çizelge 6.4'de belirtildiği gibi maksimum aksinel gerilme 103,4 kPa ve periyodik aksinel gerilme 93,1 kPa olacak şekilde numune tekrarlı yüklemeler uygulanır. Eğer numunenin boyunda şartlandırma sonunda hala azalma devam ediyorsa, aynı yükleme 1000 devire kadar devam ettirilir. Böylece numune sıkıştırılması ile yükleme arasındaki etkiler giderilmektedir.
2. Toplam düşey kalıcı şekil değiştirme şartlandırma sırasında %5'e ulaşması durumunda şartlandırma işlemi sonlandırılacaktır. Tekrar sıkıştırma yapılacak numuneler için, numunenin yeterli sıkışmamasının nedenlerini belirlemek için sıkıştırma sürecinin incelenmesi yapılacaktır. Eğer inceleme bir açıklama sağlamıyorsa, malzeme ikinci kez yeniden hazırlanacak ve deneye tabi tutulacaktır. İkinci deneyde, numune ön şartlandırma sırasında tekrar toplam %5 düşey kalıcı şekil değiştirmeye ulaşırsa, deney sonlandırılmalı ve rapor edilmelidir.

3. Yükleme Çizelge 6.4'de verilen yükleme sekansları ile devam edilir. Birinci sekansta önce maksimum aksenal gerilme 21,0 kPa'a düşürülür, çevre basıncı (yanal basınç) 21,0 kPa olarak uygulanır. Yarım sinüs dalgası (haversine) formunda, tekrarlı 100 döngüsel yükleme yapılır. Rapor formunda deformasyon ölçerler tarafından kaydedilmiş olan son 5 yükleme için ortalama geri dönüşümlü deformasyonlar ayrı bir şekilde yazılır.
4. İkinci sekansta maksimum aksenal gerilme 41,0 kPa'a yükseltılarak yeni gerilme aralığında tekrarlı yüklemelere devam edilir.
5. Kalan yük sekansları için (3-15) deneye devam edilir ve geri dönüşümlü düşey deformasyonlar kaydedilir. Eğer deformasyon %5'i geçmişse, deney sonlandırılır ve sonuç raporlanır.
6. Esneklik modülü deneyi tamamlandıktan sonra numunede oluşan toplam düşey kalıcı deformasyon ölçülür. Eğer toplam düşey kalıcı deformasyon %5'i aşmamışsa hızlı kesme deneyi yapılabilir.
7. Hızlı kesme deneyi: 34,5 kPa'lık yanal basınç numuneye uygulanır. Deformasyon kontrollü yükleme altında numuneye dakikada %1 deformasyon yapacak şekilde yük uygulanır. Artan deformasyon altında aşağıdaki durumlardan biri oluşursa;
 - artan gerilmelere karşılık yük değerleri düşüyorsa,
 - %5 deformasyona ulaşılmışsa,
 - Hücre kapasitesine ulaşılmışsa deneye son verilir.Sistem içine monte edilmiş olan deformasyon ölçerler yardımıyla yükleme aralığında yük hücresinden veriler okunur.
8. Deney tamamlanır, çevre basıncı sıfıra düşürülür.
9. Membran numuneden çıkarılır ve numunenin su muhtevası belirlenir.
10. Üç eksenli kesme prosedürüne göre numunenin gerilme-deformasyon grafiği çizilir.

Çizelge 6.4. Temel/alttemel malzemeleri için yükleme sekansları (AASHTO T 307)

Sekans No	Çevre Basıncı		Maksimum Eksenel Gerilme		Tekrarlı Gerilme		Temas Gerilmesi		Tekrar Sayısı
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	PSI	kPa	psi	
0	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	500-1000
1	20,7	3	20,7	3	18,6	2,7	2,1	0,3	100
2	20,7	3	41,4	6	37,3	5,4	4,1	0,6	100
3	20,7	3	62,1	9	55,9	8,1	6,2	0,9	100
4	34,5	5	34,5	5	31,0	4,5	3,5	0,5	100
5	34,5	5	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
6	34,5	5	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
7	68,9	10	68,9	15	62,0	9,0	6,9	1,0	100
8	68,9	10	137,9	20	124,1	18,0	13,8	2,0	100
9	68,9	10	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
10	103,4	15	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
11	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
12	103,4	15	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
13	137,9	20	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
14	137,9	20	137,9	20	124,1	18,0	13,8	2,0	100
15	137,9	20	275,8	40	248,2	36,0	27,6	4,0	100

Esneklik modülü deneyi sonrasında elde edilen veriler herhangi bir yükleme serisine ait son 5 yüklemekten elde edilmiş olan ortalama değerlerdir. Her numune için elde edilen esneklik modülü değerlerini değerlendirebilmek için araştırmacılar esneklik modülünün farklı gerilme durumlarında değişimini belirlemek amacıyla değişik matematiksel modeller oluşturmuşlardır. Çünkü gerilme – şekil değiştirme davranışı doğrusal değildir. Doğrusal olmayan bu davranışın açıklanması için oluşturulan modellerde, esneklik modülünün farklı gerilmelere bağlı olduğu belirlenmiştir.

Araştırmacılar tarafından daha önce oluşturulan ve farklı trafik yüklerinin yol katmanlarının rijitlik dağılımını açıklamak amacıyla oluşturdukları non-lineer modeller arasında en çok AASHTO (K- θ) ve Uzan (Universal) modelleri kullanılmıştır.

AASHTO modeli sadece numuneye etkiyen toplam gerilmeyi esas alan basit bir tahmin modelidir ve Eşitlik 6.18 kullanılarak hesaplanmaktadır. Modelde M_R - θ grafiğinde; k_1 eğrinin y eksenini kestiği değer, k_2 değeri ise eğrinin eğimidir.

$$\text{AASHTO Model: } M_R = k_1(\theta)^{k_2} \quad (6.18)$$

Uzan (1985), yaptığı çalışmada toplam gerilme modelinin granüler malzemelerin doğrusal olmayan özelliklerini açıklamada yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu nedenle Uzan (Universal) modelini oluşturmuştur. Bu model numuneye etkiyen deviator gerilme ve toplam gerilmeyi esas alan bir tahmin modelidir. Eşitlik 6.19 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu modeli çözümlenebilmek için eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak Eşitlik 6.20’de gösterildiği gibi lineer regresyona uyumlu hale getirilir. Eşitlikte M_R , θ ve σ_d esneklik modülü deney sonuçlarından elde edilmektedir. k_1 , k_2 , k_3 katsayıları ise regresyon analizi ile bulunabilmektedir.

$$\frac{M_R}{\sigma_{atm}} = k_1 \left(\frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}} \right)^{k_3} \quad (6.19)$$

$$\log \left(\frac{M_R}{\sigma_{atm}} \right) = \log(k_1) + k_2 \left(\log \left(\frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right) \right) + k_3 \left(\log \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}} \right) \right) \quad (6.20)$$

M_R : Esneklik modülü

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

σ_d : Deviator gerilme

σ_{atm} : Atmosfer basıncı

k_1, k_2, k_3 : Regresyon katsayıları

7. ARAŞTIRMA BULGULARI

7.1. Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deneylerin Sonuçları

Çalışmada karayolları teknik şartnamesine (KTŞ) göre tasarımı yapılan plent-miks temel tabakasının malzemeleri olarak kullanılan doğal agrega (DA), atık parke taşı (APT) ve atık tuğlanın (AT) fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneylerin sonuçlarının, KTŞ 2013’de verilen şartname limitlerine göre karşılaştırılması bu bölümde yapılmıştır.

7.1.1. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi Sonuçları

Doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğla özgül ağırlık deney sonuçları ince ve kaba agrega olmak üzere Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Kaba ve ince agrega özgül ağırlık deney sonuçları

Malzeme		Zahiri Özgül Ağırlığı (kN/m ³)	Kuru Özgül Ağırlığı (kN/m ³)	Yüzey Kuru Suyu Doygun Özgül Ağırlığı (kN/m ³)
Doğal Agrega	Kaba Agrega	27,7	26,6	26,9
	İnce Agrega	28,7	23,7	25,5
Atık Parke Taşı	Kaba Agrega	25,3	21,6	23,0
	İnce Agrega	26,1	19,1	21,8
Atık Tuğla	Kaba Agrega	26,0	17,5	20,7
	İnce Agrega	27,8	18,3	21,7

Geçmiş çalışmalarda kırılmış tuğla (CB) malzemesi için elde edilen özgül ağırlık deney sonuçları ile atık tuğla (AT) malzemesi için elde edilen deney sonuçları benzerlik göstermektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda CB kaba agregasının özgül ağırlık değeri; 26,19 kN/m³ (Arulrajah vd., 2011), 26,7 kN/m³ (Arulrajah vd., 2012b), 26,8 kN/m³ (Mohammadinia vd., 2015) olarak bulunmuştur. Atık parke taşı malzemesi (APT) için elde edilen deney sonuçları ise geçmiş çalışmalarda geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Geçmişte yapılan çalışmalarda RCA kaba agregasının özgül ağırlık değeri; 27,1 kN/m³ (Arulrajah vd., 2014), 26,9 kN/m³

(Mohammadinia vd., 2015), 26,06 kN/m³ (Cai vd., 2018), 22,0 kN/m³- 24,0 kN/m³ (Edil, 2018), 2,476 gr/cm³ (Tahmoorian ve Samali, 2018) olarak bulunmuştur.

Doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğla için su emme değerleri Çizelge 7.2’de verilmiştir. Doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğlanın su emme değerleri KTSŞ 2013 şartname limiti ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda doğal agreganın şartname limitinin altında bir değerde su emme değerinin olduğu, atık parke taşı ve atık tuğlanın su emme değerlerinin ise şartname limitlerinin çok üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Çalışmada atık tuğla malzemesi için belirlenen su emme değeri literatürde elde edilen su emme değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Geçmiş çalışmalarda elde edilen su emme değerleri CB malzemesi için; %6,2 (Arulrajah vd., 2014), %7,02 (Mohammadinia vd., 2015) olarak belirlenmiştir. Geçmiş çalışmalarda kullanılan CB malzemesi ile AT malzemesinin su emme değerlerindeki farklılık malzemelerin içeriğinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Atık parke taşı malzemesinin su emme değeri önceki çalışmalarda RCA için elde edilen su emme değerlerine benzerdir. Bozyurt vd. (2012) çalışmalarında 7 farklı bölgeden temin ettikleri RCA üzerinde gerçekleştirdikleri su emme deney sonuçlarını %5-%6,5 arasında belirlemişlerdir. Diğer çalışmalarda ise su emme değeri; %6,5 (Jayakody vd., 2017), %5,5-%6,9 (Edil, 2018), %6,3 (Tahmoorian ve Samali, 2018) olarak elde edilmiştir.

Çizelge 7.2. Su emme deney sonuçları

Malzeme	Su Emme, % (Absorpsiyon)	Şartname Limiti
Doğal Agrega	1,1	≤ 3
Atık Parke Taşı	6,52	≤ 3
Atık Tuğla	16,98	≤ 3

Çalışmada ayrıca doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğlanın birbirleriyle belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışım numunelerinin su emme oranları elde edilmiş ve Çizelge 7.3’de şartname limiti ile karşılaştırılmıştır. Doğal agreganın, atık parke taşı ve atık tuğla ile belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışımların su emme oranının karışım içerisinde bulunan atık parke taşı ve atık tuğla oranının artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Aynı şekilde atık parke taşı ile atık tuğlanın belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışımlardaki tuğla oranının arttıkça su emme oranlarının arttığı belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında doğal agreganın içerisine atık parke taşı karıştırılması ile oluşturulan karışımların su emme değerleri önceki çalışmalarda elde edilen su emme değerleri arasında benzerlik söz konusudur. Tahmoorian ve Samali (2018) yaptıkları çalışmada doğal agrega olarak kullandıkları bazalt agregası içerisine %25, %50 ve %75 oranlarında RCA katılmasıyla oluşturdukları karışımlar üzerinde gerçekleştirdikleri su emme deney sonuçları sırasıyla %2,94, %3,71, %4,62 olarak belirlemişlerdir.

Çizelge 7.3. Karışımların su emme deneyi sonuçları

Numuneler	No	Su Emme, %	Ortalama	Şartname Limiti
%15 DA+%85 APT	1	5,36	5,34	≤ 3
	2	5,32		
%25 DA+%75 APT	1	4,58	4,75	≤ 3
	2	4,91		
%50 DA+%50 APT	1	4,12	4,11	≤ 3
	2	4,11		
%75 DA+%25 APT	1	3,08	3,04	≤ 3
	2	3,00		
%85 DA+%15 APT	1	2,69	2,58	≤ 3
	2	2,47		
%50 DA+%50 AT	1	7,81	7,97	≤ 3
	2	8,13		
%75 DA+%25 AT	1	4,33	4,15	≤ 3
	2	3,97		
%50 APT+%50 AT	1	11,17	10,78	≤ 3
	2	10,38		
%75 APT+%25 AT	1	8,56	8,62	≤ 3
	2	8,68		
%50 DA+%25 APT+ %25 AT	1	4,83	4,81	≤ 3
	2	4,80		

7.1.2. Los Angeles Aşınma Deneyi Sonuçları

Karayolu inşaatında kullanılan agregalar atmosferik, mekanik ve trafik yüklerine maruz kalmaktadır. Agregalarda maruz kaldığı etkenlerden dolayı aşınma, parçalanma, ufalanma ve kırılma gibi olaylar meydana gelmektedir. Bu durumda karayolu tabakalarında bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle Los Angeles aşınma deneyi yapılmakta ve agregaların aşınma oranları tespit edilmektedir. Çalışmada doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğla üzerinde yapılan aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma oranları KTŞ 2013’de belirtilen şartname limiti ile Çizelge 7.4’de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda doğal agreganın aşınma değerinin şartname limitinin altında olduğu, atık parke taşı aşınma değerinin şartname limitine yakın bir değerde olmasına rağmen şartname limitini aştığı, atık tuğlanın ise şartname limitinin çok üzerinde bir aşınma değeri gösterdiği bulunmuştur.

Atık tuğla malzemesi için elde edilen Los Angeles aşınma değeri geçmiş çalışmalarda elde edilen aşınma değerlerinden daha yüksektir. Geçmiş çalışmalarda CB malzemesi için aşınma değerleri %36 (Arulrajah vd., 2014), %35,47 (Mohammadinia vd., 2015) olarak bulunmuştur. Atık parke taşı malzemesi için elde edilen Los Angeles aşınma değeri ile geçmiş çalışmalarda elde edilen aşınma değerleri arasında benzerlik bulunmaktadır. Geçmiş çalışmalarda RCA malzemesi için aşınma değerleri; %37 (Gabr ve Cameron, 2012), %34 (Jimenez vd., 2012), %28 (Arulrajah vd., 2014), %28 (Disfani vd., 2014), %30,8 (Mohammadinia vd., 2015), %30,2-%33,8 (Kumar, 2017) olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.4. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları

Malzeme	Los Angeles Aşınma Değerleri (%)	Şartname Limiti (%)
Doğal Agregası	10,84	≤ 35
Atık Parke Taşı	35,79	≤ 35
Atık Tuğla	82,84	≤ 35

7.1.3. Yassılık İndeksi Deney Sonuçları

Karayolu tabakalarını oluşturacak olan agregaların yassı danelerden oluşması durumunda, maruz kalacağı yüklerden dolayı karayolu tabakalarının stabilitesi azalmaktadır. Bu nedenle agregalar şartnamede belirtilen yassılık indeksi değerinden yüksek bir değerde olmaması gerekmektedir. Çizelge 7.5’de çalışmada doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğla

için elde edilen yassılık indeksi değerleri ve KTŞ 2013'deki şartname limiti verilmiştir. Çalışmada elde edilen değerler şartname limitleri ile karşılaştırıldığında doğal agrega ve atık parke taşının şartname limitinin altında bir değerde olduğu ancak atık tuğlanın şartname limitinin üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Yassılık indeksi değerleri geçmiş çalışmalarda CB malzemesi için; %14 (Arulrajah vd., 2013a), %25,9 (Mohammadinia vd., 2015) olarak bulunmuştur. RCA malzemesinin geçmiş çalışmalardaki yassılık indeksi değerleri ise; %8 (Jimenez vd., 2012), %11 (Arulrajah 2013a), %16,44 (Mohammadinia vd., 2015) olarak bulunmuştur. Atık malzemelerin yassılık indeksi değerleri geçmiş çalışmalarda elde edilen değerlere bakıldığında farklılık göstermektedir. Çalışmada elde edilen yassılık indeksi değerleri önceki çalışmalarda elde edilen değere göre daha yüksek bulunmuştur.

Çizelge 7.5. Yassılık indeksi deney sonuçları

Malzeme	Yassılık İndeksi (%)	Şartname Limiti
Doğal Agrega	21,06	≤ 30
Atık Parke Taşı	23,22	≤ 30
Atık Tuğla	31,17	≤ 30

7.1.4. Organik Madde İçeriği Deney Sonuçları

Karayolları teknik şartnamesine göre temel tabakalarında kullanılacak olan agregalar organik madde içermemesi gerekmektedir. Organik madde içeriğinin tayini için doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğla çözelti içerisinde bekletilerek renk değişimi olup olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan deney sonucunda üç malzemenin çözelti içerisinde bekletildiğinde herhangi bir renk değişiminin olmadığı bu nedenle organik madde içermedikleri sonucuna varılmıştır. Çizelge 7.6'da deney sonuçları ve şartname limiti verilmiştir.

Çizelge 7.6. Organik madde içeriği deney sonuçları

Malzeme	Organik Madde İçeriği	Şartname Limiti
Doğal Agrega	Negatif	Negatif
Atık Parke Taşı	Negatif	Negatif
Atık Tuğla	Negatif	Negatif

7.1.5. Kil Topağı ve Dağılabilen Dane Oranı Deney Sonuçları

Karayolu teknik şartnamesine göre karayolu yapımında kullanılacak olan agregaların kil topağı ve dağılabilen dane oranı şartname limitinden düşük veya eğit olması gerekmektedir. Doğal agregaya, atık parke tağı ve atık tuğlanın kil topağı ve dağılabilen dane oranı izelge 7.7’de verilmiştir. Şartname limitleri ile karşılaştırıldığında doğal agregaya ve atık parke tağının şartname limitinin altında kaldığı, atık tuğlanın ise şartname limitinin üzerinde bir değerde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.7. Kil topağı ve dağılabilen dane oranı deney sonuçları

Malzeme	Kil Topağı ve Dağılabilen Dane Oranı (%)	Şartname Limiti (%)
Doğal Agregaya	0,37	≤ 1
Atık Parke Tağı	0,27	≤ 1
Atık Tuğla	1,22	≤ 1

7.1.6. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları

Agregaların hava tesirine karşı dayanıklılığı donma zlme etkilerine karşı gösterdiği mukavemete bağlı olarak değişmektedir. Özellikle donma zlme bölgelerinde agregaya danelerinin içerisinde bulunan suyun donması sonucu oluşan hacim genleşmesiyle oluşan ilave gerilmeler agregaya danelerin parçalanmasına neden olmaktadır. Bu durum karayolları tabakalarının granülometrisinin bozulmasına yol açacağından hava tesirlerine karşı dayanıklılık karayolu açısından önemli bir etkindir.

Doğal agregaya, atık parke tağı ve atık tuğlanın hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi sonucunda yaşadıkları kayıp izelge 7.8’de şartname limitleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre; doğal agregaya ve atık parke tağının şartname limitinin altında değerlere sahip olduğu, atık tuğlanın ise şartname limitinin üzerinde bir değere sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen değerler sonucunda şartnameye göre su emmesi yüksek olan atık tuğla hava tesirlerine karşı en düşük dayanıklılığı göstermiştir. Benzer şekilde su emmesi şartname limitinin üzerinde ancak hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi şartname limitini sağlayan atık parke tağı, doğal agregadan daha düşük bir dayanım göstermiştir.

Çalışmada kullanılan atık parke tağı malzemesinin hava tesirlerine karşı dayanıklılık değeri, geçmiş çalışmalarda RCA üzerinde gerçekleştirilen hava tesirlerine karşı dayanıklılık

deneyleri sonucunda elde edilen sağlamlık değerleri arasında benzerlik bulunmaktadır. Geçmiş alışmalarda RCA üzerinde gerçekleştirilen hava tesirine karşı dayanıklılık deneylerinden elde edilen sağlamlık değerleri; %19,7 (Gabr ve Cameron, 2012), %14,3-%15,7 (Haider vd., 2014), %16,17 (Kumar,2017) olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.8. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları

Numune	Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi Değeri (%)	şartname Limiti (%)
Doğal Agregası	11,64	≤ 20
Atık Parke Taşı	18,75	≤ 20
Atık Tuğla	47,4	≤ 20

7.1.7. Likit Limit ve Plastik Limit Deney Sonuçları

Çalışmada kullanılan doğal agregası, atık parke taşı ve atık tuğla üzerinde plastik limit deneyi gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin plastik limit değerinin bulunması için 3 mm çapında ve 10 mm boyunda silindirler oluşturılmaya çalışılmış ancak üç malzeme içinde silindirler oluşturulamamıştır. Bunun sonucu olarak üç malzemenin de plastik özellik göstermediği belirlenmiştir. Malzemeler “plastik olmayan” (NP- Non Plastic) sınıfına girdiğinden dolayı, malzemelere likit limit deneyi yapılmamıştır. Malzemeler şartname limiti ile karşılaştırıldığında  malzemenin de izelge 7.9’da verilen şartname limitine göre karayolu tabakalarında kullanım için uygun olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.9. Plastik limit deney sonuçları

Malzeme	Plastisite İndeksi	şartname Limiti
Doğal Agregası	NP	NP
Atık Parke Taşı	NP	NP
Atık Tuğla	NP	NP

7.1.8. Metilen Mavisi Deney Sonuçları

Metilen mavisi deneyi ince agregadaki kil miktarını belirlemek için yapılır. Doğal agregası ile yapılan deneyde; ilk karıştırma işlemi bitirildikten sonra 5 ml boya çözeltisi eklenmiş ve ikinci karıştırma işlemi yapılmıştır. İlk aşamada 1 mm açık mavi halka gözlenememiştir.

1 mm'lik açık mavi halka oluşuncaya kadar her defasında 5 ml boya çözeltisi karışıma ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Doğal agrega için 1 mm açık mavi halkanın 90 ml boya çözeltisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Atık parke taşı ile yapılan deneyde ilk karıştırma bittikten sonra 5 ml boya çözeltisi eklenmiş ve ikinci karıştırma işlemi yapılmıştır. İlk aşamada 1 mm açık mavi halka gözlemlenmemiştir. Her defasında 5 ml boya çözeltisi karışıma eklenerek karıştırmaya devam edilmiştir. 30 ml boya çözeltisinde 1 mm açık mavi halkanın olduğu saptanmıştır.

Atık tuğla ile yapılan deneyde ilk karıştırma bittikten sonra 5 ml boya çözeltisi eklenmiş ve ikinci karıştırma işlemi yapılmıştır. İlk aşamada 1 mm açık mavi halka gözlemlenmemiştir. Her defasında 5 ml boya çözeltisi eklenerek karıştırmaya devam edilmiştir. Atık tuğla malzemesinde 1 mm açık mavi halka 20 ml boya çözeltisinde saptanmıştır.

Yapılan metilen mavisi deneyleri sonucunda doğal agrega, atık parke taşı ve atık tuğla metilen mavisi değerleri Çizelge 7.10'da gösterilmiş ve şartname limitleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.10. Metilen mavisi deney sonuçları

Numune	Metilen Mavisi Değeri (gr/kg)	Şartname Limiti (gr/kg)
Doğal Agrega	4,5	$\leq 4,5^*$
Atık Parke Taşı	1,5	$\leq 3,0$
Atık Tuğla	1,0	$\leq 3,0$

** Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanmaması durumunda bu şart aranacaktır.*

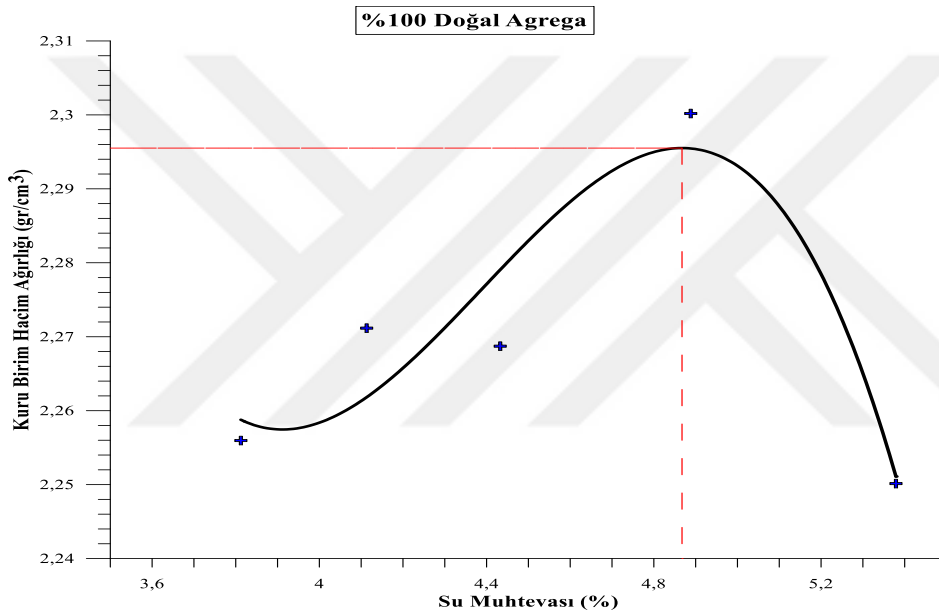
7.2. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deneylerin Sonuçları

7.2.1. Modifiye Proktor Deney Sonuçları

Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'de belirtilen ve Çizelge 6.1'de verilen plent-miks temel tip-1 gradasyon tasarımına uygun olarak %100 doğal agrega (DA), %100 atık parke taşı (APT), %100 atık tuğla (AT) kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde modifiye Proktor deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca temel gradasyon tasarımına uygun olarak DA içerisine %15, %25, %50, %75, %85 oranlarında APT konulması ile hazırlanan numuneler, DA içerisine %25,

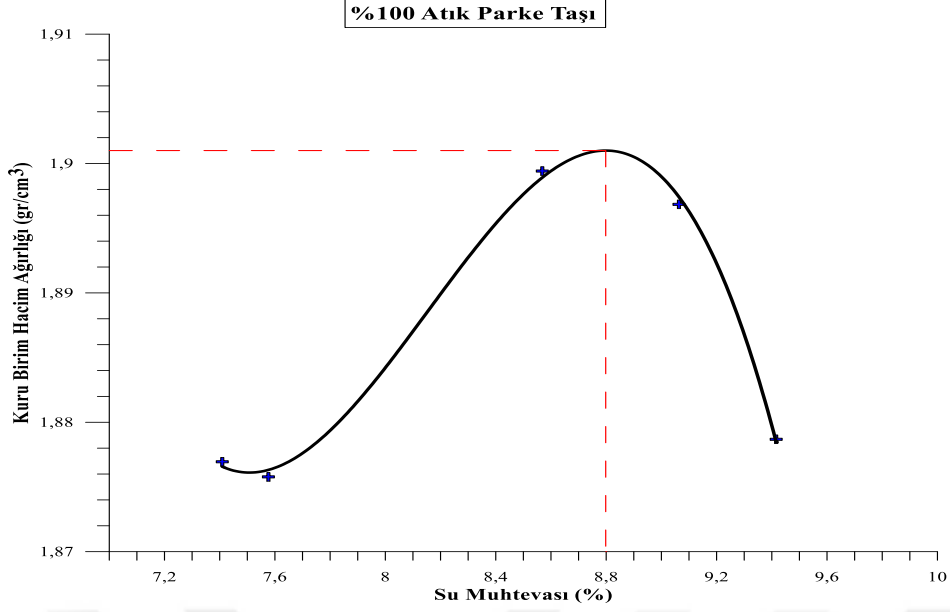
%50 oranlarında AT konulması ile hazırlanan numuneler, APT içerisinde %25, %50 oranlarında AT konulması ile hazırlanan numuneler ve %50 DA- %25 APT- %25 AT içeren üçlü malzeme karışımları için modifiye Proktor deneyi gerçekleştirilmiştir.

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %100 doğal agrega kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.1’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %100 doğal agrega plent- miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 4,86, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 2,295 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



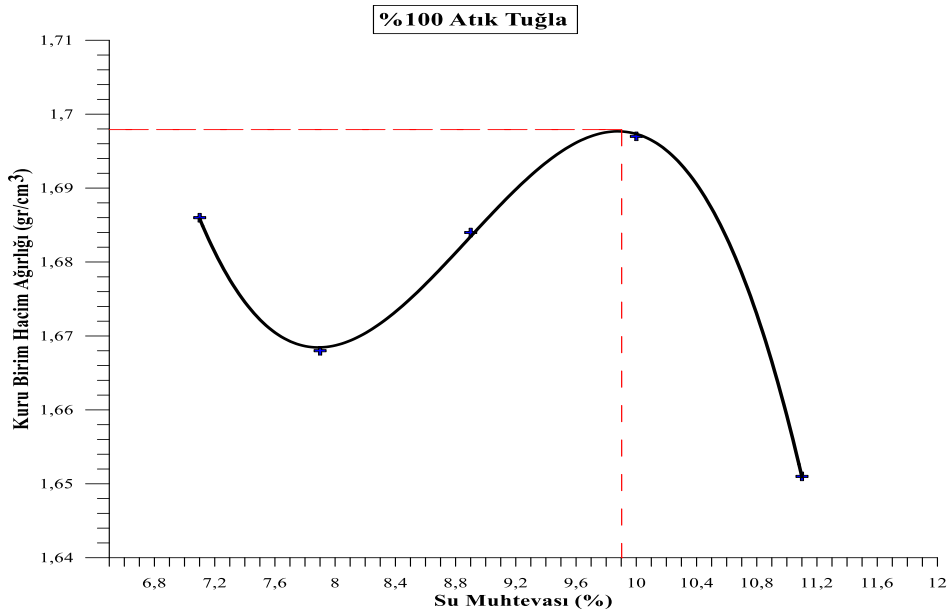
Şekil 7.1. %100 doğal agrega plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %100 atık parke taşı kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.2’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %100 atık parke taşı plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası % 8,79, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1,901 gr/cm³’tür.



