

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN (RAP) ÇİMENTO TAKVİYESİ İLE PLENT-MİKS  
TEMEL (PMT) TABAKALARINDAKİ PERFORMANSLARININ TEKRARLI YÜKLER  
ALTINDA İNCELENMESİ VE MALİYET ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Ayşegül Güneş SEFEROĞLU**

**KASIM - 2017  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN (RAP) ÇİMENTO TAKVİYESİ İLE PLENT-MİKS  
TEMEL (PMT) TABAKALARINDAKİ PERFORMANSLARININ TEKRARLI YÜKLER  
ALTINDA İNCELENMESİ VE MALİYET ANALİZİ**

**İnş. Yük. Müh. Ayşegül Güneş SEFEROĞLU**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**  
**"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 / 10 /2017**

**Tezin Savunma Tarihi : 21 / 11 /2017**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR**

**Trabzon 2017**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Ayşegül Güneş SEFEROĞLU Tarafından Hazırlanan

KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN (RAP) ÇİMENTO TAKVİYESİ İLE  
PLENT-MİKS TEMEL (PMT) TABAKALARINDAKİ PERFORMANSLARININ  
TEKRARLI YÜKLER ALTINDA İNCELENMESİ VE MALİYET ANALİZİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 /10/2017 gün ve 1725 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
DOKTORA TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN

Üye : Doç. Dr. Baha Vural KÖK

Üye : Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

Üye : Doç. Dr. Şeref ORUÇ

Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez danışmanım olan Sayın Doç. Dr. Muhammed Vefa AKPINAR'a tezime olan tüm yardımları, lisans ve lisansüstü öğrenimlerim boyunca çok kıymetli tavsiye ve görüşleri sebebiyle teşekkür ederim.

Üniversitemizin Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine, sağladığı proje desteği sebebiyle teşekkürü borç biliyorum.

Trabzon Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü'ne sağladıkları malzeme desteği için teşekkür ederim.

Karayolları Genel Müdürlüğü'ne sağladıkları proje desteği sebebiyle ve Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü AR-GE çalışanlarına da testlerim esnasındaki yardımlarından ve değerli görüşlerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora öğrenimim boyunca değerli görüşlerini benimle paylaşan ve yorumlarından yararlandığım, hayatın her alanında olduğu gibi tez çalışmalarım esnasında benden desteğini esirgemeyen çok kıymetli hayat arkadaşım ve hocam Sayın Arş. Gör. Mehmet Tevfik SEFEROĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bu zaman kadar maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman üzerimden esirgemeyen, tezimin her aşamasında desteklerini yakinen hissettiğim canım annem ve canım babama da en içten saygı sevgi ve minnetlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince belki de yeteri kadar zaman ayıramadığım biricik oğlum ve biricik kızıma da bu yoğun çalışmalarım esnasında mutluluk ve motivasyon kaynağım oldukları için müteşekkirim.

Tezimin bilim dünyası ve ülkemiz adına faydalı bir çalışma olmasını temenni ediyorum.

Ayşegül Güneş SEFEROĞLU

Trabzon 2017

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum "Kazınmış Asfalt Kaplamaların (RAP) imento Takviyesi ile Plent-Miks Temel (PMT) Tabakalarındaki Performanslarının Tekrarlı Yukler Altında İncelenmesi ve Maliyet Analizi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/11/2017

Ayşegül Güneş SEFEROĞLU

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve İçeriği.....	2
1.3. Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama (RAP) Malzemesi.....	3
1.4. Karayolu Geri Dönüşüm Yöntemleri.....	4
1.4.1. Soğuk Geri Dönüşüm (CR).....	4
1.4.1.1. Soğuk Yerde Geri Dönüşüm (CIR).....	5
1.4.1.2. Soğuk Plentte Geri Dönüşüm (CPR).....	5
1.5. RAP Malzemesinin Kullanım Alanları.....	6
1.6. RAP Malzemesi Kullanımının Avantajları.....	6
1.7. Dünya'da RAP Malzemesi Kullanım Oranları.....	7
1.8. Temel Tabakalarında RAP Malzemesi Kullanımıyla İlgili Önceki Çalışmalar.....	11
1.8.1. Katkı Malzemeleri.....	11
1.8.2. Asfalt İçeriği Tayini.....	13
1.8.3. Elek Analizi Testleri.....	14
1.8.4. Proktor Testleri.....	16
1.8.5. Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesinde Kullanılan Testler.....	19
1.8.6. Permeabilite Testleri.....	22
1.8.7. Deformasyon Testleri.....	28

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
2.1.	Giriş.....	31
2.2.	Malzemeler.....	33
2.2.1.	RAP Malzemesi.....	33
2.2.2.	Doğal Agregası (DA) Malzemesi.....	35
2.2.3.	Çimento.....	36
2.3.	RAP-DA ve RAP-DA-Çimento Karışım Numuneleri Üzerinde Yapılan Testler.....	36
2.3.1.	Asfalt İçeriği Tayini.....	36
2.3.2.	Elek Analizi Testi ve Karışım Oranlarının Belirlenmesi.....	37
2.3.3.	Modifiye Proktor Testi.....	39
2.3.4.	Yaş Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Testi.....	42
2.3.5.	Sabit Seviyeli Permeabilite Testi.....	43
2.3.6.	Tekrarlı Plaka Yükleme Testi.....	51
2.3.6.1.	Test Ekipmanları ve Yükleme Sistemi .....	51
2.3.6.2.	Test Düzeninde Kullanılan Ölçüm Sensörleri ve Konumlandırılması.	52
2.3.6.3.	Testlerde Kullanılan Karışım Malzemeleri.....	54
2.3.6.4.	Alttemel ve Temel Tabakaları Sıkıştırma Protokolü.....	55
2.3.6.5.	Tatbik Edilecek Yükün Belirlenmesi.....	57
2.3.6.6.	Uygun Plaka Çapının Belirlenmesi.....	58
2.3.6.7.	Test İçin Hazırlanan PMT Tabakaları.....	58
2.3.6.7.1.	%100 DA Karışımı.....	58
2.3.6.7.2.	%20 RAP-%80 DA Karışımı.....	59
2.3.6.7.3.	%60 RAP-%40 DA-%3 Çimento Karışımı.....	59
2.3.6.7.4.	%100 RAP-%3 Çimento Karışımı.....	59
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	60
3.1.	RAP, RAP-DA ve RAP-DA-Çimento Karışım Numunelerine Ait Test Bulguları.....	60
3.1.1.	Asfalt İçeriği Analizi Bulguları.....	60
3.1.2.	Elek Analizi Test Bulguları.....	60
3.1.2.1.	Çimento Takviyesiz Karışımların Elek Analizi Test Bulguları.....	60
3.1.2.2.	Çimento Takviyeli Karışımların Elek Analizi Bulguları.....	63
3.1.3.	Modifiye Proktor Testi Bulguları.....	63

3.1.3.1.	Çimento Takviyesiz Karışımların Modifiye Proktor Testi Bulguları.....	63
3.1.3.2.	Çimento Takviyeli Karışımların Modifiye Proktor Testi Bulguları.....	65
3.1.4.	Yaş CBR Testi Bulguları.....	68
3.1.4.1.	Çimento Takviyesiz Karışımların Yaş CBR Testi Bulguları.....	68
3.1.4.2.	Çimento Takviyeli Karışımların Yaş CBR Testi Bulguları.....	71
3.1.5.	Sabit Seviyeli Permeabilite Testi Bulguları.....	75
3.1.5.1.	Çimento Takviyesiz Karışımların Sabit Seviyeli Permeabilite Testi Bulguları.....	75
3.1.5.2	Çimento Takviyeli Karışımların Sabit Seviyeli Permeabilite Testi Bulguları.....	77
3.1.6.	Tekrarlı Plaka Yükleme Testi Bulguları.....	78
3.1.6.1.	% 100 DA ile Hazırlanan Test Kesiti.....	79
3.1.6.1.1.	Yüzey Deformasyonları.....	79
3.1.6.1.1.1.	Kalıcı Yüzey Deformasyonları.....	79
3.1.6.1.1.2.	Elastik Deformasyonlar.....	81
3.1.6.1.2.	Birim Şekil Değiştirmeler.....	82
3.1.6.2.	% 20 RAP-% 80 DA Karışımıyla Hazırlanan Test Kesiti.....	83
3.1.6.2.1.	Yüzey Deformasyonları.....	83
3.1.6.2.1.1.	Kalıcı Deformasyonlar.....	83
3.1.6.2.1.2.	Elastik Deformasyonlar.....	84
3.1.6.2.2.	Birim Şekil Değiştirmeler.....	86
3.1.6.3.	% 60 RAP-% 40 DA-% 3 Çimento Karışımıyla Hazırlanan Test Kesiti....	87
3.1.6.3.1.	Yüzey Deformasyonları.....	87
3.1.6.3.1.1.	Kalıcı Deformasyonlar.....	87
3.1.6.3.1.2.	Elastik Deformasyonlar.....	88
3.1.6.3.2.	Birim Şekil Değiştirmeler.....	89
3.1.6.4.	% 100 RAP-% 3 Çimento Karışımıyla Hazırlanan Test Kesiti.....	91
3.1.6.4.1.	Yüzey Deformasyonları.....	91
3.1.6.4.1.1.	Kalıcı Deformasyonlar.....	91
3.1.6.4.1.2.	Elastik Deformasyonlar.....	92
3.1.6.4.1.3.	Birim Şekil Değiştirmeler.....	94
3.1.6.5.	Kalıcı yüzey deformasyon profilleri.....	95
4.	MALİYET ANALİZİ.....	97



4.1.	Malzeme Taşıma Maliyeti.....	97
4.1.1.	% 100 DA'nın Ocaktan Konkasöre Taşınma Maliyeti.....	98
4.1.2.	Çimento ve RAP Malzemesini Siloya Taşıma Maliyeti.....	99
4.2.	Plent-miks Temel (PMT) Tabakası Yapım Maliyeti.....	100
4.3.	RAP-DA-Çimento Karışımlarından Yapılan PMT Tabakalarının Maliyet Analizi.....	101
4.3.1	% 100 DA Malzemesinden Yapılan PMT Tabakasının Maliyet Analizi.....	103
4.3.2.	RAP-DA Karışımlarından Yapılan PMT Tabakasının Maliyet Analizi.....	104
4.3.4.	RAP-DA-Çimento Karışımlarından Yapılan PMT Tabakasının Maliyet Analizi.....	107
5.	SONUÇLAR.....	118
6.	KAYNAKLAR.....	122
7.	EKLER.....	130
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMALARIN (RAP) ÇİMENTO TAKVİYESİ İLE PLENT-MİKS TEMEL (PMT) TABAKALARINDAKİ PERFORMANSLARININ TEKRARLI YÜKLER ALTINDA İNCELENMESİ VE MALİYET ANALİZİ

Ayşegül Güneş SEFEROĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR  
2017, 129 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Bu tezde, Karayolları Teknik Şartnamesi'nin (KTS) plent-miks temel (PMT) tabakası için belirttiği %100 doğal agrega (DA) malzemesi için yapım şartlarını sağlayan kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemesi kullanım oranları, yapılan elek analizi ve yaş CBR testleri ile belirlenmiştir. Asfalt içeriği, modifiye proktor ve permeabilite testleri de RAP malzemesinin etkisini incelemek adına %100 DA kontrol numunesi olarak göz önüne alınarak yapılmıştır. Geri dönüşüm malzemesinden daha fazla yararlanabilmek için RAP-DA karışımlarına puzolanik çimento malzemesi farklı oranlarda takviye edilerek kullanılabilir maksimum RAP oranı belirlenmiştir. Kullanılabilir maksimum RAP oranı tayin edildikten sonra trafik yükleri gibi tekrarlı yüklemenin yapıldığı tekrarlı plaka yükleme testi gerçekleştirilmiştir. Alttemel tabakasının üzerine RAP karışımları ve %100 DA malzemesinden hazırlanan PMT tabakaları serilerek 0-40 kN yükleme boşaltma periyodunda gerçekleştirilen 100'er döngü sonunda elde edilen kalıcı ve elastik deformasyonlar ve birim şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Tüm RAP katkılı karışımların maliyet analizleri yapılarak PMT tabakası yapımı ve malzemelerin nakliye harcamalarının RAP malzemesinin hangi uzaklıktan getirilmesi durumunda ekonomik bir uygulama olacağı araştırılmıştır. Çalışmalar neticesinde RAP malzemesinin %100 oranında kullanımının çimento takviyesi ile mümkün olduğu ve RAP kullanımının PMT tabakası için ekonomik bir alternatif malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma literatüre ve KTS'ne katkı sağlaması açısından önemli sonuçlar vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kazınmış asfalt kaplama (RAP), Plent-miks temel (PMT), Tekrarlı plaka yükleme testi, Maliyet analizi

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF CEMENT-REINFORCED RECLAIMED  
ASPHALT PAVEMENT (RAP) MATERIALS IN PLANT-MIX BASE (PMT) LAYERS  
UNDER CYCLING LOADING AND COST ANALYSIS

Ayşegül Güneş SEFEROĞLU

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Muhammet Vefa AKPINAR  
2017, 129 Pages, 1 Page Appendix

In this thesis, the reclaimed asphalt pavement (RAP) material ratios in the mix, which provide the criteria for the 100% virgin aggregate (VA) material specified by Turkey Highway Technical Specification (KTS) for the plant-mix base (PMT) layer, were determined by sieve analysis and soaked CBR tests. The asphalt content, modified proctor and permeability tests were also taken into consideration as a 100% VA control sample in order to examine the effect of RAP material. In order to benefit more from reclaimed material, the maximum RAP ratio available was determined by adding pozzolanic cement material to RAP-VA mixtures at different ratios. Following the determination of the maximum available RAP ratio, a cyclic plate loading test was carried out with repetitive loading such as traffic loads. The PMT layers prepared from the RAP blends and 100% VA material were laid on the base layer, and the permanent and elastic deformations and strains obtained at the end of the 100 cycle of 0-40 kN loading and unloading period were determined. Cost analysis of all RAP blends has been performed and it has been investigated that if the PMT layer construction and material transportation expenses are taken into account, whether it would be an economical application if the RAP materials were supplied remotely. As a result of the studies it was concluded that the use 100% of RAP materials with cement reinforcement is possible in roadway PMT layers and the RAP is an economical alternative material to virgin aggregate (VA). This study gives significant results in terms of contributing to the literature and KTS.

**Key Words:** Reclaimed asphalt pavement (RAP), Virgin aggregate (VA), Plant-mix base (PMT), Cyclic plate loading test, Cost analysis

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. RAP karışımlarının gradasyon eğrileri.....	15
Şekil 2. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasının belirlenmesi.....	17
Şekil 3. RAP karışımlarına çimento takviyesinin CBR üzerindeki etkisi.....	21
Şekil 4. RAP oranı-permeabilite ilişkisi.....	25
Şekil 5. Farklı çimento oranlarındaki RAP malzemesinin permeabilitesi.....	27
Şekil 6. Karışımdaki RAP oranının kalıcı deformasyon üzerindeki etkisi.....	28
Şekil 7. Kalıcı gerilme-yüklemeye döngüsü arasındaki ilişki.....	29
Şekil 8. RAP malzemesinin kazınarak kamyonla yüklenmesi.....	33
Şekil 9. Kazıma makinesinin kristal uçlu dişleri.....	34
Şekil 10. Depolanan RAP malzemesi.....	34
Şekil 11. Farklı gradasyonlardaki depolanan DA malzemeleri.....	35
Şekil 12. Ecotest asfalt analizatör cihazı.....	37
Şekil 13. Numunelerin modifiye proktor ile sıkıştırılması.....	40
Şekil 14. Kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği.....	41
Şekil 15. Yaş CBR testi numunelerinin sıkıştırılması ve su havuzuna yatırılması..	42
Şekil 16. Yaş CBR testi su havuzu ve şişme yüzdesi için kullanılan okuma saati..	43
Şekil 17. Sabit seviyeli permeabilite test silindirleri.....	45
Şekil 18. Permeabilite silindirine konulacak RAP malzemesinin harmanlanması..	47
Şekil 19. Malzemelerin silindire yerleştirilmesi ve sıkıştırılması.....	48
Şekil 20. Sabit seviyeli permeabilite test sistemi.....	49
Şekil 21. Cam tüplerdeki su seviyelerinin okunması.....	49
Şekil 22. t zamanda malzemedan geçen su hacminin belirlenmesi.....	50
Şekil 23. Tekrarlı plaka yüklemeye test ekipmanları ve yükleyici sistem.....	52
Şekil 24. Tekrarlı yüklemeye testinde kullanılan ölçüm sensörleri.....	53
Şekil 25. Ölçüm sensörlerinin konumlandırılması.....	54
Şekil 26. Alttemel ve temel tabakalarının sıkıştırılması.....	55
Şekil 27. Tabakalar halinde serilip sıkıştırılmış alttemel tabakası.....	57

Şekil 28.	% 100 DA malzemesinin gradasyon eğrisi ve şartname limitleri.....	61
Şekil 29.	RAP-DA karışımlarının gradasyon eğrileri ve şartname limitleri.....	62
Şekil 30.	RAP-DA karışımlarının modifiye proktor testi sonuçları.....	64
Şekil 31.	% 100 RAP malzemesi için çimento oranı - $V_{kmax}$ ilişkisi.....	65
Şekil 32.	% 100 RAP malzemesi için çimento oranı - $W_{opt}$ ilişkisi.....	65
Şekil 33.	DA-RAP-çimento karışımlarının $V_{kmax}$ -RAP oranı ilişkisi.....	67
Şekil 34.	DA-RAP-çimento karışımlarının $W_{opt}$ -RAP oranı ilişkisi.....	68
Şekil 35.	Farklı penetrasyon derinlikleri için %RAP-CBR ilişkisi.....	69
Şekil 36.	% 100 RAP malzemesi için çimento oranı-yaş CBR ilişkisi.....	72
Şekil 37.	DA-RAP-çimento karışımlarının 2,54 mm penetrasyon için CBR değerleri.....	74
Şekil 38.	DA-RAP-çimento karışımlarının 5,08 mm penetrasyon için CBR değerleri.....	74
Şekil 39.	% 100 DA ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri.....	80
Şekil 40.	% 100 DA ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri....	81
Şekil 41.	% 100 DA ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değiştirme değerleri.	82
Şekil 42.	%20 RAP-%80 DA ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri.....	83
Şekil 43.	%20 RAP-%80 DA ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri.....	85
Şekil 44.	%20 RAP-%80 DA ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değiştirme değerleri.....	86
Şekil 455.	%60 RAP-%40 DA-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri.....	87
Şekil 46.	%60 RAP-%40 DA-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri.....	89
Şekil 47.	%60 RAP-%40 DA-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değiştirme değerleri.....	90
Şekil 48.	%100 RAP-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri.....	91
Şekil 49.	%100 RAP-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri.....	93
Şekil 50.	%100 RAP-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değiştirme değerleri.....	94
Şekil 51.	Kalıcı yüzey deformasyon profilleri.....	96
Şekil 52.	PMT tabakası yapımı için malzemelerin taşınması.....	98

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. RAP malzemesi gradasyon limitleri.....	16
Tablo 2. Farklı araştırmacıların RAP malzemesi üzerinde yaptıkları proktor test sonuçları.....	18
Tablo 3. Farklı RAP karışımlarının modifiye proktor test sonuçları.....	18
Tablo 4. Zeminlerin tipik permeabilite katsayıları.....	22
Tablo 5. Permeabilite test sonuçlarının özeti.....	24
Tablo 6. RAP ve RAP-DA karışımlarının permeabilite sonuçları.....	25
Tablo 7. PMT tabakaları için gradasyon limitleri.....	31
Tablo 8. DA malzemesinin test sonuçları.....	35
Tablo 9. RAP-DA karışım numunelerinin oranları.....	38
Tablo 10. RAP-DA-çimento karışım numunelerinin oranları.....	39
Tablo 11. %50 RAP karışım numunesinin modifiye proktor testi sonuçları.....	41
Tablo 12. Permeabilite silindirlerine yerleştirilecek malzeme ve su miktarları.....	46
Tablo 13. Test tankına yerleştirilen malzeme miktar hesabı tablosu.....	56
Tablo 14. Elek analizi test sonuçları.....	61
Tablo 15. RAP-DA karışımlarının $V_{kmax}$ ve $W_{opt}$ değerlerine çimentonun etkisi....	66
Tablo 16. RAP-DA karışımlarının yaş CBR test sonuçları.....	69
Tablo 17. Çimento takviyeli %100 RAP malzemesinin yaş CBR testi sonuçları.....	71
Tablo 18. Çimento takviyeli RAP-DA karışımlarının yaş CBR test sonuçları.....	73
Tablo 19. Permeabilite testi yapılan karışımların hazırlanma hesapları.....	75
Tablo 20. Çimento takviyesiz RAP-DA karışımlarının permeabilite test sonuçları.	76
Tablo 21. Çimento takviyeli %100 RAP numunelerinin test silindirleri için hazırlanması.....	77
Tablo 22. Çimento takviyeli %100 RAP malzemesinin permeabilite test sonuçları	78
Tablo 23. Kazıdan başka inşaat malzemelerinin taşınmasına ilişkin pozlar ve tanımları.....	99
Tablo 24. KGM/6100/3 pozu analizi.....	100
Tablo 25. Belirlenen özel pozlar ile PMT yapım maliyeti hesabında kullanılan veriler.....	101

Tablo 26.	Eleklerden alınan malzeme miktarı ve cinsleri.....	102
Tablo 27.	1 km uzunluğundaki PMT tabakasında kullanılacak malzeme miktarları	103
Tablo 28.	%100 DA malzemesi ile PMT tabakası yapım maliyeti.....	104
Tablo 29.	%10 RAP-%90 DA karışımından PMT tabakası yapım maliyeti.....	105
Tablo 30.	%20 RAP-%80 DA karışımından PMT tabakası yapım maliyeti.....	106
Tablo 31.	%60 RAP-%40 DA-%2 çimento karışımından PMT tabakası yapım maliyeti.....	108
Tablo 32.	%60 RAP-%40 DA-%3 çimento karışımından PMT tabakası yapım maliyeti.....	109
Tablo 33.	%100 RAP-%3 çimento karışımından PMT tabakası yapım maliyeti.....	110
Tablo 34.	RAP malzemelerinin farklı mesafelere bağlı taşıma maliyetleri.....	112
Tablo 35.	Malzemelerin siloya taşınma ve PMT yapım maliyetleri dâhil toplam tutarlar.....	114
Tablo 36.	PMT tabakasında RAP/çimento kullanımından sağlanan kâr oranları.....	116

## SEMBOLLER DİZİNİ

% AC	: Asfalt içeriği
BAP	: Bilimsel araştırma projesi
°C	: Santigrat derece
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
ÇBGT	: Çimento bağlayıcılı granüler temel
DA	: Doğal agrega
DGABC	: Yoğun gradasyonlu agrega temel tabakası
e	: Boşluk oranı
ESAL	: Eşdeğer teker dingil yükü
GT	: Granüler temel
in.	: inç
k	: Permeabilite katsayısı
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
kN	: KiloNewton
kPa	: KiloPaskal
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LBR	: Limerock taşıma oranı
LL	: Likit limit
LVDT	: Deplasman ölçer
%P	: Yüzde geçen
PI	: Plastisite indeksi
PMT	: Plent-miks temel
RAP	: Geri dönüşüm asfalt kaplama
SG	: Birim şekil değiştirme ölçer (strain gauge)
Sr	: Doygunluk derecesi
t	: Ton
TL	: Türk lirası
$W_{opt}$ , OSM	: Optimum su muhtevası
$V_{kmaks}$ , MKBHA	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Bozulmuş karayolu kaplama tabakalarının yerinden kazınarak yeniden kullanılmasına geri dönüşüm denilmektedir. Ülkemizde her yıl genişleyen yol ağı, malzeme ihtiyacını gündeme getirmiştir. Gerek petrol fiyatlarındaki artış ve gerekse hammaddeye duyulan ihtiyacın gitgide karşılanamıyor oluşu yeni alternatif arayışlarını da beraberinde getirmiştir. Yol kaplama tabakalarının kazınmasıyla elde edilen asfalt kaplama malzemeleri geri dönüşüm asfalt kaplama (RAP) malzemesi olarak isimlendirilmektedir. Oldukça pahalıya mal olarak yapılan bir kaplama tabakasının ömrünü tamamlaması sonucunda kazınarak ya ekonomik değeri hiçe sayılarak atık sahalarına atılmakta ya da değerinin çok altında bir malzeme olarak yol dolgularında veya stabilize köy yollarında kullanılmaktadırlar. Ülkemizde RAP malzemelerinin bitümlü temel tabakalarında kullanımına yönelik bir takım çalışmalar mevcuttur. Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) de bitümlü temel tabakalarında %25 oranında RAP kullanımına müsaade edilmektedir. Fakat yurtdışındaki pek çok karayolu kurum ve kuruluşunda RAP malzemesi karayolu üstyapısının neredeyse tüm tabakalarında kullanır hale gelmiştir. Avrupa'daki birçok ülkede ve Amerika'da sıkça kullanılan geri dönüşüm uygulamalarından birisi de asfalt yol kaplamalarının geri dönüşümüdür. Amerika'da asfalt malzemelerinin karayolu üstyapısında geri dönüştürülerek kullanılma oranı %80'lere varmaktadır (URL-1).

Ülkemizde de bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarında kullanımı mümkün iken yeni malzeme kullanımı, gerek belediyeler ve gerekse karayolu kuruluşlarının rehber eksiklikleri nedeniyle tercih edilen bir yol olmuştur. Bu çalışmada bağlayıcısız temel tabakalarından olan plent-miks temel (PMT) tabakalarında RAP kullanımının sağlayacağı ekonomik getiri ve uygulamada izlenecek yol bir rehber olarak kullanılabilecektir. Çalışmada izlenen tüm adımlar KTŞ kriterleri göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır. RAP malzemesi ile ilgili bir kriter olmaması sebebiyle, RAP malzemesi şartname gereksinimleri geleneksel agrega malzemesinin kriterleri içerisinde değerlendirilmiştir. RAP kullanımı ile birlikte doğal agregaya (DA) olan ihtiyaç azalacak ve doğal kaynakların sonsuz olmadığı düşünüldüğünde DA malzemesine bir alternatif olarak kullanılabilir.

Düşünüldüğü zaman doğal agrega malzemesi için yüklü paralar ödenerek yapılan yol tabakaları yerine ücretsiz bir RAP malzemesinin kullanımını oldukça cazip bir fikirdir. Ayrıca, asfalt kaplamaların geri dönüşümü sayesinde doğal agregaya olan talep azalacak ve her yıl bir yenisi açılarak doğayı adeta katleden taş ocaklarına olan gereksinim azalacaktır.

Trabzon Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığı tarafından, şehir içindeki bozulmuş kaplama tabakalarının kazınmasıyla elde edilen kazınmış asfalt malzemesi yani RAP malzemesi köy yollarında herhangi bir teknik kritere bağılı olmaksızın sıkıştırılarak dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi bünyesindeki İsfalt (İstanbul asfalt fabrikaları) şantiyelerinde ise şehir içi yollarda kullanılmak üzere sıcak karışım metoduyla bitümlü temel tabakalarında da kullanılmaktadır. İsfalt'ın, uygulamada kullandığı RAP malzemesi yaklaşık oranları; aşınma tabakasında %10, binder tabakasında %15–20, bitümlü temel tabakasında da %35'tir. Bu oranlar, kullanılan malzeme türüne, üretim plant tipine ve asfalt tasarımına göre değışebilmektedir.

Avrupa'da asfalt geri kazanım işinin yaklaşık 30 yıllık bir geçmişı vardır. Türkiye'de asfaltın geri kazanım uygulamaları Avrupa ve ABD'ye kıyasla geç başlamıştır. Türkiye'de agreganın ucuz ve kolay temin ediliyor oluşu ve çevre koruma bilincinin gelişmemiş olması, geri dönüşüm için yapılacak ilk yatırım maliyetinin fazla olması da geri dönüşüm faaliyetlerinin geç başlamasının en büyük nedenleridir (Arapoğlu, 2014). Ayrıca Türkiye'deki uygulamalar, geri kazanılmış asfalt kaplama malzemelerinin asfalt kaplama tabakalarında, bitümlü temel tabakalarında ve yol dolgu malzemesi olarak kullanımı üzerinedir. Fakat yurtdışında da yaygın olarak kullanıldığı gibi bu malzeme bitümsüz temel ve alttemel tabakalarında da başarıyla kullanılabilir. Türkiye'de de geri kazanıma ilişkin bir sistemin oturması için tıpkı Avrupa'daki gibi gerekli altyapı çalışmalarının ve yasal düzenlemelerin yapılması, girişimcilerin gerekli ölçülerde desteklenmesi gerekmektedir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve İçeriğı**

Bu çalışmanın amacı, kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemesinin değılendirilerek doğaya ve ülkemiz ekonomisine katkıda bulunmaktır. Bu çalışmada, RAP malzemesinin Türkiye KTS'nde PMT tip-1 tabakası için belirtilen kriterleri sağlaması amacıyla doğal agrega ve puzolanik çimento ile karıştırılarak kullanılabilirliğı araştırılmıştır. Laboratuarda yapılan elek analizi, bitüm oranı, modifiye proktor gibi rutin

testlere ilaveten yaş CBR ve permeabilite testleri yapılarak RAP malzemesinin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca tasarlanan yeni bir test düzeneği ile malzemenin yüklemeler altındaki mekanik performansı da incelenerek tekrarlı yükler altındaki performansı hakkında da veriler elde edilmiştir. Kullanılabilir RAP miktarına karar verildikten sonra maliyet analizi yapılarak ülke ekonomisine kazandırılacak ekonomik fayda tespit edilmiştir.

Avrupa'daki uygulamalarda RAP malzemesinin doğal agrega ile aynı kriterleri sağlama zorunluluğu varken çoğu ülke bu malzeme için özel bir kritere sahip değildir (Thøgersen vd. 2013). ABD'deki birçok karayolu kuruluşu (FDOT, CDOT, Mn/DOT, ...) geri dönüşüm malzemelerinin kullanımını aktif bir şekilde desteklemekte ve bağlayıcısız temel/alttemel tabakalarında RAP malzemesi kullanımına müsaade etmektedir (Saeed, 2008).

Dünya çapında günümüze kadar araştırmacıların yapmış olduğu konuyla ilgili deneysel çalışmalar önceki çalışmalar kısmında incelenecek olup, bu sonuçların tez çalışmasına yakınlığı bakımından kıyaslamalar yapılacak ve ülkemiz şartlarında PMT tabakalarının yapımı için RAP malzemesinin kullanımının KTŞ'nde önerilen kriterlere uygunluğu ve kullanılabilirliği hakkında bilgiler verilecektir. Tekrarlı plaka yükleme testi ile de trafik yükü gibi tekrarlı yüklemeye maruz kalan PMT tabakasında meydana gelen yüzeysel deformasyonlar ve birim şekil değiştirmeler de incelenerek RAP malzemesi katkılı PMT tabakalarının saha performansı ile ilgili değerlendirmeler yapılacaktır. Ayrıca maliyet analizleri yapılarak en ekonomik RAP malzemesi kullanım oranı da belirlenecektir.