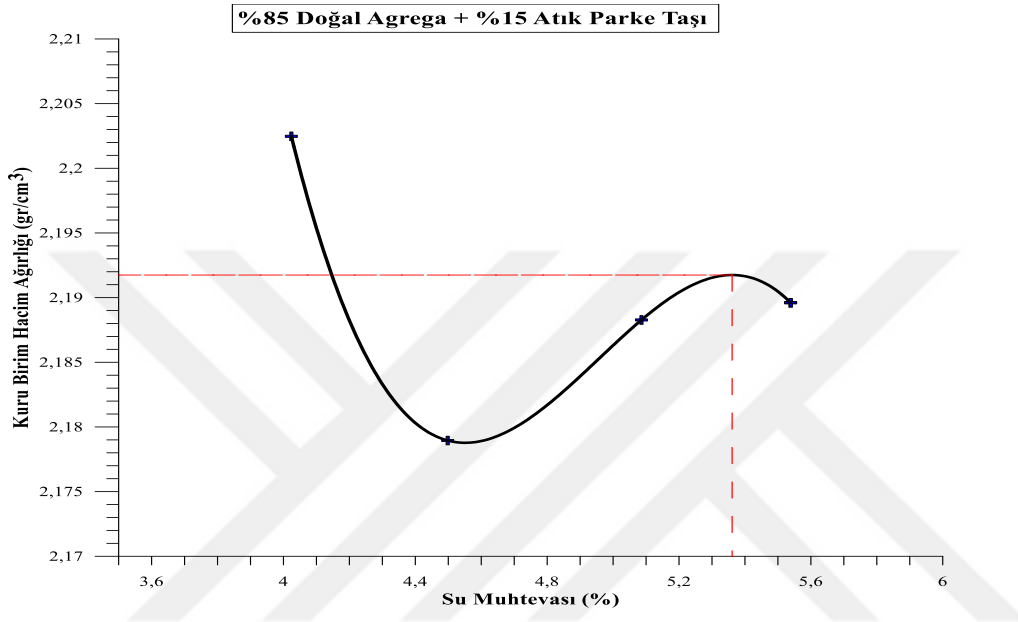
Şekil 7.2. %100 atık parke taşı plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %100 atık tuğla kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.3’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %100 atık tuğla plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 9,90, maksimum kuru birim hacim ağırlığı değeri 1,697 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



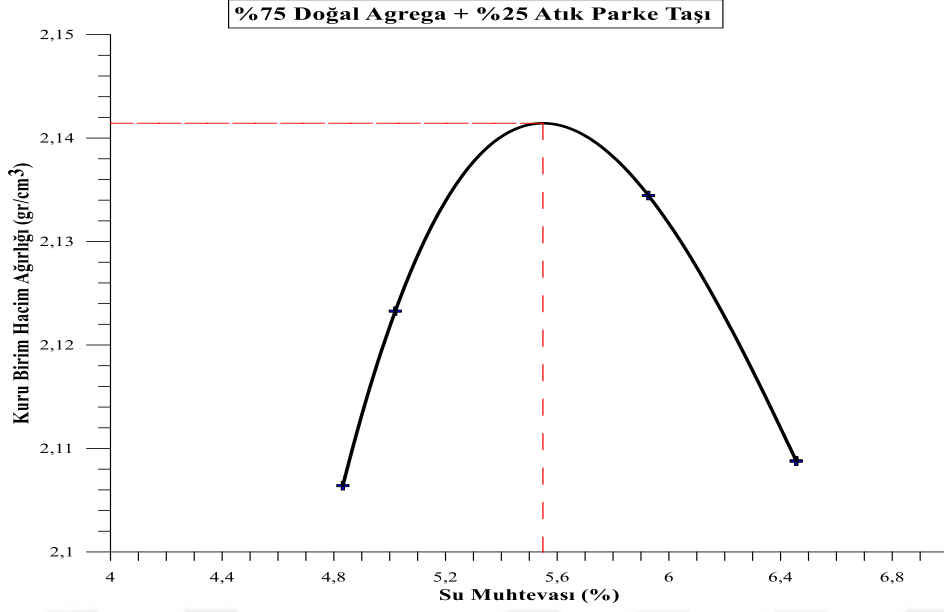
Şekil 7.3. %100 atık tuğla plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %85 DA + %15 APT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.4’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiş ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %85 DA + %15 APT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası % 5,36, maksimum kuru birim hacim ağırlığı değeri 2,191 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



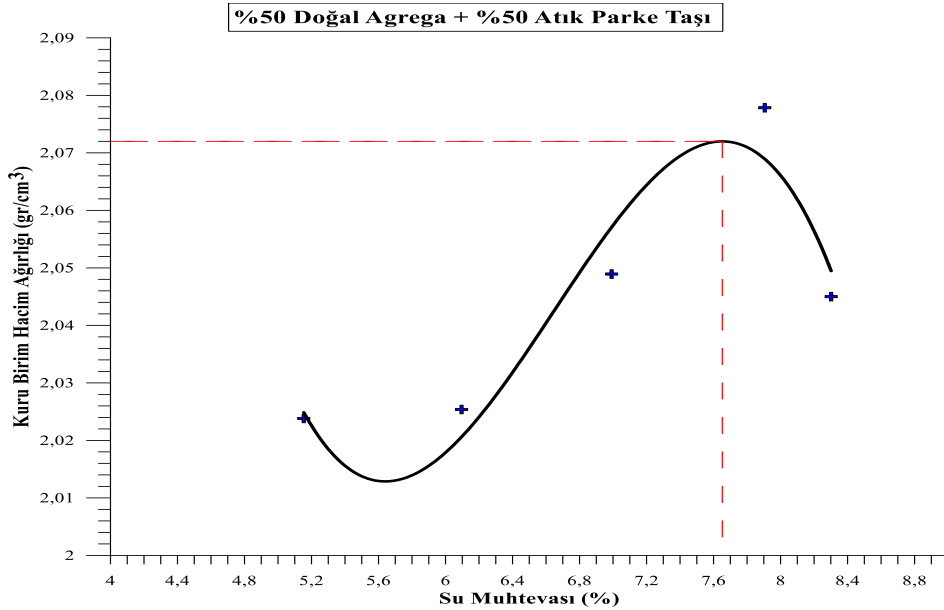
Şekil 7.4. %85 DA + %15 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %75 DA + %25 APT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.5’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiş ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %75 DA + %25 APT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası % 5,55, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 2,141 olarak bulunmuştur.



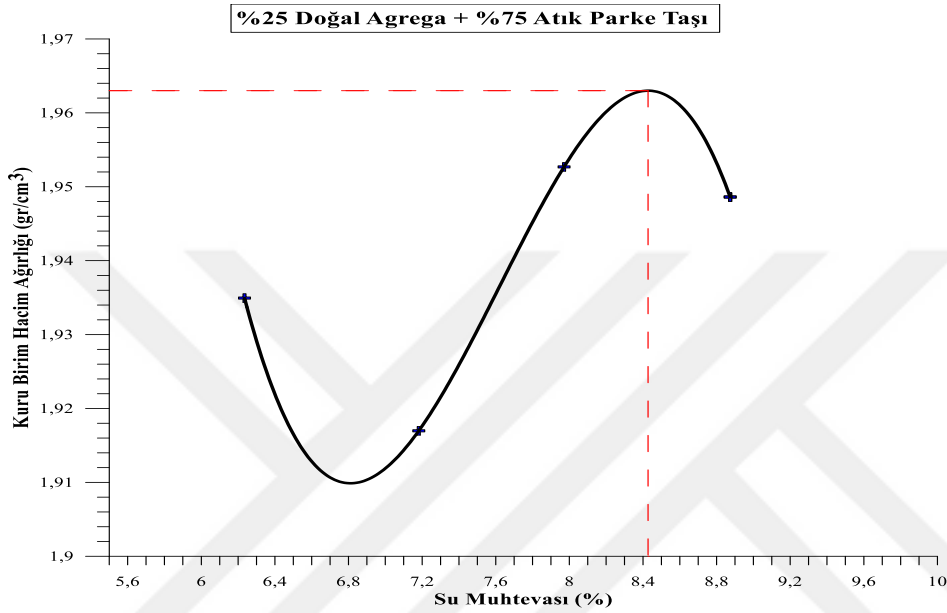
Şekil 7.5. %75 DA + %25 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor eğrisi deneyi sonucunda %50 DA + %50 APT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.6'da modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiş ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %50 DA + % 50 APT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 7,65, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 2,072 olarak bulunmuştur.



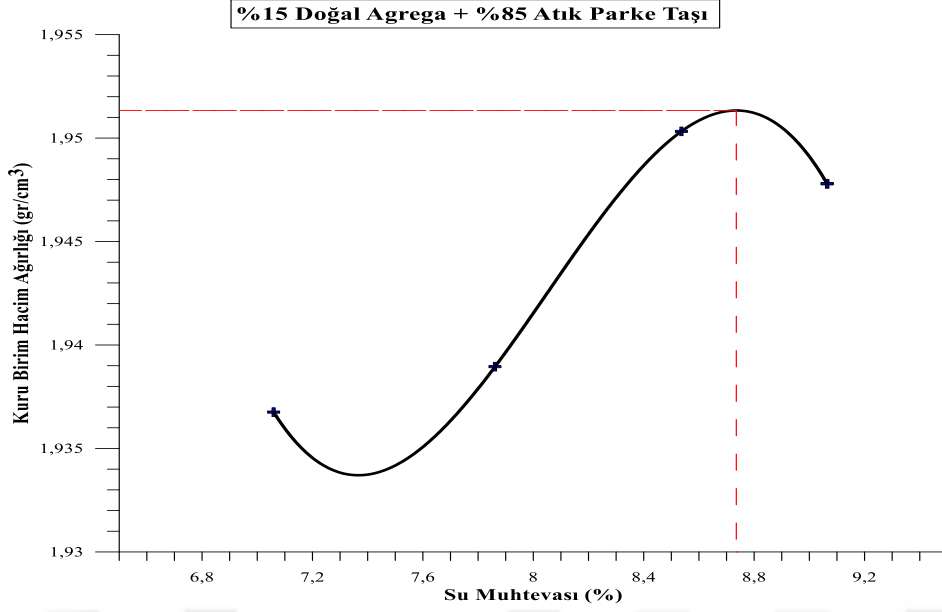
Şekil 7.6. %50 DA + %50 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %25 DA + %75 APT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.7’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %25 DA + %75 APT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 8,42, maksimum kuru birim hacim ağırlığı değeri 1,963 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



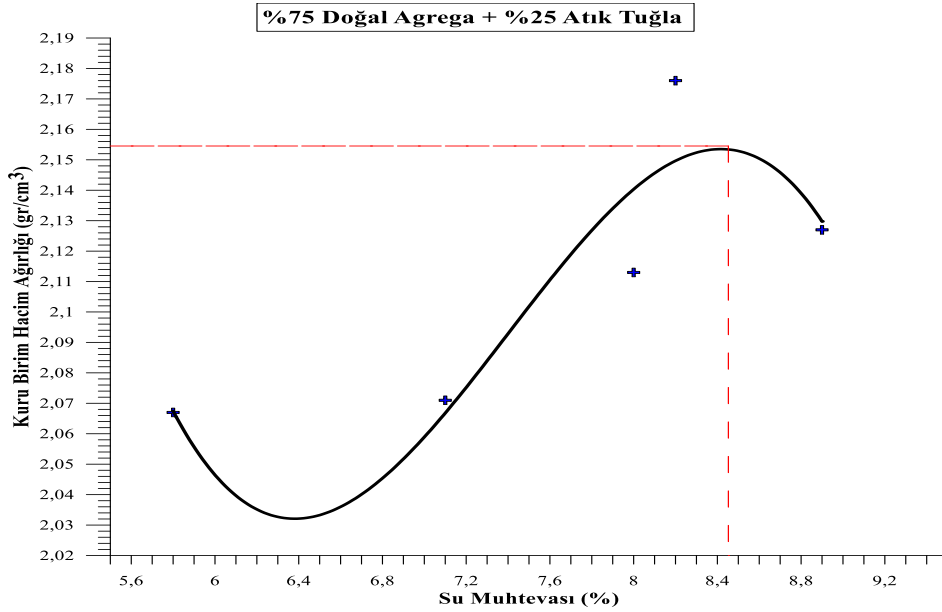
Şekil 7.7. %25 DA + %75 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %15 DA + %85 APT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.8’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %15 DA + %85 APT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 8,73, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1,951 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



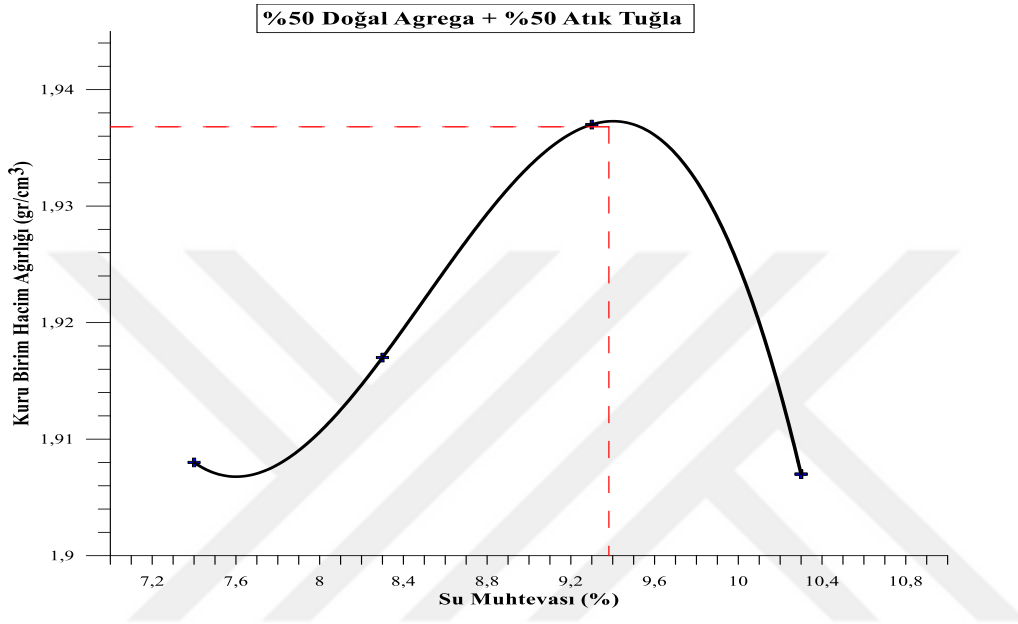
Şekil 7.8. %15 DA + %85 APT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %75 DA + %25 AT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.9’da modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %75 DA + %25 AT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 8,45, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 2,154 olarak bulunmuştur.



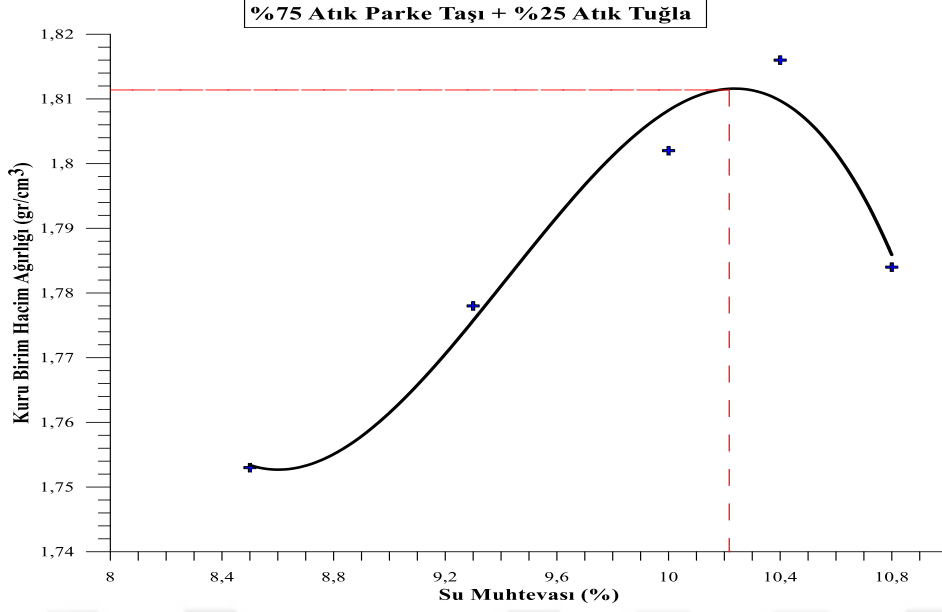
Şekil 7.9. %75 DA + %25 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %50 DA + %50 AT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.10'da modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %50 DA + %50 AT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 9,38, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1,936 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



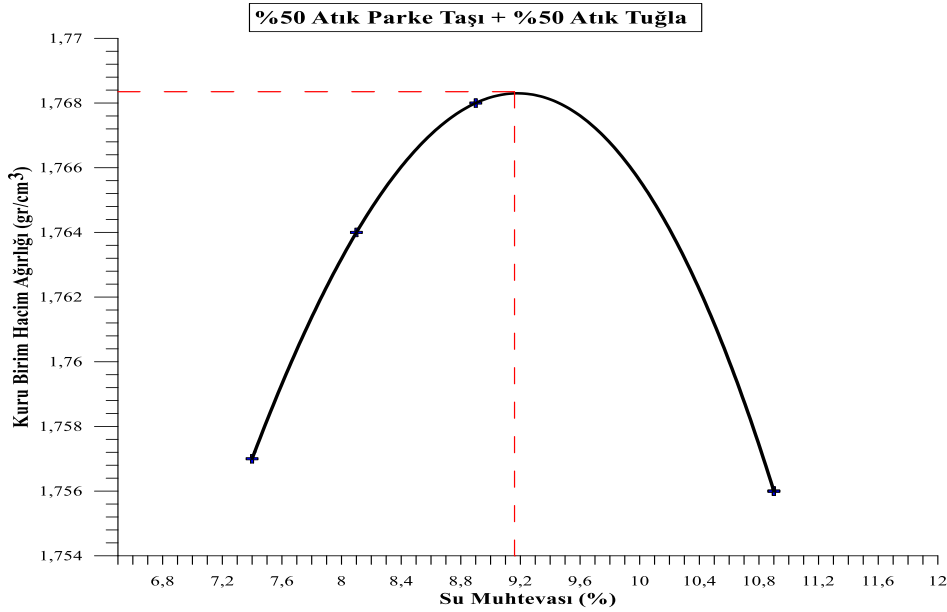
Şekil 7.10. %50 DA + %50 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %75 APT + %25 AT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.11'de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %75 APT + %25 AT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 10,21, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1,811 olarak bulunmuştur.



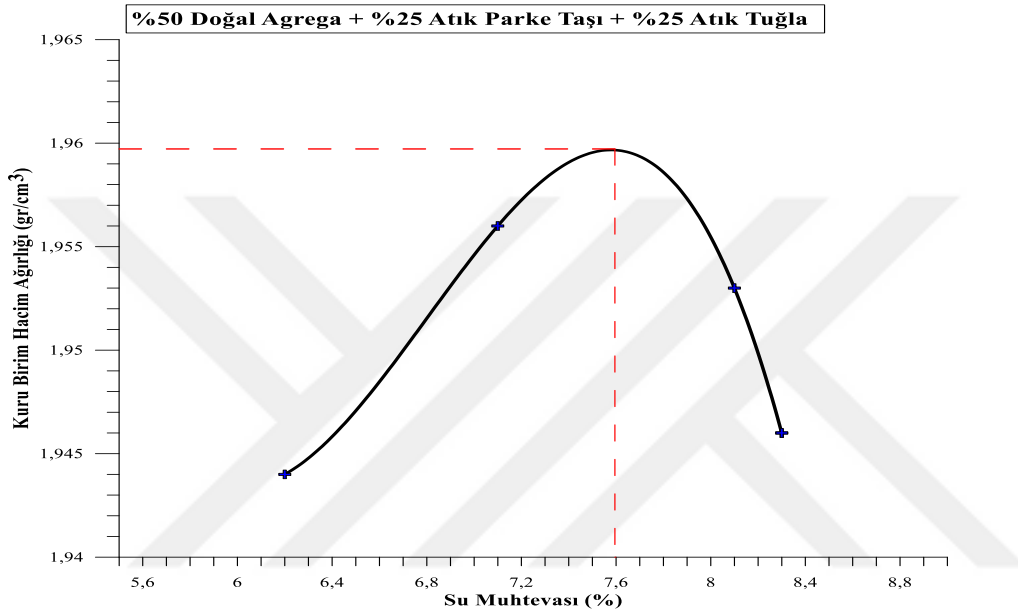
Şekil 7.11. %75 APT + %25 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %50 APT + %50 AT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 7.12’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. %50 APT + %50 AT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri % 9,16, maksimum kuru birim hacim ağırlığı değeri 1,768 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



Şekil 7.12. %50 APT + %50 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

Modifiye Proktor deneyi sonucunda %50 DA + %25 APT + %25 AT kullanılarak hazırlanan plent-miks temel tabakası için su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değer Şekil 7.13’de modifiye Proktor eğrisi üzerinde gösterilmiştir ve eğriden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. % 50 DA + %25 APT + %25 AT plent-miks temel tabakası için optimum su muhtevası değeri %7,29, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1,956 gr/cm³ olarak bulunmuştur.



Şekil 7.13. %50 DA + %25 APT + %25 AT plent-miks temel modifiye Proktor eğrisi

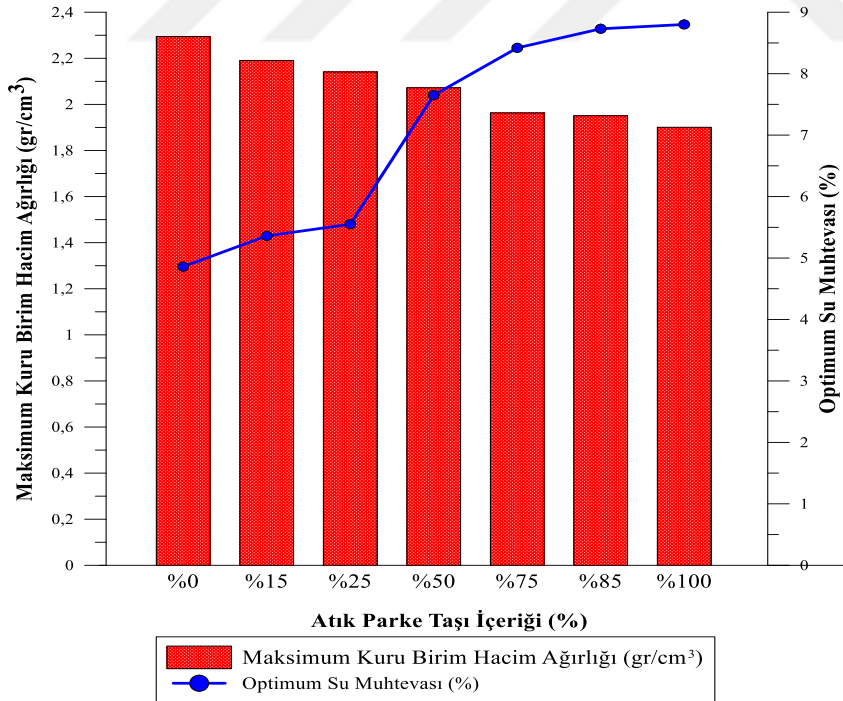
Doğal agregat, atık parke taşı ve bunların belirli oranlarda karıştırılması elde edilen karışımların modifiye Proktor eğrileri üzerinden elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 7.11’de toplu olarak verilmiştir. Ayrıca Şekil 7.14’de doğal agregat içerisindeki atık parke taşı oranına göre elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık- optimum su muhtevası arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bu grafiğe göre atık parke taşı içeriğinin artmasıyla malzemelerin maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı, optimum su muhtevası yüzdesinin arttığı belirlenmiştir.

Önceki çalışmalarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda RCA malzemesi için elde edilen optimum su muhtevası değerleri; %8,7- %11,9 (Bozyurt vd., 2012), %8,0 (Soleimanbeigi ve Edil., 2015), %9,4 (Jayakody vd., 2017), %8,7- %11,8 (Edil, 2018) elde edilmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ise; 18,9 kN/m³- 20,8 kN/m³ (Bozyurt vd., 2012), 19,2 kN/m³ (Soleimanbeigi ve Edil, 2015), 1,764 t/m³

(Jayakody vd., 2017), 19,4 kN/m³- 20,9 kN/m³ (Edil, 2018) olarak belirlenmiştir. Çalışmada atık parke taşı için elde edilen değerler ile geçmiş çalışmalarda RCA malzemesi için elde edilen değerler arasında benzerlik bulunmaktadır.

Çizelge 7.11. Doğal agrega, atık parke taşı ve karışımlarının modifiye Proktor deney sonuçları

Numune	Optimum Su Muhtevası (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı	
		gr/cm ³	kN/m ³
%100 DA	4,86	2,295	22,50
%85 DA + %15 APT	5,36	2,191	21,48
%75 DA + %25 APT	5,55	2,141	20,99
%50 DA + %50 APT	7,65	2,072	20,32
%25 DA + %75 APT	8,42	1,963	19,25
%15 DA + %85 APT	8,73	1,951	19,13
%100 APT	8,79	1,901	18,64



Şekil 7.14. Atık parke taşı içeriğine göre elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı- su muhtevası ilişkisi

Doğal agrega ve atık parke taşının, atık tuğla ile belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışımların modifiye Proktor eğrileri üzerinden elde edilen optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 7.12’de toplu olarak verilmiştir.

Önceki çalışmalarda CB malzemesinin optimum su muhtevası; %10,7 (Arulrajah vd., 2012b), %11,38 (Mohammadinia vd., 2015) olarak bulunmuştur. Ayrıca geçmiş çalışmalarda kırılmış tuğla (CB) malzemesini değişik oranlarda geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve kırma taş (CR) malzemesi içerisine katılarak elde edilen karışım numunelerinin optimum su muhtevalarını belirlenmiştir. Bu karışım yüzdelere göre tez çalışmasına benzer olan yüzde karışımlarına bakıldığında, RCA içerisine %50, %25 oranlarında CB malzemesi karıştırdıklarında elde ettikleri optimum su muhtevası değeri sırasıyla %11, %12 bulunmuştur (Arulrajah vd., 2012b). Aynı şekilde CR malzemesi içerisine %50, %25 oranlarında CB malzemesi karıştırıldığında elde edilen karışımların optimum su muhtevası değerlerini ise her iki karışım içinde %9,20 olarak bulunmuştur (Arulrajah vd., 2012). Tez çalışmasında kullanılan atık tuğla malzemesinin optimum su muhtevası değeri geçmiş çalışmalarda bulunan optimum su muhtevası değerinden daha düşük elde edilmiştir. Çalışmada atık parke taşı içerisine %25 oranında AT katılmasıyla elde edilen karışımın geçmişte yapılan çalışma ile karşılaştırıldığında benzer şekilde optimum su muhtevasında %100 AT’ye göre bir artış yaşanmıştır. DA içerisine %50 AT malzemesi karıştırılması ile elde edilen karışım ise geçmişte yapılan çalışmaya daha yakın bir optimum su muhtevası değeri elde edilmiştir. Önceki çalışmalarda CB malzemesi için elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları; $20,2 \text{ kN/m}^3$ (Arulrajah vd., 2012b), $19,9 \text{ kN/m}^3$ (Mohammadinia vd., 2015) olarak bulunmuştur. RCA ve CR içerisine %50, %25 oranlarında CB konulması ile elde edilen karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlığı geçmiş çalışmalarda; RCA-CB karışımları için sırasıyla $19,9 \text{ kN/m}^3$ ve $19,4 \text{ kN/m}^3$ olarak, CR-CB karışımları için sırasıyla $21,4 \text{ kN/m}^3$ ve $21,3 \text{ kN/m}^3$ olarak bulunmuştur (Arulrajah vd., 2012b). Geçmiş çalışmalarda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri tez çalışmasında elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında, tez çalışmasında elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yalnızca %75 DA + %25 AT malzemesinin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri, geçmiş çalışmada bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlığına yakın bir sonuç almıştır.

Çizelge 7.12. Atık tuğla ve karışımlarının modifiye Proktor deney sonuçları

Numuneler	Optimum Su Muhtevası (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı	
		gr/cm ³	kN/m ³
%100 AT	9,90	1,697	16,64
%50 DA + %50 AT	9,38	1,936	18,98
%75 DA + %25 AT	8,45	2,154	21,12
%50 APT + %50 AT	9,16	1,768	17,34
%75 APT + %25 AT	10,21	1,811	17,76
%50 DA + %25 APT + %25 AT	7,29	1,956	19,18

7.2.2. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deney Sonuçları

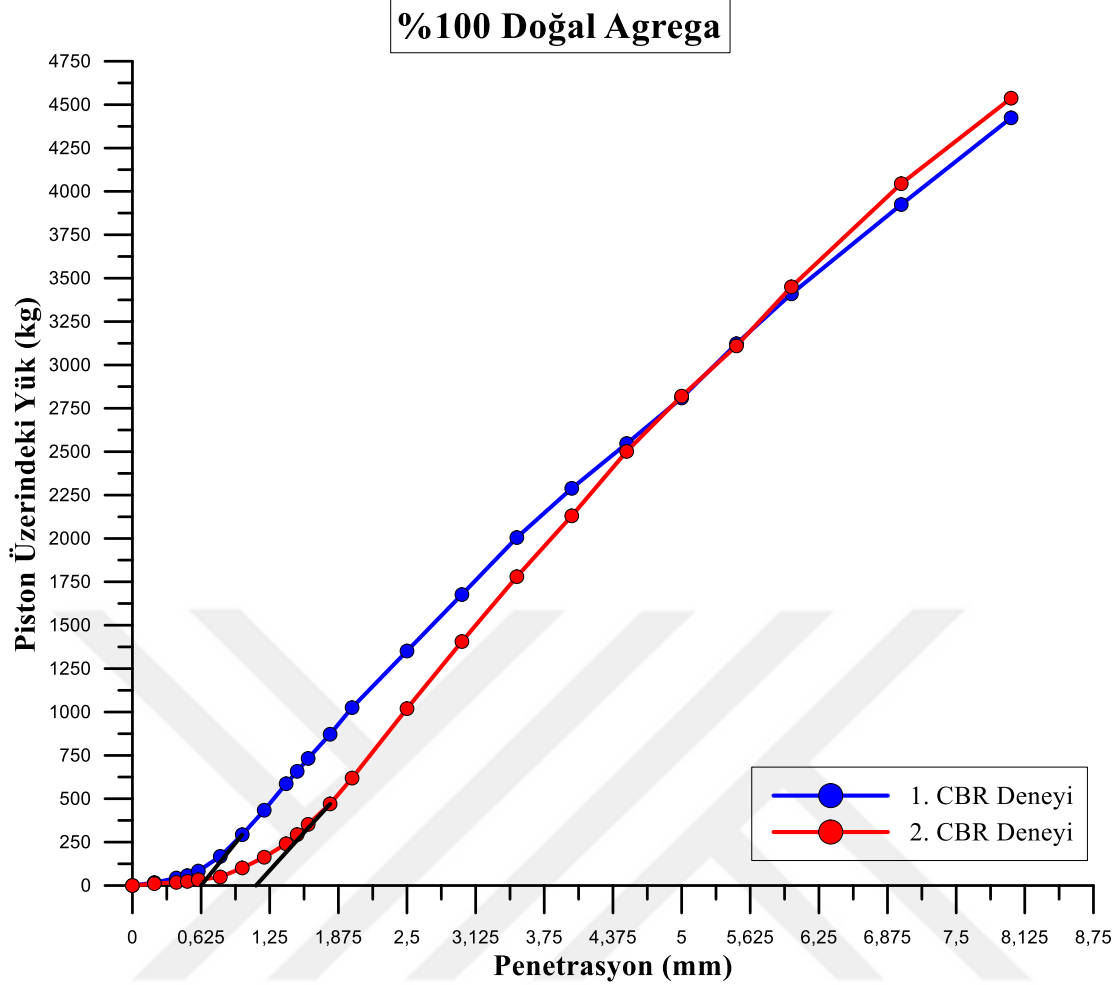
Doğal agrega, atık parke taşı, atık tuğla ve bunların birbirleriyle belirli oranlarda karıştırılması sonucunda elde edilen numunelerin CBR değerlerinin bulunması için modifiye Proktor deneyi ile elde edilen optimum su muhtevası kullanılarak numuneler sıkıştırılmış, her bir karışım için 2 adet CBR numunesi olmak üzere toplamda 26 adet numune hazırlanmıştır. Ayrıca modifiye Proktor sıklığında elde edilen numunelerin su muhtevalarının ve sıkışma yüzdelerinin kontrolleri yapılmıştır. Her bir karışım için hazırlanan 2 adet CBR numunesi 4 gün süreyle su içerisinde bekletilmiştir. Bu süre zarfında şişme kontrolü yapılmıştır. 4. Günün sonunda CBR deneyi gerçekleştirilmiştir.

%100 doğal agrega için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.13'de verilmiştir. %100 doğal agrega için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.15'de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.13'de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %130, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %156 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %138, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %171 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri

alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %100 doğal agrega için elde edilen ortalama CBR değeri %164 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.13. %100 doğal agrega CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	17	11
0,4	43	18
0,5	57	24
0,6	83	33
0,8	168	49
1,0	293	101
1,2	434	163
1,4	587	241
1,5	658	294
1,6	732	352
1,8	872	470
2,0	1025	619
2,5	1351 (1757)	1020 (1881)
3,0	1677	1406
3,5	2005	1780
4,0	2289	2130
4,5	2547	2502
5,0	2810 (3188)	2820 (3496)
5,5	3122	3110
6,0	3410	3450
7,0	3924	4045
8,0	4424	4537

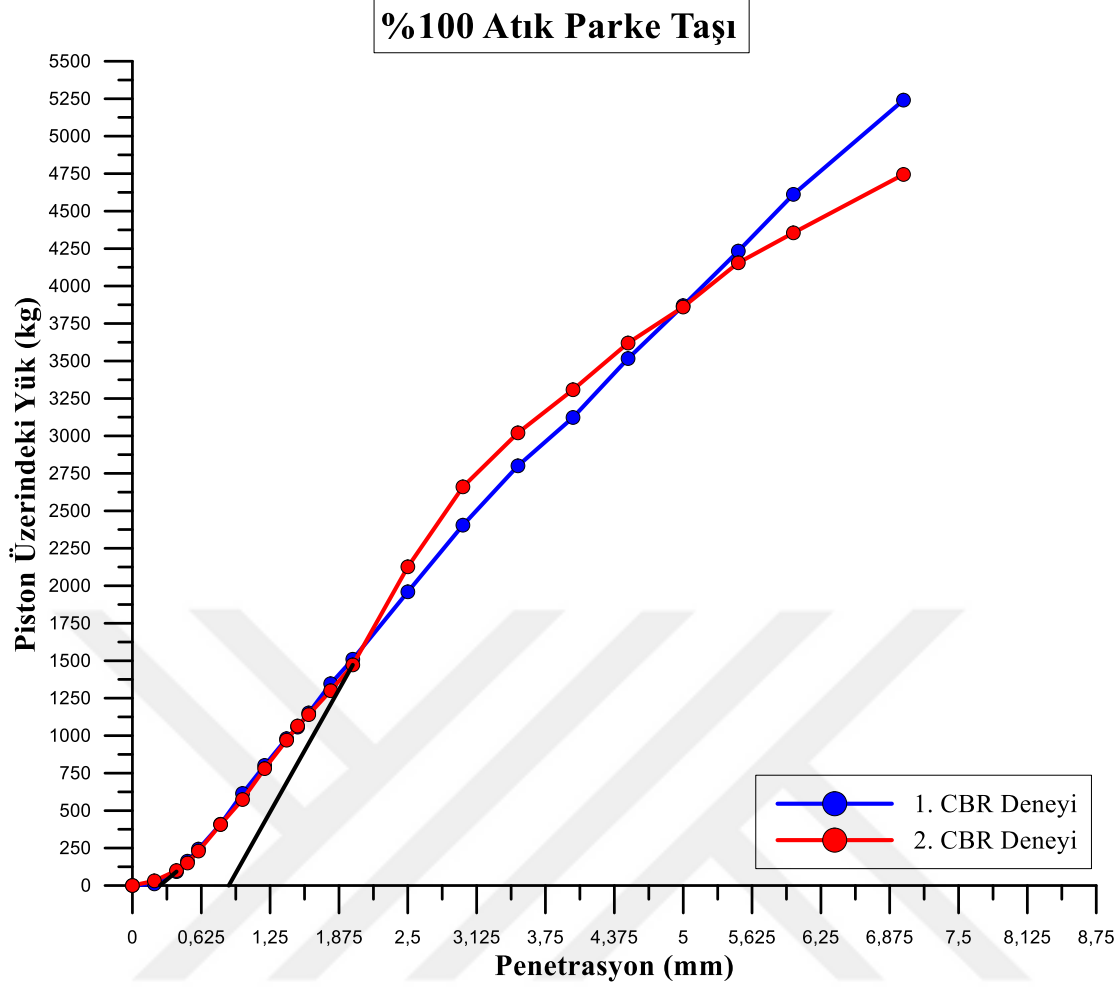


Şekil 7.15. %100 doğal agrega yük-penetrasyon eğrisi

%100 atık parke taşı için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.14’de verilmiştir. %100 atık parke taşı için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.16’da gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.14’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %161, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %199 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %214, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %211 olduğu bulunmuştur. 1. deneye bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değeri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen değer CBR değeri olarak alınmıştır. 2. Deneyde ise 2.5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen değer CBR değeri olarak seçilmiştir. Yapılan iki deney sonucunda %100 atık parke taşı için elde edilen ortalama CBR değeri %206 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.14. %100 atık parke taşı CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	11	31
0,4	93	100
0,5	162	150
0,6	243	230
0,8	409	407
1,0	614	574
1,2	801	780
1,4	980	970
1,5	1057	1064
1,6	1151	1140
1,8	1347	1300
2,0	1510	1472
2,5	1960 (2190)	2127 (2910)
3,0	2404	2660
3,5	2800	3020
4,0	3123	3308
4,5	3516	3620
5,0	3869 (4061)	3860 (4307)
5,5	4233	4155
6,0	4612	4355
7,0	5241	4745

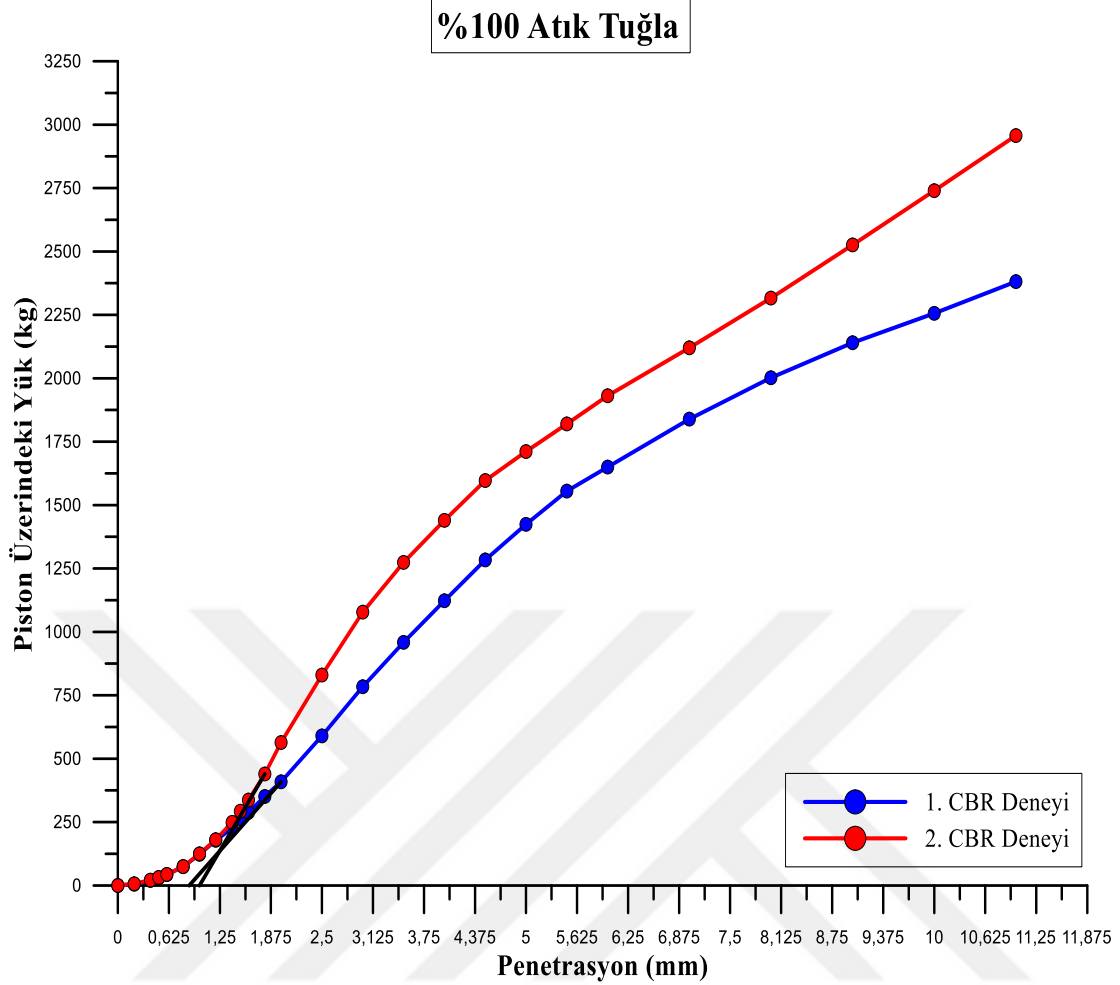


Şekil 7.16. %100 atık parke taşı yük-penetrasyon eğrisi

%100 atık tuğla için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.15’de verilmiştir. %100 doğal agrega için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.17’de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.15’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %67, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %80 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %79, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %95 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %100 atık tuğla için elde edilen ortalama CBR değeri %87 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.15. %100 atık tuğla CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	5	7
0,4	20	21
0,5	30	32
0,6	43	44
0,8	74	75
1,0	123	125
1,2	178	181
1,4	226	249
1,5	263	293
1,6	288	337
1,8	351	440
2,0	409	564
2,5	590 (913)	830 (1078)
3,0	784	1078
3,5	959	1274
4,0	1123	1440
4,5	1284	1597
5,0	1424 (1633)	1711 (1931)
5,5	1555	1820
6,0	1650	1931
7,0	1839	2120
8,0	2002	2316
9,0	2140	2526
10,0	2256	2740
11,0	2381	2957

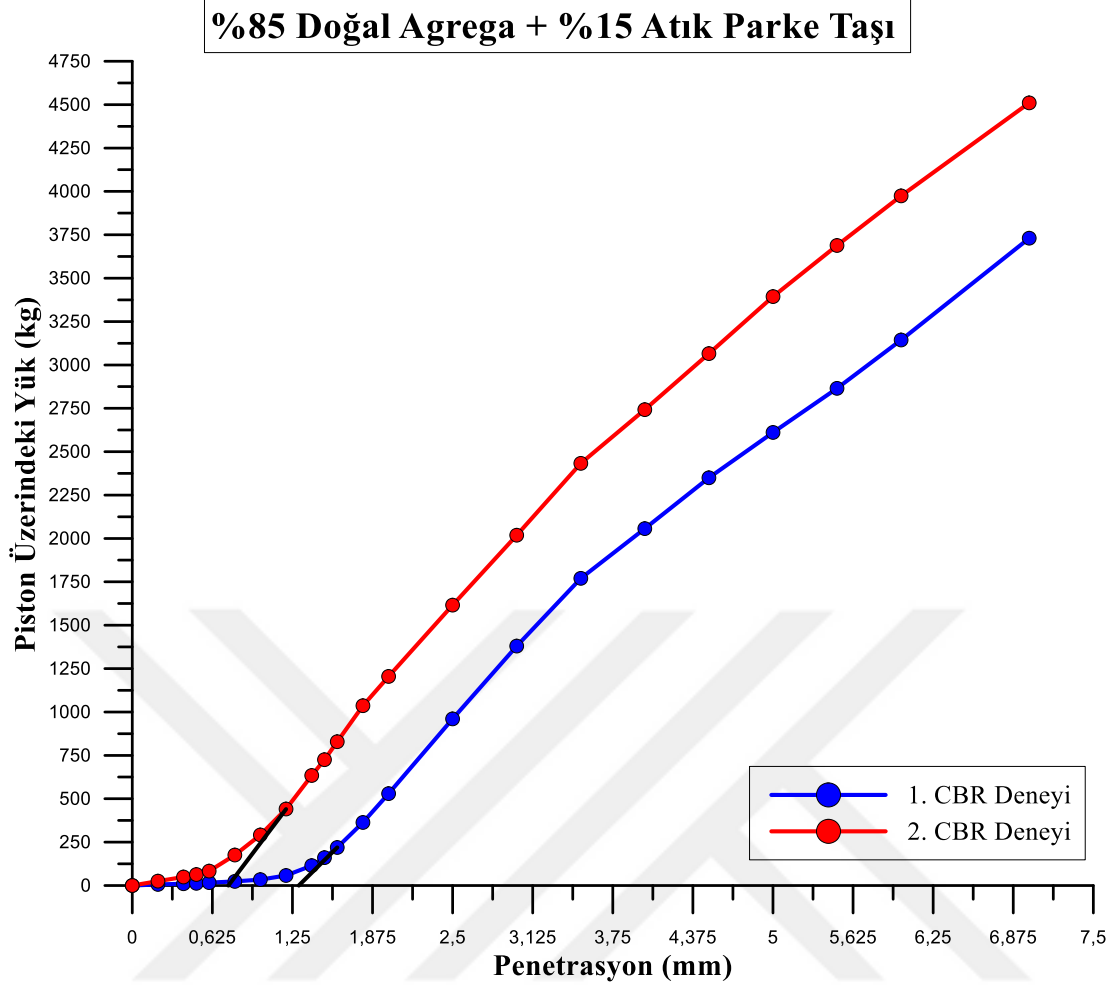


Şekil 7.17. %100 atık tuğla yük-penetrasyon eğrisi

%85 DA + %15 APT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.16'da verilmiştir. %85 DA + %15 APT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.18'de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.16'da düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %88, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %161 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %164, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %188 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %85 DA + %15 APT için elde edilen ortalama CBR değeri %174 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.16. %85 DA + %15 APT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	6	25
0,4	10	49
0,5	13	63
0,6	17	83
0,8	24	176
1,0	34	291
1,2	58	441
1,4	115	634
1,5	161	725
1,6	219	829
1,8	363	1036
2,0	530	1205
2,5	960 (1196)	1616 (2235)
3,0	1380	2019
3,5	1770	2433
4,0	2057	2742
4,5	2350	3065
5,0	2611 (3280)	3394 (3885)
5,5	2865	3688
6,0	3144	3974
7,0	3730	4510

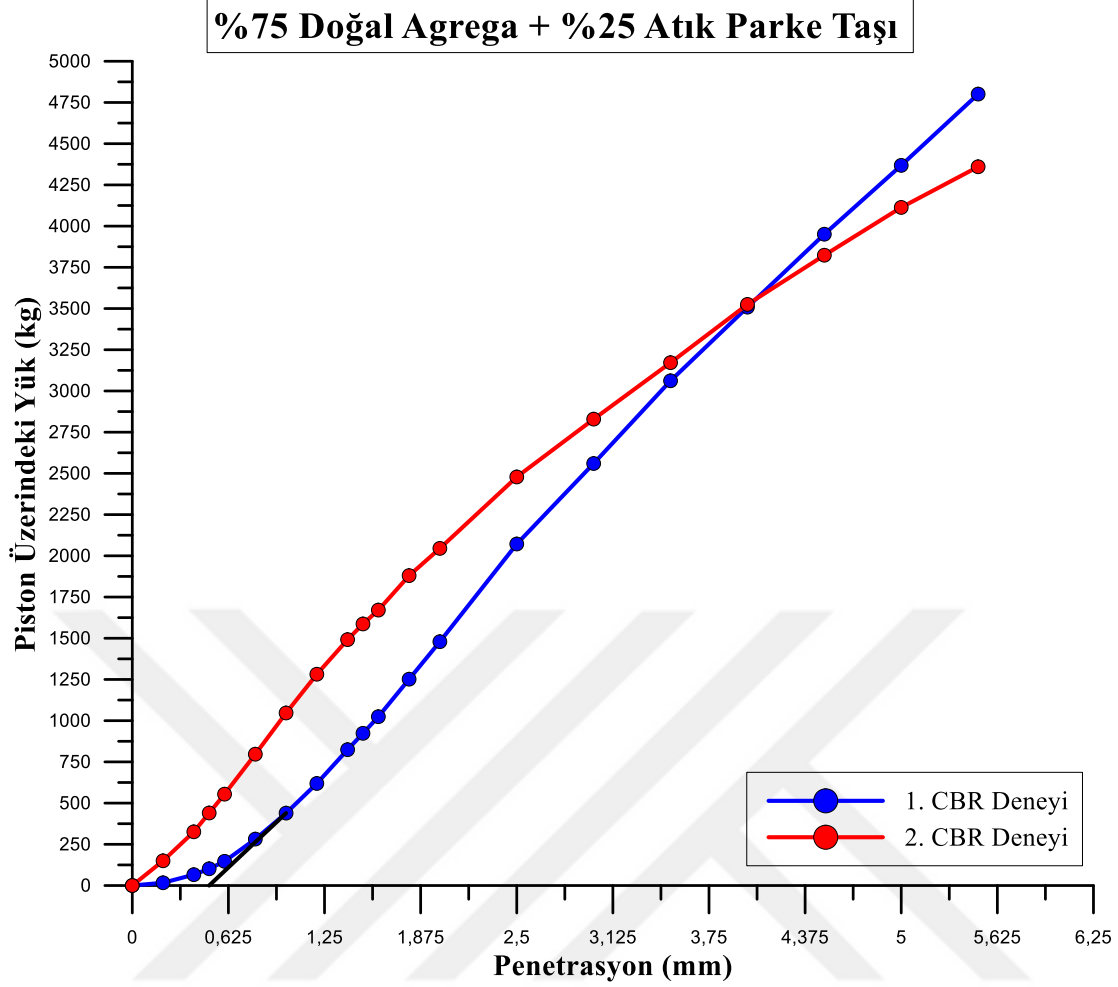


Şekil 7.18. %85 DA + %15 APT yük-penetrasyon eğrisi

%75 DA + %25 APT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.17’de verilmiştir. %75 DA + %25 APT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.19’da gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.17’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %188, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %235 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %182, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %201 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %75 DA + %25 APT için elde edilen ortalama CBR değeri %218 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.17. %75 DA + %25 APT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	17	150
0,4	66	326
0,5	102	440
0,6	147	554
0,8	282	797
1,0	439	1047
1,2	619	1282
1,4	824	1492
1,5	923	1587
1,6	1024	1671
1,8	1252	1880
2,0	1479	2045
2,5	2072 (2560)	2478
3,0	2560	2829
3,5	3062	3172
4,0	3508	3525
4,5	3951	3823
5,0	4368 (4801)	4113
5,5	4801	4360

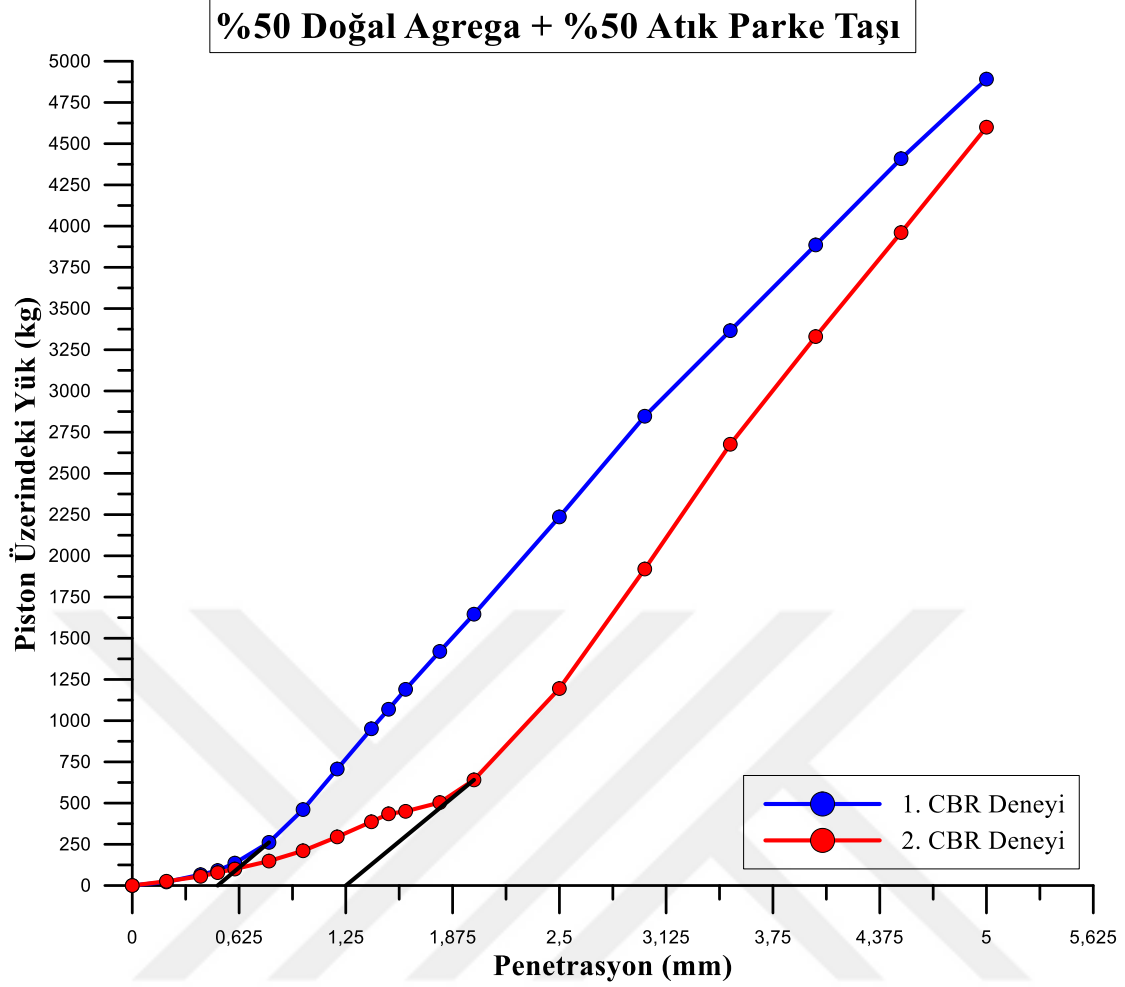


Şekil 7.19. %75 DA + % 25 APT yük-penetrasyon eğrisi

%50 DA + %50 APT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.18’de verilmiştir. %75 DA + %25 APT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.20’de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.18’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %209, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %255 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %219, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %294 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %50 DA + % 50 APT için elde edilen ortalama CBR değeri %275 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.18. %50 DA + %50 APT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	22	26
0,4	66	56
0,5	91	78
0,6	136	100
0,8	262	148
1,0	461	211
1,2	707	295
1,4	951	387
1,5	1069	435
1,6	1190	450
1,8	1420	503
2,0	1646	641
2,5	2236 (2847)	1195 (2980)
3,0	2847	1920
3,5	3366	2677
4,0	3886	3330
4,5	4409	3961
5,0	4892 (5210)	4600 (6013)

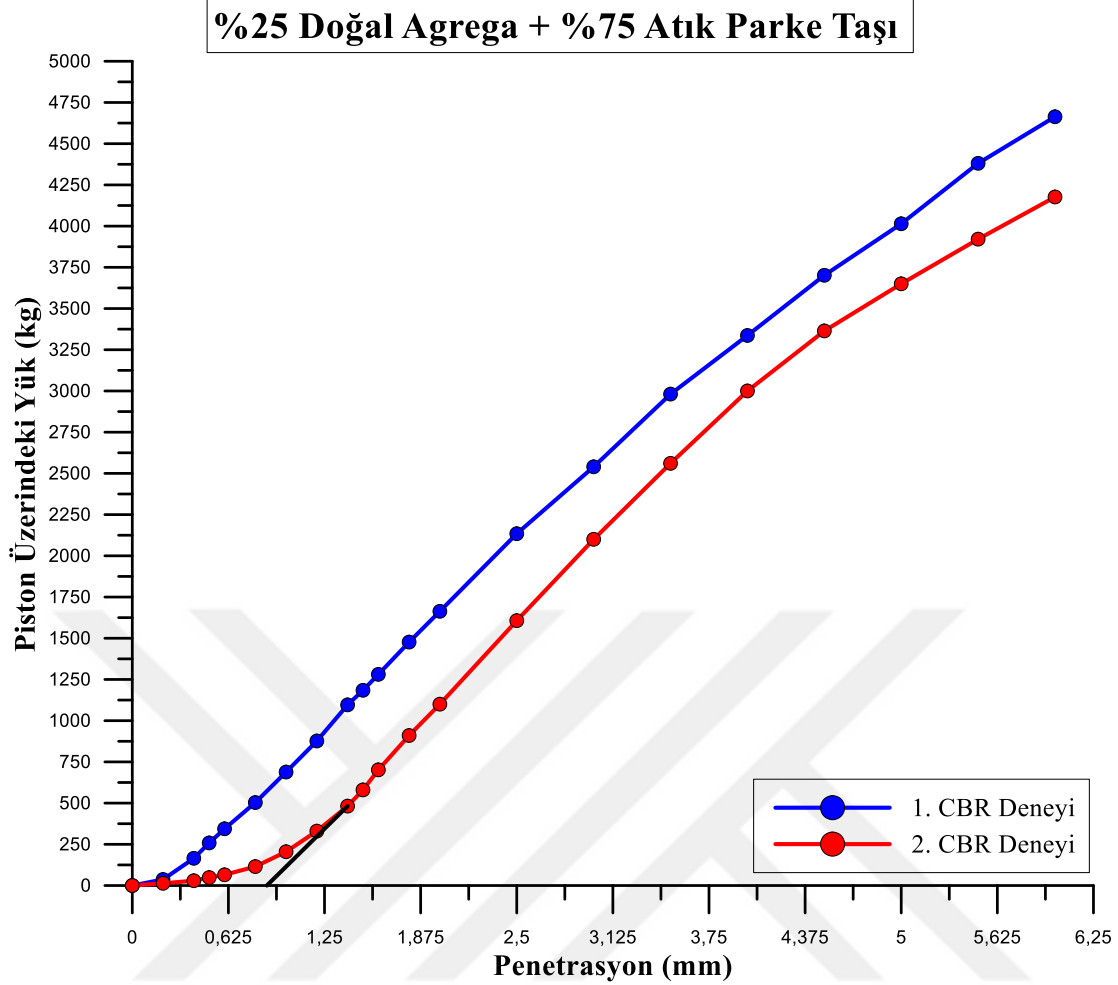


Şekil 7.20. %50 DA + %50 APT yük-penetrasyon eğrisi

%25 DA + %75 APT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.19’da verilmiştir. %25 DA + %75 APT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.21’de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.19’da düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %157, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %196 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %180, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %201 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %25 DA + %75 APT için elde edilen ortalama CBR değeri %199 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.19. %25 DA + % 75 APT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	37	13
0,4	165	29
0,5	258	48
0,6	344	65
0,8	503	115
1,0	688	205
1,2	877	330
1,4	1096	482
1,5	1184	580
1,6	1281	702
1,8	1477	910
2,0	1663	1100
2,5	2134	1607 (2458)
3,0	2540	2100
3,5	2981	2561
4,0	3337	3000
4,5	3702	3364
5,0	4014	3650 (4098)
5,5	4381	3921
6,0	4663	4177

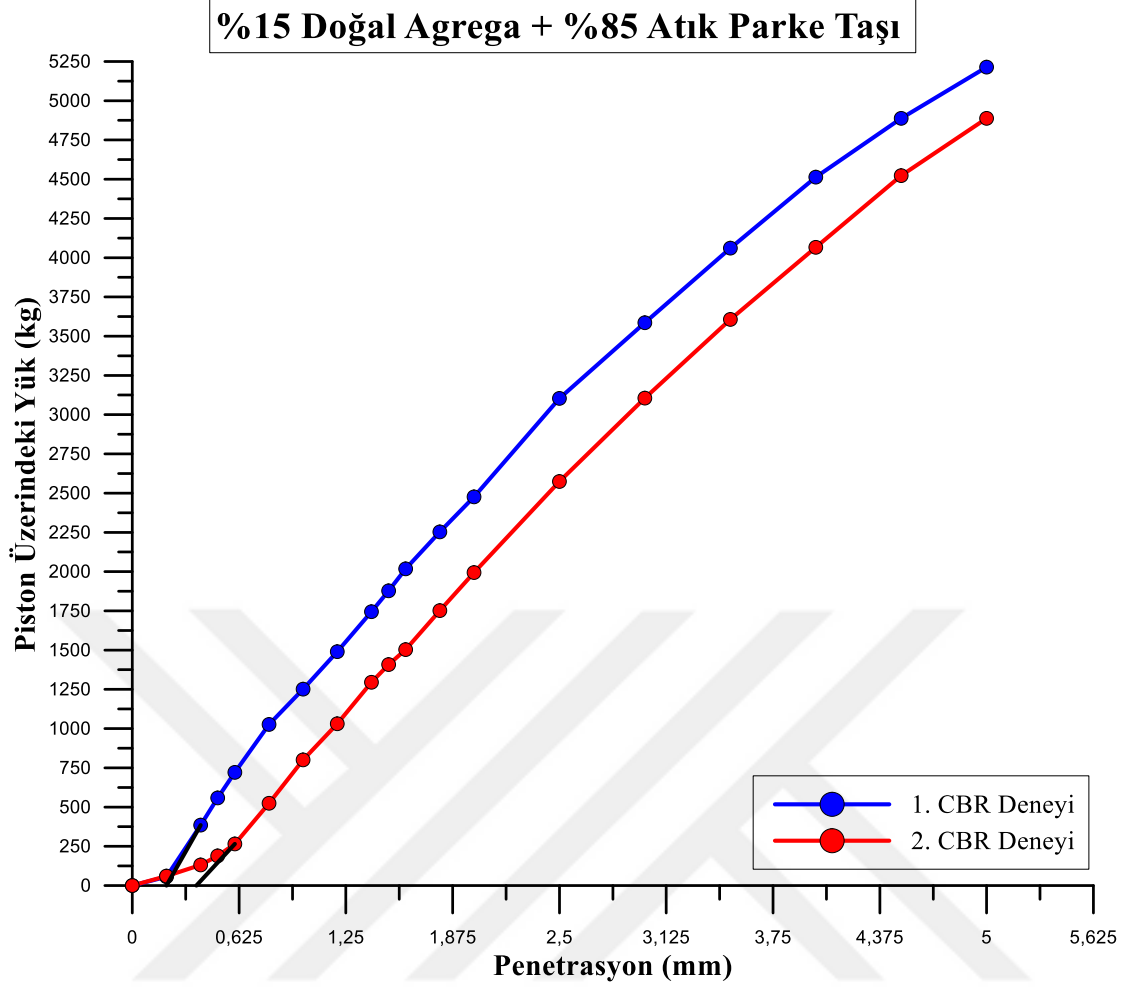


Şekil 7.21. %25 DA + %75 APT yük-penetrasyon eğrisi

%15 DA + %85 APT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.20’de verilmiştir. %15 DA + %85 APT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.22’de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.20’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %242, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %262 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %218, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %241 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %15 DA + %85 APT için elde edilen ortalama CBR değeri %252 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.20. %15 DA + %75 APT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	56	60
0,4	385	131
0,5	558	189
0,6	721	265
0,8	1026	524
1,0	1251	801
1,2	1451	1031
1,4	1745	1295
1,5	1878	1408
1,6	2018	1503
1,8	2253	1752
2,0	2476	1994
2,5	3104 (3294)	2574 (2970)
3,0	3586	3105
3,5	4061	3607
4,0	4513	4066
4,5	4888	4523
5,0	5214 (5355)	4888 (4923)