### **1.3. Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama (RAP) Malzemesi**

Mevcut yol üst yapısını oluşturan karayolu kaplama tabakaları, belirli bir kullanım süresinden sonra ömrünü tamamlar. Yol kaplama tabakasının çeşitli etkilerle deforme olması, kullanılamaz hale gelmesi ya da başka nedenlerle yenilenmesi, onarımı, profilinin düzeltilmesi veya uygun bir sürüş yüzeyi elde edilmesi için tabaka, kaplandığı yerden kazınarak sökülür. Elde edilen bu bitümlü malzeme geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) malzemesi olarak adlandırılır. RAP malzemeleri, tehlikeli atık sınıfında değildir. Kullanıldığı yerden sökülen asfalt tabakaları, bu özelliği ile geri kazanım için bir avantajdır. Uygulanacak doğru işlemlerle yeniden şekillendirilerek geri kazanılması ile tekrar kullanılabilir ve daha yüksek ekonomik değer yaratılabilir (URL-1).

RAP malzemeleri doğal agrega ve onun etrafını saran yaşlanmış haldeki bitüm tabakasından oluşmaktadır. Bazı çalışmalarda RAP agregası üzerindeki bitüm bir takım yöntemlerle çıkartılarak yalnızca RAP agregaları kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında kazındığı yerden çıkarıldığı haliyle RAP agregası ve üzerindeki bitümlü malzeme birlikte kullanılacaktır. Herhangi bir ayrıştırma işlemi uygulanmayacaktır.

#### **1.4. Karayolu Geri Dönüşüm Yöntemleri**

Karayolunda yalnızca kaplama tabakasının değil temel ve alttemel de dâhil olmak üzere ömrünü tamamlamış tüm karayolu üstyapı tabakalarının mevcut olduğu yerden kazınması için farklı geri dönüşüm yöntemleri mevcuttur. RAP malzemesinin kazınması esnasında ısı kullanılıp kullanılmamasına göre, sıcak geri dönüşüm ve soğuk geri dönüşüm olarak da iki ana başlıktan söz edilebilir. Asphalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Birliği beş farklı geri dönüşüm yöntemi tarif etmektedir (ARRA, 1992). Bunlar;

- 1- Soğuk düzeltme (CP)
- 2- Sıcak geri dönüşüm (HR)
- 3- Sıcak yerinde geri dönüşüm (HIR)
- 4- Soğuk geri dönüşüm (CR)
  - Soğuk yerinde geri dönüşüm (CIR)
  - Soğuk plentte geri dönüşüm (CPR)
- 5- Tam derinlikten geri kazanım (FDR)

Bu tez kapsamında ömrünü tamamlamış karayolu kaplama tabakasının geri dönüşümü için geri dönüşüm yöntemi olarak soğuk plentte geri dönüşüm kullanılacaktır.

##### **1.4.1. Soğuk Geri Dönüşüm (CR)**

Soğuk geri dönüşüm yöntemi, maddenin ısıtılması gerekmediğinden ekonomik bir tekniktir. Soğuk geri dönüşüm yönteminde mevcut kaplamaya herhangi bir ısı uygulanmadan kaplamanın kazınıp katkı ilave edilmesi, karıştırılması ve sıkıştırılması

şeklinde uygulanmaktadır. Soğuk geri dönüşüm soğuk yerinde geri dönüşüm ve soğuk merkezi plentte geri dönüşüm olmak üzere iki alt sınıfa ayrılmaktadır.

#### **1.4.1.1. Soğuk Yerinde Geri Dönüşüm (CIR)**

CIR genellikle, düşük hacimli yollarda stabilize temel tabakası üzerindeki basit bir kaplama yüzeyi veya çok ince sıcak karışım asfalt kaplama tabakasının iyileştirmesi için uygun bir yöntemdir (URL-2).

Soğuk yerinde geri dönüşümde, var olan kaplama malzemesi sıcaklık uygulamadan yeniden kullanılır. Herhangi bir geri dönüşüm katkısı kullanımının dışında genellikle hiçbir malzeme taşınması gerekmez ve bu yüzden nakliye maliyeti oldukça düşüktür. Yöntem varolan kaplamayı ufalama, RAP malzemesini boyutlandırma, geri dönüşüm katkısını uygulama, karıştırma, serme ve sıkıştırma aşamalarını içermektedir. Ufalama, eleme, kırma ve karıştırma birimlerinden oluşan geri dönüşüm treninin kullanımı oldukça yaygındır. Onarım derinliği 75 mm'den 100 mm'ye kadar değişmektedir. Soğuk yerinde geri dönüşümün avantajları; önemli bir yapısal iyileştirmeyi içermesi, çoğu kaplama bozulmalarını onarması, seyahat konforunu artırması ve minimum nakliye maliyeti olarak sıralanabilir (URL-3).

#### **1.4.1.2. Soğuk Plentte Geri Dönüşüm (CPR)**

Soğuk plentte geri dönüşüm yönteminde kazınan malzeme merkezi bir plente taşınmakta ve burada sıcaklığa tabi tutulmadan katkı malzemeleri ilave edilmesi ve karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Plentte soğuk geri dönüşüm uygulamasıyla elde edilen karışımın, üretimin hemen sonrasında yol yapımında kullanılabilme özelliğinin yanında; bakım işleri, yama yapılması gibi uygulamalar için sonradan kullanılmak üzere stok yapılarak saklanabilme seçeneği de vardır.

Kullanılacak olan RAP malzemesi, asfalt kazıyıcıların kullanıldığı soğuk düzeltme uygulaması veya asfalt kaplamanın bir şekilde kırılıp, yerinden sökülüp kırıcıda elenmesi şeklinde elde edilir ve plent sahasında stoklanır. Plentte soğuk geri dönüşüm uygulamasıyla elde edilen karışım sonradan kullanılmak üzere stok sahasına nakledileceği gibi, direkt yol inşaatında kullanılmak üzere kamyonlara yüklenip şantiye sahasına

gönderilebilir. Plentten gelen karışım geleneksel bitümlü sıcak karışım malzemenin seriminin yapıldığı asfalt sericilerle (finişer) serilebileceği gibi deneyimli bir operatörün kullanacağı greyder aracılığıyla da serilebilir. Asfalt serici ya da greyder aracılığıyla yola serilen karışım, mümkün olabildiğince geniş tabanlı lastik tekerlekli silindir ve vibrasyonlu demir bandajlı silindirlerle sıkıştırılır. Genelde sıkıştırılan plentte soğuk geri dönüşüm (CPR) malzemesinin üzeri geleneksel bitümlü sıcak karışım malzemesi kaplanır. Ender olarak çok düşük trafik hacimli yollarda tek ya da çift kat bitüm emülsiyonu esaslı harç tipi kaplamalar da kullanılabilir (Locander, 2009). Yerinde uygulama yöntemine göre bazı avantajları olan bu yöntemde öncelikle, hava koşullarının önemi yoktur ve gerekli durumlarda agrega, karışımdan önce ısıtılıp kurutulabilir. Ayrıca bu işlem yerinde yapılan yöntemde saatler alırken, plentte birkaç dakika içerisinde sonuçlanır. Karışımdaki malzeme oranı ve karıştırma süresinin çok daha iyi biçimde kontrol edilebildiği bu yöntemde, karışımın homojenliği de sağlanabilmektedir (URL-4).

Bu çalışma kapsamında geri dönüşüm yöntemi olarak plentte geri dönüşüm uygulaması kullanılmıştır.

### **1.5. RAP Malzemesinin Kullanım Alanları**

Kazınmış RAP malzemesi, birçok karayolu inşaat uygulamalarında kullanılabilir. Bunlar arasında, sıcak karışım veya soğuk karışımlarda agrega ikamesi olarak, granüler temel ve alttemel malzemesi olarak, stabilize temel agregası olarak veya dolgu malzemesi olarak kullanımı sayılabilir.

### **1.6. RAP Malzemesi Kullanımının Avantajları**

Ülkemizde yaygın olarak uygulanmayan fakat dünyada en çok geri dönüşümü yapılan malzemelerin başında yer alan asfalt malzemesi, ülkemiz gibi petrol ürünlerinin çok pahalı olduğu ve şehir içi yol kaplamalarının % 100'ü asfalt kaplama olan ülkelerdeki yerel yönetimler tarafından hızla uygulamaya geçilmesi gereken bir geri dönüşüm projesidir. RAP malzemesinin sürdürülebilir bir yöntem olarak kullanımının ekolojik ve ekonomik avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Mevcut malzemelerin kullanılarak taş ocaklarından temin edilen doğal agregaya (DA) olan talebi azaltarak doğal kaynakların korunumu sağlanmaktadır.
- Yeni doğal agrega malzemesinin üretim, kırma, işleme maliyetinin azaltılması ile büyük enerji tasarrufu da sağlanmaktadır.
- Doğal agrega malzemelerinin nakliyesinden kaynaklanan trafik rahatsızlığı azalmaktadır. Sera gazı salınımı düşmektedir (Carswell vd. 2005).
- Kazınan ömrünü tamamlamış haldeki karayolu kaplama tabakası malzemeleri tekrar kullanılarak milli kaynakların korunumu sağlanmaktadır.
- Kazıma çalışmaları sonucu elde edilen atık haldeki kaplama parçalarının yeniden kullanılmasıyla, bu malzemelerin oluşturacağı atık sahalarının önüne geçilebilmektedir.
- RAP malzemesinin yerden kazınması durumunda yaşanmış kaplama tabakası kaldırılarak yol çatlakları giderilecek ve yolun sürüş emniyeti ve konforu arttırılmış olacaktır.
- Bozulan yol sathına üst üste kaplama serilmediği için kaldırım yükseklikleri, drenaj girişleri ve köprü açıklıklarının korunarak kot düzensizlikleri ortadan kaldırılmış olacaktır.
- Kazıma sayesinde kaplamayla daha iyi yapışan kaba bir doku oluşturulacaktır. Böylece yeni yapılacak kaplama tabakası alt tabaka ile daha iyi bir aderans sağlayabilecektir.
- Mevcut kaplamanın üzerine yeni kaplama yapılması halinde yansıma çatlaklarının önlenememesi sorunu eski kaplamanın kazınması ile giderilebilecektir (Arapoğlu, 2014).

### **1.7. Dünya'da RAP Malzemesi Kullanım Oranları**

Ülkemiz için henüz yeni olan fakat Dünya'da yıllardır kullanılmakta olan RAP malzemesi için ülkeler ve eyaletler farklı üstyapı tabakaları için farklı RAP malzemesi kullanım oranları belirlemiştir. Bu bağlamda RAP malzemesi DA malzemesiyle kütlece farklı oranlarda karıştırılarak üstyapı tabakalarında yeniden kullanılabilir hale gelmektedir. Bu tez çalışması bağlayıcısız temel tabakalarını konu edinmesi sebebiyle literatürde de yalnızca bağlayıcısız temel tabakalarının kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır.

ABD'deki en az 13 eyalette (Arizona, Illinois, Louisiana, Maine, Nebraska, New Hampshire, North Dakota, Oregon, Rhode Island, South Dakota, Teksas, Virginia ve Wisconsin) RAP agregaları temel malzemesi olarak kullanılmaktadır. En az 4 eyalette

(Alaska, New York, Ohio ve Utah) bağlayıcısız alttemel tabakasında 2 eyalette de (California ve Vermont) stabilize temel tabakasında kullanılmaktadır (Collins ve Ciesielski, 1994).

Copeland, (2011), güncel araştırmalarda geleneksel yol tasarımı için %29'a kadar RAP içeriğinin kullanılabilmesi bildirilmiş olup birçok yurtdışı kurumunda da bu oranda kullanıldığını belirtmiştir.

McGarrah (2007), bağlayıcısız temel tabakası kullanılan RAP karışımları üzerindeki çalışmaları neticesinde %100 RAP malzemesi ile yeterli kalitede bir temel teşkil edilemeyeceğini, bu sebeple tek başına kullanılmaması gerektiğini belirtmiştir. RAP-DA karışımlarındaki RAP içeriği arttıkça, karışımın kayma mukavemetinin gerekli seviyenin altına düştüğünü belirterek RAP içeriğinin %25 ile sınırlandırmasını ve RAP malzemesinin DA ile plentte karıştırılması gerektiğini önermiştir.

Dong ve Huang (2014), RAP malzemesinin kalıcı deformasyonunun DA'dan belirgin şekilde fazla olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple asfalt kaplama altındaki bağlayıcısız temel tabakası için RAP malzemesinin tek başına kullanımının uygun olmayacağı kanısına varılmıştır.

Schaefer vd. (2008) bağlayıcısız temel tabakası uygulamalarında %20-50 arasında bir RAP oranının kullanılabilmesini belirtmiştir.

Taha vd. (1999), RAP malzemesinin alttemel tabakasında kullanım oranının %60, granüler temel tabakasında ise %10 ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmiştir.

Cosentino vd. (2012), çalışmasında, RAP içeren tüm karışımların bir miktar sünme gösterdiği sonucuna varmıştır. RAP malzemesinin karayolu temel tabakası uygulamalarında kullanılabilmesi için karışımda en fazla %25 oranında kullanılmasını önermiştir.

Bennert ve Maher (2005), yoğun gradasyonlu agrega temel tabakaları için RAP içeriğinin ağırlıkça %50 ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmiştir.

Florida Karayolları (FDOT) şartnamesi, %100 RAP malzemesinin kaplamalı banketlerde ve bisiklet yollarında kullanımına izin vermekte olup karayolu temel tabakalarında kullanımına müsaade etmemektedir (FDOT, 2013). Bunun sebebi, RAP malzemesinin düşük taşıma kapasitesine ve uzun dönemdeki yüksek sünme deformasyonu potansiyeline sahip olmasıdır (Hoppe vd. 2015).

Colorado Karayolları (CDOT) şartnamesi, RAP malzemesinin, DA malzemesiyle benzer özellikler gösterdiğini ve bu sebeple temel tabakalarında DA'ya alternatif bir



malzeme olabileceğini belirtmektedir. Şartnameye göre, RAP malzemesi agrega temel tabakası ile ilgili şartnamedeki müsaade edilebilir gradasyon aralıkları ve sıkıştırma ile ilgili sınırları sağlaması durumunda %100 oranında kullanılabilir (CDOT, 2013).

Hawaii Karayolları (Hawaii DOT) şartnamesinde RAP ve RAP katkılı malzemelerle ilgili standartlar bulunmaktadır. Bağlayıcısız temel tabakalarında ağırlıkça %10 oranına kadar RAP kullanımına müsaade edilirken, alttemel tabakalarında bu oran %25'e çıkabilmektedir (Hoppe vd. 2015). Önerilen bu oranlar, Ooi (2010) tarafından yapılan çalışmada temel ve alttemel tabakaları için önerilen %50 RAP oranından oldukça düşüktür.

Iowa Karayolları (Iowa DOT) şartnamesine göre alttemel tabakasında ağırlıkça %50 oranına kadar RAP kullanımına müsaade edilmektedir. Aslında uygulamada bağlayıcısız yol tabakaları için nispeten daha az oranda RAP malzemesi kullanılmakta, RAP malzemesini bitümlü sıcak karışımlarda kullanımı tercih edilmektedir (Iowa DOT, 2014).

Minnesota Karayolları (Mn/DOT) şartnamesi, bağlayıcısız temel tabakalarında RAP için en fazla %3,5 asfalt içeriğine izin verirken, bu değer alttemel tabakaları için %3'tür. Asfalt içeriği solvent ekstraksiyon metoduyla AASHTO T 164'e göre yapılmaktadır (Mn/DOT, 2014). Uygulamada agrega temel tabakaları için genellikle %10 ile %75 arasında bir oranda RAP malzemesi kullanılmaktadır. Şartnamede RAP katkılı agrega temel tabakalarının optimum su muhtevalarına ilişkin bir veri bulunmamaktadır. Günümüzde, Minnesota'daki karayollarının yaklaşık %60'unda RAP malzemesi kullanılmıştır. Mn/DOT, RAP malzemesi üzerinde herhangi bir kalite kontrol testine gereksinim duymamaktadır (Hoppe vd. 2015).

New York Karayolları (New York DOT) şartnamesi alttemel tabakalarında maksimum dane çapı 2 in. olmak üzere %95 oranında RAP malzemesi kullanımına müsaade etmektedir. RAP, geoteknik mühendisleri tarafından görsel bir muayeneye göre onaylanır. Çok miktarda yassı ya da uzun daneli parçacık bulunması durumunda test gerekebilir. Malzemenin tamamının RAP olması durumunda gradasyon dağılımı gereksinimlerinden feragat edilir. Geoteknik mühendislerinin görüşüne göre, malzeme inşaat aşamasında güvenilmez hale gelirse DA ile karıştırılarak kullanılması gerekebilir. Ağır tonajlı kamyon trafiğine maruz yollarda RAP kullanımına izin verilmez (New York DOT, 2008).

Teksas Karayolları (TxDOT) şartnamesi bitümlü temeller için ağırlıkça %20 oranına kadar RAP malzemesi kullanımına izin vermektedir (TxDOT, 2004-a). RAP malzemesinin 2 in.'lik elekten geçiyor olması gerekmektedir. Sıkıştırma ise Tex-113-E laboratuvar

prosedürü ile belirlenerek %100 maksimum yoğunlukta olmalıdır (TxDOT, 2011). Çimento bağlayıcılı temel tabakaları için ağırlıkça %50 oranında RAP kullanılabilir (TxDOT, 2004-b).

Hollanda'da, inşaat ve yıkıntı atıklarıyla ilgili yasaklamalar sebebiyle yol inşaatlarının neredeyse %100'ünde RAP malzemesi kullanılmaktadır. Geri dönüşüm, asfalt içerikli tabakalar üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Güncel uygulamalarda bağlayıcısız temel ve alttemel tabakaları için RAP malzemesi kullanımına izin verilmemektedir. Buna karşın bağlayıcısız tabakalarda genellikle geri kazanılmış beton agregası (RCA) kullanılmaktadır (Hoppe vd, 2015).

İngiltere'de tip-1 ve tip-2 bağlayıcısız alttemel karışımlarında ağırlıkça en fazla %50 RAP malzemesi kullanımına müsaade edilmektedir. Tip-4 bağlayıcısız agrega karışımlarında ise %100 RAP malzemesi kullanılabilir. Sıkıştırılmış malzemenin su muhtevası, optimum su muhtevası değerinin %1 üstü ile %2 altında bir aralıkta olmalıdır (Department for Transport, 2014).

Washington Karayolları (WashingtonDOT), kırışmış DA ile karıştırılması durumunda, temel tabakalarında ağırlıkça %20 oranına kadar RAP malzemesi kullanımına müsaade edilmektedir (Washington DOT, 2012).

Wisconsin Karayolları (WisDOT) şartnamesi, 11/4 in. ve 3 in.'lik yoğun gradasyonlu temel tabakalarında herhangi bir miktarda RAP kullanımına müsaade etmektedir. 3/4 in. yoğun gradasyonlu ve tüm açık gradasyonlu malzemelerde ise RAP malzemesi kullanımında sınırlandırmalar mevcuttur (WisDOT, 2014).

Türkiye'de RAP malzemesinin kullanım oranı; kullanılan malzemeye, karışım türüne ve üretim plant tipine göre değişkenlik gösteren bir durumdur. Bu konuyla ilgili İsfalt'ın (İstanbul asfalt fabrikaları), uygulamada kullandığı oranlar; aşınma tabakasında %10, binder tabakasında %15–20, bitümlü temel tabakasında da %35'tir. Bazı araştırmalar RAP malzemesinin aşınma tabakalarında mümkün olduğunca kullanılmaması gerektiğini belirtmektedir. Çünkü RAP malzemesinin etrafını saran bitüm oksidasyona (sertleşme) uğramış hâldedir. Bu uygulamayı gerçekleştiren bir başka şirket olan Nalbantoğlu İnşaat bu konuyla ilgili RAP malzemesinin yalnızca binder ve bitümlü temel tabakalarında kullandıklarını belirtmektedir (Arapoğlu, 2014).

## 1.8. Temel Tabaklarında RAP Malzemesi Kullanımıyla İlgili Önceki Çalışmalar

### 1.8.1. Katkı Malzemeleri

Soğuk geri dönüşüm uygulamalarında karışımlara katkı maddesi ilave etme zorunluluğu yoktur. RAP malzemesinin fazla kullanılması durumunda tabakanın taşıma gücünün düşmesine bağlı olarak taşıma kapasitesinin arttırılması veya kaba agregalar arası boşluğun fazla olmasına bağlı olarak permeabilitenin fazla ve dayanımın düşük olmasından ötürü bağlayıcı malzeme ilavesi yapmak mümkündür.

Polimer, uçucu kül, enzimatik stabilizatörler, kireç, fiber katkılı çimento ve puzolanik çimentosu gibi zeminin performansını arttırmak için çok çeşitli kimyasal katkı maddeleri mevcuttur. Daha yüksek mukavemet seviyelerinin gerekli olduğu ve/veya ince malzeme içeriğinin düşük olduğu durumlarda stabilizasyon sağlamak için çimentolu stabilizasyon malzemesi olarak puzolanik çimento kullanılabilir. Puzolanik uçucu kül, kendiliğinden çimentolaşan (self-cementing) uçucu kül, kireçli veya Portland çimentolu diğer puzolanlar kullanılarak da benzer stabilizasyon faydaları sağlanabilmektedir.

Carmargo vd. (2009), C tipi uçucu kül, kireç ve çimento bulamaç halinde, soğuk dönüşüm karışımlarının yapısal kapasitesini geliştirmek ve nem hasar potansiyelini azaltmak için geri dönüşüm katkı maddesi olarak arazide başarıyla kullanılabildiğini sonucuna varmıştır.

Ganne (2009), farklı RAP oranlarındaki RAP-DA karışımı temel tabakası stabilizasyonu ile ilgili çalışmalar yaparak, RAP malzemesinin Portland çimentosu ve kendinden çimentolaşan uçucu kül ile stabilizasyonunun uygulanabilirliğini araştırmıştır. Teksas'taki üç farklı noktadan RAP malzemesi olarak, DA malzemesiyle farklı oranlarda karıştırmıştır. RAP katkılı temel tabakası için hazırlanan karışımlar değişik oranlarda Portland çimentosu veya kendinden çimentolaşan uçucu kül ile stabilize edilmiştir. Karışımlar ıslanma-kuruma (wetting-drying) testinin sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. En ideal performans %4 oranında Portland çimentosu ile stabilize edilen %75 RAP içerikli karışımda elde edilmiştir. Kendinden çimentolaşan uçucu kül karışımları ıslanma-kuruma testinde aşırı hacim değişikliği göstermiştir.

Cosentino vd. (2012), çimento stabilizatör olarak kullanılıyorsa, aşırı çimento kullanımında temel malzemesinin kırılma davranış gösterebileceğini bu sebeple içeriğinin ağırlıkça %2'yi aşmaması gerektiğini belirtmiştir.

Taha vd. (2002), %0, %10, %20, %30 ve %100 RAP içeren RAP-DA karışımlarına kuru ağırlıkça %0, %3, %5 ve %7 oranında tip-1 puzolanik çimento karıştırarak bağlayıcı ve bağlayıcısız bu karışımlar üzerinde sıkıştırma ve serbest basınç dayanımı testleri yürütmüşler. Çalışmada, RAP malzemesinin temel ve alttemel tabakalarında kullanılan DA malzemesine uygun bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla beraber, çimentoyla stabilize edilen tüm RAP-DA karışımlarında RAP oranının artırılması durumunda temel tabakası kalınlığının artırılması gerekliliği doğmuştur.

Taha (2003), çalışmasında farklı RAP oranlarında RAP-DA karışımları üzerinde çimento fırın tozu kullanarak yapmış olduğu sıkıştırma ve serbest basınç testleri neticesinde optimum bir temel tasarımı için yaklaşık %15 çimento fırın tozunun gerekli olduğu sonucuna varmıştır.

Ordonez (2006), RAP malzemesini farklı oranlardaki çimento ve polietilen fiber kullanarak stabilize etmeye çalışmıştır. Stabilize RAP malzemesi üzerinde permeabilite, serbest basınç ve kesme modülü testleri yapmıştır. Test sonuçları, daha önceki çalışmalarla karşılaştırılmış ve RAP malzemesinin temel ve alttemel tabakalarında kullanımının DA malzemesine iyi bir alternatif malzeme olduğu sonucuna varmıştır.

Guthrie vd. (2007), çalışmasında RAP içeriğinin %50 ila %75 aralığında kullanılmasını, karışımlardaki çimento içeriğinin ise %1-2 arasında olması gerektiğini belirtmiştir.

Baugh ve Edil (2008), çalışmasında RAP malzemesini çimento fırın tozu ile stabilize ederek standart proktor, CBR, elastik modül ve serbest basınç dayanımı testleri gerçekleştirmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $V_{kmax}$ ) değerleri, çimento fırın tozu miktarının artmasıyla azalırken, optimum su muhtevası ( $W_{opt}$ ) değerleri artmıştır. Katkılı RAP malzemesinin CBR değeri 7 günlük kür sonunda katkısız RAP malzemesinden 9 kat daha fazla olmuştur. Elastik modül ise 56 günlük kür sonunda %650 oranında artmıştır. Bu sebeple çimento fırın tozunun stabilizatör olarak RAP temel için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bleakley ve Cosentino (2013), RAP-kireçtaşı karışımlarının temel tabakası için, stabilize edici katkı maddeleri olmadan dayanım ve sünme gereksinimlerini karşılaması için RAP malzemesinin karışımdaki oranının en çok %25 olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Maksimum %50 RAP kullanılması durumunun çimento gibi bir bağlayıcı katkı maddesi ile mümkün olabileceği belirtilmiştir. Bu durumda ağırlıkça %2-3 oranında

çimento ilavesi, stabilize edilmiş RAP malzemesi için tatmin edici mukavemet ve deformasyon özellikleri verdiği belirtilmiştir.

Gupta vd. (2009) çalışmasında, uçucu külün RAP malzemesi ile birlikte kullanılması halinde uçucu kül miktarı arttıkça malzeme kohezyonunun arttığı ve bu sayede karışımların kayma gerilmelerinin de arttığını gözlemlemiştir. Uçucu külün kalsiyumla birleşerek çimentolu birleşimlerde kullanılması, puzolanik etkiye sahip olduğunun bir göstergesi olmuştur. Bunun bir sonucu olarak da uçucu kül ve agrega karışımları çok düşük permeabilite değerlerine ( $10^{-5}$  ve  $10^{-6}$  cm/sn) sahip olmuştur.

Carmargo vd. (2009), kireç ve portland çimentosunun genellikle RAP ağırlığının %1-2'si kadar ilave edilmesini, uçucu kül içeriğinin ise %8-12 aralığında olabileceğini belirtmiştir.

### 1.8.2. Asfalt İçeriği Tayini

Zamanla, RAP malzemesindeki asfalt bağlayıcılar oksidasyona maruz kalırlar; bu da yaşlanma sertleşmesi ile sonuçlanır (Roberts vd. 1996). Kimyasal özelliklerde meydana gelen bu değişim, üstyapı tabakasının rijitliğini ve kesme mukavemetini etkileyebilir ve tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına karşı direncini düşürebilir. Bu sebeple RAP malzemesinde bulunan asfaltın miktarını belirlemek üzere asfalt içeriği (%AC) testleri yapılmaktadır.

Locander (2009), yaptığı bir çalışmada ignisyon fırını kullanarak AASHTO T 308'e göre %100 RAP malzemesinin asfalt içeriğinin ortalama %5,6 olduğunu, minimum ve maksimum değerlerin de %4,65 ve %6,20 olduğunu belirtmiştir.

Güngör vd. (2008), yılında yaptıkları bir çalışmada karayolundan kazınan binder tabakasından elde edilen RAP malzemesine ignisyon testleri yapmışlardır. Bu testler sonucunda asfalt içeriği miktarını ortalama %4,11 olarak belirlemişlerdir.

Chesner vd. (1998), RAP malzemesinin asfalt içeriğinin normal koşullarda %4,5-6 arasında olması gerektiğini, maksimum aralığın ise %3-7 olduğunu belirtmektedir.

Potturi (2006), çalışmasında asfalt içeriği miktarının, RAP-DA veya RAP/çimento karışımlarında, yüzeyi bitümlle kaplı olan RAP agregalarının yapışma özelliği üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedir. Farklı kaynaklardan temin ettiği üç farklı RAP numunesi üzerinde ignisyon fırını yöntemiyle elde ettiği asfalt içerikleri %3,5, %6,4 ve %4,7'dir.

### 1.8.3. Elek Analizi Testleri

Elek analizi testi agregaların dane boyutu dağılımının belirlenmesi için kullanılan en eski ve en iyi bilinen yöntemdir. Bu analiz, özellikle agrega olarak kullanılacak malzemelerin granülometrisinin saptanması için agrega danelerinin büyüklüğü ile her bir agrega sınıfının toplam kuru agrega ağırlığının yüzdesi olarak karışıma katılma miktarını belirlemek amacıyla yapılır. No.200 elekten geçen, 0,075 mm'den daha ince malzemeler mineral filler malzeme olarak adlandırılır. Zeminin %50'sinden fazlası No.200 elek altına geçmişse malzeme ince daneli olarak tanımlanırken, %50'sinden daha azı No.200 elek altına geçmişse iri daneli olarak tanımlanır. Ayrıca No.200 elekten geçen malzeme yüzdesi kütlece  $\leq$ %35 olan malzemeler granüler malzeme olarak adlandırılır.

Gradasyon karakteristiği, temel tabakasının performansında önemli bir etkiye sahiptir. No.200 elekten geçen malzeme miktarının, donmaya karşı hassasiyeti artırmak, yeterli permeabilitenin sağlanması ve aşırı boşluk basıncı gelişimini önlemesi neredeyse evrensel olarak kabul görmüştür.

Gray (1962), ince agrega içeriğinin çok düşük olması durumunda ( $<$ %4), kırmataş malzemede yüksek yoğunluğun elde edilemediği fakat aşırı ince malzemenin de ( $>$ %9) maksimum taşıma kapasitesini düşürdüğünü, ayrıca aşırı ince içeriğin temel tabakalarında donmaya karşı hassasiyeti arttırdığını belirtmiştir.

Barksdale ve Itani (1989), dere çakılı, kireçtaşı ve kuvarsit agregalarının elastik modül ve kalıcı deformasyon özelliklerini tekrarlı yüklemeli üç eksenli test ile tespit etmiştir. Fazla ince malzeme (No.200) eklenmesi durumunda agregaların artan kalıcı deformasyon eğilimini göstermişlerdir.