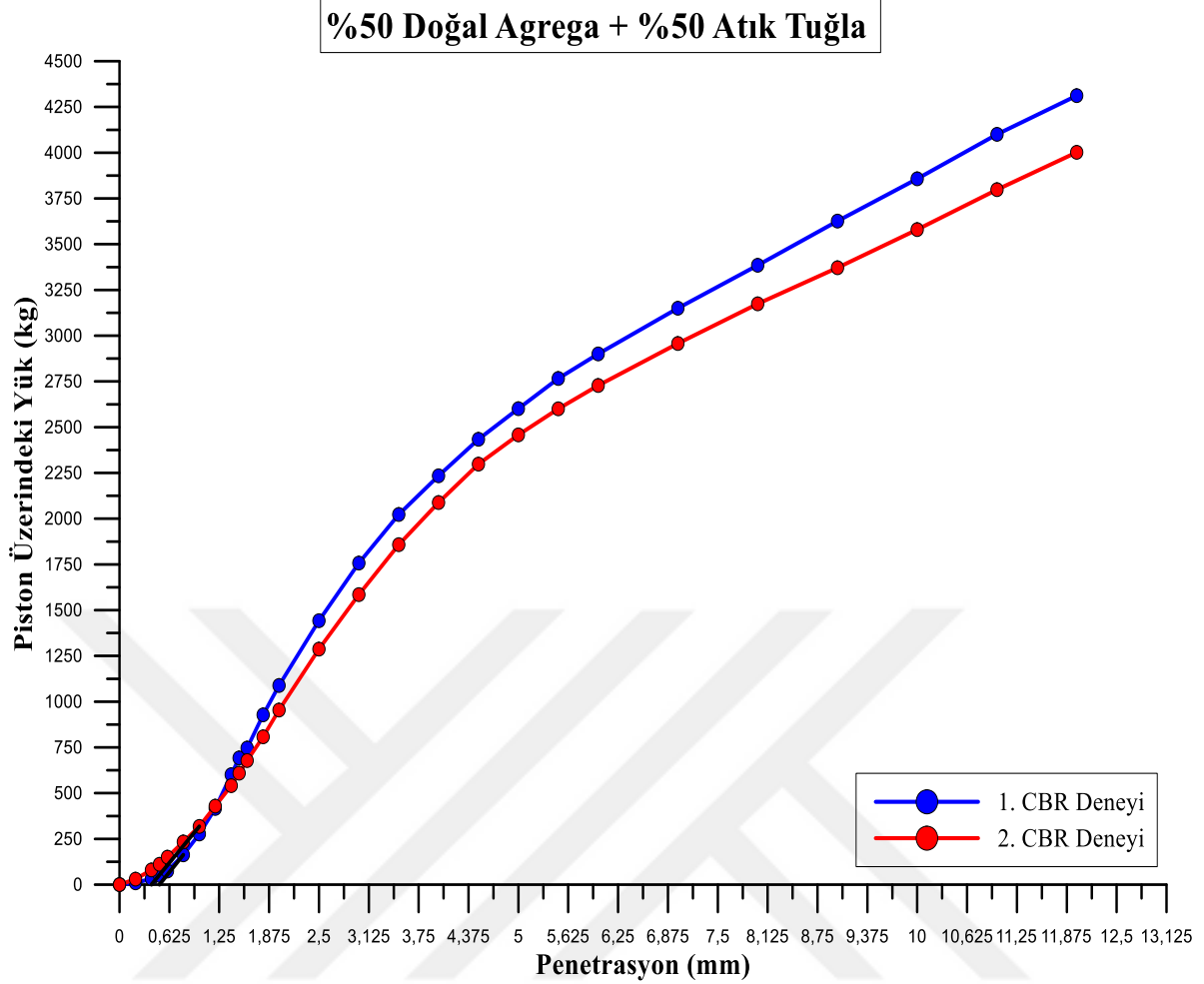


Şekil 7.22. %15 DA + %85 APT yük-penetrasyon eğrisi

%50 DA + %50 AT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.21’de verilmiştir. %15 DA + %85 APT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.23’de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.21’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %129, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %135 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %112, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %126 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %50 DA + %50 AT için elde edilen ortalama CBR değeri %131 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.21. %50 DA + %50 AT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	10	30
0,4	32	80
0,5	50	111
0,6	74	150
0,8	163	233
1,0	277	318
1,2	416	429
1,4	601	541
1,5	692	609
1,6	746	678
1,8	928	808
2,0	1088	954
2,5	1442 (1757)	1287 (1520)
3,0	1757	1585
3,5	2023	1858
4,0	2234	2088
4,5	2434	2298
5,0	2601 (2766)	2458 (2581)
5,5	2766	2600
6,0	2900	2728
7,0	3150	2957
8,0	3385	3174
9,0	3626	3371
10,0	3857	3580
11,0	4100	3798
12,0	4312	4002

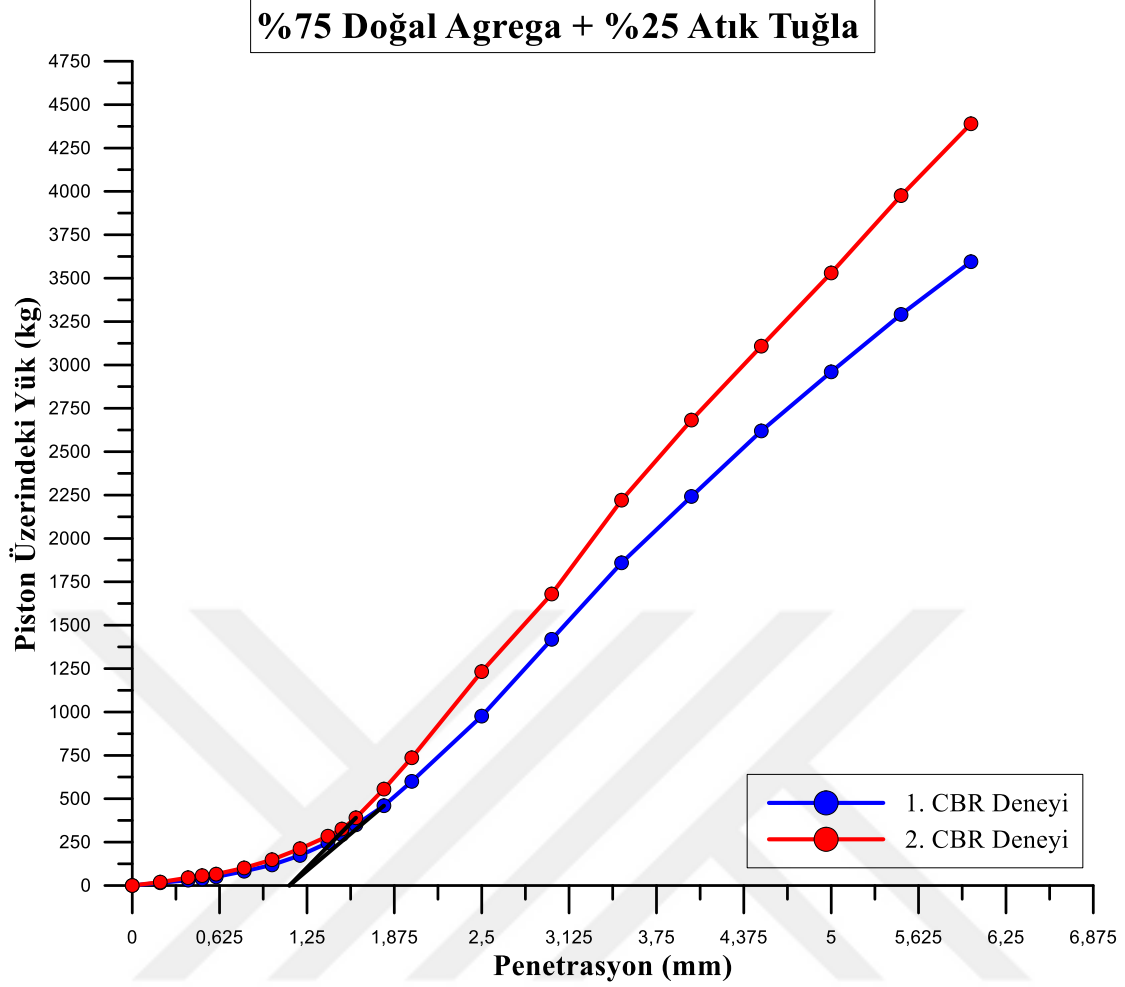


Şekil 7.23. %50 DA + %50 AT yük-penetrasyon eğrisi

%75 DA + %25 AT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.22’de verilmiştir. %75 DA + %25 AT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.24’de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.22’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %143, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %180 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %164, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %220 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %75 DA + %25 AT için elde edilen ortalama CBR değeri %200 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.22. %75 DA + %25 AT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	16	20
0,4	31	45
0,5	38	57
0,6	50	66
0,8	82	101
1,0	119	149
1,2	173	212
1,4	246	284
1,5	293	325
1,6	350	390
1,8	460	556
2,0	600	736
2,5	976 (1952)	1233 (2235)
3,0	1419	1680
3,5	1860	2221
4,0	2242	2682
4,5	2620	3108
5,0	2960 (3672)	3530 (4487)
5,5	3291	3976
6,0	3595	4390

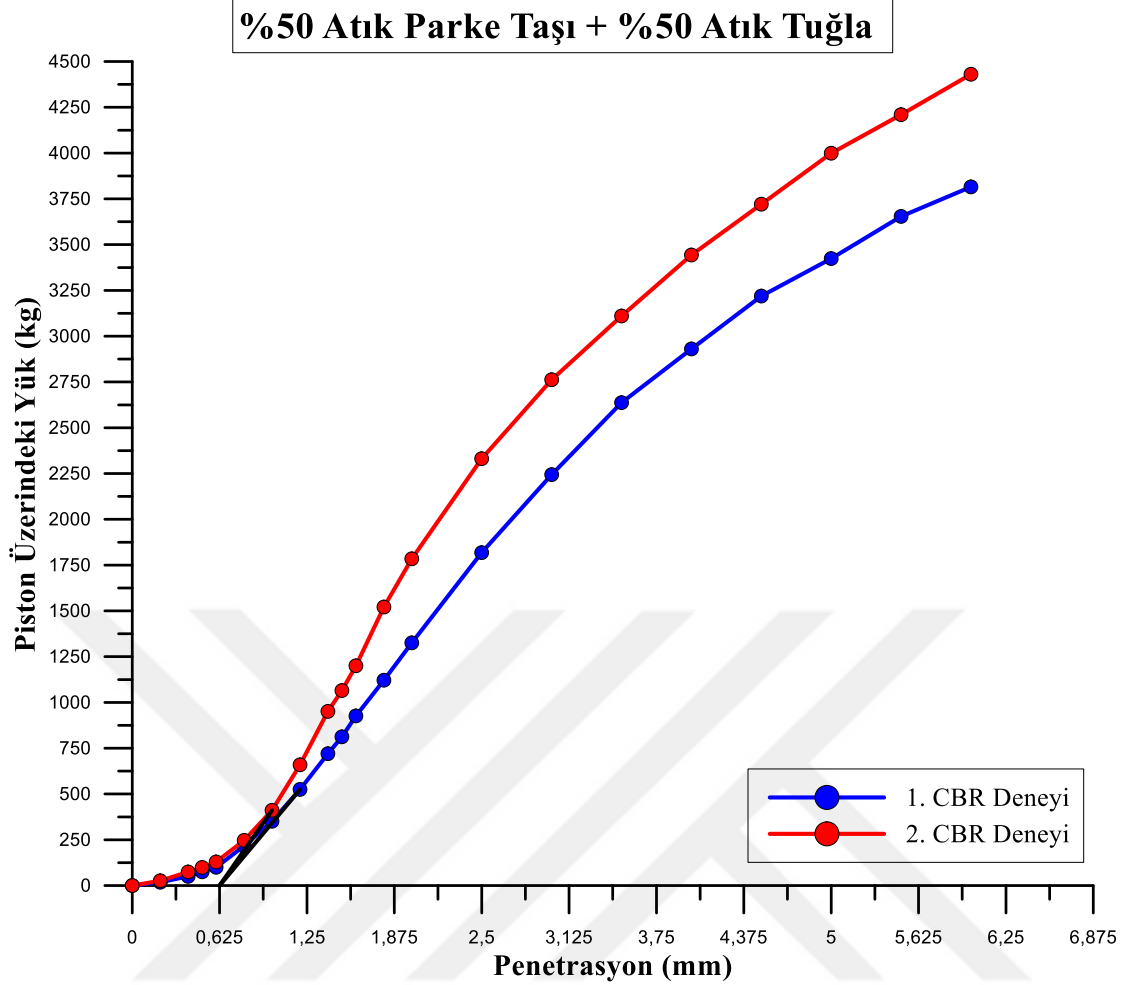


Şekil 7.24. %75 DA + %25 AT yük-penetrasyon eğrisi

%50 APT + %50 AT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.23'de verilmiştir. %50 APT + %50 AT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.25'de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.23'de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %173, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %181 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %212, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %211 olduğu bulunmuştur. 1. deneye bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değeri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen değer CBR değeri olarak alınmıştır. 2. Deneyde ise 2.5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen değer CBR değeri olarak seçilmiştir. Yapılan iki deney sonucunda %50 APT + %50 AT için elde edilen ortalama CBR değeri %197 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.23. %50 APT + %50 AT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	18	26
0,4	50	74
0,5	75	99
0,6	100	129
0,8	217	247
1,0	351	411
1,2	525	659
1,4	720	951
1,5	812	1065
1,6	926	1200
1,8	1121	1521
2,0	1325	1784
2,5	1818 (2360)	2331 (2892)
3,0	2244	2762
3,5	2637	3110
4,0	2930	3443
4,5	3219	3721
5,0	3424 (3702)	3999 (4313)
5,5	3654	4210
6,0	3815	4430

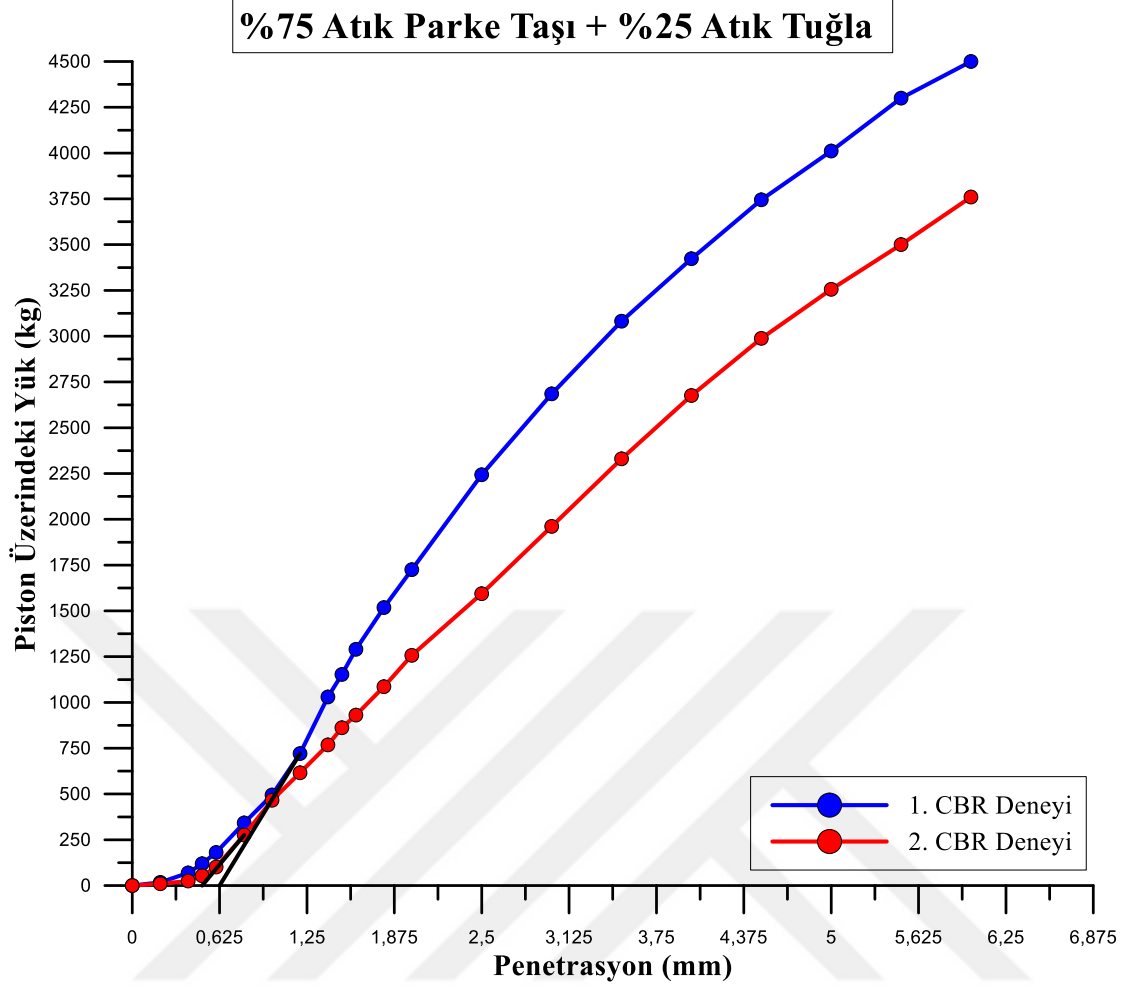


Şekil 7.25. %50 APT + %50 AT yük-penetrasyon eğrisi

%75 APT + %25 AT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.24’de verilmiştir. %75 APT + %25 AT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.26’da gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.24’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %206, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %213 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %144, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %171 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %75 APT + %25 AT için elde edilen ortalama CBR değeri %192 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.24. %75 APT + %25 AT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	17	10
0,4	69	25
0,5	119	53
0,6	181	101
0,8	342	276
1,0	494	466
1,2	721	616
1,4	1030	768
1,5	1153	862
1,6	1290	931
1,8	1518	1086
2,0	1725	1257
2,5	2243 (2805)	1594 (1961)
3,0	2685	1961
3,5	3082	2330
4,0	3423	2676
4,5	3745	2988
5,0	4011 (4358)	3256 (3500)
5,5	4300	3500
6,0	4500	3760

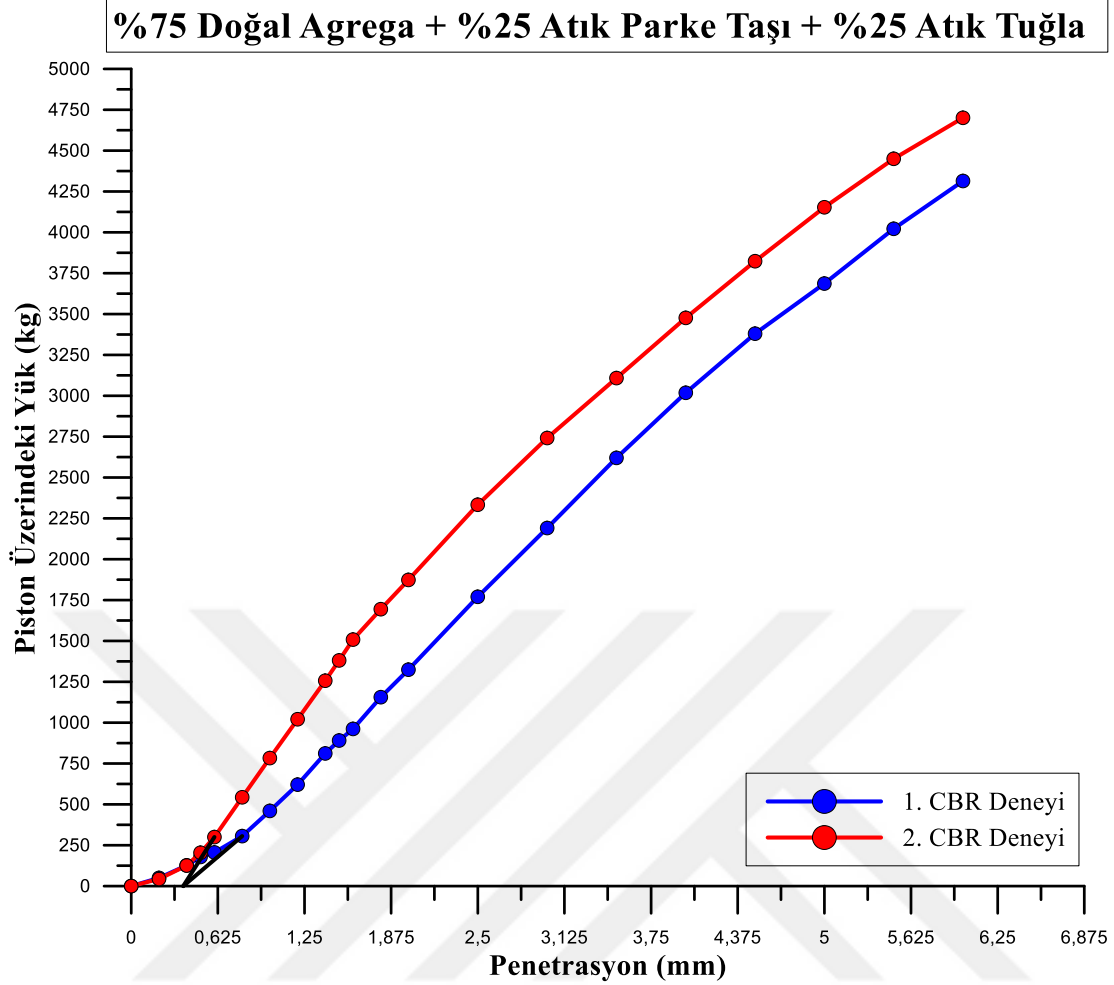


Şekil 7.26. %75 APT + %25 AT yük-penetrasyon eğrisi

%50 DA+ %25 APT + %25 AT için gerçekleştirilen CBR deneyi ile 1. deney ve 2. deney penetrasyon değerlerine göre elde edilen piston üzerindeki yük değerleri Çizelge 7.25’de verilmiştir. %50 DA + %25 APT + %25 AT için yük-penetrasyon eğrileri Şekil 7.27’de gösterilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 7.25’de düzeltilmiş değerler parantez içerisinde gösterilmiştir. Düzeltmeler sonucunda 1. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %154, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %193 olduğu bulunmuştur. 2. deney için 2,5 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %194, 5,0 mm penetrasyon değerine karşılık gelen CBR değerinin %214 olduğu bulunmuştur. İki deneye de bakıldığında 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri daha büyük olduğu için 5,0 mm penetrasyon değerlerine karşılık gelen CBR değerleri alınmıştır. Yapılan iki deney sonucunda %50 DA+ %25 APT + %25 AT için elde edilen ortalama CBR değeri %203 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.25. %50 DA + %25 APT + %25 AT CBR verileri

Penetrasyon Miktarı (mm)	1. Deney	2. Deney
	Piston Üzerindeki Yük (kg)	Piston Üzerindeki Yük (kg)
0	0	0
0,2	50	43
0,4	127	126
0,5	178	204
0,6	206	300
0,8	306	543
1,0	460	783
1,2	621	1021
1,4	812	1257
1,5	891	1381
1,6	962	1508
1,8	1156	1694
2,0	1324	1873
2,5	1770 (2099)	2333 (2636)
3,0	2191	2742
3,5	2620	3108
4,0	3018	3477
4,5	3380	3823
5,0	3687 (3940)	4153 (4375)
5,5	4022	4450
6,0	4314	4701



Şekil 7.27. %50 DA + %25 APT + %25 AT yük-penetrasyon eğrisi

Elde edilen CBR değerleri ile temel/alttemel tabakalarının taşıma kapasitesi hakkında değerlendirmede bulunulabilir. Bunun için; elde edilen CBR değerleri KTŞ 2013’de yer alan plent-miks temel tabakasının sahip olması gereken CBR değeri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 7.26’da numunelerden elde edilen bütün CBR değerleri verilmiş ve değerler şartname limiti ile karşılaştırılmıştır. Şartname limiti ile karşılaştırma yapıldığında sadece %100 atık tuğla içeren numunenin şartname limitinin altında kaldığı belirlenmiştir. Ancak atık tuğlanın diğer malzemelerle belirli oranlarda karıştırıldığında şartname limitlerinin üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. Doğal agrega, atık parke taşı malzemelerine ve bunların birbiriyle olan karışımlarına bakıldığında CBR değerlerinin şartname limitlerini sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 7.26’dan yararlanılarak doğal agrega içerisine %50 oranında atık tuğlanın katılması doğal agreganın ortalama CBR değerinde bir azalmaya yol açmaktadır. Ancak doğal agreganın içerisine %25 oranında atık tuğlanın katılması doğal agreganın ortalama CBR

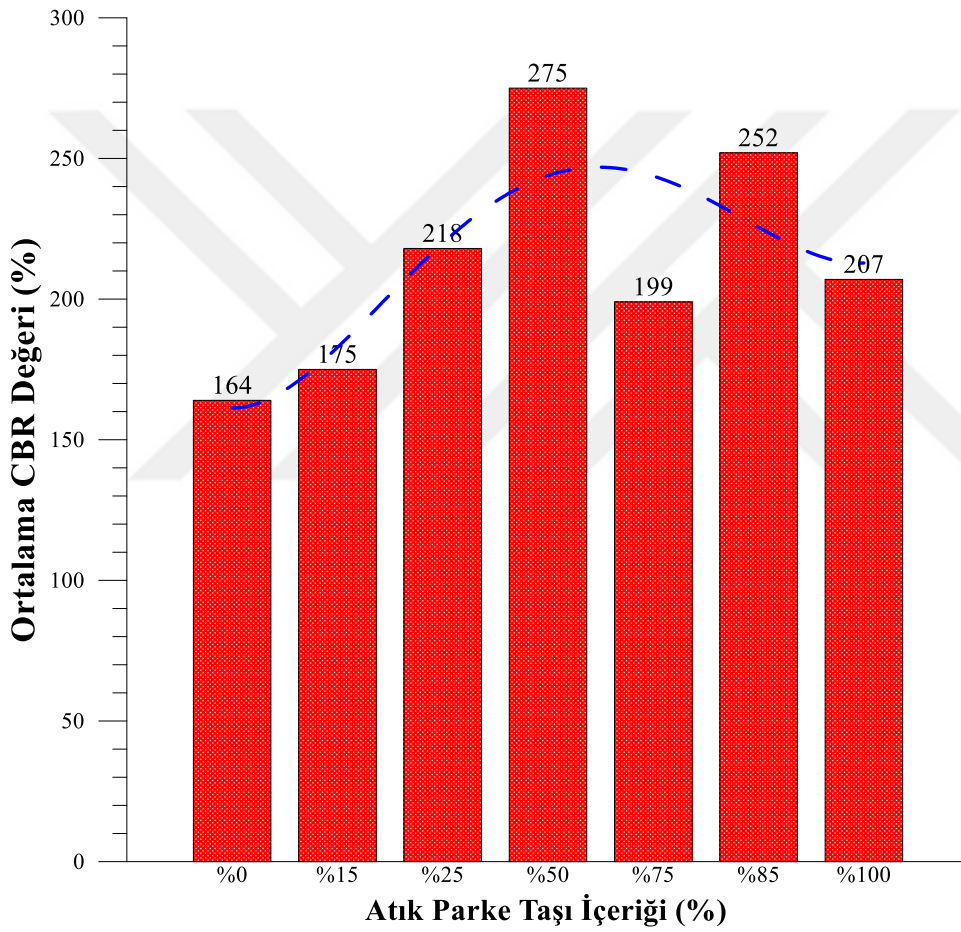
değerini artırmıştır. Atık parke taşı içerisine atık tuğlanın katılması atık parke taşının ortalama CBR değerine göre bir azalma oluşturmuştur.

Literatürde CB malzemesinin CBR değeri %123- %138 (Arulrajah vd., 2012b; Arulrajah vd., 2014) olarak elde edilmiştir. Ayrıca CB malzemesinin RCA ile karıştırılması ile oluşan karışımların CBR değerleri; %50 RCA + %50 CB için %103-%131, %75 RCA + %25 CB için %88- %141 olarak bulunmuştur (Arulrajah vd., 2012). CB malzemesinin CR ile karıştırılması ile oluşan karışımların CBR değerleri; %50 CR + %50 CB için; %127- %138 (Arulrajah vd., 2012b), %75 CR + %25 CB malzemesi için %97- %143 (Aatheesan vd., 2010), %97-%151 (Arulrajah vd., 2012b) olarak bulunmuştur. Literatürdeki CBR değerlerine bakıldığında tez çalışmasındaki atık tuğla malzemesinin taşıma gücünün daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak tez çalışmasında kullanılan atık tuğla malzemesinin DA ve APT ile karıştırılması sonucunda oluşturulan karışım numunelerinin CBR değerleri literatürde bulunan değerlere; %50 DA+ %50 AT karışım numunesinde benzer bulunurken diğer karışım numunelerinde ise daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 7.26. CBR değerleri

Numune	1. Deney CBR Değeri	2. Deney CBR Değeri	Ortalama CBR Değeri	Şartname Limiti
%100 DA	%156	%171	%164	≥ %120
%100 APT	%199	%214	%207	≥ %120
%100 AT	%80	%95	%88	≥ %120
%85 DA + %15 APT	%161	%188	%175	≥ %120
%75 DA + %25 APT	%235	%201	%218	≥ %120
%50 DA + %50 APT	%255	%294	%275	≥ %120
%25 DA + %75 APT	%196	%201	%199	≥ %120
%15 DA + %85 APT	%262	%241	%252	≥ %120
%50 DA + %50 AT	%135	%126	%131	≥ %120
%75 DA + %25 AT	%180	%220	%200	≥ %120
%50 APT + %50 AT	%181	%212	%197	≥ %120
%75 APT + %25 AT	%213	%171	%192	≥ %120
%50 DA + %25 APT + %25 AT	%193	%214	%204	≥ %120

Şekil 7.28’de doğal agregaya içerisinde atık parke taşının belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen numunelerin ortalama CBR değerleri karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde atık parke taşının doğal agregaya göre daha yüksek bir ortalama CBR değerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca doğal agreganın atık parke taşı ile karıştırılması ile oluşan numunelerin CBR değerleri doğal agregaya göre daha yüksektir. Doğal agregaya içerisindeki atık parke taşı içeriğinin artması ile numunelerin ortalama CBR oranındaki artış %50 atık parke taşı içeriğinde tepe noktasına ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra atık parke taşı içeriğinin artırılması ile düşüş yaşanmaktadır. Yine de bu düşüş doğal agreganın ortalama CBR değerinden yüksektir.



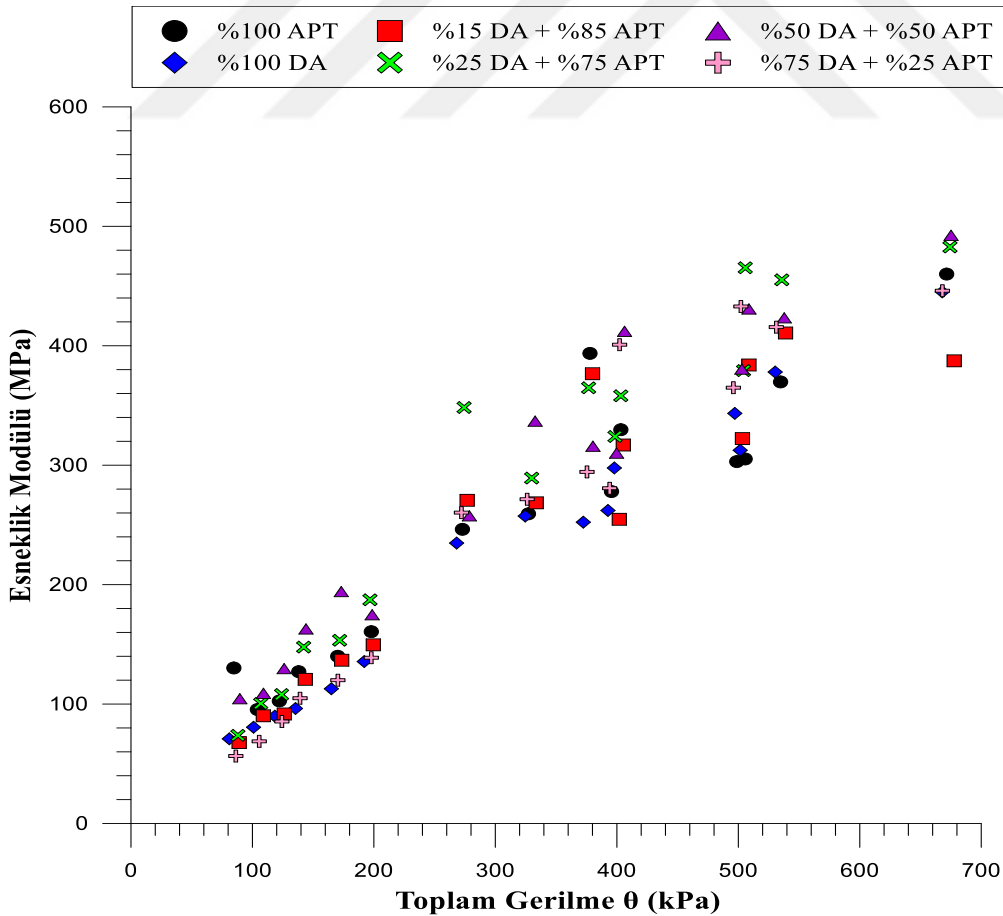
Şekil 7.28. Atık parke taşı içeriğine göre CBR değişim grafiği

Geçmiş çalışmalarda RCA malzemesinin üzerinde yapılan CBR deneyi sonucunda elde edilen CBR değerleri; %66 (Poon vd., 2006), %97- %138 (Barbudo vd., 2012), %90- %143 (Gabr ve Cameron, 2012), %138 (Jimenez vd., 2012), %118- %160 (Arulrajah vd., 2014) olarak bulunmuştur. Tez çalışmasında kullanılan atık parke taşı malzemesinin CBR değeri, geçmişte RCA malzemesi için bulunan CBR değerlerinden daha yüksektir.

7.2.1. Esneklik Modülü (M_R) Deney Sonuçları

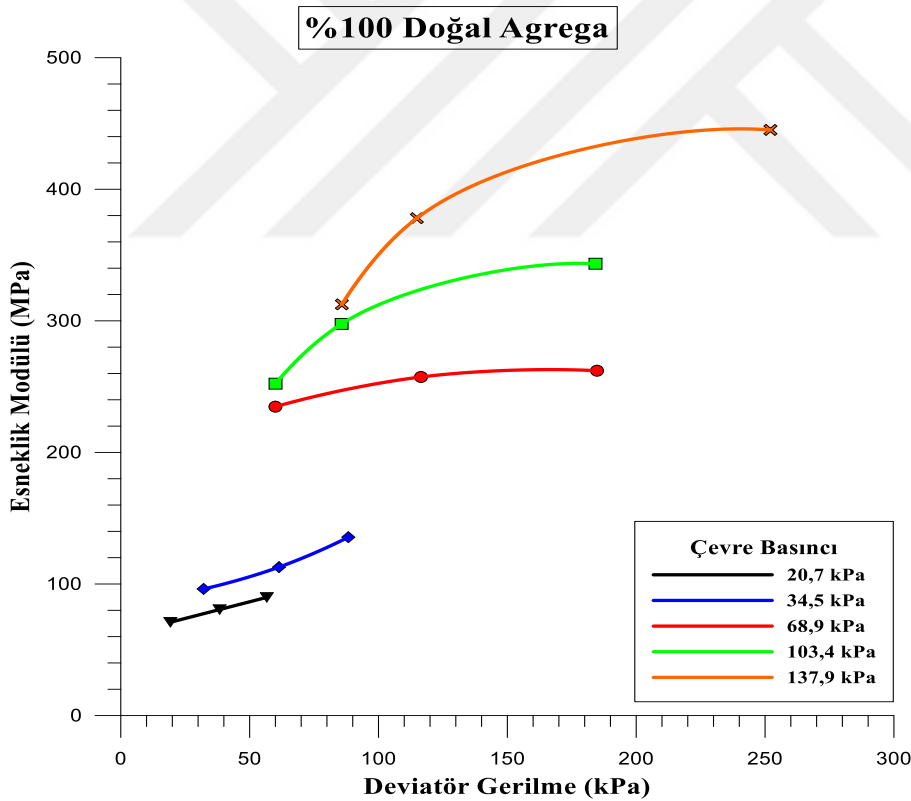
Tasarımı yapılan plent-miks temel tabakasının esneklik modülünün belirlenmesi için, AASHTO T 307 standardına uygun olarak %100 doğal agrega ve %100 atık parke taşı bulunan numunelerin yanı sıra doğal agreganın içerisine %85, %75, %50, %25 atık parke taşı katılarak oluşturulan toplam 6 adet numune üzerinde Karayolları Genel Müdürlüğü'nün zemin mekaniği laboratuvarında esneklik modülü deneyi gerçekleştirilmiştir.

Esneklik modülü deneyi sonucunda numunelerin deney bulgularına bağlı olarak çizilen esneklik modülü – toplam gerilme grafiği Şekil 7.29'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde numunelerin tamamında toplam gerilmenin artmasıyla esneklik modülünün arttığı belirlenmiştir. Esneklik modülündeki bu artış daneler arasındaki sürtünme kuvvetindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Ayrıca numuneler incelendiğinde toplam gerilme değerinin maksimum olduğu noktada, en yüksek esneklik modülü değeri 459,97 MPa ile %50 DA + %50 APT karışımında elde edilmiştir. En düşük esneklik modülü değeri ise 387,41 MPa ile %15 DA + %85 APT karışımında elde edilmiştir.

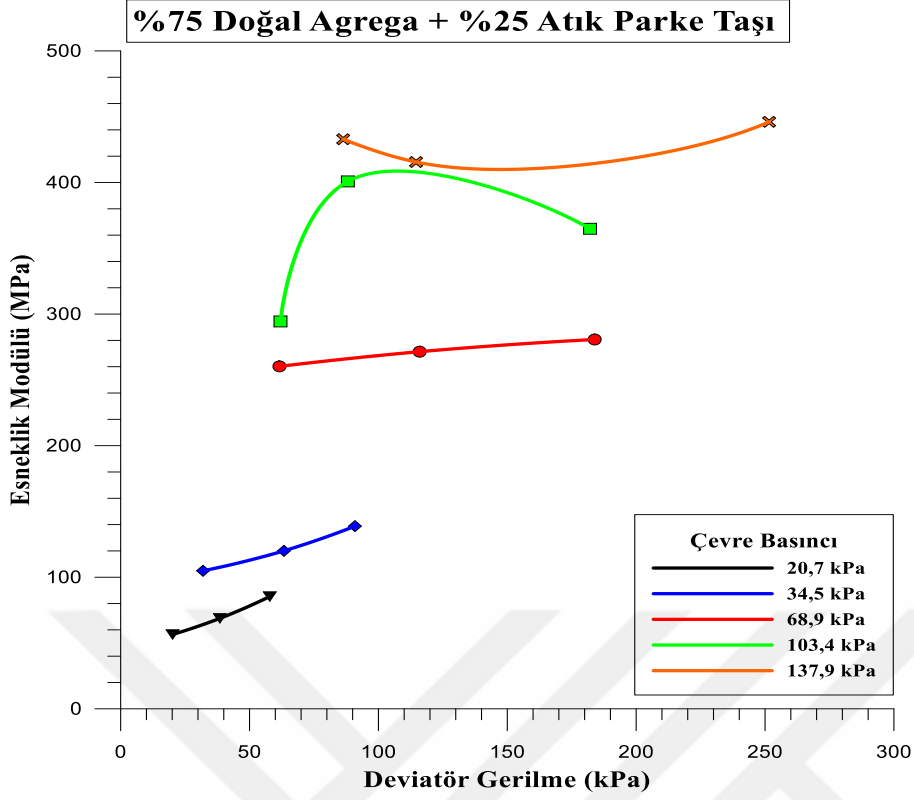


Şekil 7.29. Ölçülen esneklik modülü değerleri ile toplam gerilme değerleri arasındaki ilişki

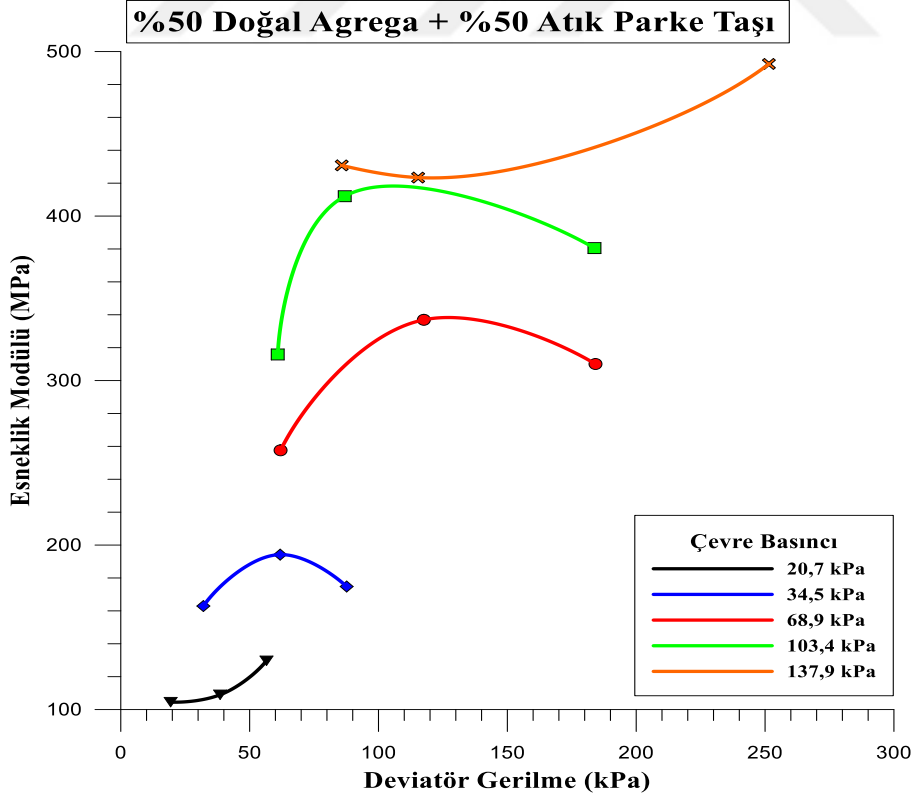
Her bir numune için EK 1, EK 2, EK 3, EK 4, EK 5, EK 6’da verilen esneklik modülü deney bulgularına göre numunelerin esneklik modülü ile deviator gerilmeler arasındaki ilişki Şekil 7.30, Şekil 7.31, Şekil 7.32, Şekil 7.33, Şekil 7.34 ve Şekil 7.35’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde uygulanan çevre basıncının artması ile numunelerin esneklik modülünün arttığı belirlenmiştir. Ancak numuneler üzerine aynı şekilde uygulanan bazı çevre basıncı değerlerinde deviator gerilmenin artmasıyla bazı numunelerin esneklik modülünde bir azalma söz konusudur. 68,9 kPa sabit çevre basıncında deviator gerilmenin artmasıyla %25 DA + %75 APT numunesinin esneklik modülü 348-324 MPa arasında, %15 DA + %85 APT numunesinin ise esneklik modülü 270-254 MPa arasında değişmiştir. Söz konusu numunelerde esneklik modülünde bir azalma yaşanmıştır. Çevre basıncının 103,4 kPa’ a çıkarılması ve deviator gerilmenin artmasıyla %15 DA+%85 APT numunesinin esneklik modülü 376-322 MPa arasında, %100 APT numunesinin ise esneklik modülü 393-303 MPa arasında değişmiştir.



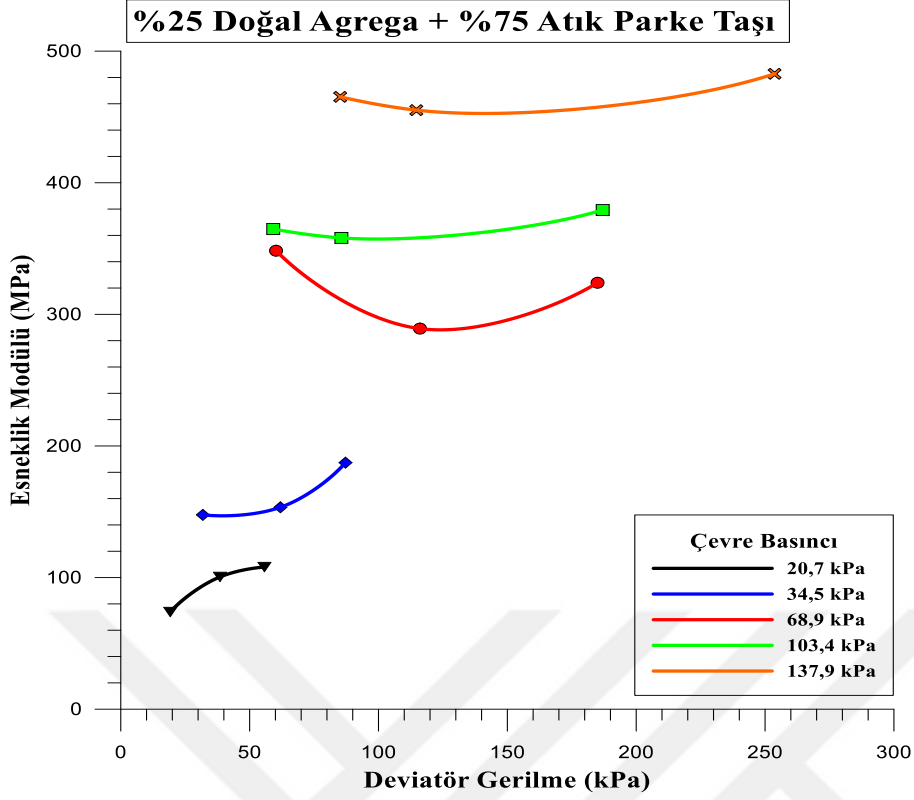
Şekil 7.30 Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği



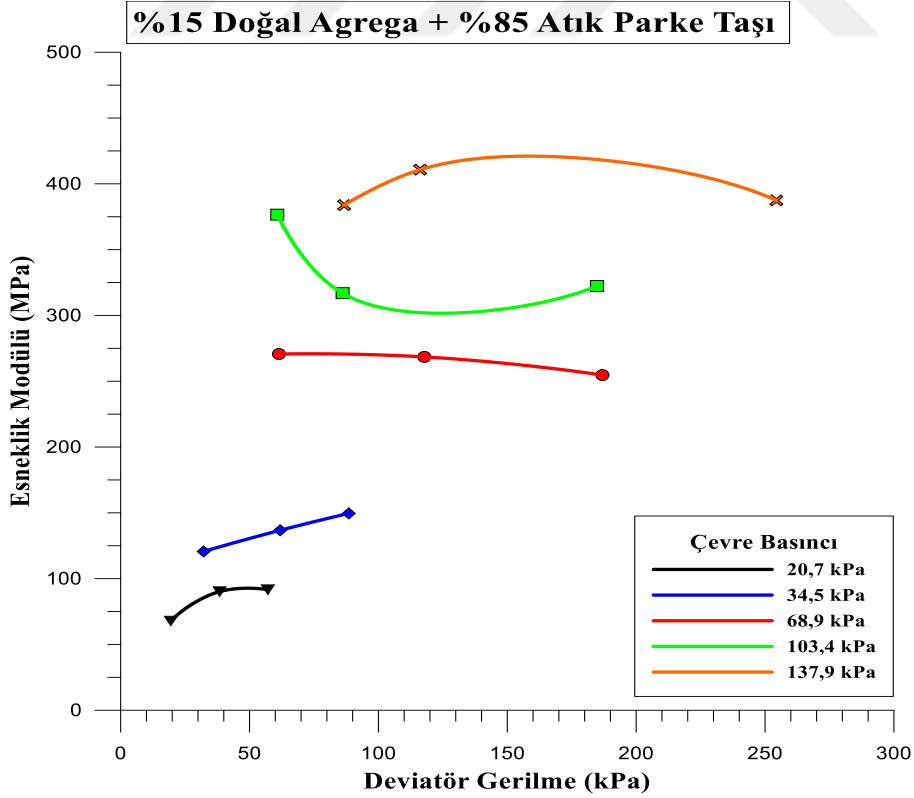
Şekil 7.31. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği



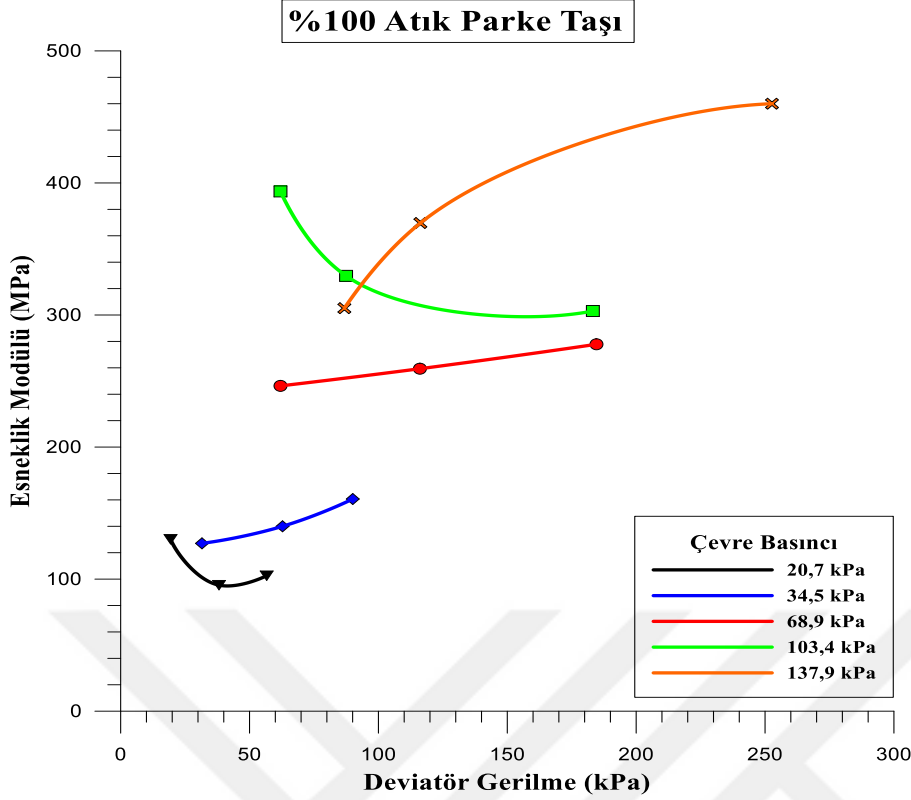
Şekil 7.32. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği



Şekil 7.33. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği



Şekil 7.34. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği



Şekil 7.35. Esneklik modülü ile deviator gerilme grafiği

Deney sonucunda her numune için esneklik modülü deneyinden elde edilen deney bulgularının daha iyi değerlendirilebilmesi için Bölüm 6.4.3’de anlatılan AASHTO ve Uzan (Universal) modelleri kullanılmıştır. Bu modellerin katsayılarının elde edilebilmesi amacıyla esneklik modülü deney verileri üzerinde regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen regresyon katsayıları ve R^2 değerleri; AASHTO modeli için Çizelge 7.27’de, Uzan modeli için Çizelge 7.28’de verilmiştir. İki modelin determinasyon katsayılarına bakıldığında Uzan modeline ait determinasyon katsayıların daha yüksek değer aldığı görülmüştür. Buna bağlı olarak deney bulguları ile Uzan modeli arasında daha yüksek bir korelasyonun olduğu belirlenmiştir. Numunelerin Uzan modeline ait regresyon katsayıları incelendiğinde ise bu katsayıların malzemenin esneklik modülü ile ilişkisinin olduğu söylenebilir. Bu ilişki k_1 değerinin artması, k_2 değerinin azalması ile esneklik modülünün artması şeklindedir. Numuneler incelendiğinde k_1 değerinin en yüksek, k_2 değerinin en düşük olduğu %50 DA + %50 APT karışımında esneklik modülü değerleri diğer numunelere göre daha yüksektir. Ayrıca en düşük esneklik modülüne sahip olan %75 DA + %25 APT karışımına bakıldığında k_1 değeri diğer numunelerden daha düşük değer alırken, k_2 değeri ise en yüksek değerini almıştır.

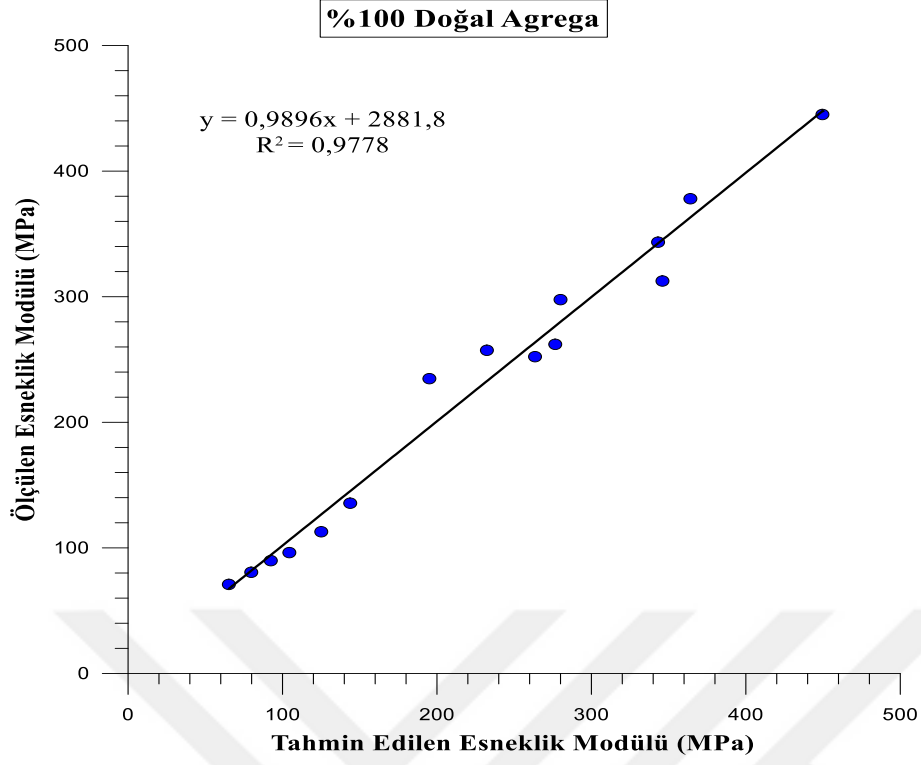
Malzemelerin doğrusal olmayan davranışını tahmin edebilmek için oluşturulan AASHTO modelinden yararlanılarak, her bir numune için EK 1, EK 2, EK 3, EK 4, EK 5, EK 6’da verilen numunelerin deneysel bulguları üzerinde AASHTO modeline uygun olarak yapılan hesaplamalardan elde edilen değerler grafik olarak aşağıda gösterilmiştir. Şekil 7.36, Şekil 7.38, Şekil 7.40, Şekil 7.42, Şekil 7.44 ve Şekil 7.46’da ölçülen esneklik modülü ile AASHTO modelinden tahmin edilen esneklik modülü değerleri, Şekil 7.37, Şekil 7.39, Şekil 7.41, Şekil 7.43, Şekil 7.45 ve Şekil 7.47’de ise esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki her bir numune için gösterilmiştir.

Çizelge 7.27. Numunelerin AASHTO modeline göre belirlenmiş regresyon katsayıları

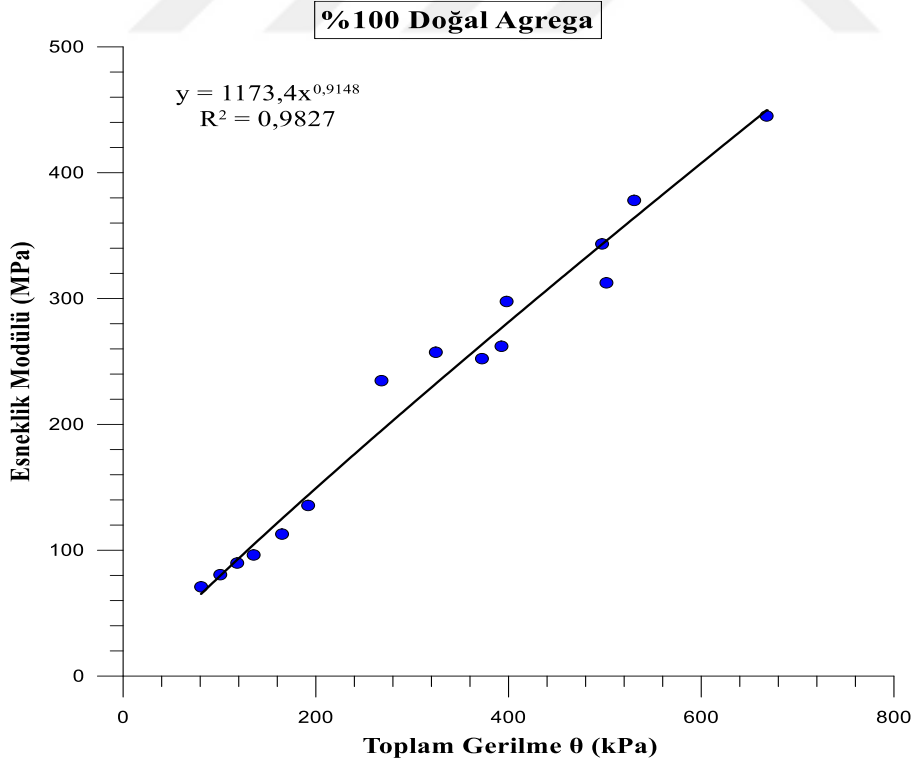
Numune	Katsayılar		Determinasyon Katsayısı (R ²)
	k ₁ (MPa)	k ₂	
%100 DA	1,173	0,915	0,978
%75 DA + %25 APT	0,463	1,088	0,925
%50 DA + %50 APT	2,792	0,802	0,957
%25 DA + %75 APT	1,318	0,931	0,925
%15 DA + %85 APT	1,168	0,925	0,883
%100 APT	3,419	0,745	0,887

Çizelge 7.28. Numunelerin Uzan modeline göre belirlenmiş regresyon katsayıları

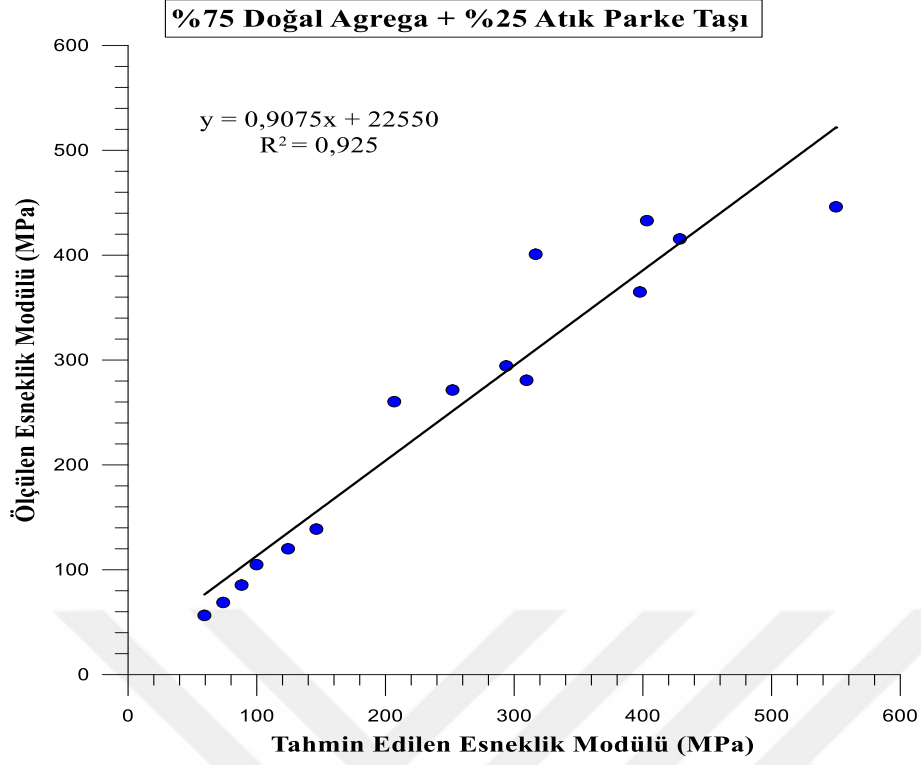
Numune	Katsayılar			Determinasyon Katsayısı (R ²)
	k ₁ (MPa)	k ₂	k ₃	
%100 DA	0,759	0,947	-0,037	0,983
%75 DA + %25 APT	0,569	1,250	-0,182	0,981
%50 DA + %50 APT	0,998	0,893	-0,100	0,976
%25 DA + %75 APT	0,786	1,088	-0,172	0,968
%15 DA + %85 APT	0,607	1,166	-0,265	0,974
%100 APT	0,792	0,972	-0,253	0,936



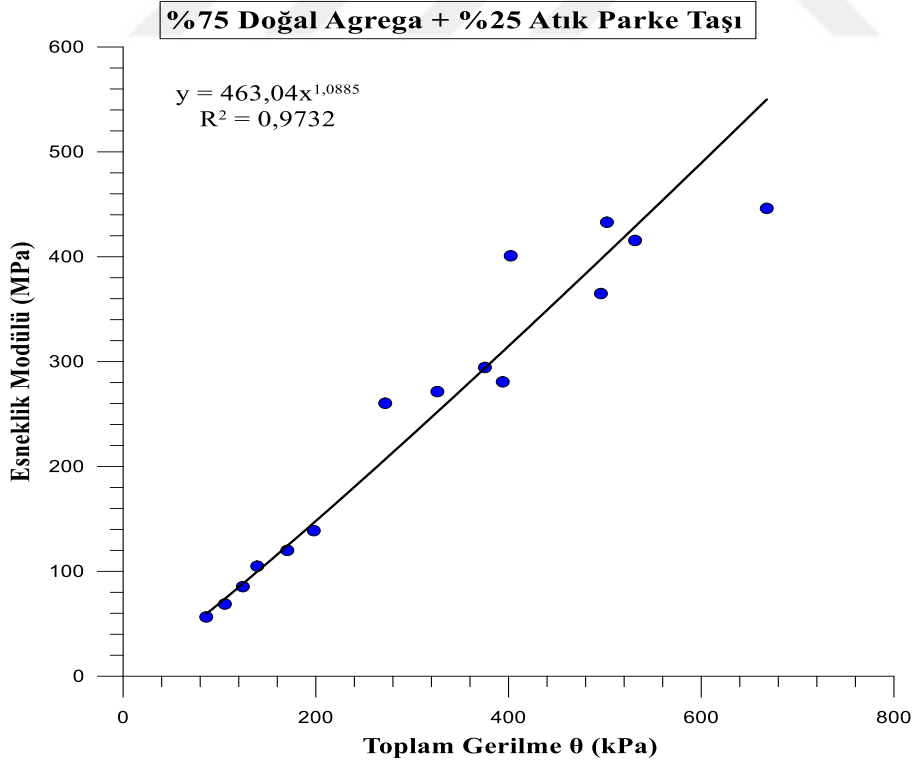
Şekil 7.36. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



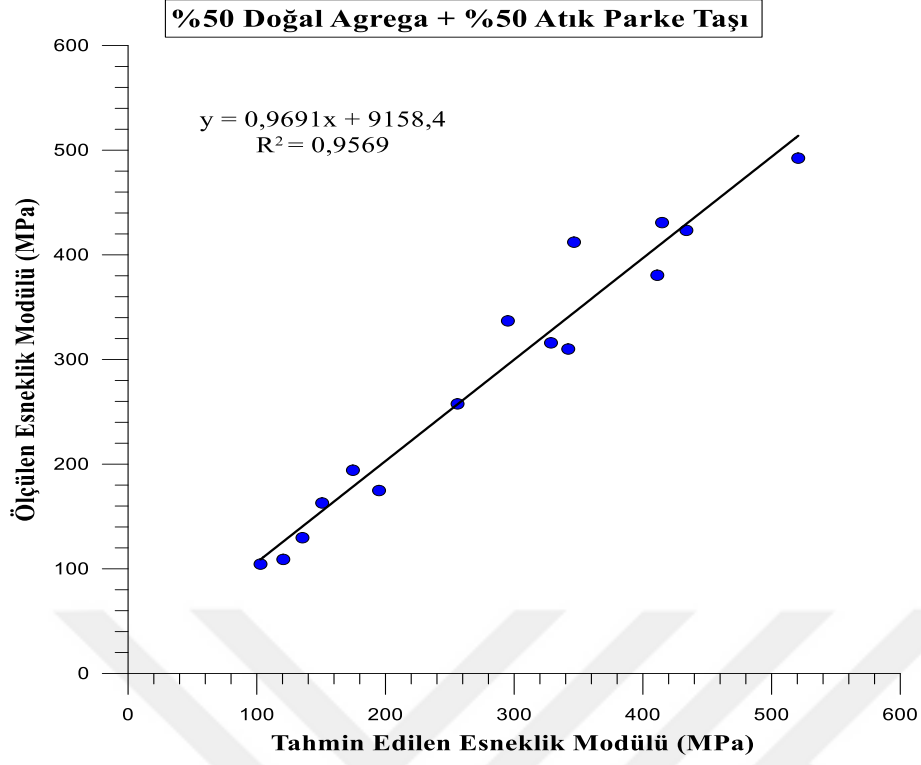
Şekil 7.37. %100 DA için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki