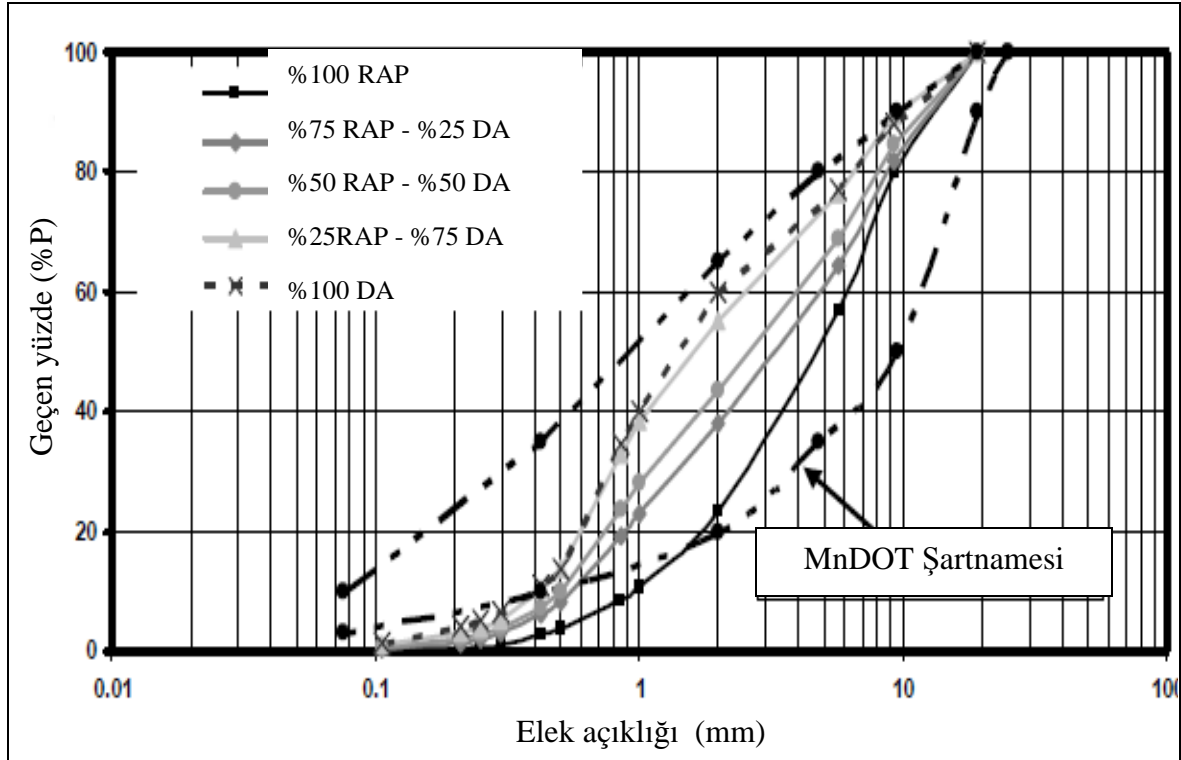
Jorenby ve Hicks (1986), ince malzeme %0'dan %10'a yükseltildiğinde, elastik modül, test edilen örnekler için yaklaşık %60 oranında azalma göstermiştir. Yani malzeme yükleme altında daha az esnek bir davranış göstermiştir.

Mohammad vd. (2006), RAP malzemesi üzerinde yaptığı elek analizi testi sonucunda, ince malzeme içeriğini (No.200 elek altı) yaklaşık %1 olarak belirlemiştir. Bunun nedeni olarak da RAP malzemesindeki ince toz malzemelerin, agrega yüzeyindeki asfalt tabakası sebebiyle daha büyük agregalara yapışmış olmasını göstermiştir.

Yurtdışındaki pek çok karayolu kurum ve kuruluşu maksimum RAP malzemesi boyutunu 40 mm (1,5 in.) ile sınırlamıştır. Daha büyük malzeme kullanımı karışımın segresyona uğramasına, aşırı boşluk oluşmasıyla, permeabilitenin artmasına ve tabakanın

serme-sıkıştırmasının zorlaşmasına sebep olabilmektedir. RAP malzemesinin maksimum boyutu için dikkat edilmesi gereken husus, sıkıştırılmış tabaka kalınlığının 1/3'ünden daha büyük olmaması gerektiğidir (URL-5).

Gupta vd. (2009), çalışmasında %100, %75, %50, %25 ve %0 RAP karışımları üzerinde yaptığı elek analizi testlerinden elde ettiği gradasyon eğrilerine göre karışımdaki RAP oranı arttıkça granüler malzeme miktarı artmakta ve karışımın ince içeriği azalmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. RAP karışımlarının gradasyon eğrileri (Gupta vd. 2009).

Bazı araştırmacıların %100 RAP malzemesi için önerdiği gradasyon limitleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. RAP malzemesi gradasyon limitleri

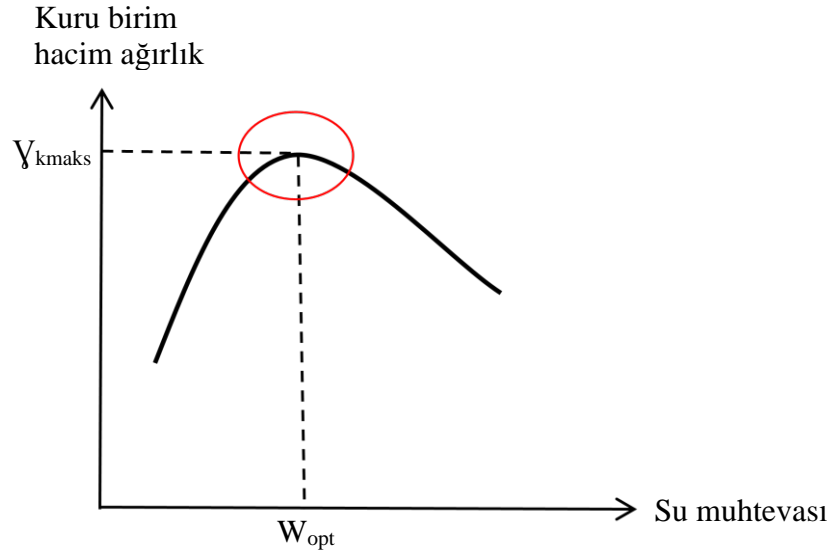
Elek açıklığı		CDOT, (2012)	Edil, (2011)	Locander, (2009)
2"	50 mm	100	-	100
1,5"	37,5 mm	-	100	-
1"	25 mm	85-100	90-100	88-100
3/4"	19 mm	75-100	-	75-100
1/2"	12,5 mm	55-90	-	56-88
3/8"	9,5 mm	45-80	50-90	44-88
No.4	4,75 mm	25-55	-	25-55
No.16	1,18 mm	5-25	-	7-25
No.200	75 $\mu$ m	0-5	0-10	0-5

#### 1.8.4. Proktor Testleri

Zeminin, kendisinden beklenen mühendislik özelliklerinin kazandırılması amacı ile tabakalar halinde serilerek, silindirleme, titreşim uygulama, tokmaklama gibi işlemlere tabi tutularak sıkıştırılmasına kompaksiyon denir. Bu işlemle zeminin içerisinde boşlukların azaltılarak daha sıkı yerleşmiş bir zemin tabakası elde edilmesi amaçlanmaktadır. Zemin sıkıştırılması ile daha büyük bir birim hacim ağırlık elde edilir ve buna bağlı olarak da mühendislik özelliklerinde artış sağlanır.

Belirli bir zemin için belirli bir sıkıştırma enerjisi ile en yüksek sıkışmayı sağlayan belli bir su muhtevası vardır. Buna “optimum su muhtevası ( $W_{opt}$ )” denir. Optimum su muhtevasına karşılık gelen birim hacim ağırlık değerine de “maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmaks}$ )” adı verilir. Farklı su içeriklerinde test tekrarlanarak, su içeriği-kuru birim hacim ağırlık eğrisi çizilir ve  $W_{opt} - \gamma_{kmaks}$  ilişkisi belirlenir (Şekil 2).





Şekil 2. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasının belirlenmesi

Zemin cinslerine göre  $W_{opt}$  granüler zeminlerde %7-8 gibi değerlerle başlar ve kohezyonlu zeminlerde %25-30 değerlerine kadar ulaşır.

Sıkıştırma ile genel olarak şu yararlar sağlanır; zeminin taşıma gücü artırılır, zeminin permeabilitesi azaltılır, zemine daha kararlı bir yapı kazandırılarak zeminin su alıp hacim değişikliklerine uğrama ihtimali azaltılır, zeminin sabit, hareketli ve dinamik yükler altında yapacağı kalıcı deformasyonlar azaltılır.

Kim vd. (2007), gyratory proktor testinin arazi yoğunluğu ölçümlerine standart proktor testinden daha yakın bir korelasyon sağladığını bildirmiştir. Gyratory proktor sonuçları, modifiye proktor sonuçları ile kıyaslandığında  $V_{kmaks}$  değerlerinde büyük farklılıklar,  $W_{opt}$  değerlerinde ise küçük farklılıklar göstermiştir. Karışımdaki RAP oranı arttıkça her iki testte de  $W_{opt}$  düşmektedir.

Yurtdışındaki pek çok araştırmacının RAP malzemesi üzerinde  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerlerini belirlemek amacıyla kullandığı testler ve elde ettikleri sonuçlar Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Farklı araştırmacıların RAP malzemesi üzerinde yaptıkları proktor test sonuçları

Araştırmacılar	Proktor Türü	$V_{kmaks}$ (t/m <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)
Bennert vd. (2000)	Standart	1,87	5
Guthrie vd. (2007)	Modifiye	2,08	5,6
Saeed, (2008)	Standart	1,99	6,3
Carmargo vd. (2009)	Standart	2,16	7,5
Wen vd. (2010)	Modifiye	2,16	6,5

Wu (2011), çalışmasında, iki farklı RAP malzemesi (RAP<sub>1</sub> ve RAP<sub>2</sub>) ile kırılmış agrega malzemesi karışımlarını kullanmıştır.  $W_{opt}$  ve  $V_{kmaks}$  değerlerinin belirlenmesi için modifiye proktor testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te gösterilmektedir. Test sonuçlarına göre karışımlardaki RAP oranları arttıkça  $W_{opt}$  ve  $V_{kmaks}$  değerlerinin iki farklı RAP malzemesi karışımı için de azaldığı görülmektedir.

Tablo 3. Farklı RAP karışımlarının modifiye proktor test sonuçları (Wu 2011).

Karışımındaki RAP Oranı	Modifiye Proktor Test Sonuçları	
	$W_{opt}$ (%)	$V_{kmaks}$ (t/m <sup>3</sup> )
%0 RAP <sub>1</sub>	8,9	2,20
%20 RAP <sub>1</sub>	8,2	2,17
%40 RAP <sub>1</sub>	7,5	2,21
%60 RAP <sub>1</sub>	7,2	2,14
%0 RAP <sub>2</sub>	9	2,20
%20 RAP <sub>2</sub>	8,8	2,14
%40 RAP <sub>2</sub>	7,9	2,11
%60 RAP <sub>2</sub>	7,5	2,14
%80 RAP <sub>2</sub>	7,1	2,13

Senior (1994), RAP malzemesinin sıkıştırılmasının, malzeme gradasyonundan etkilendiğini belirtmiştir. RAP malzemesinin ince içeriği arttıkça RAP malzemesinin daha yoğun bir şekilde sıkıştığı ve  $V_{kmaks}$  değerinin arttığı sonucuna varmıştır.

Highter vd. (1997), RAP-DA karışımlarındaki RAP oranının artması durumunda  $V_{kmaks}$  değerinin azaldığını fakat  $W_{opt}$  değerinde belirgin bir değişimin olmadığını belirtmiştir.

Chesner vd. (1998) ve Potturi (2006), RAP malzemesinin  $W_{opt}$  değerinin normal koşullarda %5'e kadar kabul edilebilir olduğunu, maksimum aralığın ise %7-8 arasında değişebileceğini,  $V_{kmaks}$  değerinin ise 1,6-2 t/m<sup>3</sup> arasında olması gerektiğini belirtmiştir.

Yuan vd. (2010), %100 RAP malzemesinin çimento takviyesiz ve %6 çimento takviyeli karışımları üzerinde yürüttüğü çalışmasında  $V_{kmaks}$ - $W_{opt}$  değerleri arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Çimentolu tüm karışımların  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerlerinin, çimentosuzlara göre arttığı görülmüştür. %6 oranında çimento takviyeli ile takviyesiz %100 RAP karışımı için ortalama farklar;  $W_{opt}$  için yaklaşık %1,2 ve  $V_{kmaks}$  için 0,064'tür. Yani her %1 çimento artışı,  $W_{opt}$  değerinde yaklaşık %0,2 artış ve  $V_{kmaks}$  değerinde ise 0,01 t/m<sup>3</sup>'lük artış meydana getirmiştir.

Taha vd. (2002), %100, %90, %80, %70 ve %0 oranlarında RAP içeren RAP-DA karışımları üzerinde kuru ağırlıkça %3, %5 ve %7 oranında çimento takviyesiyle gerçekleştirdiği modifiye proktor testlerine göre; her bir karışım için çimento içeriği arttıkça  $W_{opt}$  ve  $V_{kmaks}$  değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Benzer şekilde,  $V_{kmaks}$  değerinin de, RAP-DA karışımındaki RAP oranının artması durumunda artacağını belirtmiştir.

Hoyos vd. (2011), %2, %4 ve %6 çimento takviyeli %100 RAP malzemesinin  $W_{opt}$  değeri %5,5-6 arasında değişirken,  $V_{kmaks}$  değerinin 2,083-2,12 t/m<sup>3</sup> aralığında olduğunu belirtmiştir. Çimento miktarının %6'ya kadar çıkmasının, çimento takviye edilen RAP malzemesinin  $V_{kmaks}$ - $W_{opt}$  ilişkisini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varmıştır.

### 1.8.5. Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesinde Kullanılan Testler

Taşıma kapasitesi, malzemenin trafik yüklerine vereceği tepkinin bir ölçüsüdür. Bu parametreler kaplama tasarım ve analizi için birer girdi olarak kullanılır. Taşıma kapasitesinin belirlenmesinde ülkemizde kullanılan yöntem Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testidir. Yurtdışında limerock taşıma oranı (LBR) testi de kullanılmaktadır.

CBR testi, kesit alanı 19,35 cm<sup>2</sup> olan silindirik bir pistonu belirli bir hızla zemine iterek elde edilen yük-penetrasyon bağlantısının bulunmasını kapsar. CBR genellikle 2,5 mm'lik penetrasyon için verilir. Ancak 5 mm'lik bir penetrasyon için daha büyük bir değer çıkarsa büyük olan değer kullanılır.

KTŞ, karayolu temel tabakası tasarımı için yaş CBR testi ile ilgili standartlar içermektedir. CBR testi, sahadaki normal koşulları temsil ederken, yaş CBR testi ile

sahadaki en kötü koşullar temsil edilmektedir. Bu nedenle yaş CBR yapılacak numune kalıpları yaklaşık 4 gün suda bekletilir.

LBR testi, CBR testinin bir değişik biçimidir. Testler arasındaki temel fark, CBR veya LBR değerini belirlemede kullanılan temel basınç dayanımıdır. Malzemenin CBR değeri LBR değerinin 0,8 katıdır. 100 CBR değeri, bir pistonun malzeme içine 2,5 mm penetrasyonu için gereken 6,890 kPa gerilme anlamına gelir. 100 LBR ise aynı sonucu elde etmek için gereken 5,512 kPa gerilmedir. FDOT şartnamesi için temel tabakası malzemesinin minimum LBR değerinin 100 olması gerekmektedir (CBR=%80). Florida Teknoloji Enstitüsü ise %100 RAP malzemesinin LBR değerinin %10-30 arasında olması gerektiğini belirtmiştir (Bleakely ve Cosentino, 2012).

Chesner vd. (1998), çalışmasında, temel tabakasının taşıma kapasitesinin, RAP-DA karışımlarındaki RAP oranına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ve karışımdaki RAP oranı arttıkça taşıma kapasitesinin azaldığını belirtmiştir (Senior vd. 1994, Ayan 2011, Hanks vd. 1989). %100 RAP malzemesinin CBR değeri %20-25 civarındayken, karışımdaki RAP oranının %40'a düşmesi durumunda CBR değerinin %150'nin üzerine çıktığını belirtmiştir.

Bennert ve Maher (2005), RAP-DA karışımlarının yoğun gradasyonlu agrega temel tabakasında (DGABC) kullanılması durumundaki performansını incelemiştir. Karışımda %50'den fazla RAP kullanılması durumunda, temel tabakasının permeabilite ve CBR değerlerinin büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple karışımdaki RAP içeriğinin ağırlıkça %50 ile sınırlandırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ooi (2010), DA malzemesinin karşıladığı şartname gereksinimlerini RAP-DA karışım malzemesinin de karşılaması koşuluyla RAP kullanımını %50 ile sınırlandırmanın uygun olabileceği sonucuna varmıştır. Ayrıca temel ve alttemel tabakaları için RAP-DA karışımlarının CBR değerlerinin de sırasıyla %80 ve %60 olması gerektiğini belirtmiştir.

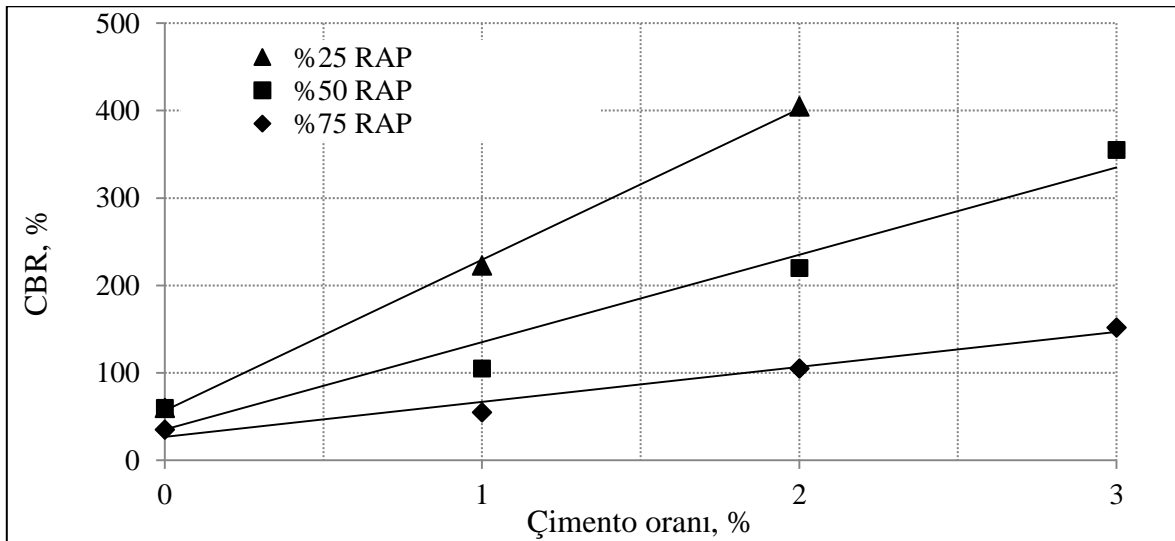
Sayed vd. (2011), Florida'daki arazi çalışmalarında %100 RAP malzemesinin bağlayıcısız temel tabakası için olumlu sonuçlar verdiğini rapor etmiştir. Çalışma süresinin kısıtlı olmasına rağmen bağlayıcısız %100 RAP temel tabakasının performansının, %100 DA ile yapılan kontrol bölümlerinin performansına eşdeğer olduğunu bildirmiştir. RAP temel malzemesi çok çeşitli dane boyu dağılımlarında uygun olmakla birlikte, yoğun gradasyonlarda performansın arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar, arazi performansının tespitinde, düşen ağırlıklı deflektometre (LWD) ve Dynaflect testlerinin uygun olduğunu, RAP malzemesinin arazi performansının değerlendirilmesinde Florida LBR testi (ve dolaylı olarak CBR) testinin yeterli olmayacağını bildirmişlerdir. Çalışmada

özetle, bağlayıcısız RAP malzemesinin temel tabakası için uygun bir malzeme olduğu kanısına varılmıştır.

Taha (1999), %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında RAP içeren RAP-DA karışımlarının performanslarının laboratuvar testleri ile kıyaslanmasına dayalı bir rapor hazırlamıştır. Sonuçlar, en düşük taşıma kapasitesinin %100 RAP ile elde edildiğini ve yalnızca %11 olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple karışımdaki RAP oranının alttemel tabakaları için %60, granüler temel tabakaları için %10 ile sınırlandırılmasını önermiştir.

Bleakley ve Cosentino (2013), çalışmasında %50 RAP-%50 kireçtaşı karışımı %1 çimentosu ile stabilize edildiğinde temel tabakası için gerekli olan %100 LBR değerinin çok üzerinde %175 LBR değerine sahip olduğunu belirtmiştir. %2 ve %3 çimento ile bu değerler sırasıyla %288 ve %396 LBR'ye ulaşmaktadır. Çalışmada çimento ve LBR arasındaki ilişkinin test edilen karışımlar için lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar arasında enterpolasyon yapılarak %0,5 çimento stabilizasyonu ile hazırlanan karışımlar ile %100'ün üzerinde bir yaş LBR değeri elde edebileceği belirtilmiştir. Bu LBR değerleri 14 günlük dayanımlara göre hesaplanmış olup, normal hidrasyon süresinde çimento mukavemetinin muhtemelen daha fazla arttıracığı belirtilmiştir.

Cosentino vd. (2012), çalışmasında 7 gün kür edilen çimento takviyeli RAP-DA karışımları üzerinde CBR testleri yapmıştır. Karışımlardaki çimento oranının artmasıyla CBR değerlerinde lineer bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. RAP karışımlarına çimento takviyesinin CBR üzerindeki etkisi (Cosentino vd. 2012).

### 1.8.6. Permeabilite Testleri

Zeminlerin taşıma gücü, yük altında sıkışması, şevler ve toprak barajlar gibi zemin yapılarının stabilitesi ve zeminlerin inşaat malzemesi olarak kullanılma karakteristikleri üzerinde zemin-su ilişkisi önemli rol oynar. Bu sebeple zemin davranışı üzerinde suyun etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Permeabilite, boşluklu bir zeminin bir sıvıyı (örneğin su) geçirebilme özelliğinin ölçüsüdür. Zeminlerin permeabilitesini etkileyen başlıca faktörler; dane boyutları, dane yapısı, dane dağılımı, boşluk oranı (e), zeminin suya doygunluk derecesi ( $S_r$ ), yeraltı suyunun özellikleri (yoğunluk, viskozite), ince dane göçü, sıcaklıktan dolayı suyun viskozitesindeki değişim ve numunedeki örselenmedir. Sıcaklık arttıkça suyun viskozitesi azalmakta, permeabilite katsayısı (k) ve akış hızı artmaktadır. Bu nedenle k, malzemelerin 20 °C'deki değerine ve suyun viskozitesine bağlı olarak tanımlanır.

Tablo 4'te zemin tiplerine göre tipik permeabilite katsayıları ve permeabilite özellikleri gösterilmektedir (URL-6). Tabloda görüldüğü gibi iri daneli zeminlerde k büyük; ince daneli zeminlerde ise küçük değerler almaktadır. Agregaların çapı arttıkça agregalar arası boşluklar artmakta ve su kendine daha rahat yol bularak ilerlemektedir.

Tablo 4. Zeminlerin tipik permeabilite katsayıları (URL-6).

Permeabilite katsayısı, k (cm/sn)	Geçirimsizlik özelliği	Zemin tipi
$< 10^{-7}$	Geçirimsiz	Kil
$10^{-7} - 10^{-5}$	Çok düşük	Silt
$10^{-5} - 10^{-3}$	Düşük	Kum (kirli)
$10^{-3} - 10^{-1}$	Orta	Kum (temiz)
$> 10^{-1}$	Yüksek	İri çakıl

Permeabilite, temel tabakası malzemesi için önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Attia vd. (2009) ve ARA (2004)'ya göre doğal zemin malzemesi suya doygun ise, kaplama hızla deforme olabilmektedir. Temel tabakasındaki parçacıklar arasında sıkışan nem, destek kaybı nedeniyle üstyapı tahribatına yol açabilmektedir. KTŞ'nde karayolu tabakalarının permeabilitesi ile ilgili bir kriter bulunmamaktadır. Yalnızca kaplama tabakalarının geçirimsiz olmasını istemektedir.

Zeminlerin permeabilite katsayılarının belirlenmesinde laboratuarda kullanılan iki test yöntemi vardır. Bunlar; sabit ve değişken seviyeli permeabilite testleridir. Güney Carolina Karayolları'na göre ince daneli iyi öğütülmüş, kohezyonlu zeminler için değişken seviyeli permeabilite testi uygunken, kaba daneli granüler ve kohezyonsuz zeminler için ise sabit seviyeli permeabilite testi uygundur (SCDOT, 2008).

Permeabilite zeminlerin en geniş aralıkta değişim gösteren özelliği olup, laboratuvar ölçümleri sırasında güvenilirliği etkileyebilecek birçok faktör söz konusudur. Bunlardan bazıları; numune içinde hava kabarcıklarının hapsolması ve buna bağlı olarak doygunluk derecesinin %100'den küçük olması veya numunenin farklı sıklıklarda olmasıdır (Benson ve Daniel, 1990). Zemin dokusu ise yine test sonuçlarında önemli etkiye sahiptir (Mitchell, 1993). Bu tip durumlarda test sonuçlarında önemli derecede değişiklikler gözlemlenebilir. Permeabilitenin pek çok değişkene (sıkıştırma, agrega tipi, boyutu,...) bağlı olması sebebiyle RAP malzemesi içeren karışımların permeabilitelerinin belirlenmesinin oldukça karışık olduğu söylenebilmektedir.

Gupta vd. (2009)'ya göre örnek hazırlama esnasında sıkıştırma çalışmaları, geniş boşlukların hacmini düşürmektedir. RAP içeren numunelerin DA ile kıyaslandığında daha yüksek permeabiliteye sahip olduğunu belirtmiştir. Buna karşın karışımdaki RAP oranı ile permeabilite katsayısı arasında bir bağlantı kuramamıştır.

Trzebiatowski vd. (2004), çalışmasında bağlayıcısız temel tabakası malzemesi olarak RAP malzemesinin doygun haldeki permeabilitesinin; modifiye proktorla sıkıştırıldığında  $4,5 \times 10^{-6}$  ile  $1,7 \times 10^{-4}$  cm/sn arasında değiştiği, standart proktorla sıkıştırıldığında ise  $2,4 \times 10^{-3}$  ile  $9,0 \times 10^{-3}$  cm/sn arasında değiştiği sonucuna varmışlardır.

Mokwa ve Peebles (2005), çalışmasında temel tabakası için farklı oranlardaki RAP-DA karışımları üzerinde yaptığı sabit seviyeli permeabilite testlerinin sonuçları Tablo 5'te gösterilmektedir. Sonuçlara göre karışımlardaki RAP oranı arttıkça temel tabakasının permeabilitesinin de arttığını belirtmektedir. Ayrıca kullanılan RAP malzemelerinin temel tabakasında meydana getirdiği k değerleri arasındaki büyük farklar da göze çarpmaktadır. RAP<sub>1</sub> malzemesinin karışımında %50 oranında kullanılması durumunda temel tabakasının k değerini yaklaşık 12 kat arttırırken, RAP<sub>3</sub> malzemesi temel tabakasının k değerini yaklaşık 53 kat arttırmıştır.

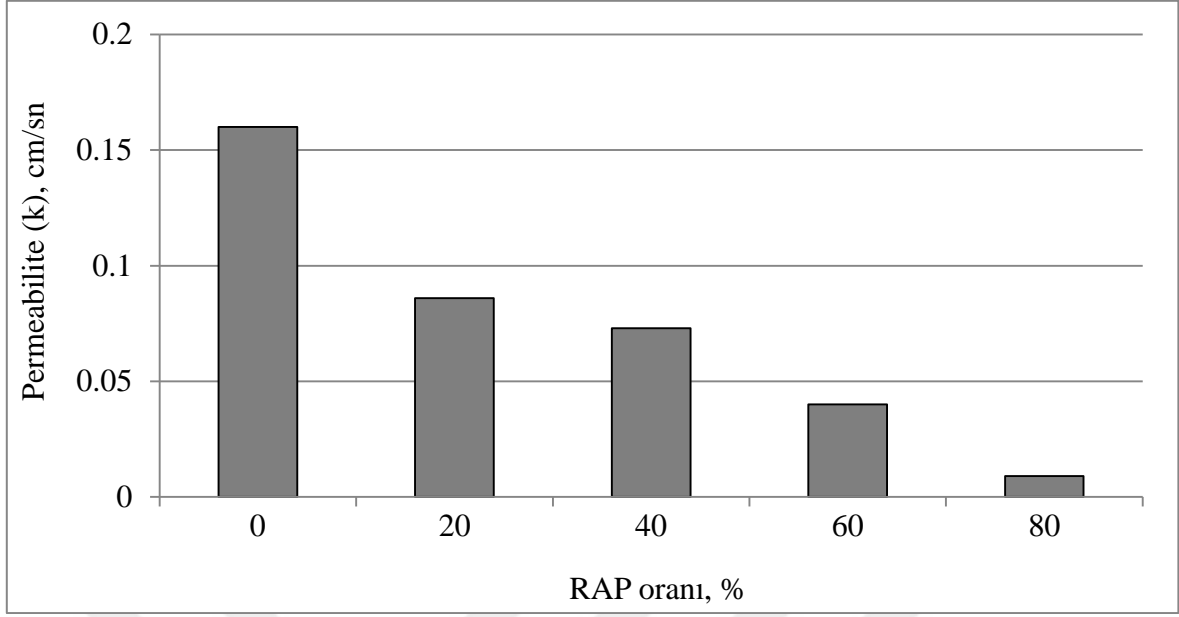
Tablo 5. Permeabilite test sonuçlarının özeti (Mokwa ve Peebles, 2005).

	$k_1 (\times 10^{-3} \text{ cm/sn})$	$k_2 (\times 10^{-3} \text{ cm/sn})$	$k_3 (\times 10^{-3} \text{ cm/sn})$	$k_{ort} (\times 10^{-3} \text{ cm/sn})$
Temel tabakası <sub>1</sub>				
%0 RAP <sub>1</sub>	5,9	2,2	0,8	3
%20 RAP <sub>1</sub>	6,3	6,1	13,1	8,5
%50 RAP <sub>1</sub>	15,1	19,3	19,9	18,1
Temel tabakası <sub>2</sub>				
%0 RAP <sub>2</sub>	2,9	5,4	4,9	4,4
%20 RAP <sub>2</sub>	7	9,7	12,6	9,8
%50 RAP <sub>2</sub>	65	51,9	49,5	55,5
Temel tabakası <sub>3</sub>				
%0 RAP <sub>3</sub>	2,9	4	1,5	2,8
%20 RAP <sub>3</sub>	12,2	12,5	10,2	11,6
%50 RAP <sub>3</sub>	73	116	260	149,6

Hanks ve Magni (1989), Ontorio Karayolları'na hazırladıkları rapor için yaptıkları çalışmada RAP-DA karışımlarındaki RAP oranı arttıkça daha yüksek permeabilite değerlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple Ontoria Karayolları şartnamesinde temel ve alttemel tabakaları için müsaade edilen maksimum RAP kullanım oranı %50'dir.

Wu (2011), RAP malzemesi üzerinde yaptığı sabit seviyeli permeabilite testi sonucunda RAP malzemesinin sürekli gradasyonunun, permeabilitenin artmasına sebep olduğunu, sıkıştırma çalışmaları, zemin cinsi ve gradasyon gibi faktörlerin, permeabiliteyi etkilediğini belirtmiştir. Test sonuçları göstermiştir ki; RAP-DA karışımındaki RAP oranı arttıkça permeabilite lineere yakın bir şekilde azalmaktadır. %20 RAP içeren karışımla %100 DA malzemesinin permeabilitesi kıyaslandığında %50'ye varan bir düşüşün söz konusu olduğu belirtmiştir (Şekil 4).





Şekil 4. RAP oranı-permeabilite ilişkisi (Wu, 2011).

Maher vd. (2005), bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarının performans özelliklerini geliştirmek için RAP-DA karışımları üzerinde permeabilite testleri yapmışlardır. RAP malzemesi, iki yüksek geçirimli malzeme ile karıştırılmıştır: yoğun gradasyonlu agrega temel tabakası (DGABC) malzemesi ve NJDOT alttemel malzemesi (I-3). Test sonuçları Tablo 6'da verilmektedir. Genel olarak; karışımdaki RAP oranı arttıkça, permeabilite her iki karışım malzemesi için de azalmaktadır (MacGregor vd. 1999). Doğal agregaların genellikle RAP malzemesinden daha geçirgen olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sabit seviyeli permeabilite testinde, düşen seviyeli permeabilite testine göre daha düşük permeabilite değerleri elde edilmiştir.

Tablo 6. RAP ve RAP-DA karışımlarının permeabilite sonuçları (Maher vd. 2005).

Karışım oranları	<i>Sabit seviyeli</i>		<i>Düşen seviyeli</i>	
	DGABC	I-3	DGABC	I-3
$\times 10^{-3}$ cm/sn				
%0 RAP	60,9	19,7	42,7	15,2
%25 RAP	42,8	0,8	9,8	0,8
%50 RAP	40,1	2,9	13,8	2,7
%75 RAP	0,6	1,1	0,7	1,2
%100 RAP	6,0	6,0	4,9	4,9

Akinwumi (2014), çalışmasında RAP-DA karışımındaki RAP oranı ile permeabilite arasında negatif bir korelasyon elde edilmiştir. Özgül ağırlık ve kompaksiyon özelliklerinin sonuçları kullanılarak DA ve RAP-DA karışımlarının boşluk oranı ve gözeneklilikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, karışımındaki RAP oranı arttıkça boşluk oranının ve gözenekliliğin sürekli olarak azaldığını göstermiştir. Boşluk oranı ve gözeneklilikteki bu azalmaya, RAP malzemesinin bitümlü içeriğinin DA içindeki gözenekleri tıkamasının neden olduğu düşünülmüştür. Bu durumun, RAP-DA karışımlarındaki artan RAP oranı ile permeabilitenin azalmasından sorumlu olabileceği görüşüne varılmıştır.

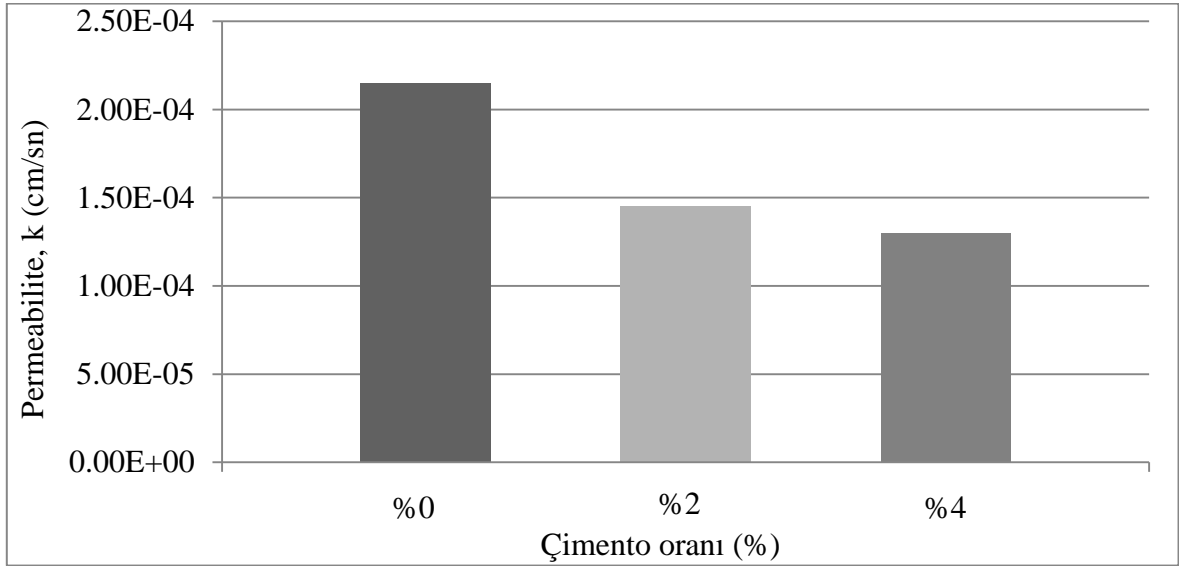
Trzebiatowski ve Benson (2005), standart proktor ile sıkıştırılmış %100 RAP karışımlarının permeabilite değerlerinin  $2,4 \times 10^{-3}$  cm/sn ile  $9,0 \times 10^{-3}$  cm/sn arasında olduğunu bildirmiştir.

Katkı malzemeleri kullanılarak permeabilitenin azaltılması mümkündür. Mineral filler yapıdaki katkı malzemeleri agregalar arasındaki boşlukları doldurarak su geçişini engeller. Böylece permeabilite düşer. Tunç (2007)'a göre kireç, jips, uçucu kül, puzolan vb. katkı maddeleri ile agrega danelerinin birbirine sıkıca bağlanarak çimentolaşması sayesinde zeminin permeabilite özelliğinin azaltılabileceği belirtilmiştir.

Yuan vd. (2002), çalışmasında farklı bölgelerden temin edilen RAP malzemelerinin DA ile %50 ve %75 oranında karıştırılması ve %100 RAP malzemesi olarak kullanılması durumunda ağırlıkça %2 veya %4 oranında çimento takviyesinin permeabilite katsayısına etkisini belirlemeye çalışmıştır. LBB ve FTW bölgeleri hariç diğer tüm %100 RAP malzemelerinin permeabiliteleri DA-RAP karışımlarından 1,5-2 kat daha fazladır. LBB ve FTW karışımlarındaki bu aksi durum Bennert ve Maher (2005)'in çalışmasındaki bulguları destekler niteliktedir. Yani karışımındaki RAP oranı arttıkça permeabilite katsayısı azalmaktadır. Çimento katkılı RAP malzemelerinin permeabilitelerine ilişkin bir kabul kriteri mevcut değildir. Katkısız %100 RAP malzemesinin standart proktor sıkıştırması altında permeabilitesine ilişkin rapor edilmiş değerler  $2,4 \times 10^{-3}$  cm/sn ile  $9 \times 10^{-3}$  cm/sn arasında olup, ortalama  $5 \times 10^{-3}$  cm/sn'dir (Trzebiatowski ve Benson, 2005). Ayrıca %4 çimento takviyeli %100 RAP karışımlarının permeabilite değerleri CHR ve LBB bölgeleri için olan  $2,94 \times 10^{-3}$  cm/sn'den, ELP için olan  $16,5 \times 10^{-3}$  cm/sn gibi geniş bir aralıkta değişmektedir.

Hoyos vd. (2011), çalışmasında sabit seviyeli permeabilite testini kullanarak çimento takviyeli %100 RAP malzemesinin permeabilitesini belirlemeye çalışmıştır. RAP malzemesinin permeabilitesi çimento oranı arttıkça azalmıştır (Şekil 5). Bunun sebebi

olarak da, çimento malzemesinin kür alma esnasında ortamdaki nem ile tepkimeye girerek RAP malzemesinin içindeki gözenekleri doldurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimentolu RAP karışımlarının çimentosuz olanlara oranla daha az geçirimli olması drenaj koşullarının tüm yol yapısının uzun vadeli performansı açısından kritik sonuçlar doğurabileceği dikkate alınarak gerekli fizibilite çalışmalarının yapılması gerektiği belirtilmiştir.



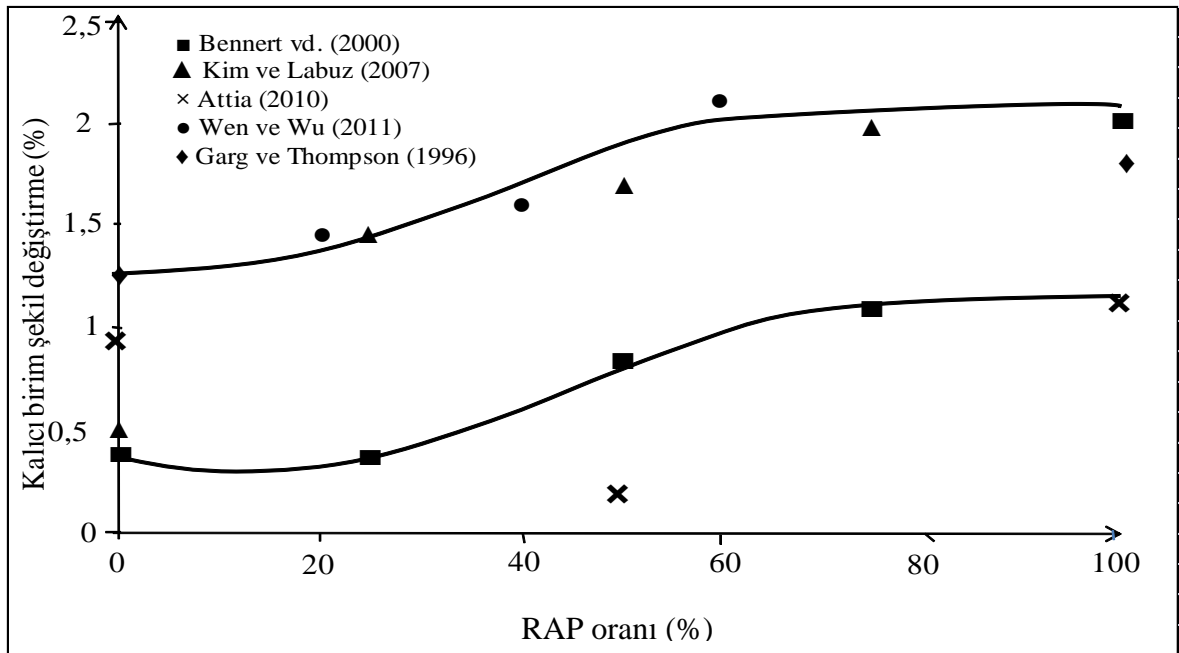
Şekil 5. Farklı çimento oranlarındaki RAP malzemesinin permeabilitesi (Hoyos vd. 2011).

Bazı araştırmacılar RAP-DA karışım malzemelerinin, DA'ya göre daha yüksek permeabilite değerlerine sahip olduğunu ve karışım içindeki RAP yüzdesi arttığında permeabilitenin de arttığını belirtmişlerdir (Highter vd. 1997, Mokwa ve Peebles 2005, Hanks ve Magni 1989, Gupta vd. 2009). Bununla birlikte bazı araştırmacılar da tam tersi sonuçlar elde edilerek, karışım içindeki RAP yüzdesi arttıkça karışımın permeabilitesinin azaldığı sonucuna varmışlardır (Bennett ve Maher 2005, Akinwumi, 2014, Wu 2011, Yuan vd. 2002). Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus; her araştırmacının kullandığı RAP malzemelerinin bitüm oranlarının, sıkıştırma yöntemlerinin, gradasyonlarının, ince içerik miktarlarının, agrega özelliklerinin ve permeabiliteyi etkileyen diğer pek çok etkenin birbirinden farklı oluşudur. Bu sebeple test sonuçlarında bazı araştırmacılar RAP oranının artması ile permeabilitenin azaldığı sonucuna varmışken, zıt görüşler ve sonuçlar da literatürde mevcuttur.

### 1.8.7. Deformasyon Testleri

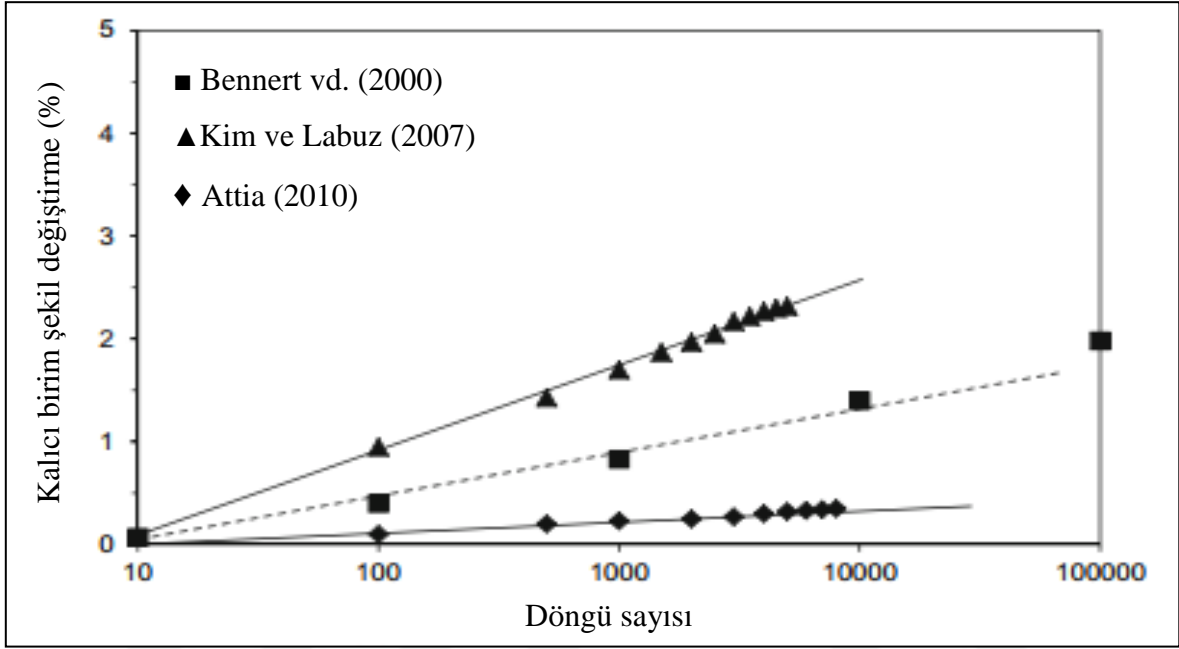
Malzemelere uygulanan yükün büyüklüğüne göre iki çeşit deformasyon meydana gelmektedir. Bunlar; kalıcı (plastik) deformasyon ve elastik deformasyondur. Elastik deformasyon, kuvvet uygulanan malzemeye ait atomların komşularından ayrılmadan aralarındaki uzaklığın değişmesi anlamına gelir. Yani uygulanan kuvvet ortadan kalkınca, cisim eski boyuna geri dönüyorsa bu tür şekil değişimine elastik deformasyon denir. Kalıcı deformasyon ise uygulanan gerilmenin malzemenin elastik sınırını aşması sonucu plastik şekil değişiminin oluşumuna denir. Tekrarlı plaka yükleme testi, yol üst yapısına tekrarlı yükleme yapan taşıtların yol tabakalarında sahada meydana getireceği deformasyonların laboratuvar ortamında önceden belirlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca test yöntemine eklenen birim şekil değiştirme ölçerler ve LVDT cetveller sayesinde de tabakalardaki tekrarlı yüklemenin oluşturacağı birim şekil değiştirmeler ve yüzey deformasyonları gözlemlenebilmektedir.

Thompson ve Smith (1990), kalıcı birim şekil değiştirmelerin, kaplama performansını belirlemek için önemli bir karakteristik olduğunu belirtmiştir. Bazı araştırmacılar, RAP-DA karışımlarının kalıcı birim şekil değiştirmelerin karışımlardaki RAP oranının artması durumunda arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 6).

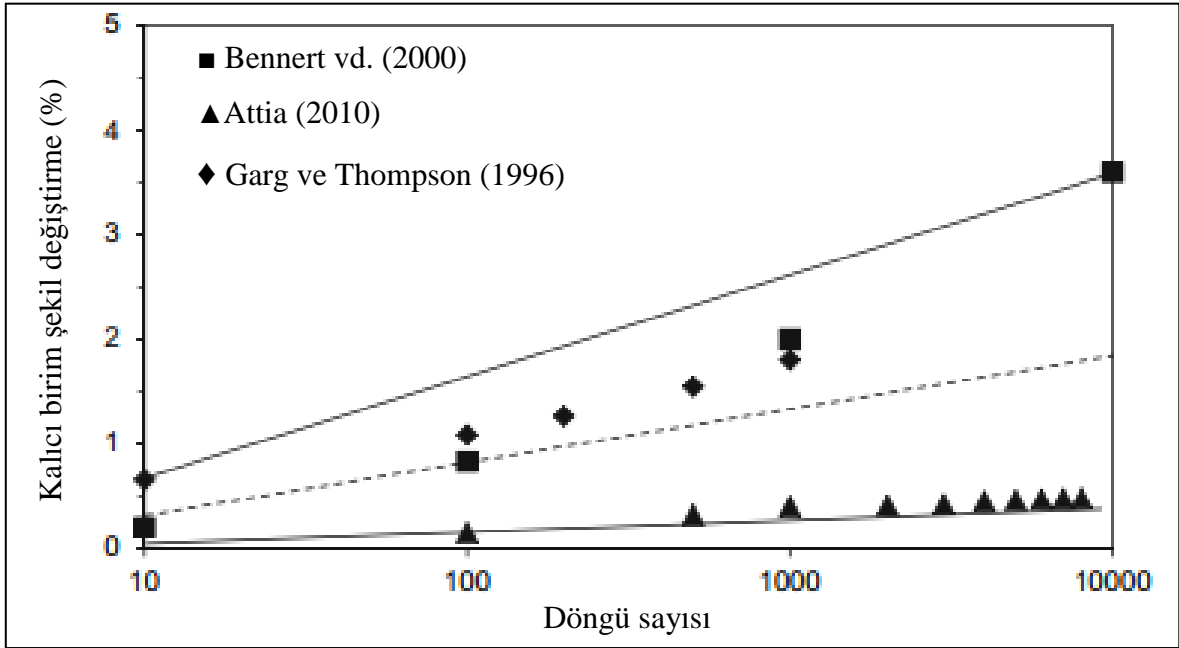


Şekil 6. Karışımdaki RAP oranının kalıcı birim şekil değiştirme üzerindeki etkisi (Thakur ve Han, 2015).

Bennert vd. (2000), Attia (2010), Garg ve Thompson (1996), ve Kim ve Labuz (2007), çalışmalarından elde ettikleri %50 RAP ve %100 RAP karışımlarının kalıcı birim şekil değiştirmeler ile yükleme-boşaltma döngü sayısı arasındaki ilişki Şekil 7'de sırasıyla gösterilmektedir (Thakur ve Han, 2015).



(a) %50 RAP-%50 DA karışımları



(b) %100 RAP-%0 DA karışımları

Şekil 7. Kalıcı birim şekil değiştirme-yükleme döngüsü arasındaki ilişki (Thakur ve Han, 2015).

Şekil 7'ye göre yükleme döngü sayısı arttıkça kalıcı birim şekil değiştirmelerde artış gözlemlenmiştir. %50 RAP karışımlarında Kim ve Labuz (2007) ve Attia (2010)'a göre yükleme-boşaltma döngü sayısı 10.000'e yaklaştıkça kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin azalan bir artış oranıyla artmaya devam ettiği görülmektedir. Buna karşın Bennert vd. (2000) döngü sayısının kalıcı birim şekil değiştirme miktarını lineer olarak arttırdığını belirtmektedir. Ayrıca karışımdaki RAP oranının artması kalıcı birim şekil değiştirme miktarının artmasına sebep olmuştur. Araştırmacıların elde ettikleri verilere göre %100 RAP malzemesinin yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı olarak kalıcı birim şekil değiştirme değerleri de sürekli artmaktadır.

Bennert ve Maher (2005) çalışmasında, RAP-DA karışımlarındaki RAP oranı arttıkça 100.000 yükleme-boşaltma döngüsü sonunca elde edilen yığılımlı kalıcı birim şekil değiştirmelerin %100 DA malzemesine kıyasla arttığını belirtmektedir. Ayrıca karışımdaki RAP oranındaki artışın, kalıcı birim şekil değiştirme oranını arttırdığı, bu sebeple en büyük kalıcı birim şekil değiştirmelerin %100 RAP malzemesinde elde edildiği sonucuna varılmıştır (Yuan vd. 2010).

Thakur ve Han (2015), CBR=%2 olarak zayıf ve CBR=%5 olarak da sağlam kabul ettiği iki farklı taban zemini üzerine yapılmış %100 RAP temel ile geocell ile güçlendirilmiş %100 RAP temelin performansını belirlemek için büyük ölçekli tekrarlı plaka yükleme testleri gerçekleştirmiştir. Temel tabakalarının kalınlıkları 15, 23 ve 30 cm'dir. Kullanılan plaka çapı 30 cm olup yükleme boşaltma döngüsü 0,5-40 kN periyodunda gerçekleştirilmiştir. Kalıcı deformasyonlar, yükleme-boşaltma döngü sayısı arttıkça artmaktadır. Kalıcı deformasyonun artış oranı yükleme-boşaltma döngüsü arttıkça azalmaktadır. Çalışma sonuçları göstermiştir ki; RAP katkılı temellerin kalıcı deformasyonu taban zemininin dayanımı, temel tabakasının kalınlığı ve geocell güçlendirmesi arttıkça azalmaktadır. Kalıcı deformasyon miktarı ilk birkaç yükleme-boşaltma yapıldığı anda hızla artmış, daha sonra azalan bir artış oranıyla deformasyonlar artmaya devam etmiştir.

Highter vd. (1997), RAP-DA karışımlarındaki RAP oranının artması durumunda daha büyük elastik deformasyon değerlerinin elde edileceğini belirtmişlerdir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Temel tabakası, taşıma gücü yeterli olan taban zemini veya alttemel üzerine teşkil edilen yol tabakasıdır. KTŞ'nde bitümsüz temel tabakası olarak, granüler temel (GT) tabakası, plent-miks temel (PMT) tabakası ve çimento bağlayıcılı granüler temel (ÇBGT) tabakası olmak üzere üç farklı tipte temel tabakası bulunmaktadır. PMT tabakasının gradasyon limitlerine göre farklı geçen yüzdeleri (%P) için tip-1 ve tip-2 olarak iki türü vardır (Tablo 7).

Tablo 7. PMT tabakaları için gradasyon limitleri (KTŞ, 2013).

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

PMT tabakası kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak Tablo 7'de verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı dane boyutundaki agreganın uygun oranda su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin KTŞ'de belirtilen şekilde serilmiş yüzey (taban zemini/alttemel) üzerine uygun olarak bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır. PMT tabakası kalınlığının 15 cm ve üzerinde olması durumunda PMT tip-1, kalınlığının 15 cm'den düşük olması durumunda ise PMT tip-1 veya tip-2 kullanılmalıdır (KTŞ, 2013).

PMT tabakası tasarım gradasyonuna uygun olarak hazırlanan ve modifiye proktor testi yöntemiyle bulunan  $V_{kmax}$  değerinin %100'üne sıkıştırılmış numunelerin yaş CBR değerleri de %120'den az olmamalıdır. Araziye serim sonrasında sıkışma kontrolü için erişilmesi istenilen minimum sıkışma yüzdesi, modifiye proktor testine göre hesaplanan yoğunluğun %100'üne eşit olmalıdır (KTŞ, 2013).

Bu tez çalışması kapsamında taş ocağından temin edilen DA malzemesinin üç farklı gradasyonda (0-7 mm, 7-19 mm, 19-38 mm) olduğu ve RAP malzemesinin de 0-25 mm dane boyutunda olduğu göz önüne alınarak en az üç farklı dane boyutu grubunun karıştırılmasıyla oluşturulan PMT tabakası tasarımı yapılmıştır. Tip-2 türü PMT tabakasının maksimum dane boyutunun 25 mm olduğu ve 15 cm'den düşük tabaka kalınlığı için kullanılması nedeniyle, DA maksimum dane boyu 38 mm olduğu ve 20 cm'lik bir PMT tabakası teşkil edilmesinden ötürü PMT tip-1 tabakası tasarım modeli olarak seçilmiştir.

Karayolu üstyapı performansı, çevresel ve trafik etkilerinin yanısıra kullanılan malzemelerin kalıcı deformasyon özellikleri ile de ilgili bir husustur. Kalıcı deformasyonların belirlenmesinde günümüzde sıklıkla kullanılan esneklik modülü testleri ve korelasyonları yol malzemelerinin bu özelliklerini tanımlamakta yetersiz kalmaktadır (Mohammad vd. 2006). Bu sebeple gerçek yol tabaka malzemelerinin karakterizasyonu için gerçek tabakalarla ve gerçek yüklemelerle elde edilen kalıcı deformasyonlar ve gerilmelerin belirlenmesi amacıyla testler yapılması yoluna gidilmiştir. Arazideki üstyapı tabakaları aynı tasarımla test tankı içerisine yerleştirilerek gerçek taşıt tekerleri yüklenmesine karşılık gelen yüklemeyle elde edilen deformasyon ve birim şekil değiştirmeler tekrarlı plaka yükleme testi ile incelenmiştir.

Bu çalışmada, KTŞ'nde PMT tabakası için belirtilen kriterleri sağlayan bir tasarım yapmak adına kullanılabilir RAP oranının artırılması amacıyla RAP malzemesi, DA ve puzolanik çimento ile karıştırılarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu bağlamda; temin edilen RAP malzemesinin DA ve çimento ile karışım oranları belirlenmiş elek analizi, modifiye proktor, yaş CBR ve permeabilite testleri gibi ön testler yapılmıştır. Daha sonra PMT tabakası için KTŞ kriterleri içerisinde kaldığına karar verilen en yüksek RAP oranlarına sahip karışım numuneleri 1 m × 1 m × 0,80 m ebatlarındaki test tankına yerleştirilerek tekrarlı plaka yükleme testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca referans olarak da %100 DA ile hazırlanan bir PMT tabakası da teste tabi tutulmuştur. Yük hücresi, birim şekil değiştirme ölçer ve LVDT (deformasyon ölçer) cetveller kullanılarak PMT



tabakasında meydana gelen yüzey deformasyonları ve birim şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Daha sonra maliyet analizleri yapılarak RAP malzemesinin kullanım oranına göre sağlanabilecek ekonomik kazançlar hesaplanmıştır.

## 2.2. Malzemeler

### 2.2.1. RAP Malzemesi

Bu çalışma, Karayolları Genel Müdürlüğü AR-GE Daire Başkanlığı ve Trabzon Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü tarafından desteklenmiştir. Trabzon Büyükşehir Belediyesi ekipleri tarafından sağlanan destek ile Trabzon İli Ortahisar İlçesi Fatih Mahallesi'nden yaklaşık 50 ton RAP malzemesi kazıma makinesiyle aşınma tabakasından kazınmıştır (şekil 8, şekil 9).



şekil 8. RAP malzemesinin kazınarak kamyonla yüklenmesi



Şekil 9. Kazıma makinesinin kristal uçlu dişleri

Kazınan yol üzerine yapılan araştırmalar, yolun 3 yıldır kullanıldığını ve yer yer bozulmaların (kopma, sökülme, timsah sırtı çatlaklar) başladığını, bu yüzden aşınma tabakasının değişmesi gerekliliğini göstermiştir. Malzeme yoldan kazınırken, kazı makinesi, yolu 5 cm kalınlığında ve ortalama %3-4 eğimle kazacak şekilde ayarlanmıştır. Aracın hızı 10-12 km/sa olarak belirlenmiştir. Maksimum dane boyu 25 mm olan RAP malzemesi kamyonlar aracılığıyla Karadeniz Teknik Üniversitesi ulaştırma laboratuvarına getirilmiş ve 2 m yüksekliğinde depolanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Depolanan RAP malzemesi

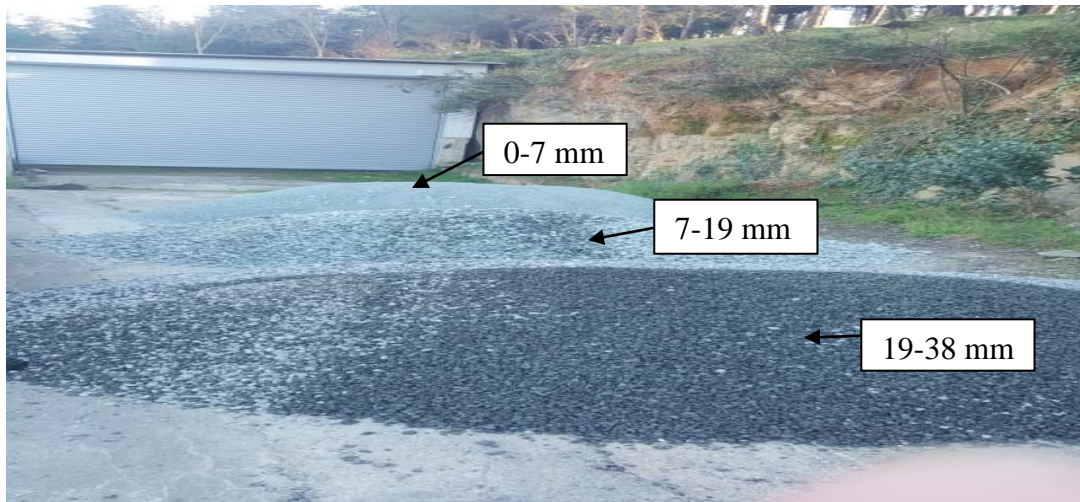
### 2.2.2. DA (Doğal Agreg) Malzemesi

0-7 mm, 7-19 mm, 19-38 mm olmak üzere 3 farklı dane boyut aralığındaki DA malzemesi Trabzon Esiroğlu mevkiinde bulunan Fernas taş ocağından temin edilmiş ve depolanmıştır. DA üzerinde yapılan rutin test sonuçları Fernas firmasından temin edilmiş olup Tablo 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8. DA malzemesinin test sonuçları

Test adı	Malzeme özellikleri	KTŞ kriterleri	Test standardı
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile kayıp, maksimum %	4,56	≤ 20	TS EN 1367-2
Aşınma kaybı (Los Angeles), %	12,0 (Tip B)	≤ 35	TS EN 1097-2, AASHTO T-96
Yassılık indeksi, %	13	≤ 25	TS EN 933-3
Su emme (kaba ve ince agreg), %	1,18	≤ 3,0	TS EN 1097-6
Likit limit (LL)	N.P.	N.P.	TS 1900-1, AASHTO T 89
Plastisite indeksi (PI)	N.P.	N.P.	TS 1900-1, AASHTO T 90

Tablo 8'de DA malzemesinin kaba ve ince danelerinin fiziksel özellikleri KTŞ'nde belirtilen kriterleri sağladığı görülmektedir. Taş ocağından alınarak Karadeniz Teknik Üniversitesi ulaştırma laboratuvarı önünde depolanan farklı gradasyondaki DA malzemeleri Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Farklı gradasyonlardaki depolanan DA malzemeleri

### 2.2.3. Çimento

Çimento, zengin kaynaklar ve düşük maliyet nedeniyle pek çok temel tabakası projesindeki en sağlam katkı malzemesidir (Yuan vd. 2010). Bu sebeple bu çalışmada, RAP karışımlarını stabilize etmek amacıyla çimento türleri içerisindeki en ucuz takviye malzemesi olarak puzolanik çimento tercih edilmiştir. Aşkale Çimento San. Tic. A.Ş. Trabzon Şubesi'nden temin edilen TS EN 197-1 standartlı çimentonun cinsi CEM IV 32,5 R'dir (TSE, 2012). Malzemenin özgül ağırlığı  $2,89 \text{ t/m}^3$  olup analiz raporu Ek 1'de sunulmaktadır. CEM IV tipi çimentoların hidrasyon ısıları düşük olup permeabiliteyi düşürücü etkileri vardır.

RAP-DA karışım numunelerinde kuru ağırlıkça %1, %2 ve %3 olmak üzere üç farklı çimento içeriği kullanılmıştır. Maksimum %3 oranında çimento kullanılmasının nedeni, çimento ile karıştırılan RAP karışımının No.200 elek altındaki materyal yüzdesinin KTŞ'ndeki PMT tabakası için belirtilen sınırı (en çok %10) aşmaması ve maliyeti de arttırmaması içindir. Yüksek çimento dozajları temel tabakası malzemesini çok sert bir hale getirerek yüksek sıcaklık koşullarında çatlaklara sebep olabilmektedir. Örneğin TxDOT temel tabakalarında kullanılabilir maksimum çimento oranını bu sebepten ötürü %2 ile %4 arasında sınırlamıştır (Rana 2004, Sebesta ve Scullion 2004).