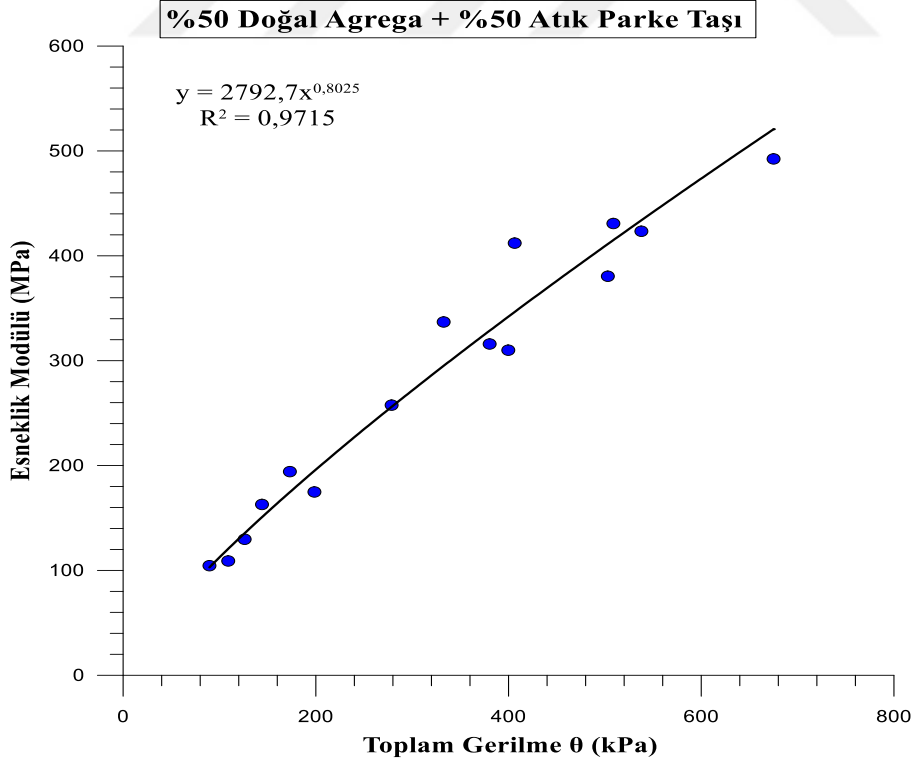
Şekil 7.38. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



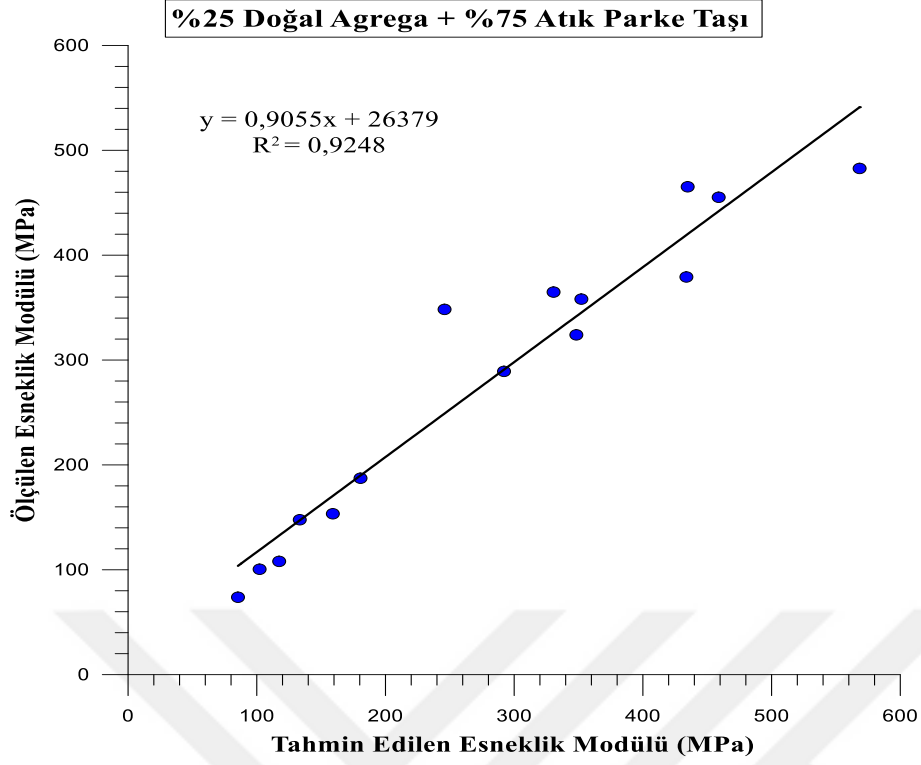
Şekil 7.39. %75 DA + %25 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki



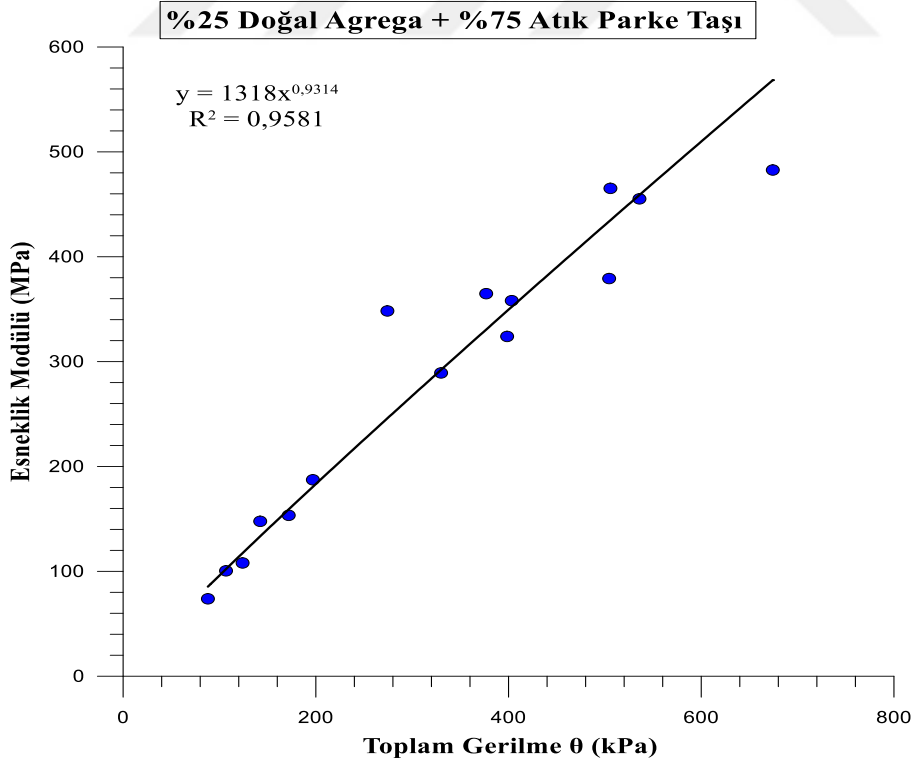
Şekil 7.40. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



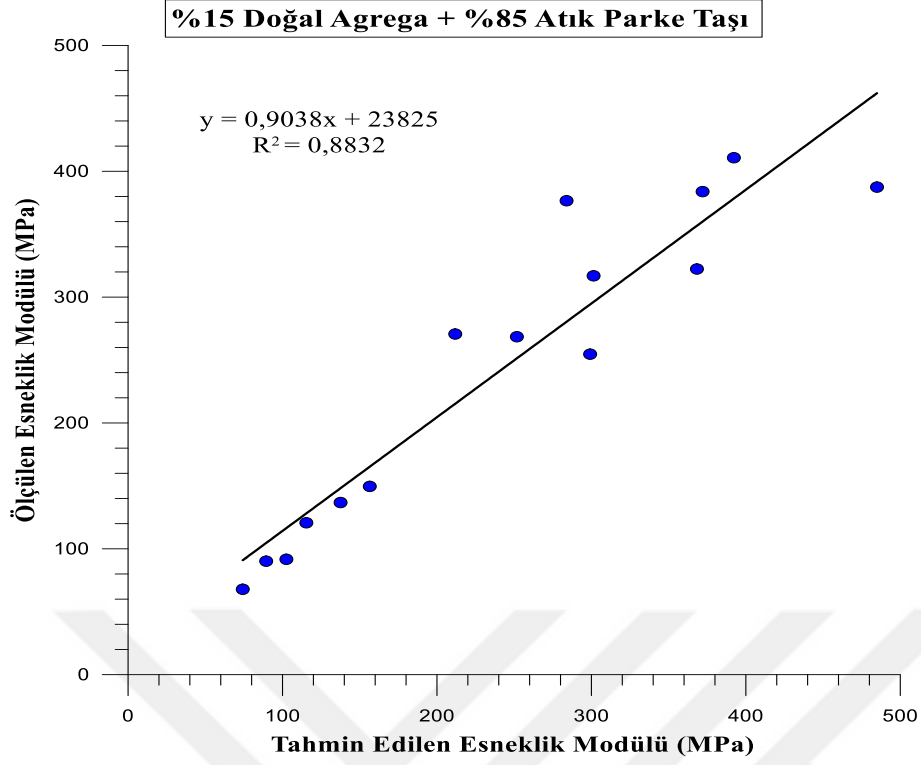
Şekil 7.41. %50 DA + %50 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki



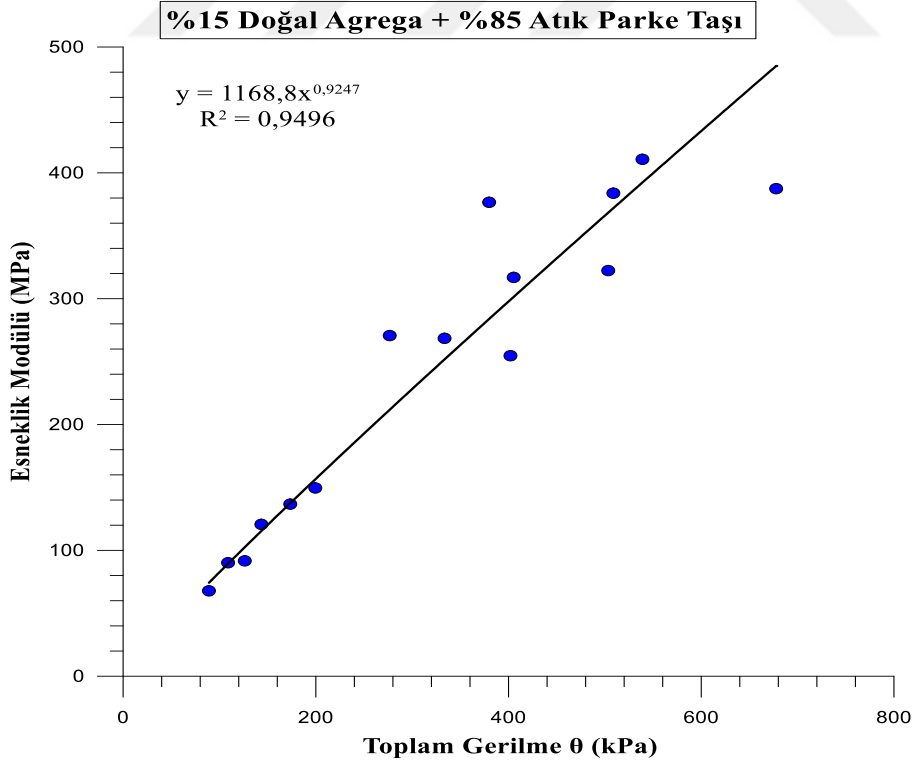
Şekil 7.42. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



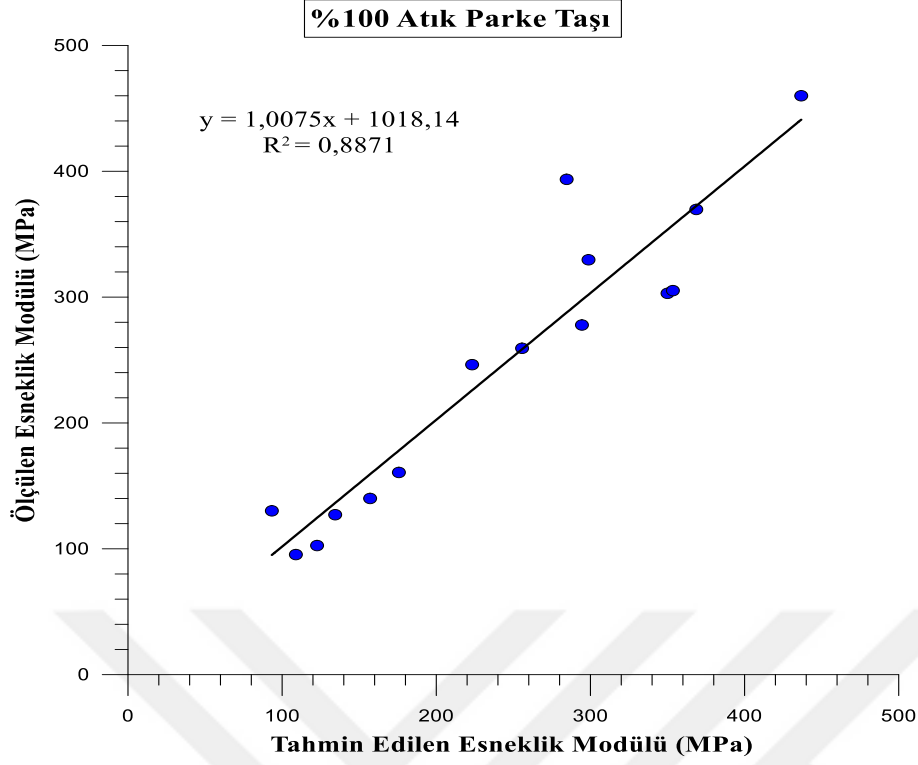
Şekil 7.43. %25 DA + %75 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki



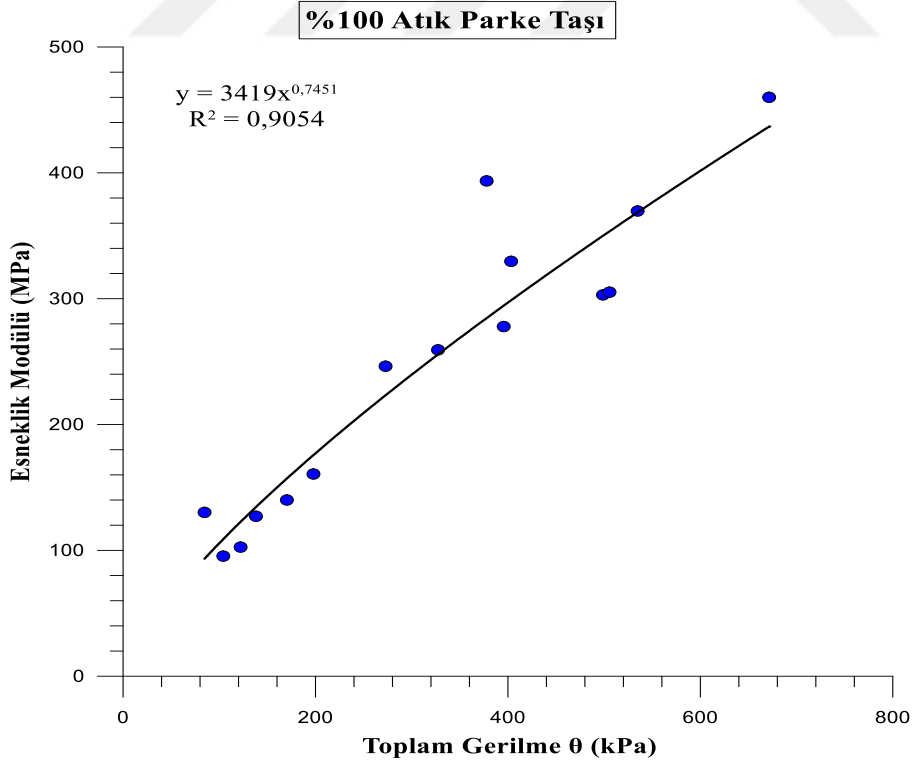
Şekil 7.44. Ölçülen MR değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



Şekil 7.45. %15 DA + %85 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki

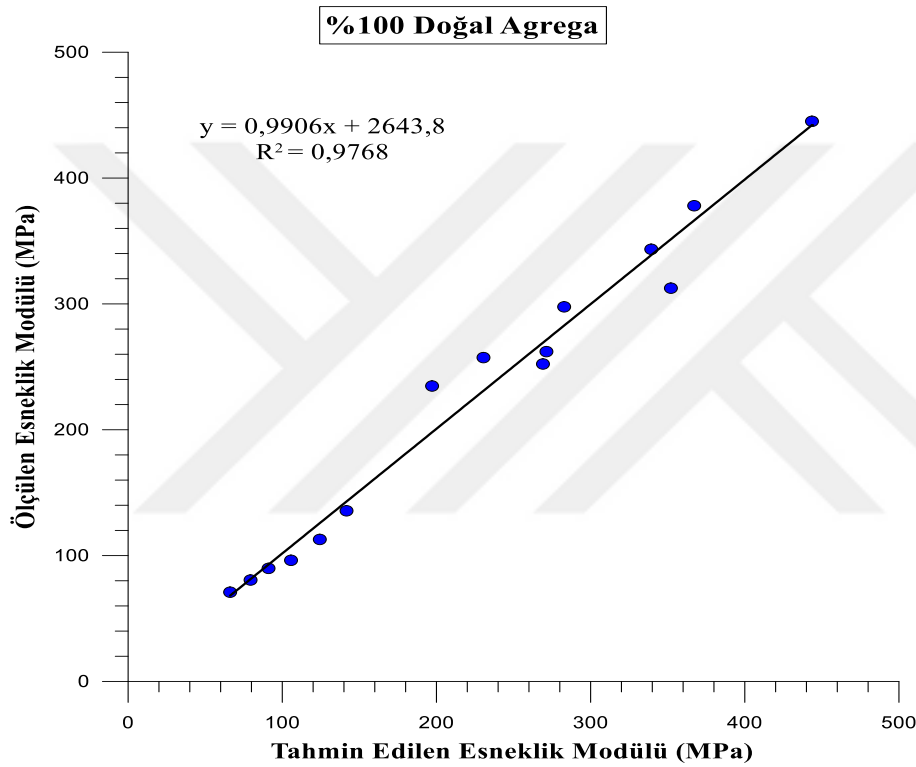


Şekil 7.46. Ölçülen M_R değerleri ile AASHTO modeli ile tahmin edilen M_R değerleri arasındaki ilişki

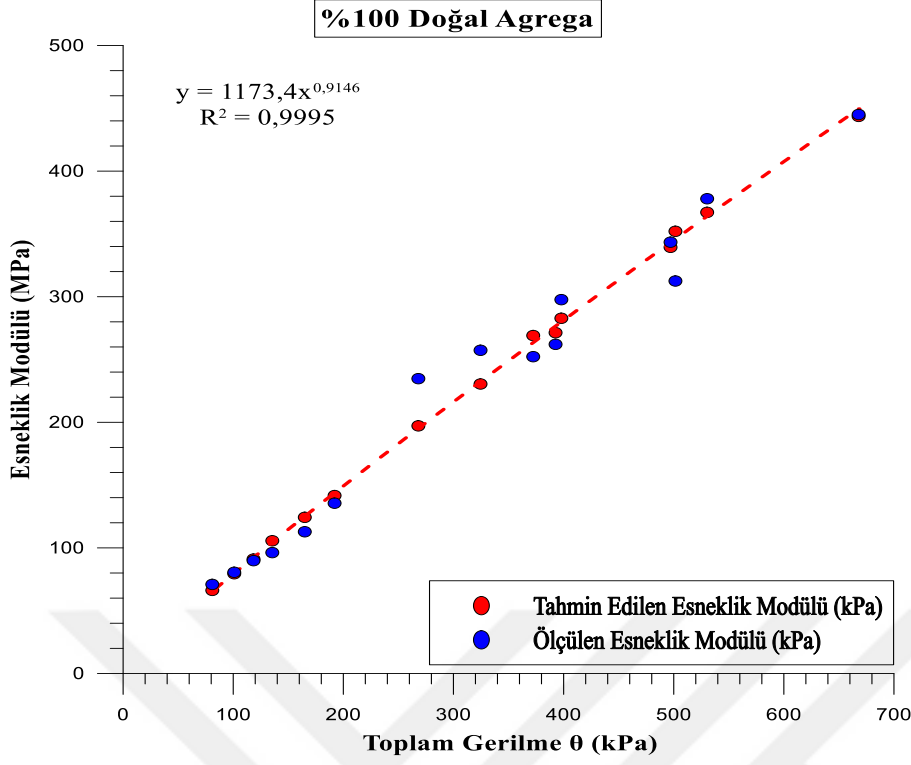


Şekil 7.47. %100 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki

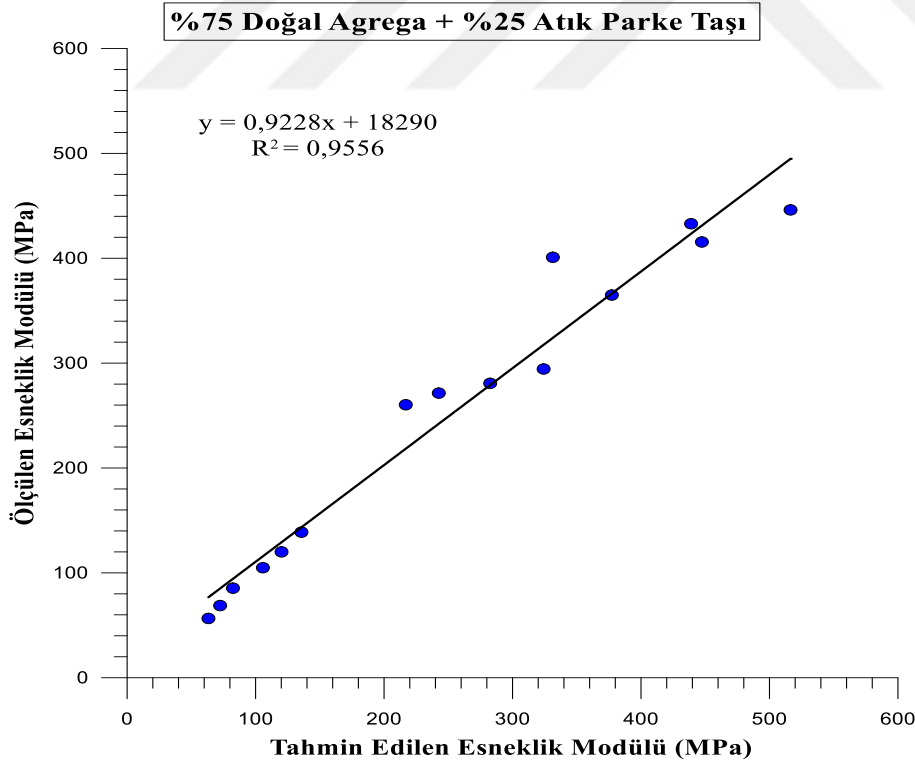
Malzemelerin doğrusal olmayan davranışını tahmin edebilmek için oluşturulan bir diğer model olan Uzan (Universal) modelinden yararlanarak, her bir numune için EK 1, EK 2, EK 3, EK 4, EK 5, EK 6'da verilen numunelerin deneysel bulguları üzerinde Uzan (Universal) modeline uygun olarak yapılan hesaplamalardan elde edilen değerler grafik olarak aşağıda gösterilmiştir. Şekil 7.48, Şekil 7.50, Şekil 7.52, Şekil 7.54, Şekil 7.56 ve Şekil 7.58'de ölçülen esneklik modülü ile Uzan (Universal) modelinden tahmin edilen esneklik modülü değerleri, Şekil 7.49, Şekil 7.51, Şekil 7.53, Şekil 7.55, Şekil 7.57 ve Şekil 7.59'da ise esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki her bir numune için gösterilmiştir.



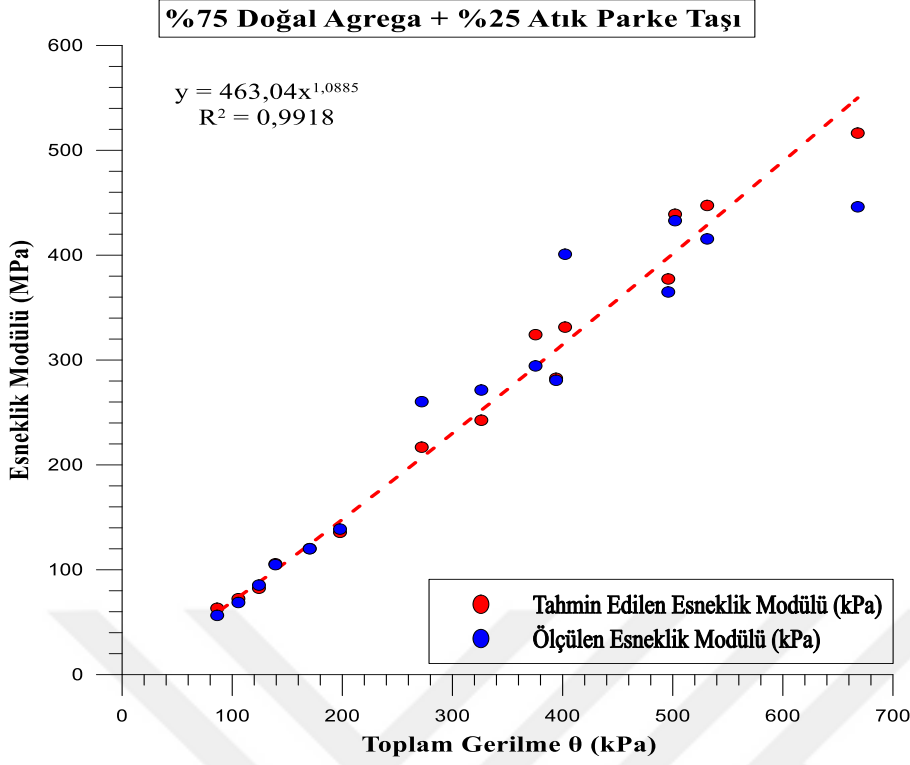
Şekil 7.48. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



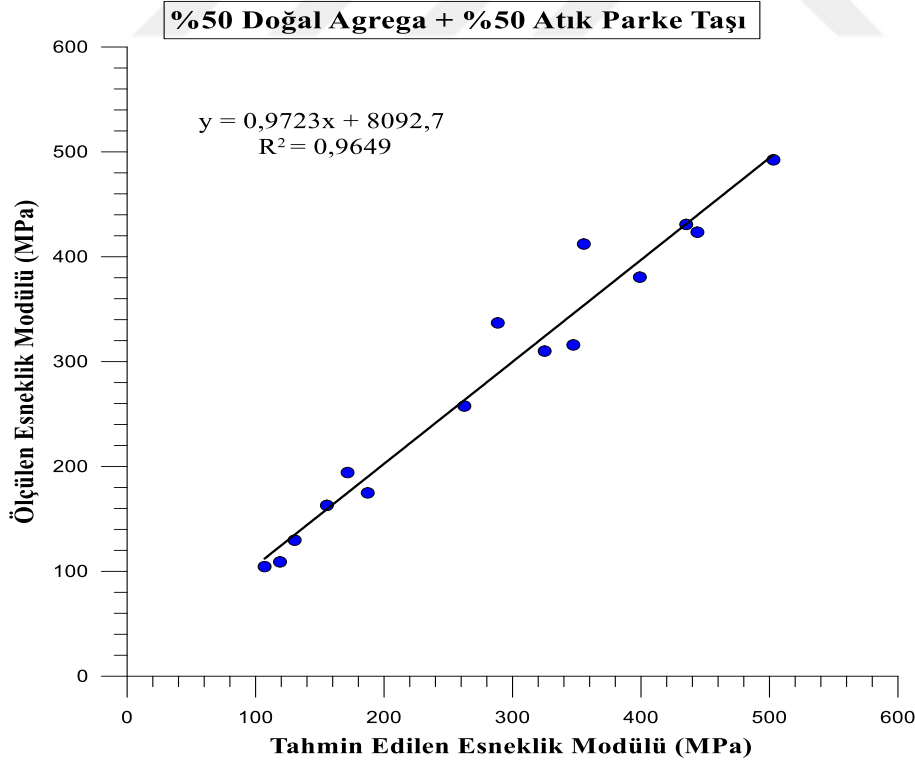
Şekil 7.49. %100 DA için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)



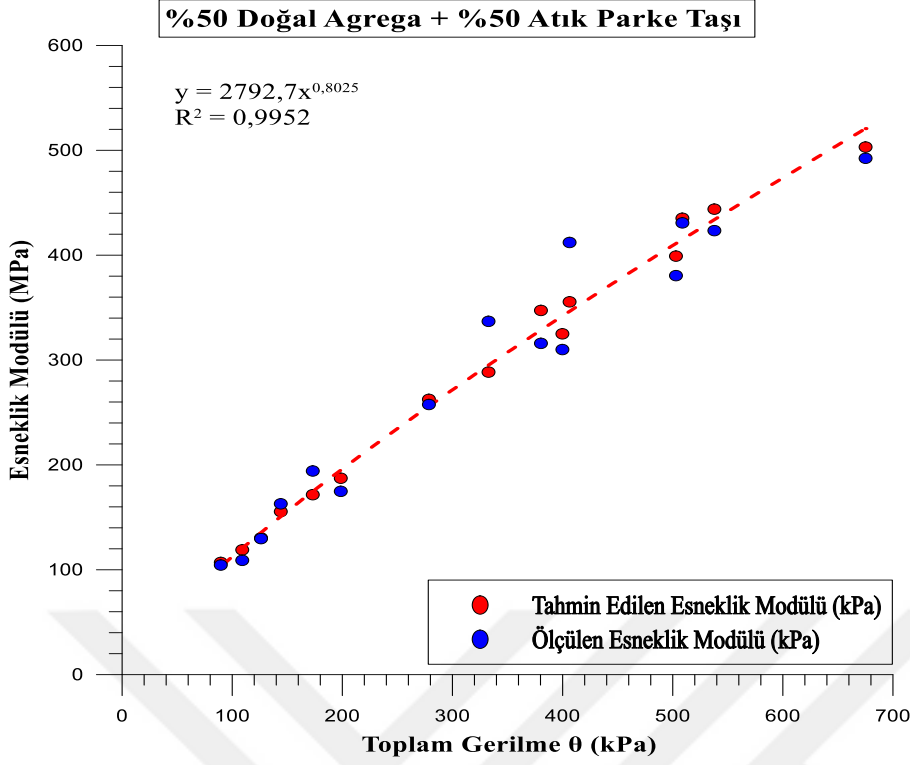
Şekil 7.50. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



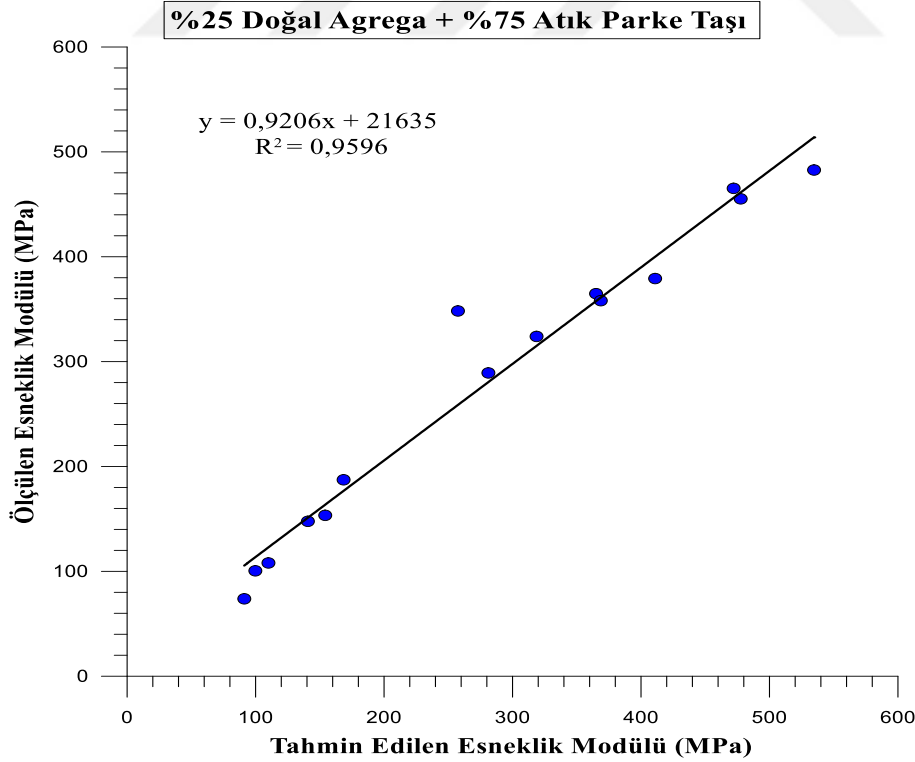
Şekil 7.51. %75 DA + %25 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)