## 2.3. RAP-DA ve RAP-DA-Çimento Karışım Numuneleri Üzerinde Yapılan Testler

### 2.3.1. Asfalt İçeriği Tayini

RAP malzemesi, Trabzon Fatih Mahallesi karayolunun aşınma tabakasının yıpranmış kesiminden temin edilmiştir. Soğuk geri dönüşüm yöntemiyle kazıma makinesi kullanılarak yerinden kazınmıştır. Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'ndeki ecotest asfalt analizatör cihazı kullanılarak test gerçekleştirilmiştir (Şekil 12). Çözücü kimyasal madde olarak trikloretilen kullanılarak TS EN 12697/1 standardına göre RAP malzemesinin asfalt içeriği (% AC) tayini yapılmıştır (TSE, 2013).



Şekil 12. Ecotest asfalt analizatör cihazı

### 2.3.2. Elek Analizi Testi ve Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Karışımların elek analizleri TS 3530 EN 933-1 standardına göre PMT tip-1 tabakası yapımında KTŞ'de belirtilen gradasyon limitleri esas alınarak çalışılmıştır (TSE, 2015). Öncelikle %100 RAP malzemesinin elek analizi yapılarak gradasyonu belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre RAP malzemesinin tek başına KTŞ'de yer alan PMT tabakası için belirtilen gradasyon limitlerini sağlayamadığı, ancak granüler temel tip-C'ye uygun olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan RAP malzemesi yol kaplaması yüzeyinden 0-25 mm boyutunda kazıma yapan kazıma makinesi dişleriyle kazındığı için ilaveten bir konkasörden geçirme işlemine ihtiyaç duyulmamıştır. Yalnız çok az da olsa birbirine yapışık haldeki agregalar için bir eleme işlemi yapılarak tüm malzeme maksimum dane boyutu 25 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Ayrıca kullanılan kazıma makinesi agregaları kırarak değil, RAP agregaları arasındaki bağlayıcı özelliğini yitirerek gevrek hale gelen yaşlanmış bitüm malzemesini kırarak işlem yaptığı için agregalarda kırılma olmamıştır.

RAP malzemesi kazınma esnasında makine dişlerin parçalama etkisiyle ve büyük parçaların istenilen gradasyona getirilmesi için konkasörden geçirilerek No.200 elek

altında kalan ince parçacık miktarı artabilmektedir. Bu sebeple literatürdeki bazı araştırmacılar, RAP malzemesinin ince içeriğini maksimum %10 ile sınırlandırmıştır. Ülkemiz KTŞ'nin PMT tip-1 tabakası için belirtmiş olduğu maksimum ince malzeme (No.200'den geçen) miktarı %10'dur. Bu çalışmada RAP malzemesi için yapılan elek analizi sonucunda No.200 elekten geçen malzeme miktarının %3,3 olduğu görülmüş, doğal agrega malzemesi ile karışım oranları belirlenirken şartname limitlerinin dışına çıkılmamasına özen gösterilmiştir.

RAP malzemesinin elek analizi sonuçları elde edildikten sonra taş ocağından alınan 0-7 mm, 7-19 mm, 19-38 mm olmak üzere 3 farklı boyuttaki kırmataş DA malzemesinin de ayrı ayrı elek analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarla %100 DA'dan oluşan PMT tabakası hazırlanmıştır. Daha sonra RAP-DA karışımları hazırlanarak PMT tip-1 tabakasına göre tasarım yapılmıştır.

%100 RAP ve %100 DA karışım malzemelerinden sonra RAP ve DA belirli oranlarda karıştırılarak [(%10 RAP - %90 DA), (%20 RAP - %80 DA), (%30 RAP - %70 DA), (%40 RAP - %60 DA), (%50 RAP - %50 DA), (%60 RAP - %40 DA)] gradasyon eğrilerinin KTŞ'nin alt-üst ve tolerans limitleri içerisinde kalmasına dikkat edilmiştir (Tablo 9).

Tablo 9. RAP-DA karışım numunelerinin oranları

Karışımında Ağırlıkça Kullanım Oranları (%)			
RAP	DA	RAP	DA
100	0	30	70
60	40	20	80
50	50	10	90
40	60	0	100

Tablo 9'da belirtilen karışım oranlarına ilaveten puzolanik çimento katkısının eklenmesi çalışmanın temel taşlarından biridir. RAP malzemesinin PMT tabakasında maksimum oranda kullanılabilmesi için öncelikle %100 RAP malzemesine ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında puzolanik çimento bağlayıcı katkı malzemesi olarak eklenmiş fakat çimentonun mineral filler bir malzeme olması ve dolayısıyla No.200 elek altında kalması sebebiyle ayrıca bir elek analizi testi uygulanmamıştır. %1, %2 ve %3 oranlarının seçimi yapılırken KTŞ'nde PMT tabakası için verilen No.200 elek altı malzeme limitleri göz

önünde bulundurulmuştur. Karışımlarda kullanılan çimento oranları Tablo 10'daki gibi belirlenmiştir.

Tablo 10. RAP-DA-çimento karışım numunelerinin oranları

Karışımda Ağırlıkça Kullanım Oranı (%)					
RAP	DA	Çimento	RAP	DA	Çimento
100	-	1	40	60	1
		2			2
		3			3
60	40	1	30	70	1
		2			2
		3			3
50	50	1	-		
		2			
		3			

Ganne (2009), Cosentino vd. (2012), Taha vd. (2002), Taha (2003), Ordonez (2006), Potturi vd. (2007), Guthrie vd. (2007), Baugh ve Edil (2008), Bleakley ve Cosentino (2013) ve Carmargo vd. (2009) yapmış oldukları çalışmalarda çimento oranını ağırlıkça %1 ile %7 aralığında kullanmışlardır.

Bölüm 3.1.4.'te görüleceği üzere %10 ve %20 RAP karışımları KTŞ'nde PMT tip-1 için belirtilen minimum %120 yaş CBR kriterini sağlamıştır. Bu oranlar için çimento takviyesine gerek duyulmamış, çimento takviyesine %30 RAP karışımından başlanmıştır.

### 2.3.3. Modifiye Proktor Testi

AASHTO T 180 standardına göre gerçekleştirilen modifiye proktor testinde karışım numunelerinin  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerleri belirlenmiştir (AASHTO, 2017). Çimentosuz RAP karışımlarının proktor testine ağırlıkça %2 başlangıç suyu ile başlanmıştır. Çimentolu RAP karışımlarında ise çimentonun su emme potansiyeli göz önünde bulundurularak başlangıç suyu %2-3 aralığında seçilmiştir.

Her bir karışım malzemesi için 5'er adet 6'şar kg'lık numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin su muhtevaları %1 oranında arttırılarak her bir numune en az 4 proktor

testine tabi tutulmuştur. Bu numunelerin sıkıştırma işlemi başlamadan önce içerisinde yaklaşık 400-600 gr ağırlığındaki malzeme daha sonra nem içeriğinin tespiti için ayrı bir kaba alınarak etüve konulmuştur. Bu işlem 6 kg'lık tüm numuneler için gerçekleştirilmiştir. Numuneler 152,4 mm iç çaplı, 116,4 mm gövde yüksekliğine sahip proktor kalıbına 5'er tabaka halinde serilerek her bir tabaka 4,5 kg ağırlığındaki tokmağın 56 kez düşürülmesiyle sıkıştırılmıştır (Şekil 13). Sıkıştırma işlemi bittikten sonra kalıbın üst yüzeyi tıraşlanarak fazla malzeme atılmış ve kalıbıyla beraber tartılarak yaş haldeki sıkıştırılmış numune + kalıp ağırlığı kaydedilmiştir.



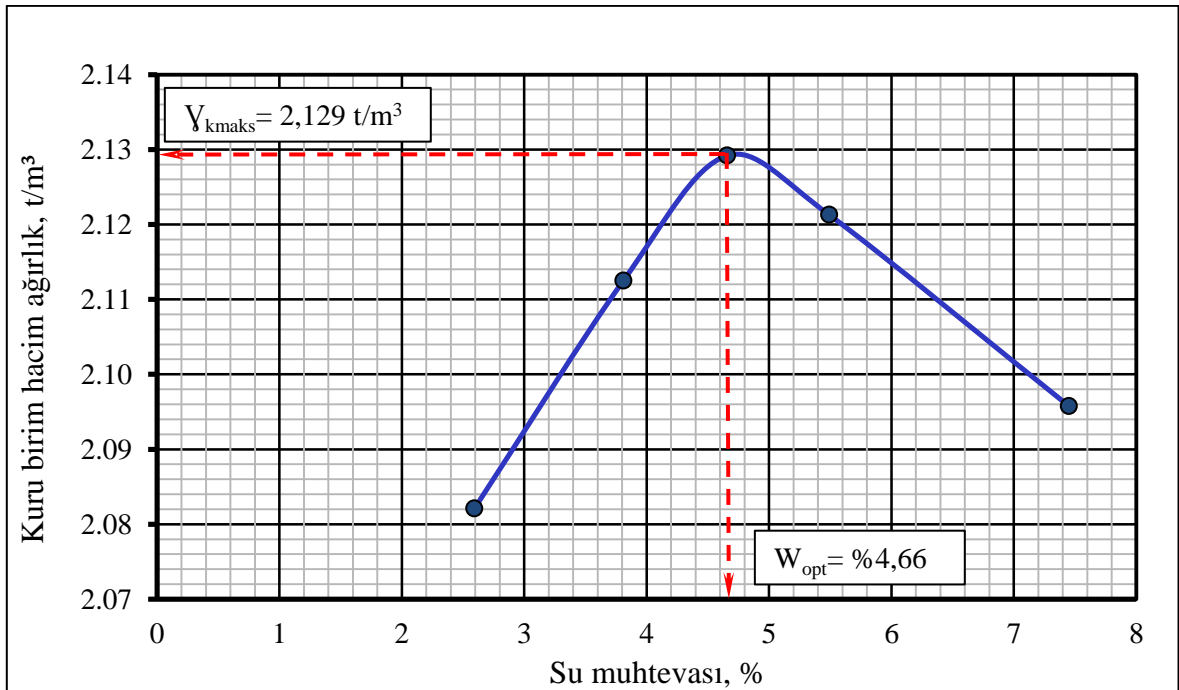
Şekil 13. Numunelerin modifiye proktor ile sıkıştırılması

Tablo 11'de %50 RAP oranındaki RAP-DA karışımının modifiye proktor testine ait hesaplamaların yapılışı örnek olarak gösterilmektedir. Bu tablodaki verilerden elde edilen  $V_{kmax}-W_{opt}$  grafiği ise Şekil 14'te verilmiştir. Grafiğe göre, tepe noktası malzemenin  $V_{kmax}$  değerini temsil etmekte, bu noktanın düşey izdüşümü ise  $W_{opt}$  değerini temsil etmektedir.



Tablo 11. %50 RAP karışım numunesinin modifiye proktor testi sonuçları

Kalip hacmi (V) :	944 cm <sup>3</sup>	Tokmak ağırlığı :	2,5 kg	Tek numune	
	2124 cm <sup>3</sup> X		4,5 kg X	Ayrı ayrı numuneler	X
<b>KURU BİRİM HACİM AĞIRLIĞIN SAPTANMASI</b>					
Kalıp numarası	5	5	5	5	5
Kalıp ağırlığı (w <sub>1</sub> ) g	2617	2617	2617	2617	2617
Kalıp + yaş numune ağırlığı (w <sub>2</sub> ) g	7154	7275	7350	7370	7400
Yaş numune ağırlığı (w <sub>2</sub> -w <sub>1</sub> ) g	4537	4658	4733	4753	4783
Yaş birim hacim ağırlık $\bar{Y} = (w_2 \cdot w_1) / V \text{ t/m}^3$	2,136	2,193	2,228	2,238	2,252
Su muhtevası (W) %	2,59	3,81	4,66	5,49	7,45
Kuru birim hacim ağırlık $\bar{Y}_k = (100 \cdot \bar{Y}) / (100 + W) \text{ t/m}^3$	2,082	2,113	2,129	2,121	2,096
<b>SU MUHTEVASININ SAPTANMASI</b>					
Kap numarası	4	5	6	7	2
Kap ağırlığı (w <sub>1</sub> ) g	87,23	84,53	94,98	92,71	94,43
Kap + yaş numune ağırlığı (w <sub>2</sub> ) g	423,99	482,51	467,58	469,26	455,00
Kap + kuru numune ağırlığı (w <sub>3</sub> ) g	415,48	467,90	451,00	449,66	430,00
Kuru numune ağırlığı (w = w <sub>3</sub> - w <sub>1</sub> ) g	328,25	383,37	356,02	356,95	335,57
Su ağırlığı (w <sub>m</sub> = w <sub>2</sub> - w <sub>3</sub> ) g	8,51	14,61	16,58	19,60	25,00
Su muhtevası $W = 100 \times (w_m / w_d) \%$	2,59	3,81	4,66	5,49	7,45
Maksimum kuru birim hacim ağırlık, $\bar{Y}_{kmaks}$ :	2,129	t/m <sup>3</sup>			
Optimum su muhtevası, $W_{opt}$ :	4,66	%			



Şekil 14. Kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği

### 2.3.4. Yaş CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) Testi

Çalışmada, modifiye proktor testi sonucu elde edilen optimum su muhtevalarında sıkıştırılmış karışım numunelerinin taşıma gücünü belirlemek amacıyla AASHTO T-193 standardına göre yaş CBR testi yapılmıştır (AASHTO, 2013). Numuneler 4 gün suda bekletilerek yaş CBR testi çimentolu ve çimentosuz RAP-DA karışımlarına uygulanmıştır (Şekil 15).

Test sonucunda 2,54 ve 5,08 mm'lik penetrasyon derinliklerindeki yaş CBR değerleri esas alınmıştır. CBR testleri Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü AR-GE Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 15. Yaş CBR testi numunelerinin sıkıştırılması ve su havuzuna yatırılması

CBR kalıbına konulan numunelerin üzerine, herbiri 2,270 kg ağırlığında olan 2'şer adet çelik ağırlık diski yerleştirilmiştir. Bu halde suda bekletilen numunelerin şişme yüzdesi değerleri de sudaki kalıpların üzerine yerleştirilen okuma saatleri sayesinde belirlenerek su etkisiyle numunelerde hacimsel değişiklik olup olmadığı incelenmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Yaş CBR testi su havuzu ve şişme yüzdesi için kullanılan okuma saati

### 2.3.5. Sabit Seviyeli Permeabilite Testi

Permeabilite, malzemenin boşluk oranıyla doğrudan ilgilidir. Karayolu kaplama tabakaları tamamen geçirimsiz yapılarak alt tabakalara yağış suların veya birikinti sularının geçişi engellenir. Fakat çevresel ve taşıt yükleri gibi sebeplerle zaman içinde deformasyona uğrayan kaplama tabakası çatlakların ve sökülmelerin etkisiyle geçirimsizlik özelliğini kaybeder. Bu durumda alttaki temel tabakasına su girişi başlar. Temel tabakasının geçirimsiz olması durumunda kaplama ile temel tabakası arasında su birikerek kaplamanın temelden ayrılmasına sebep olabilir. Temel tabakasının çok geçirimli olması durumunda ise, kaplamadan sızan su temel tabakasındaki bu boşluklara dolar ve bir boşluk suyu basıncı meydana getirir. Sızan sular, geçirgen zemin içinde kendine bir yol bularak alt

tabakalara inerek destek kaybına ve hatta göçmelere sebep olabilir. Ayrıca boşlukları dolduran suyun donma çözünme etkisiyle zeminde istenmeyen gerilmeler doğurabileceği ve kabarmalar oluşturarak kaplamada deformasyonlar oluşturacağı da aşikârdır. Temel tabakasından geçerek alttemel veya taban zeminine ulaşan su, destek kaybına ve yol yüzeyinde lokal oturmalara sebep olabilmektedir. Bu sebeple zeminlerin aşırı geçirimli veya aşırı geçirimsiz olması durumu, sorunları beraberinde getirmektedir. Geçirgen temel tabakasının temel işlevi, kabul edilebilir bir zaman çerçevesi içinde kaplama yüzeyinden sızan suları kaplama kenarına yana doğru yanal hareket ettirerek dağıtmaktır. Fakat geçirimli temel tabakası içindeki hava boşlukları yüzeyden su ile beraber gelen ince malzemelerle zaman içerisinde tıkanarak kaplamada ciddi deformasyonlar meydana getirebilir.

KTŞ'de temel tabakasının permeabilitesi ile ilgili herhangi bir kriterle rastlanmamıştır. Bu çalışmada PMT tabakası için elde edilen permeabilite testi sonuçlarının şartnamenin iyileştirilmesine ve uygulamalara da ışık tutması amaçlanmıştır.

Oluşturulan çimento takviyeli ve takviyesiz karışımların permeabilite katsayısının belirlenebilmesi için sabit seviyeli permeabilite testleri yapılmıştır. Ülkemiz genelinde yapılan sabit seviyeli permeabilite test çalışmaları kaba daneli agregaların permeabilitesini belirlemeye yönelik olmasına rağmen piyasada küçük çaplı permeabilite cihazları bulunmaktadır. Bu çalışmada kaba daneli agregaların kullanılması, büyük çaplı permeabilite silindirlerinin özel imalatı gerekliliğini doğurmuştur. Daha önce modifiye proktor testleri yapılarak  $V_{kmax}$  değerleri hesaplanan karışımlar, belirlenen  $W_{opt}$  değerlerine göre yeniden hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin permeabilite katsayılarının belirlenmesinde kaba daneli zeminler için ASTM D 2434'te önerilen sabit seviyeli permeabilite test cihazları kullanılmıştır (ASTM, 2015). BAP projesi kapsamında özel bir firmaya yaptırılan silindirler kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Sabit seviyeli permeabilite test silindirleri

Permeabilite testi, minimum %120 yaş CBR değerini sağlayan tüm RAP-DA karışımları ve kontrol numunesi olarak da %100 DA karışımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Permeabilite test silindirlerinin içine yerleştirilen malzemeler %100 modifiye proktor sıklığında hazırlanmıştır. RAP malzemesi içerisinde 3/8 in. elek üzerinde kalan malzeme miktarı toplam malzemenin %35'inden az olduğu için 162 mm çaplı silindir hücreler kullanılmıştır. RAP-DA karışımından oluşan malzemelerde ise 3/8 in. elek üzerinde kalan malzeme toplam malzemenin %35'inden fazla olduğu için 213 mm çaplı silindir hücreler kullanılmıştır. Bu bağlamda 162 mm çapındaki silindirler %100 RAP, %100 RAP - %1 çimento, %100 RAP - %2 çimento, %100 RAP - %3 çimento karışımlarının permeabilitelerinin ölçümünde kullanılırken 213 mm çapındaki silindirler; %100 DA, %10 RAP - %90 DA, %20 RAP - %80 DA, %30 RAP - %70 DA, %40 RAP - %60 DA, %50 RAP - %50 DA ve %60 RAP - %40 DA karışımları için kullanılmıştır. 162 mm çapındaki silindirin iç hacmi  $10.900 \text{ cm}^3$  iken, 213 mm çapındakinin  $20.750 \text{ cm}^3$ 'tür. Kullanılan permeabilite test silindirinin hacmine göre, içine koyulacak malzeme ağırlıklarının hesabında kullanılacak eşitlikler aşağıdaki gibidir.

$$w = \gamma_{\text{kmaks}} \times V_{\text{silindir}} + w_{\text{su}} \quad (1)$$

$$w = \gamma \times V_{\text{silindir}} \quad (2)$$

Burada;  $w$  silindire yerleştirilen malzeme ağırlığı (gr),  $\gamma_{\text{kmaks}}$  malzemenin kuru birim hacim ağırlığı ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ),  $V_{\text{silindir}}$  silindir hacmi ( $\text{cm}^3$ ),  $w_{\text{su}}$  karışıma eklenen su ağırlığı,  $\gamma$  malzemenin optimum su muhtevastındaki yaş birim hacim ağırlığıdır.

Silindirlere yerleştirilecek olan karışım malzemelerinin miktarları (1) No'lu eşitlikte olduğu gibi,  $\gamma_{\text{kmaks}}$  değerine göre hesaplanmış olup daha sonra  $W_{\text{opt}}$  kadar su ilave edilerek harmanlanmış ve permeabilite silindirlerine sıkıştırılmıştır. Böylece %98-100 modifiye proktor sıklığı sağlanmaya çalışılmıştır. Bu hesabın (2) No'lu eşitlikteki gibi karışımın  $\gamma$  değeri ile de yapılması mümkündür. Ancak su karıştırıldıktan sonra malzemelerin tartılmasının uygulamada zor olması sebebiyle (1) No'lu eşitlikten faydalanılmıştır. Silindirlere yerleştirilecek malzemelerinin ağırlıkları ve bu malzemeleri sıkıştırmak için kullanılması gereken su miktarları Tablo 12'de belirtilen değerler esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 12. Permeabilite silindirlerine yerleştirilecek malzeme ve su miktarları

	$\gamma_{\text{kmaks}}$ ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	$W_{\text{opt}}$ (%)	Silindir hacmi ( $\text{cm}^3$ )	Malzeme ağırlığı (kg)	Sıkıştırma için kullanılan su ağırlığı (kg)
%100 DA	2,230	6,00	20.750	46,27	2,776
%10 RAP - %90 DA	2,181	5,38	20.750	45,25	2,434
%20 RAP - %80 DA	2,150	5,10	20.750	44,61	2,275
%30 RAP - %70 DA	2,147	5,02	20.750	44,55	2,236
%40 RAP - %60 DA	2,136	4,92	20.750	44,32	2,180
%50 RAP - %50 DA	2,129	4,66	20.750	44,18	2,059
%60 RAP - %40 DA	2,042	4,31	20.750	42,37	1,826
%100 RAP	1,952	4,27	10.900	21,25	1,041
RAP - %1 çimento	1,979	4,30	10.900	21,57	0,927
RAP - %2 çimento	2,053	4,39	10.900	22,37	0,982
RAP - %3 çimento	2,092	4,60	10.900	22,80	1,049

Tablo 12'deki hesaplamalar doğrultusunda belirlenen sıkıştırmayı sağlayacak olan su, karışımlara ilave edilmiştir. Numuneler homojen bir görünüte elde edilecek şekilde bu su ile karıştırılarak hazırlanmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Permeabilite silindrine konulacak RAP malzemesinin harmanlanması

Tüm malzemenin silindire sığdırılabilmesi ve homojen bir sıkışmanın sağlanabilmesi amacıyla, hazırlanan karışımlar 162 mm çapında veya 213 mm çapındaki silindir permeabilite hücreleri içerisinde 5'er tabaka halinde yerleştirilmiş ve her bir tabaka el tokmağı yardımıyla %98-100 modifiye proktor sıklığı oluşacak şekilde sıkıştırılmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Malzemelerin silindire yerleştirilmesi ve sıkıştırılması

Tablo 12'deki hesaplamalara göre hazırlanıp silindirlere sıkıştırılan numunelerin kapağı kapatılıp test, ASTM D 2434 prosedürüne göre başlatılmıştır. Silindirin üst kapağındaki vana bir hortum vasıtasıyla çeşmeye bağlanmıştır. Permeabilite silindiri üzerinde belirli aralıklarla 3 adet vana bulunmaktadır. Vanalar arası düşey mesafe (L)162 mm çaplı silindir için en alttaki vanadan itibaren sırasıyla  $L_1= 32$  cm,  $L_2=16$  cm ve  $L_3=16$  cm'dir. 213 mm çapındaki silindir için ise  $L_1= 42$  cm,  $L_2=21$  cm ve  $L_3=21$  cm'dir. Çeşme açılarak silindire su girişi başlatılmıştır. Test silindirine üstten giren su, numune içinden geçtikten sonra silindir üzerindeki aşağıdan yukarı doğru 1, 2 ve 3 olarak numaralandırılan vanalara bağlanmış şeffaf su borularından geçerek cam tüplere ulaşmaktadır (Şekil 20).





Şekil 20. Sabit seviyeli permeabilite test sistemi

Numuneye giren su silindirin alt kısmındaki boru vasıtasıyla tahliye olmaktadır. 1, 2 ve 3 vanasından cam tüplere gelen suların yükseklikleri stabil hale geldiğinde su seviyeleri okunarak her bir vana için sırasıyla  $h_1$ ,  $h_2$  ve  $h_3$  olarak kaydedilmiştir (Şekil 21) .



Şekil 21. Cam tüplerdeki su seviyelerinin okunması

Daha sonra tahliye borusundan boşalan su 1000 cm<sup>3</sup>'lük cam vezüve kronometre tutularak yaklaşık 850-1000 cm<sup>3</sup> civarına kadar belirli sürede doldurulmuştur. Böylece t zamanda malzemeden geçen suyun hacmi (Q) belirlenmiştir (Şekil 22).



Şekil 22. t zamanda malzemeden geçen su hacminin belirlenmesi

Permeabilite katsayıları aşağıdaki (3) No'lu eşitliğe göre her bir vana için ayrı ayrı hesaplanarak sırasıyla  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  olarak belirlenmiştir. Bu üç vana için elde edilen k değerlerinin ortalaması alınarak tüm karışım numunelerinin permeabilite katsayıları  $k_{ort}$  olarak (4) No'lu eşitlikten ayrı ayrı tespit edilmiştir.

$$k_{1,2,3} = \frac{Q \times L}{A \times t \times h} \quad (3)$$

$$k = k_{ort} = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3} \quad (4)$$

Burada, k permeabilite katsayısı (cm/sn), Q t zamanında zeminden geçen suyun hacmi (cm<sup>3</sup>), L vanalar arası düşey mesafe (cm), A silindirin kesit alanı (cm<sup>2</sup>), t zaman (sn), h piyezometredeki su yükseklikleri farkıdır (cm).

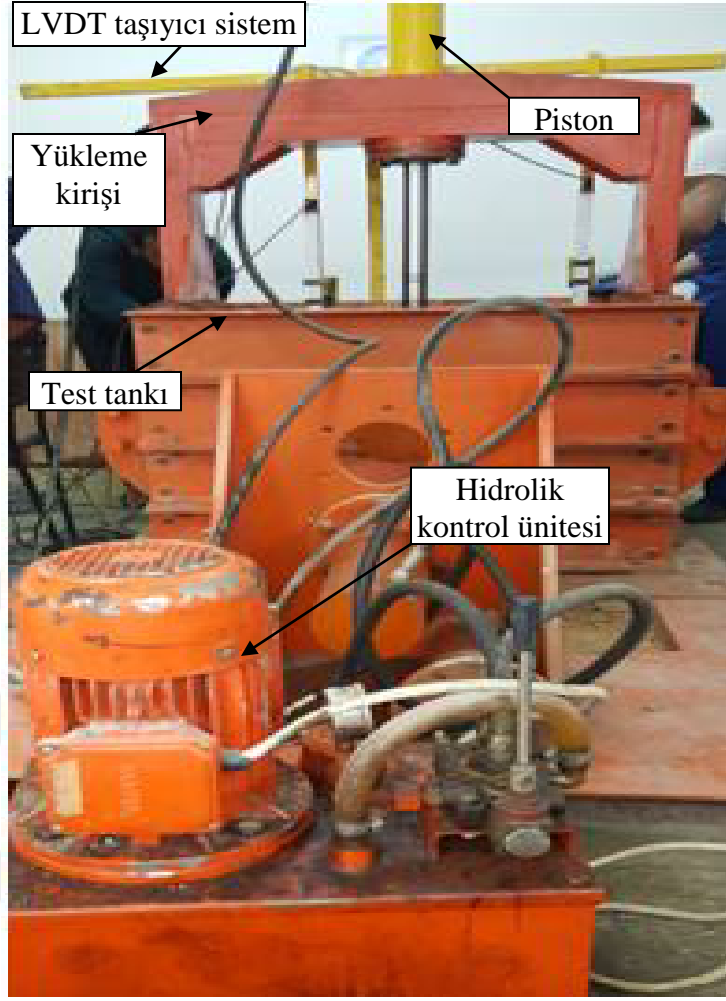
### 2.3.6. Tekrarlı Plaka Yükleme Testi

Uygulama yükü olarak, 550 kPa yükleme basıncı oluşturan 80 kN'luk çift tekerlek eşdeğer dingil yükünü temsil eden yükleme esas alınarak, 1 tekerin oluşturduğu yükleme olan 40 kN tatbik yükü olarak seçilmiştir. Karayolu üstyapı tasarımları için tekerlek izi, ondülasyon gibi hasarlara neden olan tekrarlı yüklemelerin temsil edildiği tekrarlı yükleme yapılan deneysel yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu sebeple tekrarlı yükleme altındaki yol tabakalarının deformasyonlarını belirleyebilmek adına Türkiye'de henüz kullanılmayan tekrarlı plaka yükleme testi kullanılmıştır.

#### 2.3.6.1. Test Ekipmanları ve Yükleme Sistemi

Tekrarlı plaka yükleme testi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği, 2010 yılında TÜBİTAK desteğiyle Trabzon Sanayi Sitesi'nde imal ettirilmiştir. Düzenek, temel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; malzemenin içine yerleştirildiği çelik tank, yükleme kirişine monteli piston ve hidrolik kontrol ünitesidir. Tank gövdesi, numunenin doldurulup boşaltılmasını kolaylaştırmak adına sökülüp takılabilir bloklardan oluşmaktadır. Piston, aşağı-yukarı yönde hareket edebilen, ucuna yükleme plakasının ve yük hücresinin bağlandığı bir sistem ile çalışmakta olup yatay bir kirişe sabitlenmiştir. Hidrolik kontrol ünitesi ise 3 kW kapasiteli elektrikli motor ve 20 litrelik yağ tankından oluşmaktadır. Bu ünite yarı otomatik bir kol ile kontrol edilmektedir.

Temel tabakasında oluşan düşey deplasmanların belirlenebilmesi amacıyla kullanılan LVDT cetveller (linear variable differential transducer, deplasman ölçer), sistem hareketinden kaynaklanan titreşimlerden etkilenmemesi adına düzenekten bağımsız olarak askıda imal edilmiştir. Test ekipmanları ve yükleme sistemi Şekil 23'te gösterilmektedir.

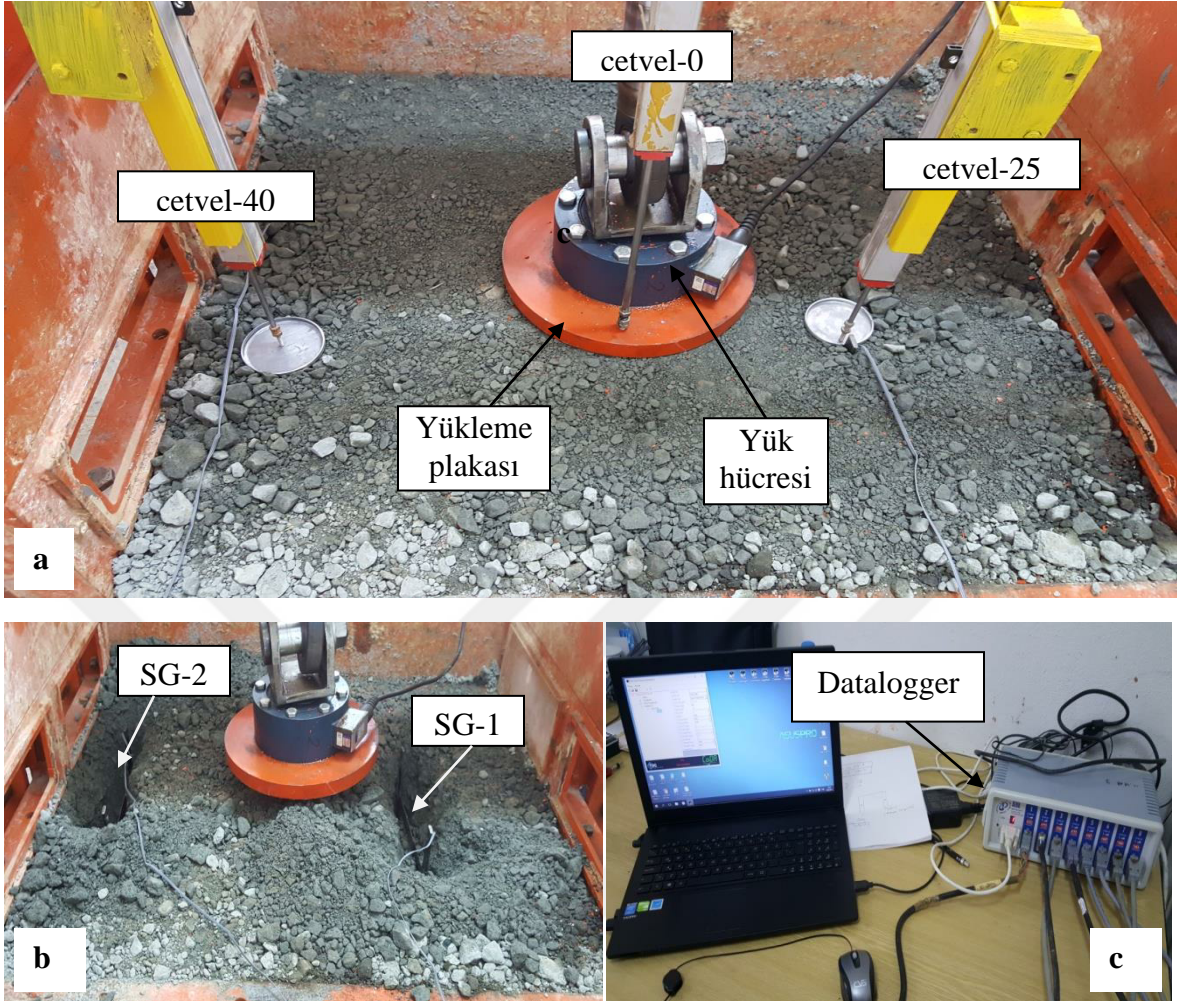


Şekil 23. Tekrarlı plaka yükleme test ekipmanları ve yükleyici sistem

### 2.3.6.2. Test Düzeneginde Kullanılan Ölçüm Sensörleri ve Konumlandırılması

Test, aşağıda özellikleriyle verilen ölçüm aletleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

- 3 adet LVDT cetvel (Şekil 24-a)
  - 2 adet 50 cm ölçüm kapasiteli: cetvel-25 ve cetvel-40
  - 1 adet 100 cm ölçüm kapasiteli: cetvel-0
- 1 adet 20 ton kapasiteli basınç-çekme yapabilen yük hücresi (Şekil 24-a)
- 2 adet -7500 ile +7500 microstrain arası ölçüm alabilen birim şekil değiştirme ölçer (strain gauge): SG-1 ve SG-2 (Şekil 24-b)
- 1 adet veri toplama ünitesi (Datalogger) (Şekil 24-c)



Şekil 24. Tekrarlı yükleme testinde kullanılan ölçüm sensörleri

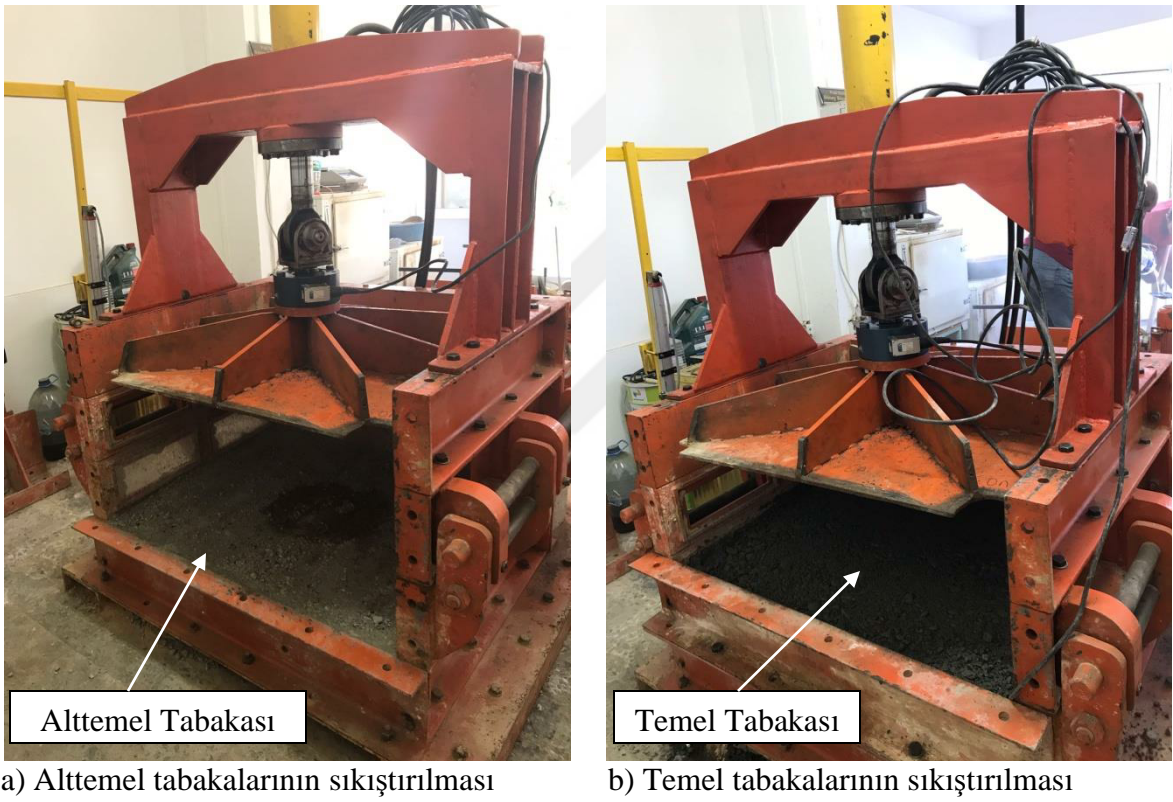
Yüzey deformasyonlarının tespiti için gerekli olan 3 adet LVDT cetvel, plaka merkezine (cetvel-0), plakadan 25 ve 40 cm uzaklığa (cetvel-25 ve cetvel -40) yerleştirilmiştir. Bu cetveller yükleme kirişi ve tank titreşiminden etkilenmemesi için ayrı bir taşıyıcı düzenek yapılarak bir taşıyıcı sistem üzerine monte edilmiştir.

Temel tabakası üzerindeki plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaklığa ise yatay olarak konumlandırılmış 2 adet birim şekil değiştirme ölçer (SG-1 ve SG-2) yerleştirilmiştir (Şekil 25).



### 2.3.6.4. Alttemel ve Temel Tabakaları Sıkıştırma Protokolü

Test tankının içerisine yerleştirilen malzemeler minimum %98-100 modifiye proktor sıklılığını sağlayacak şekilde serilmiştir. %100 DA malzemesinden oluşan alttemel tabakası ve karışım malzemelerinden oluşan temel tabakaları test tankının içerisine 5'er cm'lik sıkıştırılmış halde toplam kalınlık 20 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Alttemel ve temel tabakalarının sıkıştırma işlemi, 0,95 m × 0,80 m ebatlarında bir çelik plakanın yükleme pistonunun ucuna monte edilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 26).



Şekil 26. Alttemel ve temel tabakalarının sıkıştırılması

Test tankı içerisine yerleştirilecek temel ve alttemel malzemelerinin miktar hesapları Tablo 13'te gösterilen hesaplara göre yapılmıştır.

Tablo 13. Test tankına yerleştirilen malzeme miktar hesabı tablosu

	$\gamma_{kmaks}$ (t/m <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ , (%)	Tank hacmi (m <sup>3</sup> ) (20 cm için)	$G_{20}$ (kg)	$G_5$ (kg)	$G_{su}$ (kg)	$G_{\%3\text{çim.}}$ (kg)
	A	B	$C=0,995 \times 0,845 \times 0,2$	$D=A \times C \times 0,98$	D/4	$B \times D/4$	$D/4 \times \%3$
% 100 DA (alttemel)	2,23	6	0,1681	374,86	93,71	5,62	0
% 100 DA (temel)	2,23	6	0,1681	374,86	93,71	5,62	0
%20 RAP - %80 DA	2,15	5,1	0,1681	354,19	88,54	4,52	0
%60 RAP - %40 DA - %3 çimento	2,10	4,82	0,1681	345,95	86,49	4,17	2,59
%100 RAP - %3 çimento	2,092	4,6	0,1681	344,63	86,16	4,15	2,58

$G_{20}$ : 20 cm'e %98 modifiye proktor sıklığında yerleştirilmesi gereken malzeme ağırlığı

$G_5$ : 5 cm'e %98 modifiye proktor sıklığında yerleştirilmesi gereken malzeme ağırlığı

$G_{su}$ : Sıkıştırma için kullanılması gereken su ağırlığı

$G_{\%3\text{çim.}}$ : %3 çimento ağırlığı

%100 DA'dan oluşturulan alttemel tabakasının ve karışımlardan oluşturulan temel tabakasının minimum %98 modifiye proktor sıklığını sağlayabilmek için, belirlenen malzeme miktarlarının, belirtilen tank hacmine yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, yapılan ön çalışmalarda yükleme pistonu aracılığıyla 10 çevrim yaparak her bir çevrimde 20 ton kapasiteye kadar yükü arttırmak koşuluyla %98 ve üzerinde sıkışmanın gerçekleştiği görülmüştür. Teste tabi tutulan tüm karışım numuneleri aynı sıkıştırma protokolü izlenerek sıkıştırılmıştır (Şekil 27). Alttemel tabakası ve temel tabakaları istenen sıklık derecesine kadar sıkıştırıldıktan sonra sıkıştırma levhası çıkartılarak yükleme plakası sisteme takılmıştır.





Şekil 27. Tabakalar halinde serilip sıkıştırılmış alttemel tabakası

### 2.3.6.5. Tatbik Edilecek Yükün Belirlenmesi

Tekrarlı plaka yükleme testinde plakaya pistonun uygulaması gereken yük, rastgele seçilmeyip literatüre bağlı kalınarak araziden alınmış ölçümlerdeki ağır taşıt dingil yükü (dingilin her iki tarafında eşit dağılmış tekerlek yükleri) esas alınmıştır.

Tekrarlı plaka yükleme testinde pistonun uyguladığı maksimum yük, 40 kN'luk tek bir tekerlek yükünü (80 kN'luk bir aks yüküne ve 550 kPa'lık bir lastik temas basıncına eşdeğer) simüle etmek üzere seçilmiştir (Thakur vd. 2012, Pokharel 2010, Yang 2010).

Her bir çevrimde yük, 0 kN'dan 40 kN'a kadar arttırılmış, daha sonra yük boşaltılarak 0 kN'a düşürülmüştür. Böylece yükleme-boşaltma çevriminden oluşan bir yükleme prosedürü gerçekleştirilmiştir. Elde olan imkânlar çerçevesinde otomatik yükleme boşaltma yapan bir cihaz temin edilememesi sebebiyle yükleme-boşaltma prosedürü manuel olarak yapılmıştır. Bu durum, yüklemenin yapılması esnasında nadiren de olsa yükün 40 kN'un üzerine çıkmasına bazen de her bir çevrimin eşit sürelerde tamamlanmamasına neden olmuştur.

### 2.3.6.6. Uygun Plaka apının Belirlenmesi

Kullanılan plaka çapı 30 cm olarak seçilmiştir. Arazide gerçek tekerlek yukleri altında bir araç tekerleğinin kaplama tabakasının st yüzeyinde meydana getirdiği gerilme, kaplama tabakasından temel tabakası st sınırına doğru daha geniş bir alana yayıldığı için sönümlenerek ilerler. zcanan (2014), Pokharel (2010), Yang (2010) ve Thakur (2011)'e göre temel tabakası st yüzeyinde bir tekerleğin temel tabakası st yüzeyinde oluşturduğu basınç 550 kPa'dır. Bir tekerleğin eşdeğer teker dingil yüküne (ESAL) göre 40 kN yükleme yaptığı düşünülürse 550 kPa basınç oluşturabilmesi için uygulama alanının 727,3 cm<sup>2</sup> olması gerekmektedir. Bu uygulama alanını oluşturan en yakın plaka çapı olarak 706,8 cm<sup>2</sup> uygulama alanına sahip 30 cm çaplı dairesel plaka seçilmiştir.

### 2.3.6.7. Test için Hazırlanan PMT Tabakaları

Karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen elek analizi ve yaş CBR testi sonuçlarından PMT tip-1 tabakası için KTş'nde belirtilen kriterleri sağlayan; %100 DA, %20 RAP-%80 DA, %60 RAP-%40 DA-%3 imento ve %100 RAP-%3 imento karışimleri üzerinde tekrarlı plaka yükleme testi yapılmıştır.

#### 2.3.6.7.1. %100 DA Karışımı

%100 DA malzemesi 0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm boyutlarındaki agregaların karışımından elde edilmiştir. Toplam karışımın ağırlıkça %44'n 0-7 mm'lik malzeme, %30'unu 7-19 mm'lik malzeme ve %26'sını ise 19-38 mm'lik malzeme oluşturmaktadır. Hazırlanan karışımın  $V_{kmaks}$  değeri 2,23 t/m<sup>3</sup> olup,  $W_{opt}$  değeri ise %6'dır. 0,1681 m<sup>3</sup>'lk hacme sahip olan test tankına %98-100 modifiye proktor sıklılığında yerleştirilen 374,86 kg'lık malzeme %6 su muhtevasına denk gelen 5,62 kg su ile karışırılarak 20 cm'lik temel tabakası 5'er cm'lik 4 tabaka halinde hazırlanmıştır.

Bölüm 2.3.6.2.'de belirtilen, ölüm sensörlerinin konumlandırılması esas alınarak aynı şekilde tüm karışimler hazırlanmış ve teste hazır hale getirilmiştir.

### 2.3.6.7.2. %20 RAP-%80 DA Karışımı

%20 RAP-%80 DA karışım malzemesi ağırlıkça %20'si 0-25 mm boyutundaki RAP malzemesinden, %80 ise 0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm'lik DA malzemesi oluşturmaktadır. %80 DA malzemesindeki agregaların ise %34'ünü 0-7 mm'lik malzeme, %22'sini 7-19 mm'lik malzeme ve %24'ünü ise 19-38 mm'lik malzeme oluşturmaktadır. Hazırlanan karışımın  $V_{kmax}$  değeri  $2,15 \text{ t/m}^3$  olup,  $W_{opt}$  değeri ise %5,10'dur.  $0,1681 \text{ m}^3$  lük hacme sahip olan test tankına %98-100 modifiye proktor sıklığında yerleştirilen 354,19 kg'lık malzeme %5,10 su muhtevasına denk gelen 4,52 kg su ile karıştırılarak 20 cm'lik temel tabakası 5'er cm'lik 4 tabaka halinde hazırlanmıştır.

### 2.3.6.7.3. %60 RAP-%40 DA-%3 Çimento Karışımı

%60 RAP-%40 DA-%3 çimento karışım malzemesi ağırlıkça %60'ı 0-25 mm boyutundaki RAP malzemesinden, %40 0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm'lik DA malzemesinden oluşmakta olup karışımın üzerine toplam ağırlığın %3'ü kadar çimento takviyesi yapılmıştır. Kullanılan çimento ağırlığı 2,59 kg'dır. %40 DA malzemesindeki agregaların ise %18'ini 0-7 mm'lik malzeme, %11'ini 7-19 mm'lik malzeme ve %11'ini ise 19-38 mm'lik malzeme oluşturmaktadır. Hazırlanan karışımın  $V_{kmax}$  değeri  $2,10 \text{ t/m}^3$  olup,  $W_{opt}$  değeri ise %4,82'dir.  $0,1681 \text{ m}^3$  lük hacme sahip olan test tankına %98-100 modifiye proktor sıklığında yerleştirilen 345,95 kg'lık malzeme %4,82 su muhtevasına denk gelen 4,17 kg su ile karıştırılarak 20 cm'lik temel tabakası 4 tabaka halinde hazırlanmıştır.

### 2.3.6.7.4. %100 RAP-%3 Çimento Karışımı

%100 RAP-%3 çimento karışım malzemesi 0-25 mm boyutundaki RAP malzemesi ile hazırlanan karışıma takviye olarak ağırlıkça %3 çimento ilave edilmesiyle oluşturulmuştur. Kullanılan çimento ağırlığı 2,58 kg'dır. Hazırlanan karışımın  $V_{kmax}$  değeri  $2,092 \text{ t/m}^3$  olup,  $W_{opt}$  değeri ise %4,60'dur.  $0,1681 \text{ m}^3$  lük hacme sahip olan test tankına %98 modifiye proktor sıklığında yerleştirilen 344,63 kg'lık malzeme %4,60 su muhtevasına denk gelen 4,15 kg su ile karıştırılarak 20 cm'lik temel tabakası 5'er cm'lik 4 tabaka halinde hazırlanmıştır.

### **3. BULGULAR VE İRDELEME**

Bu kısımda RAP, DA, RAP-DA karışımları ve çimento takviyeli karışımlar üzerinde gerçekleştirilen testlere dayalı elde edilen bulgular sunulmuştur ve bu bulguların irdelenmesi yapılmıştır.

#### **3.1. RAP, RAP-DA ve RAP-DA-Çimento Karışım Numunelerine Ait Test Bulguları**

##### **3.1.1. Asfalt İçeriği Analizi Bulguları**

RAP malzemesi üzerinde KGM laboratuvarında gerçekleştirilen ekstraksiyon testi sonucunda RAP malzemesinin %AC değeri %3,72 olarak tespit edilmiştir. Literatürdeki bazı araştırmacıların buldukları sonuçlar da %3,5 ile %5,5 arasında değişmektedir. (Locander 2009, Güngör vd. 2008, Potturi 2006).

##### **3.1.2. Elek Analizi Test Bulguları**

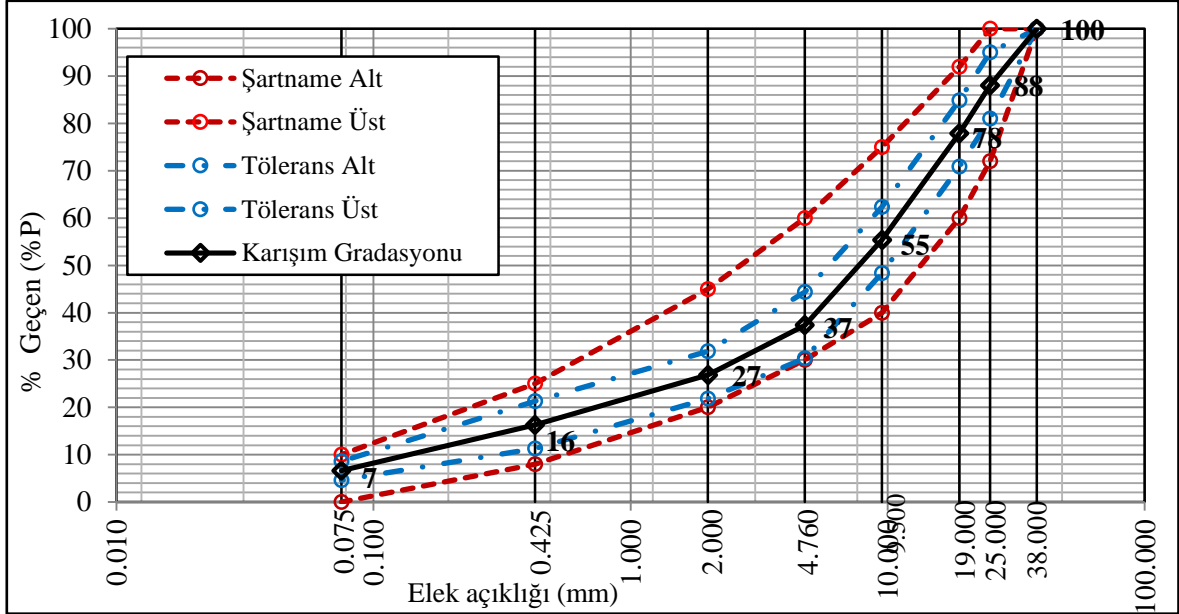
###### **3.1.2.1. Çimento Takviyesiz Karışımların Elek Analizi Test Bulguları**

RAP malzemesi kazıma makinesinden maksimum dane boyutu 25 mm olacak şekilde kazanmıştır. Yalnız çok az da olsa birbirine yapışmış haldeki 25 mm'den büyük parçalar sebebiyle bir eleme işleminden geçirilerek maksimum RAP malzemesi dane boyutu 25 mm olarak ayarlanmıştır.

Yurtdışındaki pek çok kurum ve kuruluş maksimum RAP dane boyutunu 40 mm ile sınırlandırmıştır. Maksimum RAP boyutu için dikkat edilmesi gereken kural, sıkıştırılmış haldeki tabaka kalınlığının 1/3'ünden daha büyük parça olmaması gerektiğidir (URL-5). Sıkıştırılmış haldeki PMT temel tabakasının 20 cm teşkil edileceği düşünüldüğünde maksimum dane boyutunun 67 mm olabileceği ve bu çalışmadaki 25 mm'nin uygun bir dane boyutu olduğu belirlenmiştir.

Trabzon Fernas taş ocağından temin edilen 3 farklı tipteki (0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm) malzeme üzerinde gerçekleştirilen elek analizi testlerinden elde edilen %100 DA

karışımının gradasyon eğrisi ve PMT tip-1 temel tabakası için belirtilen şartname limitleri Şekil 28'de gösterilmektedir.



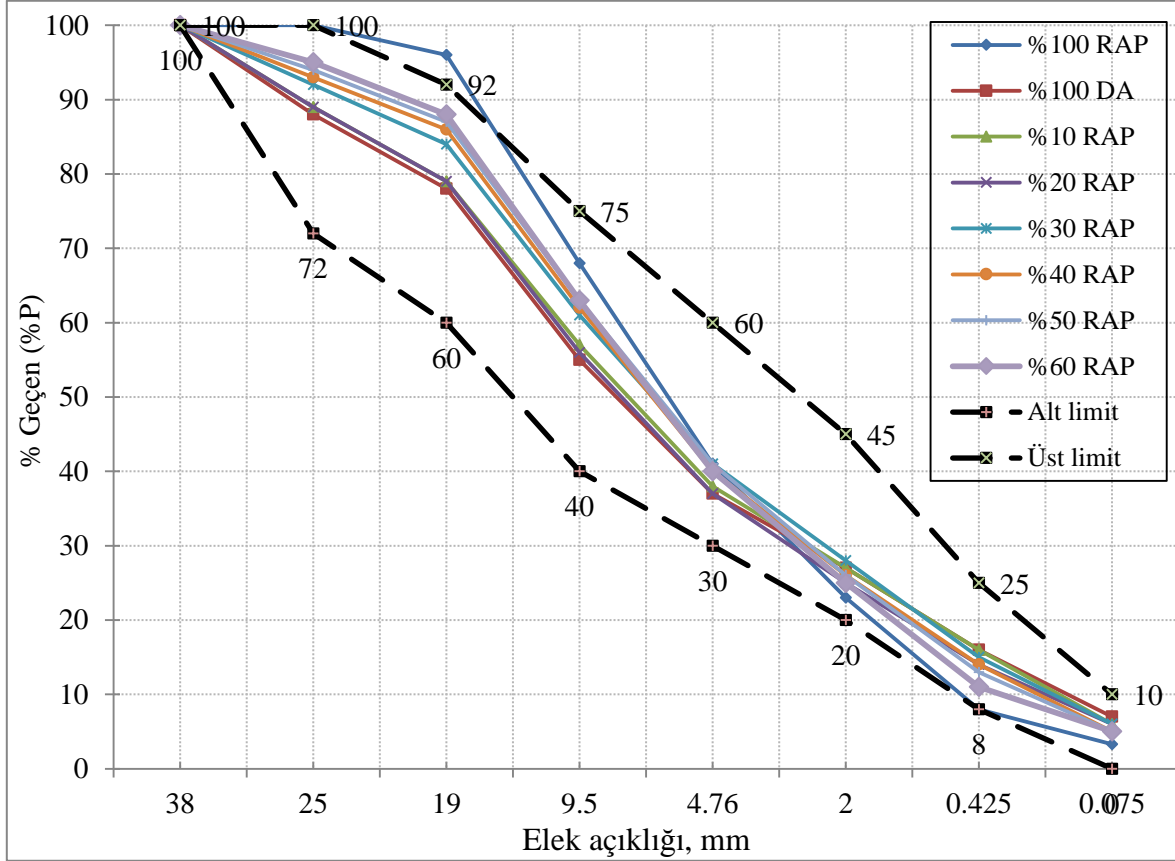
Şekil 28. % 100 DA malzemesinin gradasyon eğrisi ve şartname limitleri

Tüm malzeme numuneleri üzerinde yapılan elek analizi test sonuçları ve PMT tabakaları için belirtilen KTŞ gradasyon alt ve üst limitleri Tablo 14'te gösterilmektedir.

Tablo 14. Elek analizi test sonuçları

Elek açıklıkları		RAP	DA	%10 RAP-%90 DA	%20 RAP-%80 DA	%30 RAP-%70 DA	%40 RAP-%60 DA	%50 RAP-%50 DA	%60 RAP-%40 DA	KTŞ limitleri (KTŞ, 2013)	
										PMT Tip-1	
mm	in.									Alt	Üst
38	1 ½	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
25	1	100	88	89	89	92	93	94	95	72	100
19	¾	96	78	79	79	84	86	87	88	60	92
9,5	¾	68	55	57	56	61	62	63	63	40	75
4,76	No.4	41	37	38	37	41	40	41	40	30	60
2	No.10	23	27	27	25	28	26	26	25	20	45
0,425	No.40	8	16	16	14	15	14	13	11	8	25
0,075	No.200	3,3	7	6	6	6	5	5	5	0	10

Malzemelerin elek analizi sonucunda elde edilen gradasyon eğrileri ve KTŞ'nde PMT tip-1 tabakası için belirtilen alt ve üst limitler Şekil 29'da gösterilmektedir.



Şekil 29. RAP-DA karışımlarının gradasyon eğrileri ve şartname limitleri

RAP malzemesinin 19-25 mm arasında kalan malzeme miktarının KTŞ üst limitini bir miktar aştığı görülmüştür. Fakat diğer tüm karışımların ve %100 DA'nın gradasyon eğrileri alt ve üst limitler arasında kalmıştır. RAP malzemesinin ince içerik (No.200 elek altı) miktarı da %3,3 olarak belirlenmiştir. Bu değer KTŞ PMT tip-1 tabakası için belirtilen No.200 elek altı malzeme için maksimum %10 oranının oldukça altında bir değerde olduğu gözlenmiştir. Bu durum aynı zamanda çalışma kapsamında çimento kullanılması durumunda mineral filler miktarının şartname limitlerini aşmayacağını göstermiştir. RAP malzemesi için No.200 elekten geçen malzeme miktarı Sullivan (1996)'a göre %10'dan, Rathje vd. (2002) ve McGarrah (2007)'a göre %5'ten daha az olmalıdır.

RAP karışımlarındaki ince içerik miktarı, deformasyon özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Fazla ince malzeme içeriği kalıcı deformasyon eğilimlerini

arttırmaktadır. Bu çalışmada elde edilen elek analizi bulguları göstermiştir ki; RAP malzemesinin ince içeriği %3,3 olarak literatürde araştırmacıların maksimum sınır olarak belirledikleri %5-10 sınırının oldukça altındadır. Ayrıca PMT tabakası için KTŞ'nin önerdiği maksimum %10 sınırının da altında bir değerdir. Bu durum, RAP malzemesinden yapılacak bir PMT tabakası için daha düşük deformasyonların elde edileceği hususunda bir ipucu vermektedir. Ayrıca takviye malzemesi olarak kullanılan çimentonun mineral filler bir malzeme olması sebebiyle ince içeriği arttıracak fakat limitlerin dışına çıkmasının, ancak çok büyük oranlarda kullanılması durumunda gerçekleşeceği düşünülmüştür. Çimento kullanımında kısıtlayıcı kıstas olarak, fazla oranda çimento kullanımının malzemeyi gevrekleşmesi gibi olumsuz özellikler doğurabileceği ihtimali olmuştur.

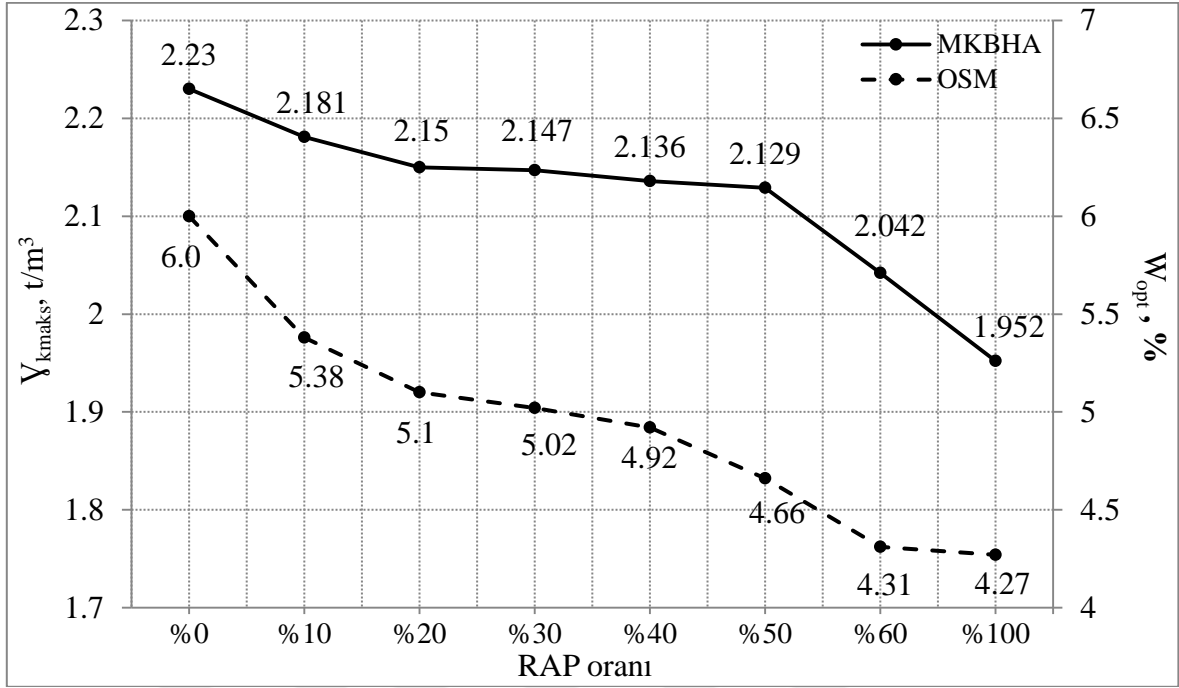
### **3.1.2.2. Çimento Takviyeli Karışımların Elek Analizi Bulguları**

Hazırlanan karışımlarda çimento kullanılmadan RAP malzemesinin PMT tabakası için gerekli minimum CBR değerini (%120) sağlayan maksimum RAP oranı %20'dir. Bu oranı arttırmak ve böylece geri dönüşüm malzemesinden daha fazla faydalanmak için RAP karışımlarına ağırlıkça %1-3 arasında puzolanik çimento ilave edilerek minimum %120 yaş CBR değerini sağlayan RAP karışımları belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca modifiye proktor ve permeabilite testleri de yapılarak yoğunluk, su muhtevası ve geçirgenlik üzerindeki çimento etkisi de araştırılmıştır. Çimentonun, mineral filler bir malzeme olması sebebiyle No.200 elek altında kalan yüzdeyi az bir miktar arttırmasından dolayı şartname limitlerinin dışına çıkmayacağı düşünülerek çimento takviyeli karışım numuneleri için ilaveten bir elek analizi testine gerek duyulmamıştır.