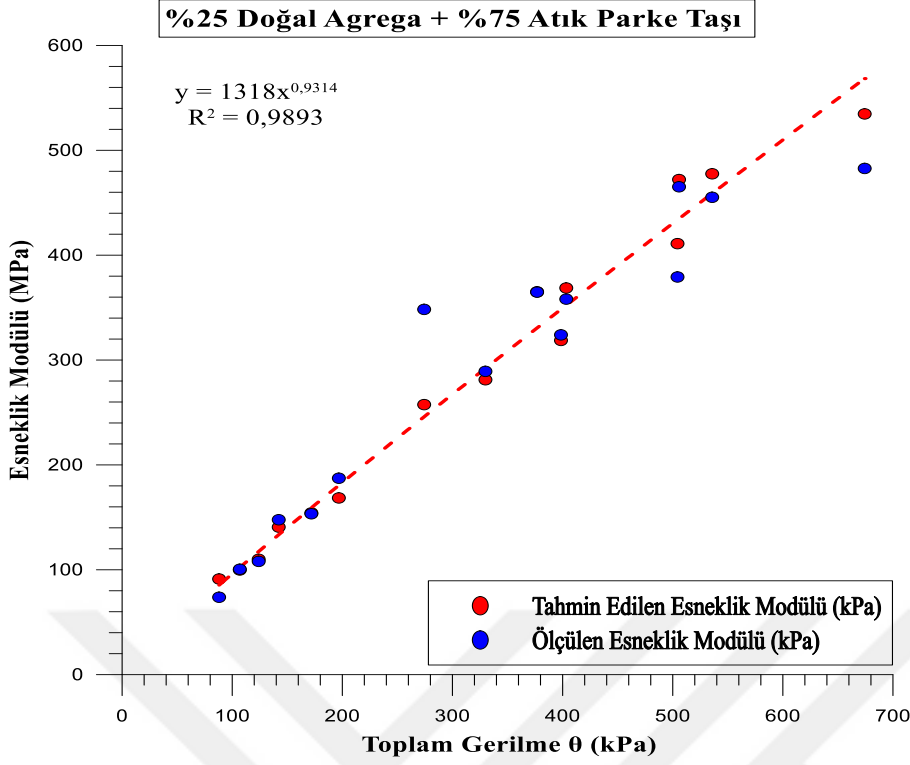
Şekil 7.52. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



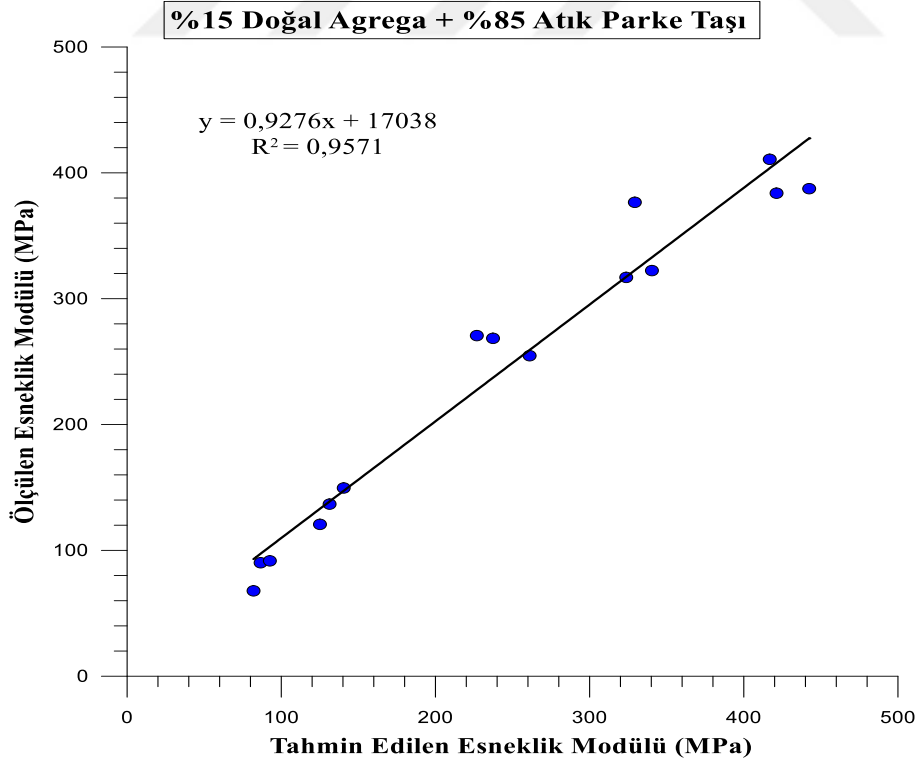
Şekil 7.53. %50 DA + %50 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)



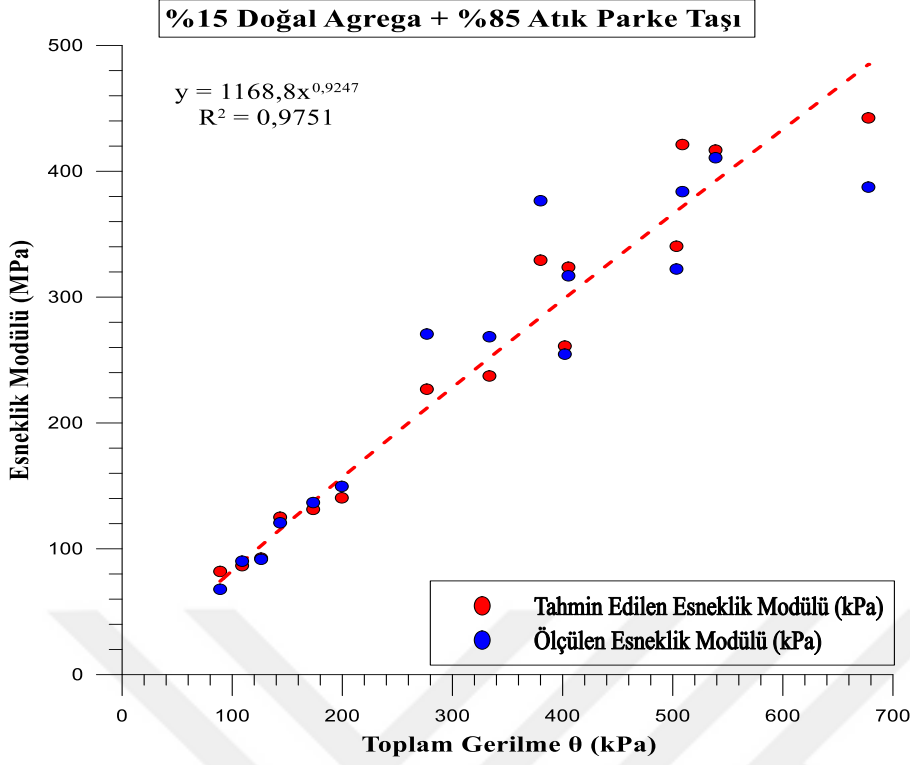
Şekil 7.54. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



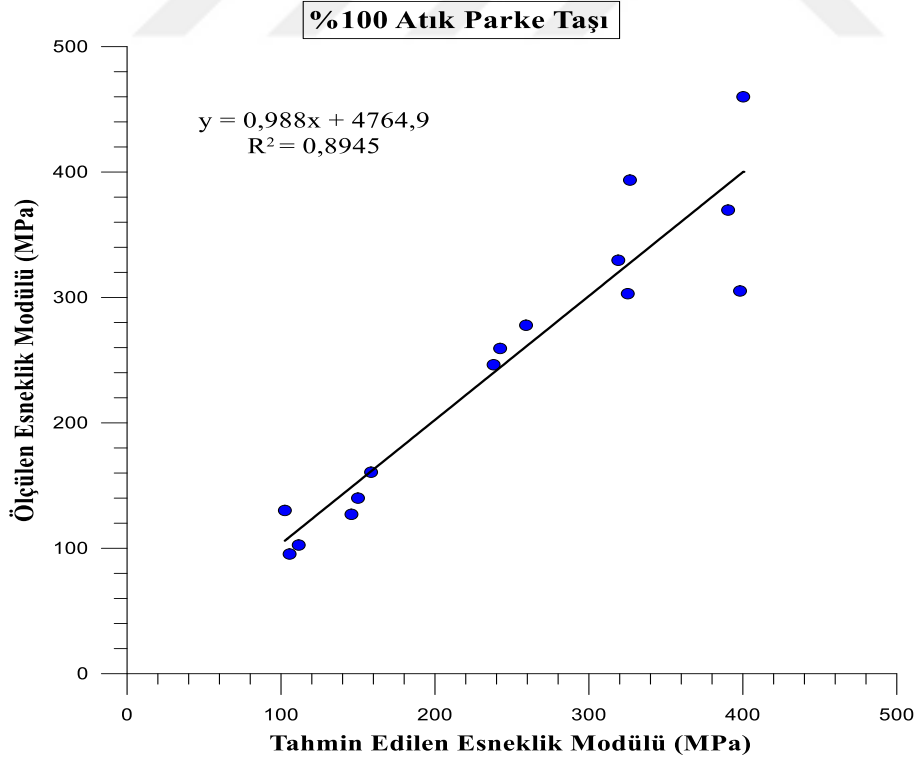
Şekil 7.55. %25 DA + %75 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)



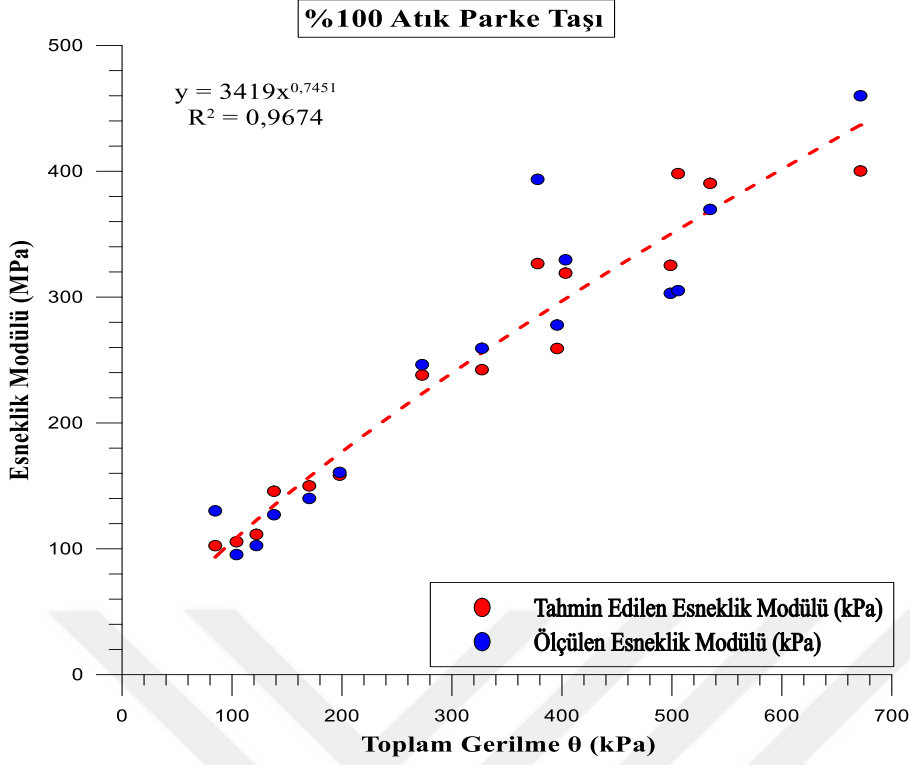
Şekil 7.56. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



Şekil 7.57. %15 DA + %85 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)

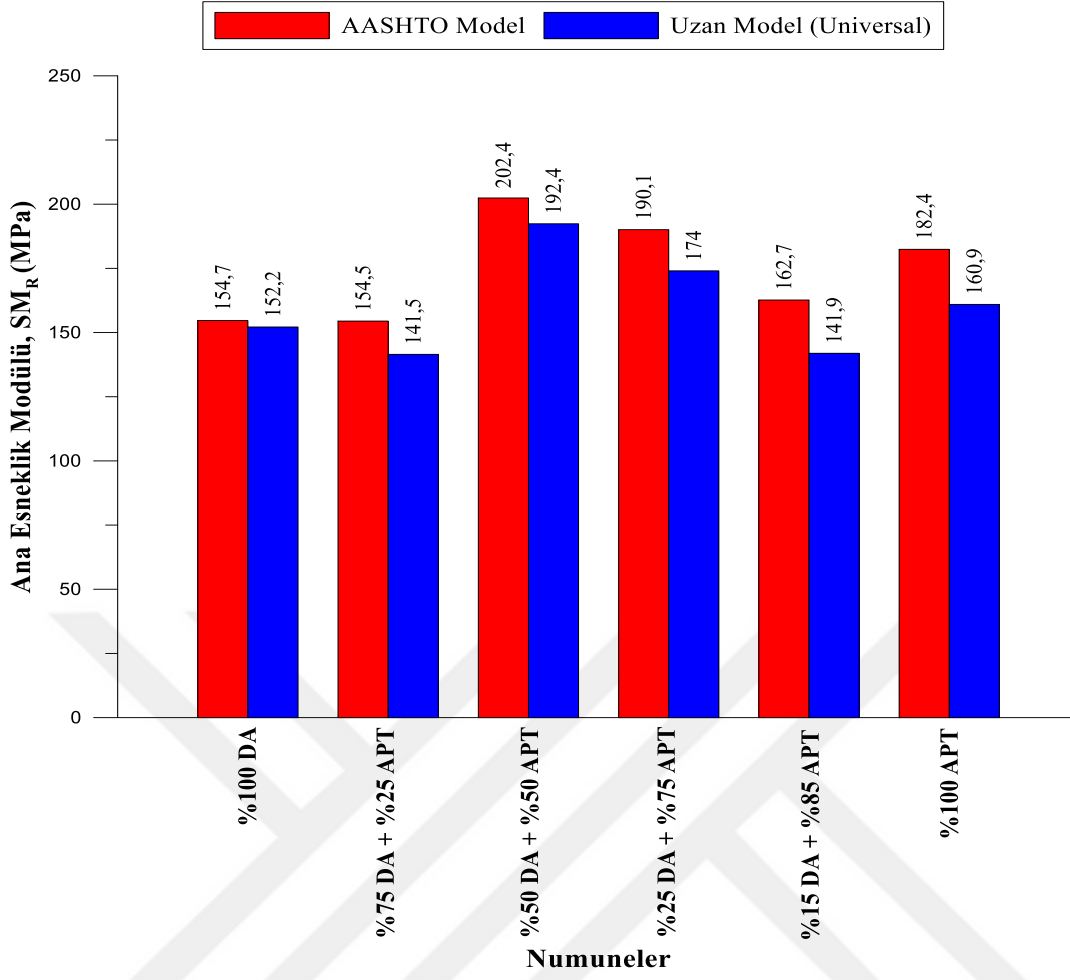


Şekil 7.58. Ölçülen MR değerleri ile Uzan modeli ile tahmin edilen MR değerleri arasındaki ilişki



Şekil 7.59. %100 APT için esneklik modülü ile toplam gerilme arasındaki ilişki (Uzan Modeli)

Karayolları teknik şartnamesine uygun olarak hazırlanan plent-miks temel tabakasında kullanılacak olan malzemelerin tasarım esneklik modülünün değerinin hesaplanabilmesi için; 34,5 kPa çevre basıncı ve 103,4 kPa deviator gerilme kullanılmıştır (NCHRP, 2003). Malzemeler için toplam gerilme 208 kPa olarak hesaplanmıştır. Her bir numune için elde edilen AASHTO ve Uzan (Universal) model denklemleri kullanılarak, numunelerin ana esneklik modülü (SM_R) değerleri elde edilmiştir. Her bir numune için elde edilen değerler Şekil 7.60'da gösterilmiştir. Numunelerin ana esneklik modülü değerleri incelendiğinde AASHTO modelinin, Uzan modeline göre daha yüksek esneklik modülü değerleri aldığı görülmektedir. En yüksek SM_R değeri %50 DA + %50 APT numunesinde, en düşük SM_R değeri ise %75 DA + %25 APT numunesinde elde edilmiştir. Literatürde 7 farklı RCA malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen esneklik modülü deneyi sonucunda elde edilen tasarım esneklik modülü 163 MPa- 208 MPa arasında değişen değerler almaktadır (Bozyurt vd., 2012). Bu değerler tez çalışması kapsamında APT için belirlenen tasarım esneklik modülü değerleri ile tutarlılık göstermektedir.



Şekil 7.60. Numunelerin SM_R değerlerinin tahmin modellerine göre değişimi

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında inşaat ve yıkıntı atığı olarak depolanan atık parke taşı (APT) ve atık tuğla (AT) malzemelerinin, doğal agrega (DA) yerine plent-miks temel tabakasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Depolama tesisinden temin edilen APT ve AT malzemelerinin konkasör yardımıyla kırımı gerçekleştirilmiştir. Kırımı gerçekleştirilen malzemeler ve DA için Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'e (KTŞ 2013) uygun olarak plent-miks tip-1'e göre temel tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan plent-miks temel karışımına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde KTŞ 2013'de belirtilen standartlara uygun bir şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için; özgül ağırlık ve su emme deneyi, Los Angeles aşınma deneyi, yassılık indeksi deneyi, organik madde içeriğinin tayini deneyi, kil topağı ve dağılabilen dane oranı deneyi, hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi, plastik limit deneyi ve metilen mavisini deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için; modifiye Proktor deneyi, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi ve esneklik modülü deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır;

- Atık malzemelerin özgül ağırlık değerleri; AT için kaba agrega $26,0 \text{ kN/m}^3$, APT için kaba agrega $25,3 \text{ kN/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. DA için elde edilen kaba agrega özgül ağırlık değeri $27,7 \text{ kN/m}^3$ 'tür. Temin edilen atık malzemelerin özgül ağırlıkları doğal agregaya göre daha düşüktür. Bunun nedeni atık malzemelerin daha gözenekli ve boşluklu bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

- AT malzemesinin su emme değeri %16,98 olarak bulunmuştur. Atık tuğla malzemesi KTŞ 2013'de belirtilen %3 limit değerinin üzerindedir. Bunun nedeni AT malzemesinin gözenekli bir yapıya sahip olmasıdır. APT malzemesi AT malzemesine göre daha düşük bir su emme değerine sahiptir. APT malzemesinin su emme değeri %6,52 olarak bulunmuştur. Yine de APT malzemesinin su emme değeri KTŞ 2013'de belirtilen %3 limit değerinin üzerindedir. Bu durum APT malzemesinin gözenekli bir yapıya sahip olması ve emici özelliğe sahip olan küçük boyutlara sahip çimentonun bulunması ile açıklanabilmektedir. Malzemelerin su emme değerlerine ek olarak malzemelerin birbiriyle olan karışımlarının su emme değerleri de belirlenmiştir. AT malzemesinin APT ve DA ile belirli oranlarda karıştırılması sonucunda su emme değeri AT malzemesinin su emme değerine göre daha düşüktür. Yine de karışımlar için elde edilen su emme değerleri şartname limitinin üzerindedir. Aynı şekilde APT malzemesinin DA ile belirli oranlarda karıştırılması sonucunda elde edilen karışımların su emme değerleri

DA'nın su emme değeri %1,1 olmasına rağmen sadece %85 DA + %15 APT numunesinde %2,58 ile şartname limitinin altında değer almıştır. Bu nedenle temel tabakasında kullanılacak olan AT veya APT malzemelerinin su emme değerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

- Malzemelerin Los Angeles aşınma değerleri AT malzemesi için %82,84, APT malzemesi için %35,79 ve DA için %10,84 olarak belirlenmiştir. Atık malzemelerin aşınmaya karşı dayanıklılığı DA ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Elde edilen aşınma değerine göre AT malzemesinin KTŞ 2013'de belirtilen %35 aşınma değeri limitinden çok daha yüksek bir aşınma değerine sahip olduğu belirlenmiştir. APT malzemesinin ise şartname limitlerine yakın bir değer almasına rağmen şartname değerini aştığı belirlenmiştir. Elde edilen aşınma değerleri sonucunda APT malzemesinin AT malzemesine göre trafik yükü altında aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Bu durum APT malzemesinin içerisindeki çimento hamuru ile agreganın birbirine iyi bir şekilde kenetlenmesi ile açıklanabilir.

- Malzemelerin yassılık indeksi değerleri AT malzemesi için %31,17, APT malzemesi için %23,22 ve DA için %21,06 olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerlere göre sadece AT malzemesinin KTŞ 2013'de belirtilen %30 yassılık indeksi değerini geçtiği belirlenmiştir. Ayrıca bu yassılık indeksi değerlerine göre AT malzemesinin danelerinin birbirine kenetlenmesi daha az ve yük altında parçalanması APT malzemesine ve DA'ya göre daha çok gerçekleşeceği sonucu çıkarılabilir.

- Organik madde içeriğinin tespiti için yapılan deney sonucunda AT malzemesi, APT malzemesi ve DA'nın organik madde içermediği belirlenmiştir. Malzemelerde organik madde bulunmadığından dolayı organik maddeler agregaların trafik yükü altında dayanımını etkilemeyecektir.

- Malzemelerin kil topağı ve dağılabilen dane oranı AT malzemesi için %1,22, APT malzemesi için %0,27 ve DA için %0,37 olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerlere göre AT malzemesinin KTŞ 2013'de belirtilen %1 kil topağı ve dağılabilen dane oranının üzerinde olduğu belirlenmiştir. APT malzemesinin kil topağı ve dağılabilen dane oranı DA ile karşılaştırıldığında daha düşük bulunmuştur. Bunun nedeni APT malzemesinin belirli bir standarda sahip beton kullanılarak üretilmesi ve beton içerisinde kullanılan agreganın kil topağı ve dağılabilen dane oranının daha az olmasıdır.

- Malzemelerin hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi sonucunda elde edilen kayıp değeri AT malzemesi için %47,4, APT malzemesi için %18,75 ve DA için %11,64 olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerlere göre AT malzemesinin KTŞ 2013'de belirtilen %20 hava tesirlerine karşı dayanıklılık değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni AT

malzemesinin su emme değerinin yüksekliğidir. AT malzemesi içerisinde bulunan suyun donması ile gerçekleşen hacim genleşmesi sonucunda oluşan ilave gerilmeler AT malzemesinin parçalanmasına neden olmaktadır. Bu parçalanma sonucunda temel tabakasının gradasyonunda bozulma meydana gelebilir. Bu nedenle AT malzemesi kullanılacaksa hava tesirlerine karşı dayanıklılığı çok iyi bir şekilde belirlenmelidir. Benzer şekilde APT malzemesinin su emme değerinin yüksekliğinden dolayı hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi sonucunda elde edilen kayıp değeri, DA iin elde edilen değerden daha yüksektir. Ancak APT malzemesi KTŞ 2013’de belirtilen %20 hava tesirlerine karşı dayanıklılık değerini sağlamıştır.

- Malzemeler üzerinde yapılan plastik limit deneyi sonucunda AT, APT ve DA’ nın plastik özellik göstermediği belirlenmiştir. Bu nedenle likit limit deneyi yapılmamıştır.

- Malzemelerin metilen mavisi değerleri AT malzemesi için 1,0 gr/kg, APT malzemesi için 1,5 gr/kg ve DA için 4,5 gr/kg olarak belirlenmiştir. Bu üç malzemede KTŞ 2013’de belirtilen şartname limitini sağlamıştır.

- Tasarımı yapılan plent-miks temel tabakasında kullanılan AT, APT ve DA numunelerinin yanı sıra bu malzemelerin birbirleriyle karışımından oluşan numuneler üzerinde madifiye Proktor deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda optimum su muhtevası değerleri %100 DA için; %4,86, %100 APT için; %8,79 ve %100 AT için; %9,90 olarak bulunmuştur. Numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise %100 DA için; 2,295 gr/cm³, %100 APT için; 1,901 gr/cm³ ve %100 AT için; 1,697 gr/cm³ olarak elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %100 AT numunesinin optimum su muhtevası olarak en büyük değeri, kuru birim hacim ağırlık olarak ise en düşük değeri aldığı belirlenmiştir. Bunun nedeni AT malzemesinin su emme değerinin yüksek olmasıdır. DA içerisine %15, %25, %50, %75 ve %85 oranlarında APT konularak hazırlanan numunelerin optimum su muhtevası değerleri sırasıyla %5,36, %5,55, %7,65, %8,42, %8,73 olarak, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ise sırasıyla 2,191 gr/cm³, 2,141 gr/cm³, 2,072 gr/cm³, 1,963 gr/cm³, 1,951 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre APT malzemesinin içeriğinin artmasıyla optimum su muhtevasında artış, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ise bir düşüşü yaşanmaktadır. Bunun nedeni APT malzemesinin su emme değerinin DA’ ya göre daha yüksek olması ve APT içerisinde hidratasyonu tamamlanmamış imento varlığıdır. Bu durum yüksek optimum su muhtevasına ve düşük kuru birim hacim ağırlığına neden olmaktadır. DA ve APT içerisine %50, %25 oranlarında AT malzemesi konulduğunda DA ile oluşturulan numunelerin optimum su muhtevası sırasıyla %9,38, %8,45, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla 1,936 gr/cm³, 2,154 gr/cm³ olmaktadır. APT ile oluşturulan numunelerin optimum su muhtevası sırasıyla %9,16, %10,21, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise sırasıyla

1,768 gr/cm³, 1,811 gr/cm³ olmaktadır. Bu sonuçlara göre DA içerisindeki AT oranı azalmasıyla optimum su muhtevası azalmakta, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise artmaktadır. APT içerisine AT konulması ile oluşturulan numunelerde ise AT oranının azalması ile optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında bir artış yaşanmıştır.

- Tasarımı yapılan plent-miks temel tabakasında kullanılan malzemeler üzerinde yaş olarak gerçekleştirilen Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) deneyi sonucunda numunelerin ortalama CBR değerleri %100 DA için; %164, %100 APT için; %207 ve %100 AT için; %88 olarak bulunmuştur. %100 APT numunesinin CBR değeri %100 DA numunesinden ve ayrıca KTŞ 2013’de belirtilen %120 CBR değerinden daha büyük bir değer elde edilmiştir. Bu durum yaş olarak gerçekleştirilen CBR deneyinde APT içerisinde bulunan hidratasyonu gerçekleşmemiş çimentonun su ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşmuştur. DA içerisine %15, %25, %50, %75, %85 oranlarında APT katılmasıyla oluşan numunelerin ortalama CBR değerleri sırasıyla %175, %218, %275, %199, %252 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar incelendiğinde APT içeriğinin artmasıyla karışımların CBR değerinde bir artış yaşanmıştır. En yüksek CBR değerine %50 DA + %50 APT numunesinde ulaşılmıştır. Bu tepe noktadan sonra APT içeriğinin artmasıyla CBR değerinde bir azalma yaşanmış yine de numunelerin CBR değeri %100 DA numunesinin CBR değerinden daha yüksek bir değer almıştır. Bu sonuçlardan yola çıkılarak APT malzemesinin plent-miks temel tabakasında kullanımının DA’ ya göre daha iyi bir performans göstereceği belirlenmiştir. KTŞ 2013’e göre plent-miks temel tabakasında kullanılacak olan malzemenin CBR değerinin %120 olması istenmektedir. Bu limit değeri %100 AT numunesi sağlayamamıştır. Ancak DA veya APT malzemesinin içerisine %50, %25 oranlarında AT katılmasıyla oluşturulan numunelerde şartname limitinin üzerinde CBR değerleri elde edilmiştir. %50 DA + %50 AT numunesinin CBR değeri %131 olarak bulunmuştur. Bu değer %100 DA numunesinin CBR değerinden düşüktür. Ancak %100 AT numunesinin CBR değerinden yüksektir. Bu karışım numunesinde DA AT malzemesinin mukavemet özelliklerini iyileştirmiştir. %75 DA + %25 AT numunesinin CBR değeri ise %200 olarak belirlenmiştir. Bu değer %100 DA CBR değerinden yüksektir. Bu karışım numunesinde ise AT, DA’ nın mukavemet özelliğini artırmıştır. APT malzemesi içerisine %50 oranında AT malzemesi konulan numunenin CBR değeri ise %197, %25 oranında AT malzemesi konulan numunenin CBR değeri ise %192 olarak bulunmuştur. Bu iki CBR değerinin %100 APT numunesinin CBR değerinden düşük olmasına karşın KTŞ 2013 CBR limitini sağlamıştır.

- Tasarımı yapılan plent-miks temel tabakasında kullanılan %100 DA, %100 APT ve DA içerisine %25, %50, %75, %85 oranlarında APT malzemesi konularak hazırlanan numuneler üzerinde Karayolları Genel Müdürlüğünde esneklik modülü deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Elde edilen esneklik modülü deney bulgularına göre numuneler üzerindeki toplam gerilmenin artması ile birlikte esneklik modülünün arttığı belirlenmiştir. Aynı şekilde çevre basıncının artması ile birlikte numunelerin esneklik modülünde de artış yaşanmaktadır. Esneklik modülü deney bulgularının daha iyi değerlendirilebilmesi için malzemenin doğrusal olmayan davranışının belirlenmesi için geliştirilen tahmin modellerinden AASHTO model ve Uzan (Universal) modeli kullanılmıştır. Kullanılan modellerde regresyon analizleri yapılmıştır. Modeller kullanılarak yapılan analizlerde tahmin esneklik modülünün, esneklik modülü deneyi sonucunda elde edilen deney bulgularına yakınlığının belirlenmesi için determinasyon katsayısı (R^2) her bir numune için belirlenmiştir. AASHTO modeline göre belirlenen R^2 değerleri; %100 DA için; 0,98, %100 APT için; 0,89, DA içerisine %25, %50, %75, %85 oranlarında APT konulmuş numuneler için sırasıyla 0,92, 0,96, 0,92, 0,88 olarak belirlenmiştir. Uzan modeline göre belirlenen R^2 değerleri ise; %100 DA için; 0,98, %100 APT için; 0,94, DA içerisine %25, %50, %75, %85 oranlarında APT konulmuş numuneler için sırasıyla 0,98, 0,98, 0,97, 0,97 olarak belirlenmiştir. R^2 değerleri incelendiğinde Uzan modelinin tahmin edilen esneklik modülü değerlerinin deney bulgularına daha yakın bir sonuç verdiği belirlenmiştir. Bu iki model kullanılarak numunelerin 34,5 kPa çevre basıncında ve 103,4 kPa deviator gerilme altındaki tasarım esneklik modülü (SM_R) değeri belirlenmiştir. AASHTO model için belirlenen SM_R değeri; %100 DA için; 154,7 MPa, %100 APT için; 182,4 MPa, DA içerisine %25, %50, %75, %85 oranlarında APT konulmuş numuneler için sırasıyla 154,5 MPa, 202,4 MPa, 190,1 MPa, 162,7 MPa olarak belirlenmiştir. Uzan (Universal) model için belirlenen SM_R değeri; %100 DA için; 152,2 MPa, %100 APT için; 160,9 MPa, DA içerisine %25, %50, %75, %85 oranlarında APT konulmuş numuneler için sırasıyla 141,5 MPa, 192,4 MPa, 174 MPa, 141,9 MPa olarak belirlenmiştir. SM_R sonuçları incelendiğinde AASHTO modeline ait değerlerin Uzan modeline göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Uzan modeline göre numunelerin SM_R değerleri değerlendirildiğinde en yüksek SM_R değerine sahip olan numunenin %50 DA + %50 APT numunesi olduğu belirlenmiştir. En düşük SM_R değerine sahip numune ise %75 DA + % 25 APT numunesidir. Bu sonuçlara göre APT malzemesi DA' ya göre daha iyi bir performans göstermekle birlikte genel olarak DA esneklik modülü özelliğini iyileştirmiştir.

Atık tuğla malzemesi için elde edilen deney sonuçları genel olarak incelendiğinde; çalışmada kullanılan atık tuğla malzemesinin hem fiziksel hem de mekanik özellik bakımında plent-miks temel tabakası için KTSŞ 2013'e göre tek başına yetersiz kaldığı belirlenmiştir. Ancak atık tuğla malzemesinin doğal agrega veya atık parke taşı ile karıştırılması sonucunda

oluşturulacak olan plent-miks temel tabakasında daha iyi bir performans göstereceği belirlenmiştir. Yine de atık tuğla karışımlarının fiziksel özellik bakımından iyi bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Ayrıca geçmiş çalışmalarda kırılmış tuğla (CB) için elde edilen deney sonuçları ile tez çalışmasında kullanılan atık tuğla deney sonuçları arasındaki farklılık atık malzeme olarak kullanılan tuğlanın içeriğine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle temel/alttemel malzemesi olarak kullanılacak olan atık tuğla malzemesinin geoteknik özelliklerinin çok iyi bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Atık parke taşı malzemesinin deney sonuçları genel olarak incelendiğinde; atık parke taşı ve doğal agrega ile belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışımların su emme değerlerinin yüksekliğinin dışında plent-miks temel tabakasında kullanımı KTŞ 2013'e göre yeterlidir. Su emme değeri düşürülmek isteniyorsa doğal agrega içerisindeki atık parke taşı oranı azaltılmalıdır. Ancak atık parke taşı oranının azaltılması taşıma gücü ve esneklik modülünde bir azalışa neden olacaktır. Bu nedenle atık parke taşının su emme değerinin nasıl azaltılabileceği hakkında çalışma yapılabilir.