### **3.1.3. Modifiye Proktor Testi Bulguları**

#### **3.1.3.1. Çimento Takviyesiz Karışımların Modifiye Proktor Testi Bulguları**

Elek analizinden elde edilen karışım gradasyonunda hazırlanan numunelerin  $V_{kmax}$  ve  $W_{opt}$  ilişkileri modifiye proktor testi ile ayrı ayrı tespit edilmiş olup sonuç grafikleri Şekil 30'da gösterilmektedir.



Şekil 30. RAP-DA karışımlarının modifiye proktor testi sonuçları

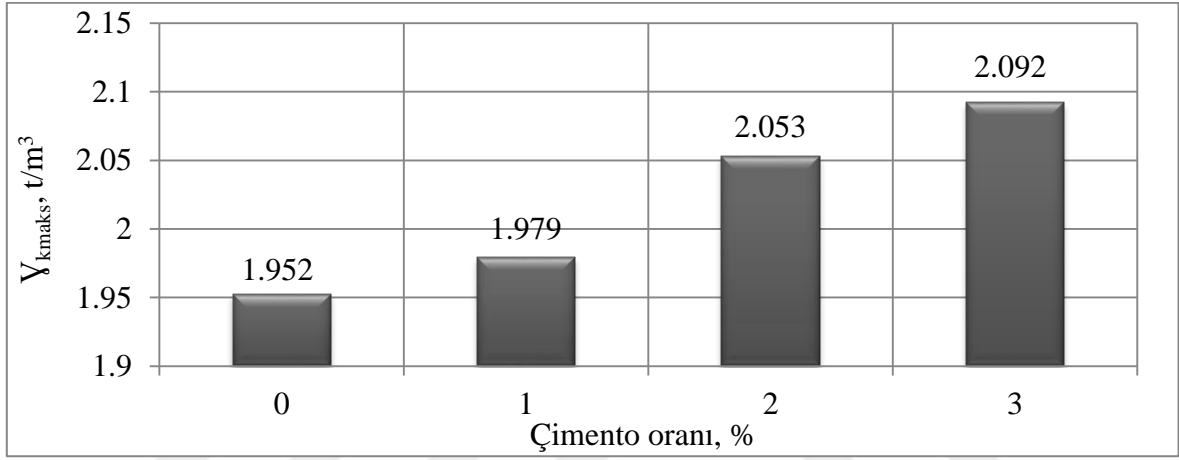
RAP malzemesi için modifiye proktor testi sonucu tespit edilen  $V_{kmaks}$  değeri  $1,952 t/m^3$  olup literatürdeki ortalama değer olan  $2 t/m^3$  değerine oldukça yakındır (Chesner 1998, Saeed 2008, Camargo vd. 2009, Wen vd. 2010, Guthrie vd. 2007). Şekil 6'da görüldüğü üzere karışımdaki RAP oranı arttıkça  $V_{kmaks}$  değeri azalmaktadır. Bu durum literatürü destekler niteliktedir (Hoppe vd. 2015, Wu 2011). Asfaltla kaplı RAP agregaları, DA ile tam bir sıkışma sağlamadan  $V_{kmaks}$  değerinde artışa neden olamayacaktır. Çünkü RAP agregalarının üzerinin sıkıştırmayı engelleyen asfalt ile kaplı olması nedeniyle, RAP-DA karışımının  $V_{kmaks}$  değeri, RAP içeriği arttıkça azalma eğilimi gösterir (Senior vd. 1994, Taha vd. 1999, McGarrah 2007). Ayrıca RAP agrega yüzeyini saran bitümün ince malzemeleri birleştirerek ve agregalar arasını doldurmak suretiyle sıkışmayı sağlayacak olan ince malzeme miktarını azaltması sebebiyle agregalar arası kenetlenmeyi engellediği de düşünülmektedir.

RAP malzemesinin optimum su muhtevası %4,27 olarak belirlenmiş olup, literatürle kıyaslandığında makul sınırlar içerisinde olduğu gözlemlenmiştir (%4-7,5) (Chesner vd. 1998, Saeed 2008, Carmargo vd. 2009). Karışımdaki RAP oranı arttıkça  $W_{opt}$  değerleri azalmaktadır. Yani RAP eklendikçe önceden karışımda yer alan DA malzemesinin yerini etrafı bitümlerle kaplı olan RAP malzemesi alır. Bu sebeple daha az su ile maksimum sıkışma elde edilmiştir (Mokwa ve Peebles 2005, Guthrie vd. 2007, Hoppe vd. 2015, Wu 2011).



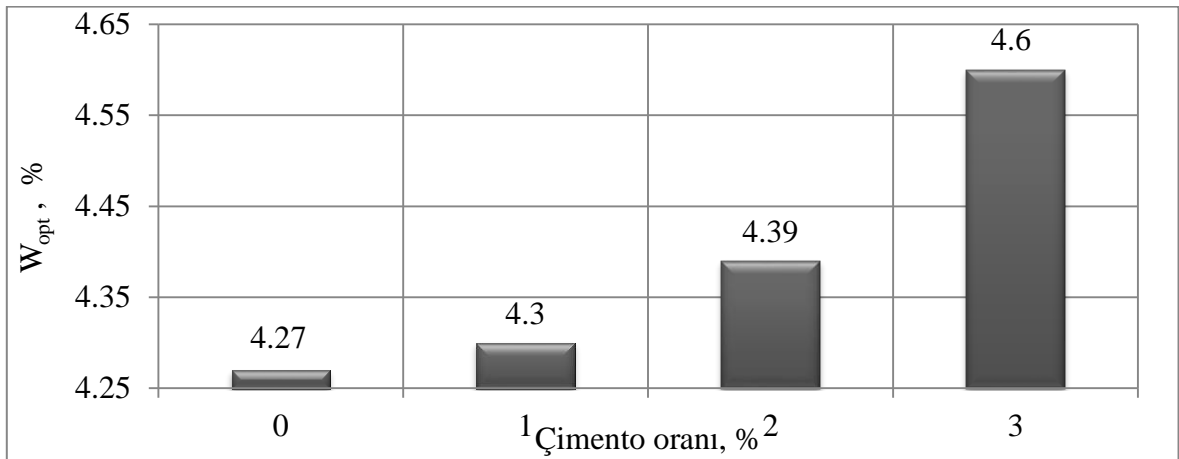
### 3.1.3.2. Çimento Takviyeli Karışımların Modifiye Proktor Testi Bulguları

%100 RAP ve RAP-DA karışımlarına ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranında çimento katkısı eklenmek suretiyle numuneler hazırlanmış ve modifiye proktor testleri gerçekleştirilerek  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerleri belirlenmiştir. Çimentonun %100 RAP malzemesinin  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerleri üzerindeki etkisi Şekil 31 ve Şekil 32'de gösterilmektedir.



Şekil 31. %100 RAP malzemesi için çimento oranı -  $V_{kmaks}$  ilişkisi

Çimento takviyeli RAP malzemesinde, çimento oranı arttıkça  $V_{kmaks}$  değeri de artmaktadır. %3 oranında bir çimento takviyesi, %100 RAP malzemesinin  $V_{kmaks}$  değerinde %7 civarında bir artış meydana getirmiştir.



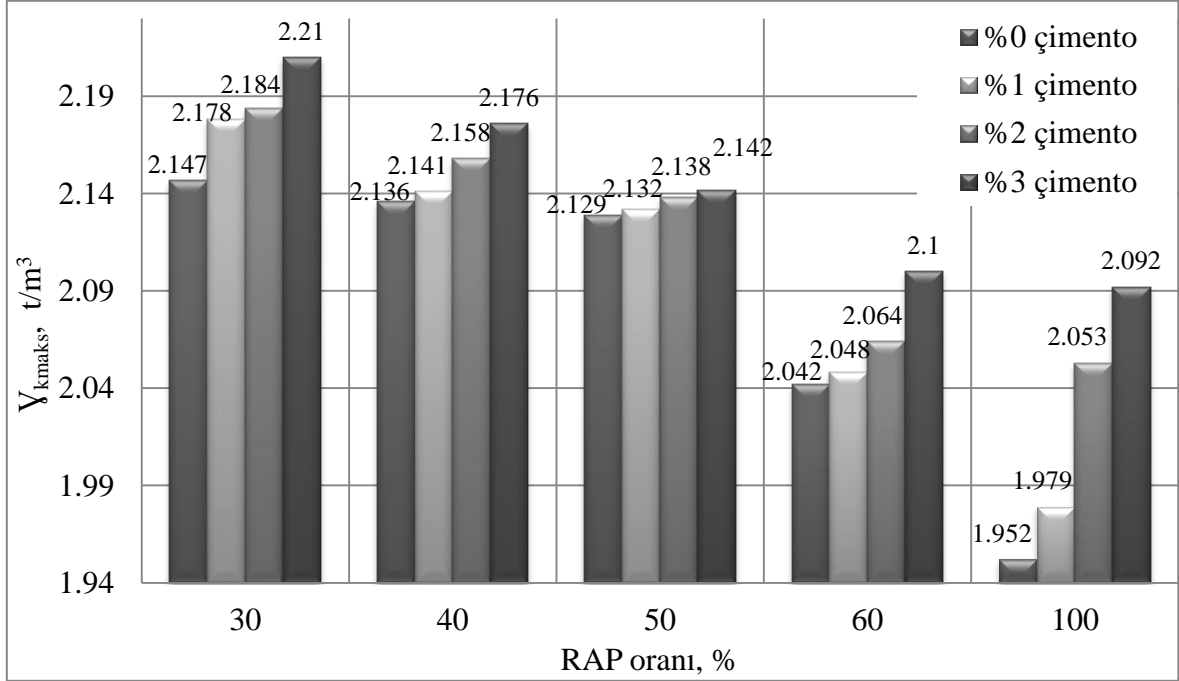
Şekil 32. %100 RAP malzemesi için çimento oranı -  $W_{opt}$  ilişkisi

%100 RAP malzemesine çimento eklendikçe  $W_{opt}$  değerlerinde artış saptanmıştır. Çimento gibi su emme kapasitesi yüksek bir malzemenin bu artışı doğurması makul görülmüştür. En fazla %3 oranında çimento eklenmiş ve testler bu sınıra kadar yapılmıştır. Bu uygulamanın sebebi %3 çimentonun üzerine çıkılması durumunda RAP malzemesinin ince içeriğin artmasına bağlı olarak aşırı ince içeriğin sebep olduğu düşük taşıma kapasitesi, temel tabakasının don hassasiyetinde artış gibi sakıncaların doğabileceği (Barksdale ve Itani, 1989) ve No.200 elek altındaki malzeme yüzdesinin KTS sınırlarının dışına çıkma ihtimalinin olabileceği düşünülmüştür.

Bölüm 3.1.4.'te görüleceği üzere %20 ve altındaki oranlardaki RAP malzemesinin %120 CBR değerini sağlaması sebebiyle karışımlara çimento takviyesi uygulanmamıştır. %30 ve üzeri oranlarda RAP içeren DA-RAP karışımlarının  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerlerinin çimento oranına bağlı değişimi Tablo 15'teki gibi olup bu değerlere göre çizilen grafik Şekil 33 ve Şekil 34'de gösterilmektedir.

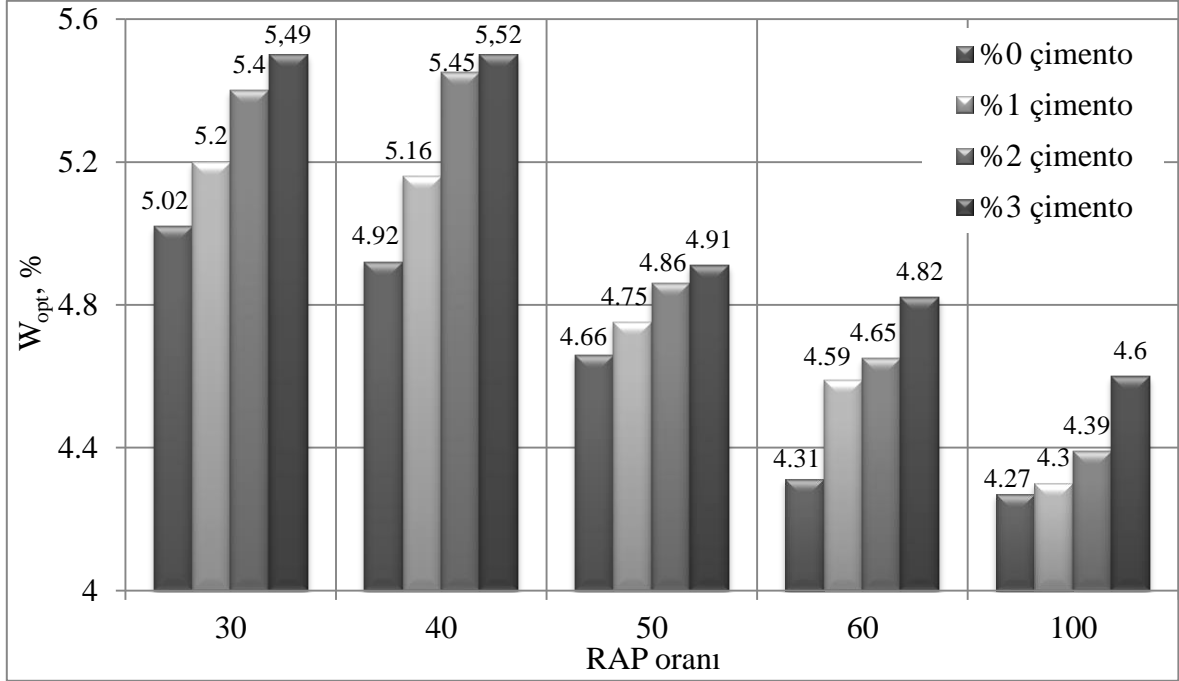
Tablo 15. RAP-DA karışımlarının  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerlerine çimentonun etkisi

RAP (%)	DA (%)	Çimento (%)	$V_{kmaks}$ (t/m <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)
30	70	0	2,147	5,02
40	60		2,136	4,92
50	50		2,129	4,66
60	40		2,042	4,31
100	0		1,952	4,27
30	70	1	2,178	5,20
40	60		2,141	5,16
50	50		2,132	4,75
60	40		2,048	4,59
100	0		1,979	4,30
30	70	2	2,184	5,40
40	60		2,158	5,45
50	50		2,138	4,86
60	40		2,064	4,65
100	0		2,053	4,39
30	70	3	2,21	5,50
40	60		2,176	5,50
50	50		2,142	4,91
60	40		2,100	4,82
100	0		2,092	4,60



Şekil 33. DA-RAP-çimento karışımlarının  $V_{kmaks}$ -RAP oranı ilişkisi

Şekil 33'te tüm karışımlarda, ilave edilen çimento oranı arttıkça  $V_{kmaks}$  değerlerinde artış gözlenmiştir. RAP oranının daha düşük olduğu %30 RAP karışımında bu artış daha belirgin iken özellikle %50 RAP karışımında artış oranı %0,2'ye düşmektedir. Yuan vd. (2010) çalışmasında RAP-DA karışımına ilave edilecek her %1'lik çimento artışının  $V_{kmaks}$  değerinde 0,01 t/m<sup>3</sup>'lük bir artışa neden olduğunu belirtmiştir. Şekilden elde edilen veriler ışında aynı şekilde her %1'lik çimento artışı minimum 0,003 t/m<sup>3</sup>'lük bir artışa neden olmuştur. Ayrıca çimentonun %1'lik artışı  $V_{kmaks}$  değerlerinde %0,1 ile %1,7 arasında bir artışa neden olmuştur.



Şekil 34. DA-RAP-çimento karışımlarının  $W_{opt}$ -RAP oranı ilişkisi

Şekil 34'te görüldüğü gibi tüm karışımlarda, ilave edilen çimento oranı arttıkça  $W_{opt}$  değerlerinde %2 ile %6 arasında değişen oranlarda artış gözlenmiştir. Çimento oranının artmasıyla  $W_{opt}$  değerinin artış oranı azalmakla birlikte artmaya devam etmiştir. RAP-DA karışımına ilave edilen her %1'lik çimento ilavesinin  $W_{opt}$  değerini %1 ile %6 arasında arttırdığı görülmüştür.

Taha vd. (2002), çalışmasında RAP-DA karışımlarındaki çimento oranının artmasıyla  $W_{opt}$  ve  $Y_{kmaks}$  değerlerinin arttığı sonucuna varmıştır. Bu sonuçlar kullanılan çimentonun cinsine de bağlı olarak değişebildiği göz önüne alınmakla birlikte paralel sonuçların elde edildiği söylenebilmektedir.

### 3.1.4. Yaş CBR Testi Bulguları

#### 3.1.4.1. Çimento Takviyesiz Karışımların Yaş CBR Testi Bulguları

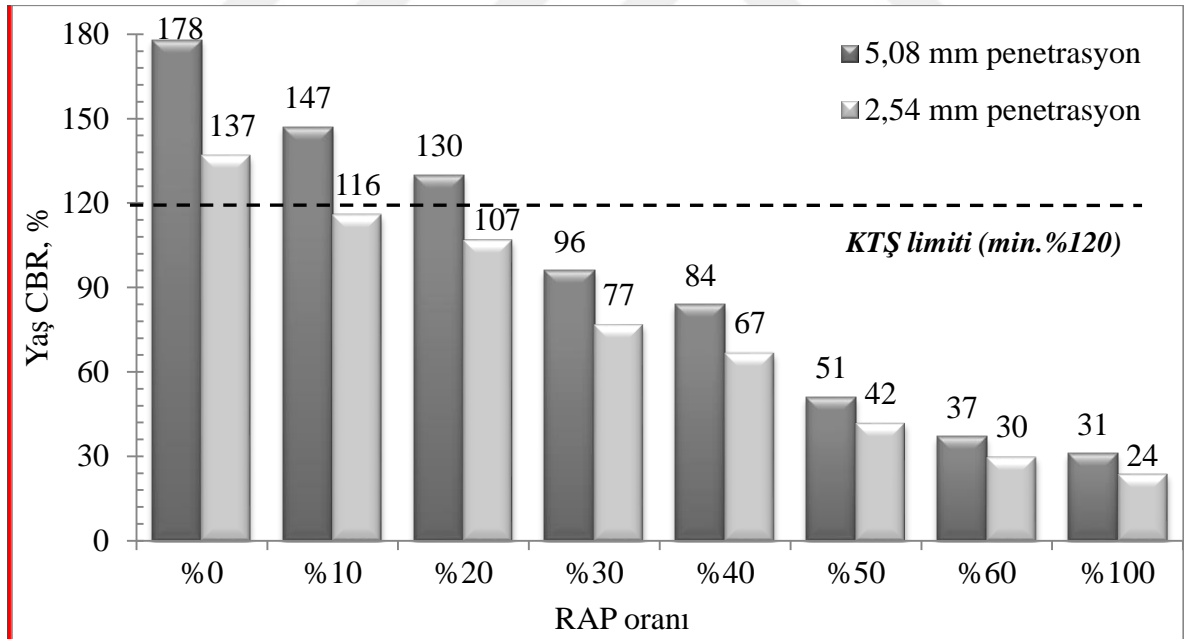
Yaş CBR testi için 4 gün suda bekletilen numunenin tüm boşlukları tamamen suya doymun hale geldiğinde, en düşük taşıma gücündeki mukavemeti belirlenebilmektedir. Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'nde gerçekleştirilen yaş CBR testleri sonucunda 2,54 ve

5,08 mm penetrasyon derinliklerinde elde edilen CBR değerleri Tablo 16'da gösterilmektedir. Ayrıca tabloya göre çizilen grafikler de Şekil 35'te gösterilmektedir.

Tablo 16. RAP-DA karışımlarının yaş CBR test sonuçları

	Penetrasyon derinliği (mm)	%100 DA	%10 RAP	%20 RAP	%30 RAP	%40 RAP	%50 RAP	%60 RAP	%100 RAP
Yaş CBR (%)	2,54	137	116	107	77	67	42	30	24
	5,08	178	147	130	96	84	51	37	31

CBR değeri için 2,54 mm batmayı sağlayan CBR değeri kullanılır. Eğer 5,08 mm batmadaki CBR değeri daha büyükse test tekrarlanır. Yine aynı sonuç elde edilirse bu CBR değeri esas alınır (Tunç, 2007). Bu sebeple en yüksek CBR değerini veren bu penetrasyon derinliğindeki değer numunenin CBR değeri olarak kullanılmıştır.



Şekil 35. Farklı penetrasyon derinlikleri için %RAP - CBR ilişkisi

Gradasyonun CBR değeri üzerinde büyük bir etkisi vardır. Agregaların parça şekli ve gradasyonlarındaki farklılıklar CBR değerinin bir miktar değişmesine neden olmuştur. Şekil 36'da görüldüğü üzere RAP oranı arttıkça CBR değeri lineere yakın bir biçimde

azalmaktadır. Literatürdeki araştırmacılar da RAP malzemesinin CBR üzerinde olumsuz etkisi olduğunu ve karışımdaki RAP oranı arttırıldıkça CBR değerinin yani taşıma kapasitesinin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır (Ayan 2011, Benner ve Maher 2005, Senior vd. 1994, Chesner vd. 1998).

Chesner vd. (1998) çalışmasında %100 RAP malzemesinin %20-25 CBR değerine sahip olduğunu ve RAP oranının %40'a düşürülmesi durumunda CBR değerinin %150'nin üzerine çıkarak yaklaşık 7,5 kat arttığını belirtmiştir.

KTŞ'nin PMT tip-1 tabakası için belirttiği minimum yaş CBR kriteri %120'dir. Şekil 36'ya göre bu değeri sağlayan karışım oranları %10 ve %20 RAP oranındaki RAP-DA karışımları ve %100 DA olmuştur. CBR testinde büyük CBR değerini veren penetrasyon değerindeki okuma, malzemenin CBR değeri olarak kullanıldığından (Tunç, 2007), %10 ve %20 RAP içerikli karışımların 5,08 mm penetrasyondaki CBR değerleri şartname kriterini sağlamıştır. Fakat daha yüksek RAP oranındaki karışımlar şartname limitinin altında kalmıştır.

RAP malzemesinin etrafını saran bitüm, malzemenin suya doygunluğunu ve su ile sarılmasını önemli ölçüde kısıtladığından istenilen sıkışma gerçekleşmemektedir. Buna sebep olan etmenlerin başında bitümlle kaplı RAP malzemesi DA ile tam bir aderans sağlamaması gelmektedir. Aderans sağlanamaması durumunda da CBR değerinde pozitif bir artış meydana gelebilecektir. Bu sebeple %100 DA numunesinde en büyük CBR değerleri elde edilmiştir. RAP yüzdesi arttıkça CBR değeri azalmıştır.

Yaş CBR testi sonuçlarına göre en yüksek CBR değeri %100 DA kullanılması durumunda elde edilirken, test sonuçları incelendiğinde karışımdaki RAP oranının artması CBR değerinin azalmasına neden olmaktadır. RAP malzemesinin CBR değeri için 5,08 mm penetrasyondaki değeri alınarak %31 olarak belirlenmiştir. Taha vd. (1999) çalışmasında %100 RAP malzemesinin CBR değerinin %11 olduğunu, Chesner vd. (1998) ve Potturi (2006) %20-25 arasında olduğunu tespit etmiştir. Bu değerler baz alındığında bu çalışmada kullanılan RAP malzemesinin diğer araştırmacıların kullandığı RAP malzemesinden daha mukavim olduğu çıkarımı yapılabilir. Yalnız RAP malzemesinin gradasyonu, parça şekli ve diğer tüm fiziksel ve mekanik özellikleri hatta yapılan CBR türü (yaş/kuru) bile CBR sonuçlarını etkiler niteliktedir. Ülkemizde kazınan aşınma tabakalarının ilk yapım şartları, şehirden şehire bile farklılıklar gösterirken, yapılan bu çalışmanın yurtdışındaki RAP malzemeleriyle kıyaslanacak olduğunda ortaya çıkan bu durum beklenen bir sonuçtur.

4 gün su havuzunda bekletilen numune kalıplarının üzerinde bulunan okuma saatlerinden, malzemenin suda kaldığı müddetçe şişme yüzdesi belirlenmiştir. Bünyesine su alan malzemede meydana gelen kabarma miktarı, okuma saatinin göstergesinden okunarak malzemenin yaş CBR şişme yüzdesi olarak kaydedilmiştir. Çalışmada kullanılan RAP malzemesinin şişme yüzdesi %0,03 olarak tespit edilmiş olup, bu değer sifıra çok yakın bir değer olduğundan şişmesinin olmadığı kabul edilebilmektedir. Bu sebeple bazı numuneler 4 günden daha fazla süre suyun içinde bekletilmiş ve değişimin olmadığı gözlemlenmiştir.

FDOT (2013) ve Ooi (2010), temel tabakası için sağlanması gereken CBR değerinin en az %80 olması gerektiğini belirtirken, KTŞ'nde PMT tip-1 tabakası için belirtilen minimum yaş CBR değeri %120'dir. %120 yaş CBR değerini sağlayan, PMT tabakası yapımında çimento takviyesi olmadan hazırlanan numuneler içerisinde kullanılmaya en uygun olan karışımların %20 ve daha az RAP oranlarında olduğu görülmüştür.

### 3.1.4.2. Çimento Takviyeli Karışımların Yaş CBR Testi Bulguları

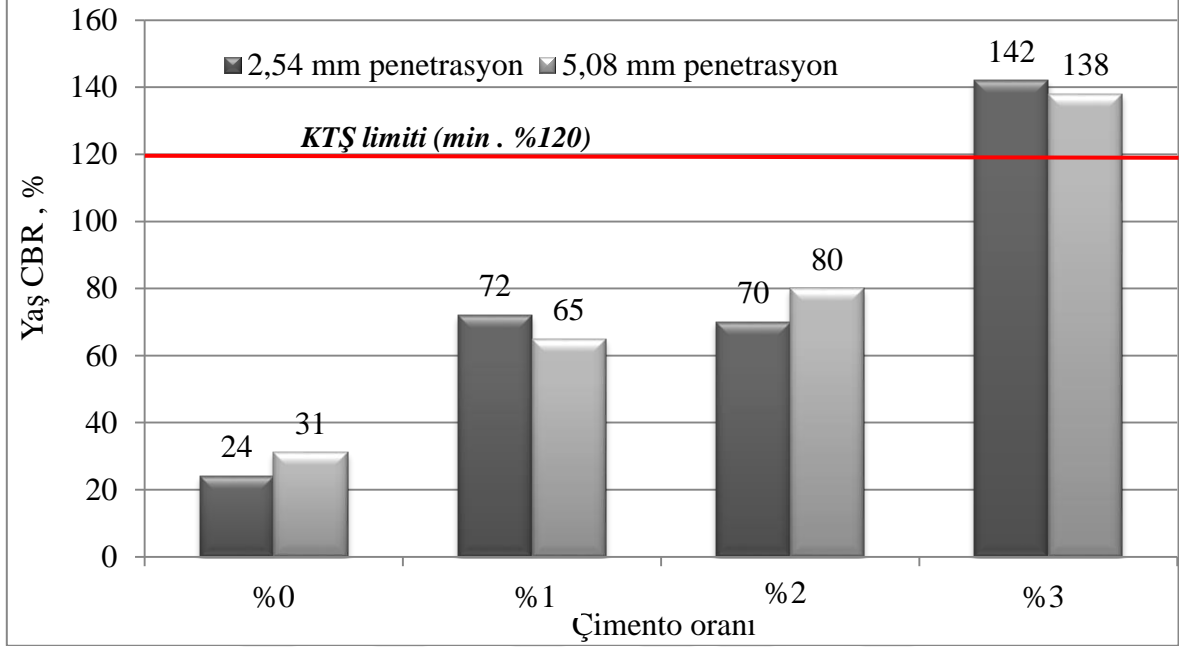
Çimento takviyesiz RAP-DA karışımlarının PMT temel tabakası için sağlanması gereken minimum %120 yaş CBR değeri, %20 ve daha düşük RAP içerikli karışımlarda sağlanmıştır. RAP malzemesinden daha fazla faydalanmak amacıyla karışımlardaki kullanım oranını arttırmak adına katkı malzemesi olarak puzolanik çimento kullanılmıştır. Çimento takviyesinin %100 RAP malzemesinin yaş CBR sonuçları üzerinde meydana getirdiği değişiklik Tablo 17'de gösterilmektedir.

Tablo 17. Çimento takviyeli %100 RAP malzemesinin yaş CBR testi sonuçları

	Penetrasyon derinliği (mm)	%100 RAP - %1 çimento	%100 RAP - %2 çimento	%100 RAP - %3 çimento
Yaş CBR (%)	2,54	72	70	142
	5,08	65	80	138

Karışım numunelerinin taşıma oranının iyileştirilmesi ve daha fazla RAP malzemesinin kullanımı amaçlanarak RAP malzemesine ve RAP-DA karışımlarına bağlayıcı katkı malzemesi olarak %1, %2 ve %3 oranlarında puzolanik çimento ilave

edilerek yaş CBR testleri yapılmıştır. Çimento katkısının %100 RAP malzemesinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi ile ilgili olarak Şekil 36'daki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 36. %100 RAP malzemesi için çimento oranı-yaş CBR ilişkisi

%100 RAP malzemesine sadece %1 ve %2 oranında çimento takviyesinin taşıma kapasitesini 2-3 katına çıkardığı, %3'lük takviyenin ise 5-6 katına çıkardığı testler neticesinde görülmüştür. KTŞ'nde PMT tabakası için belirtilen minimum yaş CBR değerinin %3'lük bir çimento takviyesi ile sağlandığı görülmüştür. Bununla birlikte temel malzemeleri için oluşturulacak karışımlarda gradasyon limitlerinin de sağlanması gerçeği unutulmamalıdır. Çimento katkısı sadece gerekli minimum CBR sınırlarını karşılamıştır. Bu yüzden KTŞ'nde istenen diğer fiziksel ve mekanik özellikler de ayrıca araştırılmalıdır.