Atık parke taşı geçmiş çalışmalarda kullanılan geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) ile karşılaştırıldığında farklı ve benzer yönleri bulunmaktadır. Yıkım faaliyetlerinden elde edilen RCA genellikle heterojen bir yapıya sahiptir ve içerisinde değişik malzemeleri içerebilmektedir. RCA doğal agrega gibi tek bir kaynaktan elde edilemediği için farklı yıkım alanlarından gelen RCA'nın mukavemet ve kaliteleri farklılık göstermektedir. Atık parke taşı malzemesi ise belirli bir standarda ve mukavemete sahiptir. Ayrıca atık depolama alanlarında ayrı bir malzeme olarak depolandıkları için içerisinde farklı malzemeler bulunmamaktadır. Atık parke taşı ile geçmiş çalışmalarda temel/alttemel malzemesi olarak kullanılan RCA benzer fiziksel özelliklere sahiptir. Mekanik özellikler bakımından ise RCA'dan daha iyi bir performans göstermektedir. Bu nedenle atık parke taşı geçmiş çalışmalarda kullanılan RCA malzemesine alternatif bir malzeme olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak atık parke taşı malzemesinin tek başına veya doğal agrega içerisine belirli oranlarda konularak oluşturulan temel tabakalarının, doğal agrega kullanılarak oluşturulan temel tabakalarına alternatif olabileceği belirlenmiştir. Temel malzemesi olarak atık parke taşının kullanılması doğal agregaya bir alternatif olmakla birlikte doğal agrega tüketiminin azalmasına, depolama alanlarında depolanan atık parke taşının yeniden kullanılarak ekonomiye kazandırılmasına ve tüm bunların yanında çevrenin korunmasına katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- AASHTO (2012). *Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials (T 307-99)*. Washington, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2012). *The California bearing ratio (T 193-10)*. Washington, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Aatheesan, T., Arulrajah, A., Bo, M. W., Vuong, B., Wilson, J. (2010). Crushed brick blends with crushed rock for pavement systems. *Waste and Resources Management*, 163, 29-35.
- Altındağ, S. (2011). *İstanbul'da hafriyat toprağı, inşaat ve yıkıntı atıklarının tersine lojistik yöntemiyle alternatif yönetim planı*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arulrajah, A., Ali, M. M. Y., Piratheepan, J., Bo, M. W. (2012c). Geotechnical properties of waste excavation rock in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 924-932.
- Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Prongmanee, N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, 58, 245-257.
- Arulrajah, A., Piratheepan J., Ali, M. M. Y., Bo M. W. (2012a). Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Geotechnical Testing Journal*, 35, 1-9.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan, T., Bo, M. W. (2011). Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 1444-1452.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., Sivakugan N. (2012b). Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, 796-811.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W. (2013a). 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., Bo, M. W. (2013b). Resilient moduli response of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), 1920-1928.
- ASTM (2014). *Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (C131)*. West Conshohocken, USA : American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2017). *Standard test method for clay lumps and friable particles in aggregates (C142)*. West Conshohocken, USA : American Society for Testing and Materials.
- Aurstad, J., Aksnes, J., Dahlhaug, J., Bernsten, G., Uthus, N. (2006). *Unbound crushed concrete in high volume roads – a field and laboratory study*. Proceedings of the 5th International Conference on Research and Practical Applications Using Wastes and Secondary Materials in Pavement Engineering, Liverpool, UK.
- Ayan, V., Limbachiya, M. C., Omer, J. R., Azadami, S. M. N. (2014). Compaction assessment of recycled aggregates for use in unbound subbase applications. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(2), 169-174.
- Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jimenez, J. R., Poon, C. S. (2012). Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, 28, 129-138.
- Bennert, T., Papp, W., Maher, A., Gucunski, N. (2000). Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications. *Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1714, 33-39.
- Bozyurt, O., Tinjum, J. M., Son, Y., Edil, T. B., Benson, C. H. (2012). *Resilient modulus of recycled asphalt pavement and recycled concrete aggregate*. Geo-Congress March 25-29, Oakland, California, United States.
- BS (1990). *Part 105: Methods for determination of particle shape- Section 105.1 Flakiness index (BS 812-105.1)*. London, UK: British Standards Institution.
- Cai, X., Li, X., Wu, K., Huang, W. (2018). Grading design of recycled aggregate cement-stabilized gravel based on rotary compaction. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 12(3), 1-6.
- Cerni, G., Cardone, F., Bocci, M. (2012). Permanent deformation behaviour of unbound recycled mixtures. *Construction and Building Materials*, 37, 573-580.

- Disfani, M. M., Arulrajah, A., Haghghi, H., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S. (2014). Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, 667-676.
- EC (2000). 2000/532/EC: Commission decision of 3 May 2000 replacing decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to article 1(a) of council directive 75/442/EEC on waste and council decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to article 1(4) of council directive 91/689/EEC on hazardous waste. *Official Journal of the European Communities*, 226, 3-24.
- Edil, T. B. (2018). A review of recycled aggregates (RAP and RCA) as unbound base course material for sustainable highway construction. In: Tran-Nguyen HH., Wong H., Ragueneau F., Ha-Minh C. (eds.), *Proceedings of the 4th Congress International de Geotechnique-Ouvrages-Structures*. CIGOS 2017. Lecture Notes in Civil Engineering 8. Springer, Singapore.
- Eurostat (2016). *Waste statistics*. Erişim adresi: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics
- 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.
- Güngör, A. G., Sağlık A, (2009, Kasım 18-19). *Mekanistik ampirik üstyapı tasarımında esneklik modülünün şartnamelere uyarlanması*. 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara.
- Haider, I., Cetin, B., Kaya, Z., Hatipoglu, M., Cetin, A., Ahmet, H. A. (2014). *Evaluation of the mechanical performance of recycled concrete aggregates used in highway base layers*. Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability, Atlanta, United States.
- Huang, Y., H. (2004). *Pavement analysis and design 2nd edition*. Englewood cliffs, New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- İpekçi, C. A., Coşkun, N., Karadayı, T. T. (2017). İnşaat sektöründe geri kazanılmış malzeme kullanımının sürdürülebilirlik açısından önemi. *TÜBAV Bilim*, 10(2), 43-50.
- Jayakody, S., Gallage, C., Ramanujam, J. (2017). Effects of reclaimed asphalt materials on geotechnical characteristics of recycled concrete aggregates as a pavement material. *Road Materials and Pavement Desing*. DOI: [10.1080/14680629.2017.1417151](https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1417151)

- Jiménez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., Lopez, M., Galvin, A. P. (2012). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 88-97.
- Kahveci, A. E. (2008). *Diyarbakır yöresinde bazalt taşının yapı malzemesi olarak kullanımının incelenmesi üzerine bir araştırma*. (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2006). *Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi*. Ankara, Türkiye: KGM Yayını.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2013). *Karayolu teknik şartnamesi*. Ankara, Türkiye: KGM Yayını.
- Kaya, A. O. (2014). *Esnek üstyapıların aşınma tabakasında elektrik ark fırını cürufunun agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kumar, R. (2017). Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. *Construction and Building Materials*, 142, 248-255.
- Kumbasar, V. ve Kip, F. (1999). *Zemin mekaniği problemleri* (6. Baskı). İstanbul, Türkiye: Çağlayan Basımevi.
- Leite, F. C., Motta, R. S., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25, 2972-2979.
- Mehus, J., Petkovic, G., Englasen, C. J., Karlsen, J., Lillestol, B. (2003). *Recycled aggregates a viable alternative for Norwegian building and construction industry*. WASCON Progress on the Road to Sustainability, 5th International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, San Sebastian, Spain.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Chinkulkhniwat, A. (2017). Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 547-556.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W., Darmawan, S. (2015). Laboratory evaluation of the use of cement-treated construction and demolition

- materials in pavement base and subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014186
- Molenaar, A., van Niekerk, A. (2002). Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. *Transportation Research Record*, 1787, 73-82.
- Nataatmadja, A., Tan, Y. (2001). Resilient response of recycled concrete road aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 127(5), 450-453.
- NCHRP (2003). *Harmonized test methods for laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design (1-28A)*. National Research Council, Washington, D.C.
- Neves, J., Freira, A. C., Roque, A. J., Martins, I. M., Autunes, M. L., Faria, G. (2013). *Utilization of recycled materials in unbound granular layers validated by experimental test sections*. Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway.
- O'Mahony, M. M., Milligan, G. W. E. (1991). Use of recycled materials in subbase layers. *Transportation Research Record*, 1310, 73-80.
- Obe, D. K. R., Brito, D. J., Silva, V. R., Lye, Q. C. (2019). *Woodhead publishing series in civil and structural engineering sustainable construction materials: recycled aggregates*. United Kingdom: Elsevier Science.
- Ölmez, E. ve Yıldız, Ş. (2008, Kasım 02-06). *İnşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan İstanbul modeli*. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları '08 Sempozyumu, İstanbul.
- Özüğurlu, B. (2015). *Karayolu esnek üstyapı binder tabakasında elektrik ark ocağı cürufunun yapay agrega olarak kullanılması*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pamuk, R. (2018). *Türkiye'de inşaat ve yıkıntı atıklarının geri kazanımının mevcut durumu: atık yönetimi için bir model önerisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ping, W. V., Xiong, W., Yang, Z. (2003). *Implementing resilient modulus test for design of pavement structures in Florida*. Tallahassee, Florida: Florida A&M University – Florida State University.

- 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, 578-585.
- Semiz, M. (2006). *Beton kilit taşlarının fiziksel özellikleri ve alternatif üretimin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sivakumar, V., McKinley, J. D., Ferguson D. (2004). Reuse of construction waste: performance under repeated loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, 157, 91-96.
- Soleimanbeigi, A. Ve Edil, T. B. (2015). Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 04015011.
- Tahmoorian, F., Samali, B. (2018). Laboratory investigations on the utilization of RCA in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11, 627-638.
- TS (2006). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri – bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini (TS 1900-2)*. Ankara, Türkiye : Türk Standartları Enstitüsü.
- TS (2010). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar (TS EN 1097-2)*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS (2011). *Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler – bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi (TS EN 1367-2)*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS (2013). *Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler – bölüm 1: Kimyasal analiz (TS EN 1744-1:2009+A1)*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS (2013). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini (TS EN 1097-6)*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS (2014). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler – bölüm 9: İnce tanelerin tayini – Metilen mavisi deneyi (TS EN 933-9+A1)*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS (2015). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri – bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini (TS 1900-1)*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- Tunç, A. (2007). *Yol malzemeleri ve uygulamaları (2. Baskı)* . Ankara, Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım.

- Uçar, H. (2008). *Kırmataşların beton agregasında ve hazır beton tesislerinde kullanılma kriterleri örnek uygulama: Sağlıklı köyü kalker ocağı*. (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Uzan, J. (1985). Characterization of granular material. *Transport Research Record*, 1022, 52-59.
- Vieira, C. S., Pereira, P. M. (2015). Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 192-204.
- Yar, B. (2019). *Elektrik ark ocağı fırını cürufunun karayolu esnek üstyapısı aşınma tabakası için eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yayla, N. (2004). *Karayolu mühendisliği*. İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi

EKLER

EK 1. %100 DA Ayrıntılı Esneklik Modülü Deney Sonuçları

a. %100 DA Esneklik Modülü Deney Bulguları

Yanal Basınç (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Bulk Gerilme (kPa)	Ortalama Elastik Birim Deformasyon (%)	Ortalama Esneklik Modülü (kPa)
20,6	20,7	19,3	80,92	0,02	70929
20,8	41,4	38,3	100,86	0,04	80600
20,6	62,1	56,6	118,41	0,06	89864
34,4	34,5	32,1	135,40	0,03	96274
34,5	68,9	61,4	164,94	0,05	112850
34,6	103,4	88,3	192,06	0,06	135590
69,4	68,9	60,0	268,13	0,02	234790
69,4	137,9	116,5	324,58	0,04	257350
69,3	206,8	184,8	392,73	0,06	262090
104,1	68,9	60,1	372,36	0,02	252280
104,1	103,4	85,7	397,99	0,02	297650
104,3	206,8	184,2	497,10	0,05	343430
138,6	103,4	85,8	501,60	0,02	312510
138,5	137,9	114,9	530,40	0,03	378030
138,6	275,8	252,1	667,90	0,05	445080

b. %100 DA AASHTO Modeli Deneş Sonuçları

Ortalama Bulk Gerilme, θ (kPa)	Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	k_1	k_2	AASHTO Model
		1173,37	0,9146	$k_1 * \theta^{k_2}$
		Tahmin Edilen Esneklik Modülü		
		kPa	MPa	
80,92	70929,0	65231,8	65,23	
100,86	80600,0	79790,1	79,79	
118,41	89864,0	92398,6	92,40	
135,40	96274,0	104452,9	104,45	
164,94	112850,0	125113,6	125,11	
192,06	135590,0	143802,6	143,80	
268,13	234790,0	195116,4	195,12	
324,58	257350,0	232370,2	232,37	
392,73	262090,0	276618,0	276,62	
372,36	252280,0	263466,7	263,47	
397,99	297650,0	280004,4	280,00	
497,10	343430,0	343150,8	343,15	
501,60	312510,0	345990,7	345,99	
530,40	378030,0	364115,1	364,12	
667,90	445080,0	449565,6	449,57	

c. %100 DA Uzan Modeli Deney Sonuçları

Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	Bulk Gerilme, θ (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	k_1	k_2	k_3	Uzan Model
			759,0	0,947	-0,037	$\sigma_{atm} * k_1 * (\theta / \sigma_{atm})^{k_2} * (\sigma_d / \sigma_{atm})^{k_3}$
			Tahmin Edilen Esneklik Modülü			
			kPa		MPa	
70929	80,92	19,27	66125,31		66,13	
80600	100,86	38,34	79401,74		79,40	
89864	118,41	56,64	91095,64		91,10	
96274	135,4	32,14	105644,42		105,64	
112850	164,94	61,41	124318,12		124,32	
135590	192,06	88,32	141666,19		141,67	
234790	268,13	60,02	197150,87		197,15	
257350	324,58	116,5	230485,86		230,49	
262090	392,73	184,8	271374,97		271,37	
252280	372,36	60,06	269082,63		269,08	
297650	397,99	85,69	282817,94		282,82	
343430	497,1	184,2	339293,55		339,29	
312510	501,6	85,8	352105,81		352,11	
378030	530,4	114,9	367201,59		367,20	
445080	667,9	252,1	443599,43		443,60	

EK 2. %100 APT Ayrıntılı Esneklik Modülü Deney Sonuçları

a. %100 APT Esneklik Modülü Deney Bulguları

Yanal Basınç (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Bulk Gerilme (kPa)	Ortalama Elastik Birim Deformasyon (%)	Ortalama Esneklik Modülü (kPa)
21,8	20,7	19,4	84,66	0,01	130160
22,0	41,4	38,2	104,12	0,04	95400
21,8	62,1	56,7	122,13	0,05	102560
35,5	34,5	31,5	138,09	0,02	127080
35,8	68,9	62,8	170,21	0,04	140010
35,9	103,4	90,1	197,87	0,05	160650
70,3	68,9	62,0	272,86	0,02	246300
70,4	137,9	116,1	327,30	0,04	259310
70,4	206,8	184,6	395,65	0,06	277850
105,3	68,9	62,0	377,91	0,01	393600
105,3	103,4	87,5	403,35	0,02	329680
105,2	206,8	183,2	498,80	0,05	303010
139,6	103,4	86,8	505,62	0,02	305200
139,5	137,9	116,3	534,80	0,03	369650
139,6	275,8	252,7	671,50	0,05	459970

b. %100 APT AASHTO Modeli Deney Sonuçları

Ortalama Bulk Gerilme, θ (kPa)	Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	k_1	k_2	AASHTO Model
		3419,04	0,7451	$k_1 * \theta^{k_2}$
		Tahmin Edilen Esneklik Modülü		
		kPa	MPa	
84,66	130160,0	93358,4	93,36	
104,12	95400,0	108918,6	108,92	
122,13	102560,0	122666,7	122,67	
138,09	127080,0	134421,4	134,42	
170,21	140010,0	157086,0	157,09	
197,87	160650,0	175736,1	175,74	
272,86	246300,0	223276,3	223,28	
327,30	259310,0	255686,3	255,69	
395,65	277850,0	294493,0	294,49	
377,91	393600,0	284597,6	284,60	
403,35	329680,0	298752,7	298,75	
498,80	303010,0	349977,5	349,98	
505,62	305200,0	353536,6	353,54	
534,80	369650,0	368629,0	368,63	
671,50	459970,0	436760,0	436,76	

c. %100 APT Uzan Modeli Deney Sonuçları

Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	Bulk Gerilme, θ (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	k_1	k_2	k_3	Uzan Model
			792,11	0,972	-0,253	$\sigma_{atm} * k_1 * (\theta / \sigma_{atm})^{k_2} * (\sigma_d / \sigma_{atm})^{k_3}$
			Tahmin Edilen Esneklik Modülü			
			kPa		MPa	
130160	84,66	19,35	102507,30		102,51	
95400	104,12	38,15	105542,82		105,54	
102560	122,13	56,67	111493,71		111,49	
127080	138,09	31,53	145740,62		145,74	
140010	170,21	62,78	150006,29		150,01	
160650	197,87	90,05	158487,67		158,49	
246300	272,86	61,99	238073,32		238,07	
259310	327,3	116,1	242374,75		242,37	
277850	395,65	184,6	259142,14		259,14	
393600	377,91	62,01	326706,63		326,71	
329680	403,35	87,45	319042,12		319,04	
303010	498,8	183,2	325214,33		325,21	
305200	505,62	86,82	398138,16		398,14	
369650	534,8	116,3	390449,32		390,45	
459970	671,5	252,7	400216,19		400,22	

EK 3. %15 DA + %85 APT Ayrıntılı Esneklik Modülü Deney Sonuçları

a. %15 DA + %85 APT Esneklik Modülü Deney Bulguları

Yanal Basınç (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Bulk Gerilme (kPa)	Ortalama Elastik Birim Deformasyon (%)	Ortalama Esneklik Modülü (kPa)
23,2	20,7	19,5	89,05	0,03	67842
23,5	41,4	38,4	108,94	0,04	90191
23,1	62,1	57,1	126,27	0,05	91654
37,1	34,5	32,2	143,47	0,02	120660
37,2	68,9	61,9	173,53	0,04	136710
37,0	103,4	88,5	199,48	0,05	149570
71,8	68,9	61,4	276,73	0,02	270640
71,9	137,9	117,8	333,56	0,04	268510
71,7	206,8	186,9	402,03	0,06	254690
106,4	68,9	60,7	379,93	0,01	376560
106,4	103,4	86,1	405,29	0,02	316940
106,2	206,8	184,8	503,40	0,05	322300
140,7	103,4	86,7	508,81	0,02	383870
140,9	137,9	116,2	538,90	0,02	410730
141,1	275,8	254,4	677,70	0,06	387410

b. %15 DA + %85 APT AASHTO Modeli Deney Sonuçları

Ortalama Bulk Gerilme, θ (kPa)	Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	k_1	k_2	AASHTO Model
		1168,75	0,9247	$k_1 * \theta^{k_2}$
		Tahmin Edilen Esneklik Modülü		
		kPa	MPa	
89,05	67842,0	74231,8	74,23	
108,94	90191,0	89444,2	89,44	
126,27	91654,0	102527,1	102,53	
143,47	120660,0	115378,4	115,38	
173,53	136710,0	137568,5	137,57	
199,48	149570,0	156490,4	156,49	
276,73	270640,0	211808,4	211,81	
333,56	268510,0	251741,2	251,74	
402,03	254690,0	299181,6	299,18	
379,93	376560,0	283941,2	283,94	
405,29	316940,0	301424,3	301,42	
503,40	322300,0	368331,0	368,33	
508,81	383870,0	371990,0	371,99	
538,90	410730,0	392288,3	392,29	
677,70	387410,0	484888,9	484,89	

c. %15 DA + %85 APT Uzan Modeli Deneý Sonuçları

Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	Bulk Gerilme, θ (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	k_1	k_2	k_3	Uzan Model
			607,17	1,166	-0,265	$\sigma_{atm} * k_1 * (\theta / \sigma_{atm})^{k_2} * (\sigma_d / \sigma_{atm})^{k_3}$
			Tahmin Edilen Esneklik Modülü			
			kPa		MPa	
67842	89,05	19,45	81989,27		81,99	
90191	108,94	38,38	86614,34		86,61	
91654	126,27	57,12	92592,18		92,59	
120660	143,47	32,2	125116,06		125,12	
136710	173,53	61,9	131339,07		131,34	
149570	199,48	88,51	140541,21		140,54	
270640	276,73	61,42	226851,08		226,85	
268510	333,56	117,8	237324,12		237,32	
254690	402,03	186,9	261069,38		261,07	
376560	379,93	60,73	329323,67		329,32	
316940	405,29	86,09	323710,74		323,71	
322300	503,4	184,8	340394,52		340,39	
383870	508,81	86,71	421288,17		421,29	
410730	538,9	116,2	416832,70		416,83	
387410	677,7	254,4	442379,11		442,38	

EK 4. %25 DA + %75 APT Ayrıntılı Esneklik Modülü Deney Sonuçları

a. %25 DA + %75 APT Esneklik Modülü Deney Bulguları

Yanal Basınç (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Bulk Gerilme (kPa)	Ortalama Elastik Birim Deformasyon (%)	Ortalama Esneklik Modülü (kPa)
23,0	20,7	19,2	88,05	0,02	73838
22,8	41,4	38,5	106,82	0,03	100510
22,7	62,1	55,8	123,98	0,04	108020
36,8	34,5	31,9	142,21	0,02	147690
36,6	68,9	62,0	171,87	0,04	153440
36,6	103,4	87,2	196,87	0,04	187340
71,3	68,9	60,3	274,24	0,02	348330
71,3	137,9	116,1	329,94	0,03	289160
71,2	206,8	185,0	398,57	0,05	324030
105,9	68,9	59,1	376,83	0,01	364830
105,9	103,4	85,6	403,29	0,02	358100
105,8	206,8	187,0	504,40	0,04	379230
140,2	103,4	85,2	505,75	0,02	465250
140,4	137,9	114,7	535,90	0,02	455160
140,2	275,8	253,7	674,30	0,05	482720

b. %25 DA + %75 APT AASHTO Modeli Deney Sonuçları

Ortalama Bulk Gerilme, θ (kPa)	Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	k_1	k_2	AASHTO Model
		1318,02	0,9314	$k_1 * \theta^{k_2}$
		Tahmin Edilen Esneklik Modülü		
		kPa	MPa	
88,05	73838,0	85352,1	85,35	
106,82	100510,0	102183,1	102,18	
123,98	108020,0	117392,1	117,39	
142,21	147690,0	133391,8	133,39	
171,87	153440,0	159130,8	159,13	
196,87	187340,0	180587,2	180,59	
274,24	348330,0	245901,3	245,90	
329,94	289160,0	292115,8	292,12	
398,57	324030,0	348332,0	348,33	
376,83	364830,0	330602,2	330,60	
403,29	358100,0	352172,5	352,17	
504,40	379230,0	433757,1	433,76	
505,75	465250,0	434838,3	434,84	
535,90	455160,0	458933,9	458,93	
674,30	482720,0	568425,9	568,43	

c. %25 DA + %75 APT Uzan Modeli Deney Sonuçları

Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	Bulk Gerilme, θ (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	k_1	k_2	k_3	Uzan Model
			786,59	1,087	-0,172	$\sigma_{atm} * k_1 * (\theta / \sigma_{atm})^{k_2} * (\sigma_d / \sigma_{atm})^{k_3}$
			Tahmin Edilen Esneklik Modülü			
			kPa		MPa	
73838	88,05	19,2	91153,18		91,15	
100510	106,82	38,48	99762,22		99,76	
108020	123,98	55,76	110040,02		110,04	
147690	142,21	31,87	140694,75		140,69	
153440	171,87	61,95	154157,35		154,16	
187340	196,87	87,19	168465,84		168,47	
348330	274,24	60,25	257511,32		257,51	
289160	329,94	116,1	281188,29		281,19	
324030	398,57	185	318683,55		318,68	
364830	376,83	59,13	365034,66		365,03	
358100	403,29	85,59	368706,12		368,71	
379230	504,4	187	410963,45		410,96	
465250	505,75	85,15	472081,39		472,08	
455160	535,9	114,7	477583,19		477,58	
482720	674,3	253,7	534677,42		534,68	

EK 5. %50 DA + %50 APT Ayrıntılı Esneklik Modülü Deney Sonuçları**a. %50 DA + %50 APT Esneklik Modülü Deney Bulguları**

Yanal Basınç (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Bulk Gerilme (kPa)	Ortalama Elastik Birim Deformasyon (%)	Ortalama Esneklik Modülü (kPa)
23,4	20,7	19,4	89,57	0,02	104530
23,5	41,4	38,5	109,04	0,03	109010
23,2	62,1	56,5	126,10	0,04	129700
37,3	34,5	32,1	144,09	0,02	162920
37,1	68,9	61,8	173,13	0,03	194230
37,0	103,4	87,6	198,57	0,04	174800
72,2	68,9	62,0	278,64	0,02	257610
71,7	137,9	117,6	332,70	0,03	336920
71,9	206,8	184,2	399,78	0,05	310050
106,5	68,9	60,9	380,39	0,02	315900
106,5	103,4	86,9	406,40	0,02	412080
106,4	206,8	183,8	503,00	0,04	380530
141,0	103,4	85,8	508,77	0,02	430790
140,8	137,9	115,4	537,80	0,02	423410
141,2	275,8	251,5	675,10	0,04	492450

b. %50 DA + %50 APT AASHTO Modeli Deney Sonuçları

Ortalama Bulk Gerilme, θ (kPa)	Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	k_1	k_2	AASHTO Model
		2792,74	0,8025	$k_1 * \theta^{k_2}$
		Tahmin Edilen Esneklik Modülü		
		kPa	MPa	
89,57	104530,0	102949,9	102,95	
109,04	109010,0	120552,9	120,55	
126,10	129700,0	135468,5	135,47	
144,09	162920,0	150771,0	150,77	
173,13	194230,0	174705,8	174,71	
198,57	174800,0	195024,3	195,02	
278,64	257610,0	255952,5	255,95	
332,70	336920,0	295092,9	295,09	
399,78	310050,0	341957,6	341,96	
380,39	315900,0	328582,8	328,58	
406,40	412080,0	346494,3	346,49	
503,00	380530,0	411167,2	411,17	
508,77	430790,0	414947,9	414,95	
537,80	423410,0	433843,5	433,84	
675,10	492450,0	520687,5	520,69	

c. %50 DA + %50 APT Uzan Modeli Deney Sonuçları

Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	Bulk Gerilme, θ (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	k_1	k_2	k_3	Uzan Model
			998,72	0,893	-0,100	$\sigma_{atm} * k_1 * (\theta / \sigma_{atm})^{k_2} * (\sigma_d / \sigma_{atm})^{k_3}$
			Tahmin Edilen Esneklik Modülü			
			kPa		MPa	
104530	89,57	19,37	106977,36		106,98	
109010	109,04	38,54	119040,73		119,04	
129700	126,1	56,53	130449,40		130,45	
162920	144,09	32,07	155546,43		155,55	
194230	173,13	61,83	171614,66		171,61	
174800	198,57	87,63	187321,96		187,32	
257610	278,64	62,01	262488,49		262,49	
336920	332,7	117,6	288457,98		288,46	
310050	399,78	184,2	324968,48		324,97	
315900	380,39	60,89	347300,79		347,30	
412080	406,4	86,9	355549,09		355,55	
380530	503	183,8	399089,37		399,09	
430790	508,77	85,77	435167,13		435,17	
423410	537,8	115,4	443896,32		443,90	
492450	675,1	251,5	503071,47		503,07	

EK 6. %75 DA + %25 APT Ayrıntılı Esneklik Modülü Deney Sonuçları**a. %75 DA + %25 APT Esneklik Modülü Deney Bulguları**

Yanal Basınç (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Deviator Gerilme (kPa)	Ortalama Bulk Gerilme (kPa)	Ortalama Elastik Birim Deformasyon (%)	Ortalama Esneklik Modülü (kPa)
22,1	20,7	20,2	86,32	0,03	56514
22,4	41,4	38,6	105,63	0,05	68773
22,1	62,1	57,9	124,25	0,06	85377
35,7	34,5	32,0	139,19	0,03	104930
35,7	68,9	63,4	170,36	0,05	120050
35,7	103,4	90,9	197,85	0,06	138830
70,1	68,9	61,6	272,01	0,02	260270
70,1	137,9	116,0	326,18	0,04	271450
70,1	206,8	183,9	394,05	0,06	280690
104,5	68,9	62,0	375,49	0,02	294400
104,7	103,4	88,1	402,24	0,02	400860
104,6	206,8	182,1	495,90	0,04	364870
138,6	103,4	86,3	502,14	0,02	432890
138,9	137,9	114,6	531,30	0,02	415550
138,8	275,8	251,6	668,00	0,05	446110

b. %75 DA + %25 APT AASHTO Modeli Deney Sonuçları

Ortalama Bulk Gerilme, θ (kPa)	Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	k_1	k_2	AASHTO Model
		463,04	1,088	$k_1 * \theta^{k_2}$
		Tahmin Edilen Esneklik Modülü		
		kPa	MPa	
86,32	56514,0	59301,5	59,30	
105,63	68773,0	73875,4	73,88	
124,25	85377,0	88155,4	88,16	
139,19	104930,0	99752,6	99,75	
170,36	120050,0	124294,0	124,29	
197,85	138830,0	146274,2	146,27	
272,01	260270,0	206847,8	206,85	
326,18	271450,0	252059,5	252,06	
394,05	280690,0	309643,4	309,64	
375,49	294400,0	293802,0	293,80	
402,24	400860,0	316655,0	316,66	
495,90	364870,0	397685,9	397,69	
502,14	432890,0	403135,9	403,14	
531,30	415550,0	428682,6	428,68	
668,00	446110,0	550011,9	550,01	

c. %75 DA + %25 APT Uzan Modeli Deney Sonuçları

Ölçülen Esneklik Modülü (kPa)	Bulk Gerilme, θ (kPa)	Deviator Gerilme (kPa)	k_1	k_2	k_3	Uzan Model
			568,95	1,250	-0,181	$\sigma_{atm} * k_1 * (\theta / \sigma_{atm})^{k_2} * (\sigma_d / \sigma_{atm})^{k_3}$
			Tahmin Edilen Esneklik Modülü			
			kPa		MPa	
56514	86,32	20,17	63265,14		63,27	
68773	105,63	38,58	72375,37		72,38	
85377	124,25	57,86	82366,90		82,37	
104930	139,19	31,97	105734,39		105,73	
120050	170,36	63,35	120214,93		120,21	
138830	197,85	90,9	135732,05		135,73	
260270	272,01	61,62	216867,99		216,87	
271450	326,18	116	242590,48		242,59	
280690	394,05	183,9	282577,63		282,58	
294400	375,49	61,99	324161,02		324,16	
400860	402,24	88,14	331396,77		331,40	
364870	495,9	182,1	377339,63		377,34	
432890	502,14	86,34	438950,43		438,95	
415550	531,3	114,6	447421,42		447,42	
446110	668	251,6	516376,65		516,38	

ÖZGEÇMİŞ

1994 yılında Tekirdağ'da doğdu. İlkokul ve ortaokulunu Tekirdağ'da tamamladı. 2012 yılında Tuğlacılar Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı. 2017 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2018 yılında Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladı.