%10 ve %20 RAP oranına sahip karışımların yaş CBR değerleri KTŞ'deki PMT tabakası değerlerini sağladığı için çimento takviyesine gerek duyulmamıştır. Fakat %120'den daha düşük yaş CBR değerlerinin elde edildiği daha yüksek RAP oranındaki karışımları için (%30, %40, %50, %60 ve %100) ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında puzolanik çimento takviyesi yapılarak malzemelerin taşıma kapasiteleri arttırılmaya çalışılmıştır. Karışımların, şartnamede belirtilen sınırları (%120) sağlayıp sağlamadığı ve sağlıyorsa hangi çimento oranında sağladığı araştırılmıştır. RAP-DA karışımlarına çimento

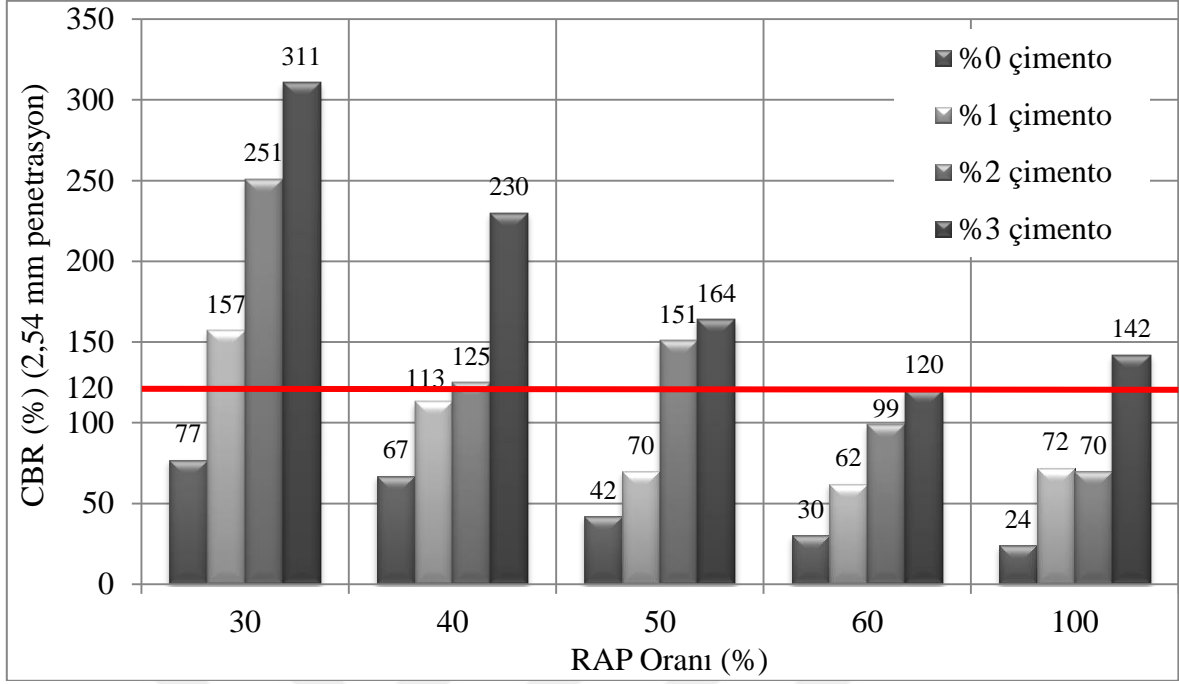


takviyesi yapılarak gerçekleştirilen yaş CBR testinin 2,54 ve 5,08 mm penetrasyonlarındaki sonuçları Tablo 18'de gösterilmektedir.

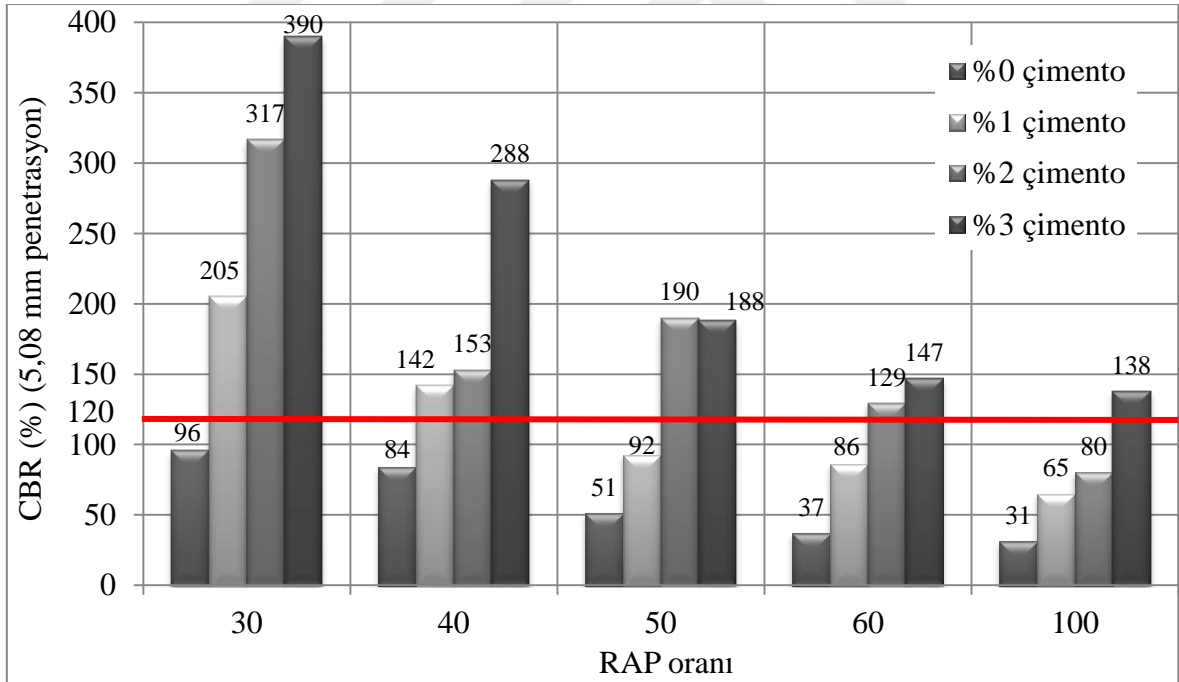
Tablo 18. Çimento takviyeli RAP-DA karışımlarının yaş CBR test sonuçları

Karışımdaki RAP oranı, %	Penetrasyon derinliği (mm)	Yaş CBR, %			
		%0 çimento	%1 çimento	%2 çimento	%3 çimento
0	2,54	<b>137</b>	-	-	-
	5,08	<b>178</b>	-	-	-
10	2,54	116	-	-	-
	5,08	<b>147</b>	-	-	-
20	2,54	107	-	-	-
	5,08	<b>130</b>	-	-	-
30	2,54	77	<b>157</b>	<b>251</b>	<b>311</b>
	5,08	96	<b>205</b>	<b>317</b>	<b>390</b>
40	2,54	67	113	<b>125</b>	<b>230</b>
	5,08	84	<b>142</b>	<b>153</b>	<b>288</b>
50	2,54	42	70	<b>151</b>	<b>164</b>
	5,08	51	92	<b>190</b>	<b>188</b>
60	2,54	30	62	99	<b>120</b>
	5,08	37	86	<b>129</b>	<b>147</b>
100	2,54	24	72	70	<b>142</b>
	5,08	31	65	80	<b>138</b>

Tablo 18'e göre %1 çimento takviyesi ile %30 ve %40 RAP oranındaki karışım; %2 çimento takviyesi ile %30, %40, %50 ve %60 RAP oranındaki karışımlar ve %3 çimento takviyesi ile de tüm karışımlar %120 yaş CBR limitinin üzerine çıkarak KTŞ kriterini sağlamayı başarmıştır. Yaş CBR test sonuçlarınaa bağlı olarak hazırlanan grafikler Şekil 37 ve Şekil 38'de sunulmaktadır.



Şekil 37. DA-RAP-çimento karışımlarının 2,54 mm penetrasyon için CBR değerleri



Şekil 38. DA-RAP-çimento karışımlarının 5,08 mm penetrasyon için CBR değerleri

Testten elde edilen verilere göre, puzolanik çimentonun malzemenin taşıma kapasitesini arttırması bakımından RAP malzemesi için oldukça uygun bir katkı maddesi olduğu ve düşük oranlarda ilave edilmesi durumunda bile yaş CBR değerlerini %30 ila

%90 arasında arttırdığı gözlemlenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; çimento miktarının No.200 elek altında kalan ince malzeme miktarını arttırdığı için KTŞ gradasyon limitlerinde müsaade edilen maksimum %10 sınırının aşılması gerektiğidir. Dolayısıyla %100 RAP ile temel tasarımı yapmak adına çimento miktarının keyfi kullanımı mümkün değildir.

### 3.1.5. Sabit Seviyeli Permeabilite Testi Bulguları

#### 3.1.5.1. Çimento Takviyesiz Karışımların Sabit Seviyeli Permeabilite Testi Bulguları

Sabit seviyeli permeabilite test silindirlerine yerleştirilen malzeme ve su miktarlarının hesabı Tablo 19'daki değerlere göre yapılmıştır. Malzemeler tabakalar halinde silindire konulmuş ve her bir tabaka el tokmağı yardımıyla KTŞ gereğince minimum %98 modifiye proktor sıklığında sıkıştırılmıştır.

Tablo 19. Permeabilite testi yapılan karışımların hazırlanma hesapları

	$V_{kmaks}$ (t/m <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)	Kullanılan silindir hacmi (cm <sup>3</sup> )	Silindirdeki malzeme ağırlığı (kg)	Agreganın sıkışması için kullanılan su ağırlığı (kg)
%100 DA	2,230	6,00	20750	46,27	2,776
%10 RAP - %90 DA	2,181	5,38	20750	45,25	2,434
%20 RAP - %80 DA	2,150	5,10	20750	44,61	2,275
%30 RAP - %70 DA	2,147	5,02	20750	44,55	2,236
%40 RAP - %60 DA	2,136	4,92	20750	44,32	2,180
%50 RAP - %50 DA	2,129	4,66	20750	44,18	2,059
%60 RAP - %40 DA	2,042	4,31	20750	42,37	1,826
%100 RAP	1,952	4,27	10900	21,27	0,909

Tablo 19'daki hesaplara göre silindire yerleştirilerek teste tabi tutulan karışımlardan elde edilen permeabilite katsayısı değerleri Tablo 20'de verilmektedir.

Tablo 20. Çimento takviyesiz RAP-DA karışımlarının permeabilite test sonuçları

	$k_1$ (cm/sn)	$k_2$ (cm/sn)	$k_3$ (cm/sn)	k, $k_{ort}$ (cm/sn)
% 100 DA	0,0600	0,0252	0,0355	$40,2 \times 10^{-3}$
% 10 RAP - % 90 DA	0,0398	0,0390	0,0399	$39,9 \times 10^{-3}$
% 20 RAP - % 80 DA	0,0510	0,0292	0,0372	$39,1 \times 10^{-3}$
% 30 RAP - % 70 DA	0,0438	0,0286	0,0371	$36,5 \times 10^{-3}$
% 40 RAP - % 60 DA	0,0340	0,0258	0,0137	$24,5 \times 10^{-3}$
% 50 RAP - % 50 DA	0,0285	0,0209	0,0166	$22,0 \times 10^{-3}$
% 60 RAP - % 40 DA	0,0210	0,0195	0,0164	$18,97 \times 10^{-3}$
% 100 RAP	0,0140	0,0180	0,0160	$16,0 \times 10^{-3}$

Permeabilite test sonuçlarına göre %100 RAP malzemesinin permeabilite katsayısı (k)  $16,0 \times 10^{-3}$  cm/sn, %100 DA malzemesininki ise  $40,2 \times 10^{-3}$  cm/sn olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre sahada, tamamı ocak malzemesinden (%100 DA) yapılan bir PMT tabakasının permeabilitesinin tamamı RAP malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasına göre %150 oranında daha fazla geçirimli olmaktadır. Karışımlardaki RAP oranı arttıkça permeabilite azalmaktadır. Permeabilitedeki azalmanın nedeninin RAP malzemesi etrafını saran bitümün, malzemenin sıkıştırılması esnasında agrega danelerini birbirine yapıştırarak permeabiliteyi azaltmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 21'de görüldüğü üzere testte kullanılan her bir numune için vanalardan elde edilen  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, malzemenin homojen biçimde sıkıştırıldığını göstermektedir.

%100 RAP malzemesinin ince içerik miktarı %3,3 gibi literatürdeki değerlerin oldukça altında bir değerdir (%5-7). Literatürdeki kıyaslamalarda görülen permeabilite değerlerindeki farklılıklara, ince içerik miktarındaki değişimin neden olduğu düşünülmektedir.

Test sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı bulguları değerlendirildiğinde karışımdaki RAP oranı arttıkça permeabilitenin azaldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuç; McGregor vd. (1999), Wu (2011) ve Maher vd. (2005)'in çalışma sonuçlarını destekler niteliktedir. Yalnız bazı araştırmacılar RAP oranının artmasının permeabiliteyi etkilemediği veya arttırdığı sonucuna varmışlardır (Hanks ve Magni 1989, Hightler vd. 1997, Gupta vd. 2009, Mokwa ve Peebles 2005). Bu zıt görüşün sebebi permeabilitenin RAP bitüm oranına, sıkıştırma yöntemine, dane şekline, zemin cinsine ve ince içerik miktarına bağlı olarak oldukça değişken bir davranış göstermesi olarak açıklanabilir (Wu,

2011). Ayrıca %100 DA malzemesinin boşluk oranı, kuru yoğunluğu, plastisitesi gibi özelliklerin farklı oluşu da permeabiliteyi etkileyen faktörler arasındadır. Örneğin Highter vd. (1999) granüler zeminler üzerinde yaptığı çalışmada RAP oranının artması durumunda permeabilitenin belirgin biçimde arttığını bildirirken, kırmataş malzeme üzerinde yaptığı çalışmada RAP oranındaki değişimin permeabilite üzerinde az bir etkisi olduğunu bildirmiştir.

### 3.1.5.2. Çimento Takviyeli %100 RAP Malzemesinin Sabit Seviyeli Permeabilite Testi Bulguları

Çimento takviyeli %100 RAP karışımlarının test silindirine yerleştirilmesi Tablo 21'de verilen hesaplamalar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Modifiye proktor sonucu elde edilen  $V_{kmaks}$  ve  $W_{opt}$  değerleri ile kullanılan silindirin hacmine göre silindire yerleştirilen malzeme ağırlıkları ve sıkıştırma için kullanılacak su miktarları belirlenmiştir.

Tablo 21. Çimento takviyeli %100 RAP numunelerinin test silindirleri için hazırlanması

	$V_{kmaks}$ ( $t/m^3$ )	$W_{opt}$ (%)	Kullanılan silindir hacmi ( $cm^3$ )	Silindirdeki malzeme ağırlığı (kg)	Agreganın sıkışması için kullanılan su ağırlığı (kg)
%100 RAP - %1 çimento	1,979	4,30	10.900	21,57	0,927
%100 RAP - %2 çimento	2,053	4,39	10.900	22,37	0,982
%100 RAP - %3 çimento	2,092	4,60	10.900	22,80	1,048

Tablo 21'deki değerlere göre hazırlanan test silindiri içerisindeki çimento takviyeli %100 RAP karışımları, permeabilite testine tabi tutularak her bir karışım için hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 22'de gösterilmiştir.

Tablo 22. Çimento takviyeli %100 RAP malzemesinin permeabilite test sonuçları

	$k_1$ (cm/sn)	$k_2$ (cm/sn)	$k_3$ (cm/sn)	$k_{ort}$ (cm/sn)
%100 RAP	0,0140	0,0180	0,0160	$16 \times 10^{-3}$
%100 RAP - %1 çimento	0,0297	0,0303	0,0300	$15,8 \times 10^{-3}$
%100 RAP - %2 çimento	0,0113	0,0203	0,0146	$15,4 \times 10^{-3}$
%100 RAP - %3 çimento	0,0111	0,0098	0,0088	$9,9 \times 10^{-3}$

Granüler bir malzemenin permeabilitesi doğrudan malzemedeki mevcut ince tanelerin yüzdesi (No.200 elek altı parçacıklar) ile ilgilidir. Beklendiği gibi, çimento miktarı arttıkça RAP malzemesinin permeabilitesi azalmaktadır. Bunun, kür sırasında çimentonun nem ile reaksiyona girerek RAP malzemesi içerisindeki boşluk miktarını azaltmasından kaynaklandığı söylenebilir. Tunç (2007), kireç, jips, uçucu kül gibi katkı maddeleriyle agrega danelerinin birbirine sıkıca bağlanarak çimentolaşması sayesinde zeminin permeabilite özelliğinin azaltılabileceğini belirtmiştir. Elde edilen sonuçlar da bu görüşü destekler niteliktedir.

Bağlayıcı malzeme olarak çimentonun kullanıldığı testlerde dikkati çeken husus permeabilitenin oldukça düşük olduğu yani geçirimsiz bir tabakanın elde edilmiş olduğudur. Bunun sebebi olarak silindir içine konulan çimentonun ilave edilen su ile priz aldığı düşünülmektedir. Keza silindirin içi boşaltılırken malzemenin betonlaştığı göze çarpmaktadır. Çimentolu karışımlar yerleştirildikleri permeabilite silindirleri içerisinde yaklaşık 2-4 saat bekletildikten sonra teste tabi tutulmuştur. Ancak bu süre çimentonun priz alması için yeterli değildir. Daha fazla bekletilmesi durumunda ise permeabilite değerlerinin sıfıra yakın yani geçirimsiz bir değere ulaşmasından ötürü diğer çimentolu karışımlar için permeabilite testi yapılamamıştır.

### 3.1.6. Tekrarlı Plaka Yükleme Testi Bulguları

Bir malzemeye yeterli kuvvetin uygulanması, malzemde belirli bir şekil değişimine neden olmaktadır. Temel tabakası üzerine uygulanan kuvvetin meydana getirdiği deformasyon, düşey doğrultudaki oturma hareketi olarak karşımıza çıkmaktadır. Kuvvet kaldırıldığında eski haline geri dönen geçici şekil değiştirmelere elastik deformasyon denir. Bir yükleme-boşaltma döngüsünde yüklemenin yapıldığı andaki deformasyon ile

boşaltmanın yapıldığı andaki deformasyon farkı elastik deformasyonu verirken geri tepme olarak da adlandırılır. Yükleme sırasında uygulanan kuvvetin malzemenin şeklini kalıcı olarak değiştirdiği durumlar ise kalıcı deformasyon olarak adlandırılır.

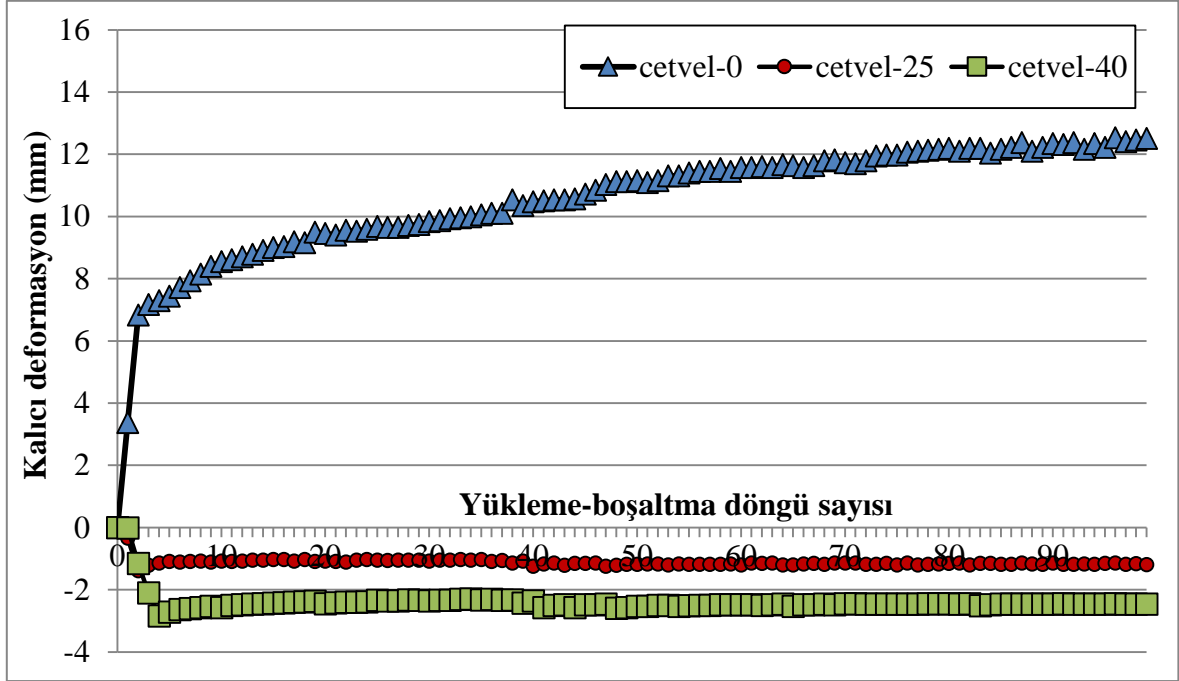
### **3.1.6.1. %100 DA İle Hazırlanan Test Kesiti**

KGM tarafından PMT tabakası yapımında kullanılan %100 DA malzemesi ile yapılan tekrarlı plaka yükleme testinden yüzeysel deformasyonlar ve birim şekil değiştirme verileri elde edilmiştir. Bu veriler, RAP malzemesi karışımlarından elde edilecek sonuçlar için bir referans niteliğinde olacaktır.

#### **3.1.6.1.1. Yüzey Deformasyonları**

##### **3.1.6.1.1.1. Kalıcı Yüzey Deformasyonları**

Thompson ve Smith (1990), yol performansının belirlenmesinde en sık kullanılan kriterin kalıcı deformasyon veya tekerlek izi olduğunu belirtmiştir. Kalıcı yüzey deformasyonu, her bir yükleme-boşaltma döngüsünde yüklemenin boşaltıldığı durumda (0 kN) test kesiti yüzeyinde yüklemenin kalkmasıyla geri dönmeyen deformasyondur. %100 DA ile hazırlanan PMT tabakasının yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı olarak değişen, plaka merkezinden 0, 25 ve 40 cm uzaklıktaki LVDT cetveller sayesinde elde edilen kalıcı deformasyon değerleri grafiği Şekil 39'da gösterilmektedir. Oturmalar (+), kabarmalar ise (-) işaret ile gösterilmiştir. Bu grafikten elde edilecek olan veriler, RAP karışımlarına referans olması açısından önem taşımaktadır.



Şekil 39. %100 DA ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri

Plaka merkezindeki kalıcı deformasyonlar yükleme-boşaltma döngü sayısı ile artmaktadır. Kalıcı deformasyonun artış oranı ise döngü sayısı arttıkça azalmaktadır. %100 DA malzemesiyle hazırlanan PMT tabakası için plaka merkezinde 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda elde edilen kalıcı deformasyon değerinin yaklaşık 12,5 mm olduğu belirlenmiştir.

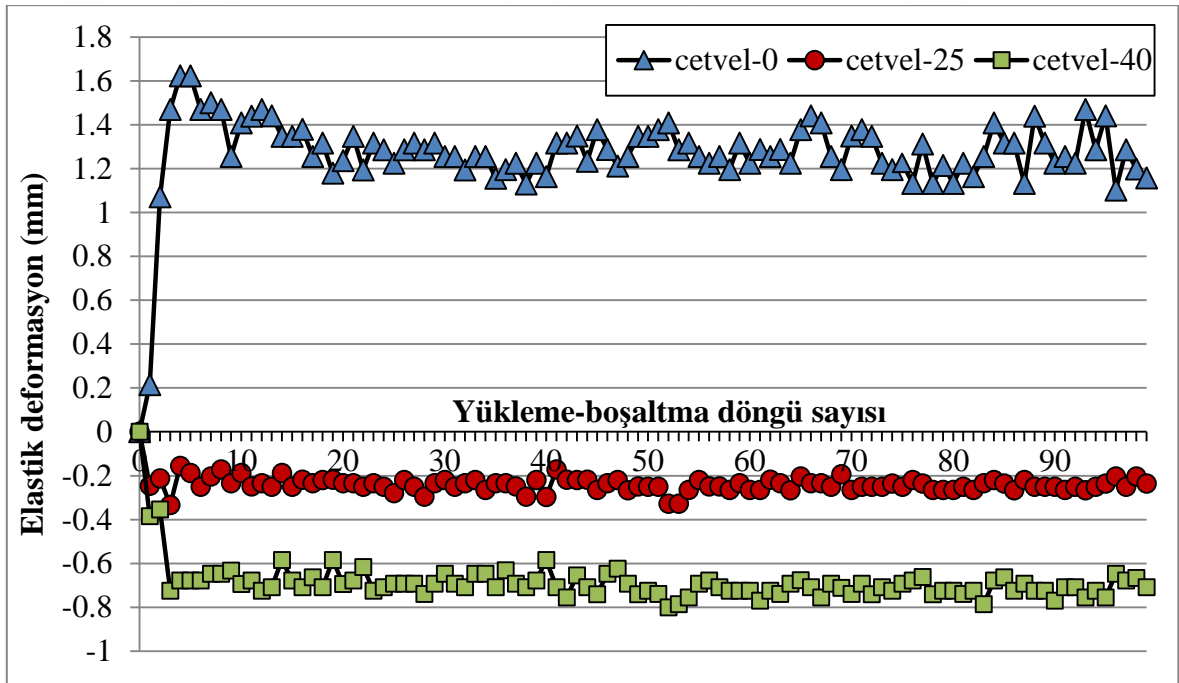
Yüklem plakası altında oturma meydana gelirken, plakadan 25 ve 40 cm uzaklıktaki noktalarda kabarmalar oluşmuştur. Plakanın zemine oturma miktarı yaklaşık 12,5 mm iken, 25 ve 40 cm uzaklıkta oluşan kabarmalar sırasıyla yaklaşık olarak 2,5 ve 1 mm'dir. Plaka merkezine yakın konumdaki cetvel-25'ten elde edilen kabarmalar, daha uzaktaki cetvel-40'tan daha az olmuştur.

Deformasyonlar, ilk döngülerde ani bir artış göstermiştir. Plaka altında oluşan kalıcı deformasyonlar, yükleme-boşaltma döngüsü boyunca azalan bir oranla artmaya devam ederken, 25 ve 40 cm uzaktaki ölçümlerde ise yükleme-boşaltma döngü sayısından etkilenmeyip sabit kaldığı gözlemlenmiştir.



### 3.1.6.1.1.2. Elastik Deformasyonlar

Elastik deformasyon, temel tabakasının maksimum yük ile yüklenip (40 kN) minimum yüke (0 kN) boşaltıldığında zeminin geri tepmesi olarak isimlendirilebilir. Elastik deformasyon miktarları, her bir yük döngüsündeki toplam yüzey deformasyonundan kalıcı deformasyonların çıkartılmasıyla elde edilmiştir. Farklı uzaklıklara yerleştirilmiş olan LVDT cetveller sayesinde elastik deformasyonların yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı değişimi gözlemlenmiştir. Oturma (+), kabarma (-) ile ifade edilmektedir. Elde edilen grafikler Şekil 40'ta verilmektedir.

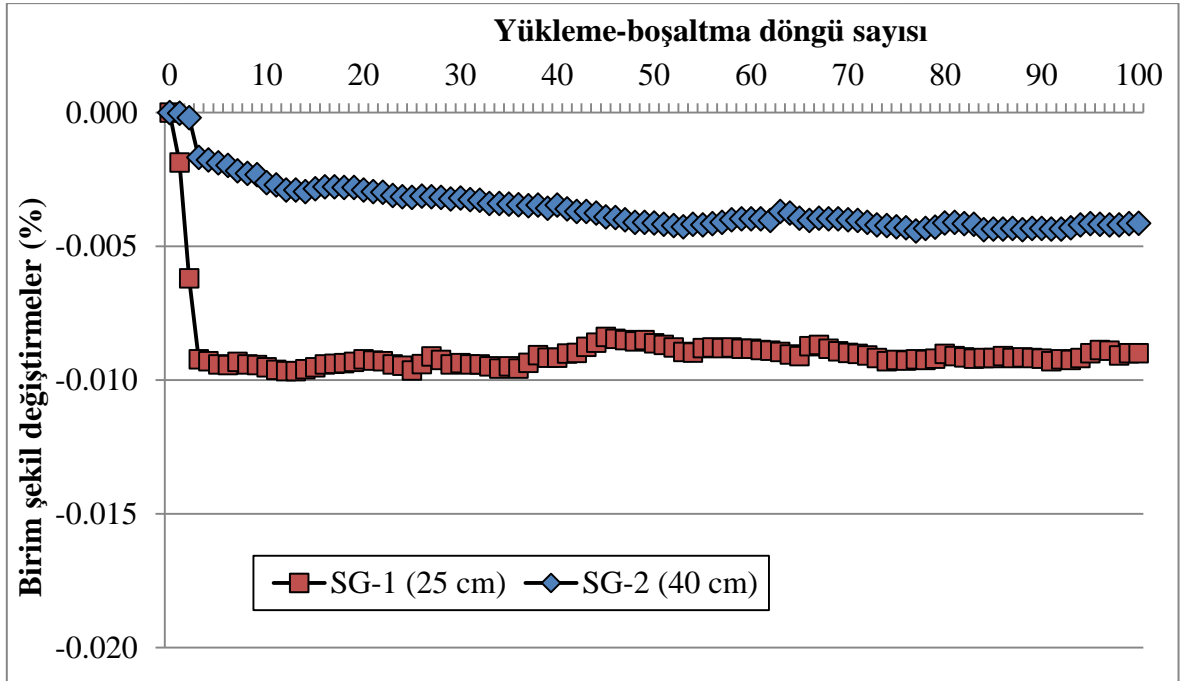


Şekil 40. %100 DA ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri

Elastik deformasyonlar, beklenildiği gibi plaka altında oturma şeklinde oluşmakta ve 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonucunda plaka merkezinin altında yaklaşık 1,4 mm'lik bir elastik deformasyon göstermektedir. Plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaktaki LVDT cetvellerden alınan verilere göre elastik deformasyon miktarı yaklaşık olarak sırasıyla 0,2 ve 0,7 mm civarında olup kabarma şeklinde bir deformasyon gözlemlenmiştir. Yükleme-boşaltma döngüsü başladığı anda deformasyonlar aniden artmış, gerek plaka merkezindeki, gerekse 25 ve 40 cm uzaktaki deformasyonlar daha sonraki yükleme-boşaltma döngü sayısından etkilenmeyip aynı seviyede kalmıştır.

### 3.1.6.1.2. Birim Şekil Değişirmeler

Yükleme-boşaltma işlemi uygulanırken malzemenin yerleştirildiği tankın çeperlerinde oluşması muhtemel bir tepki kuvveti, elde edilecek sonuçları etkileyecektir. Bu sebeple tank kenarına yakın olan, merkezden 40 cm uzaklıktaki bir noktaya SG-2 cihazı yatay pozisyonda yerleştirilmiştir. Ayrıca birim şekil değişirmenin uzaklıkla değişiminin gözlenmesi adına 25 cm uzaklığa da bir SG-1 cihazı yerleştirilmiştir. Plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaklığa yerleştirilen SG-1 ve SG-2 ile ölçümler alınarak yükleme-boşaltma döngüsüyle oluşan değişimler Şekil 41'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 41. %100 DA ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değişirme değerleri

İlk yükleme-boşaltma döngülerinde plaka merkezindeki birim şekil değişirmelerde ani bir artış izlenirken daha sonraki yüklemeler boyunca sabit hale geldiği görülmüştür. Plaka merkezinden 40 cm uzaktaki SG-2'de yaklaşık %0,004 seviyesinde bir birim şekil değişirme gözlenirken 25 cm uzaktaki SG-1'de yaklaşık %0,009 seviyesinde bir değişim oluşmuştur. Yani plaka merkezinden uzaklaştıkça birim şekil değişirme miktarı azalmıştır.

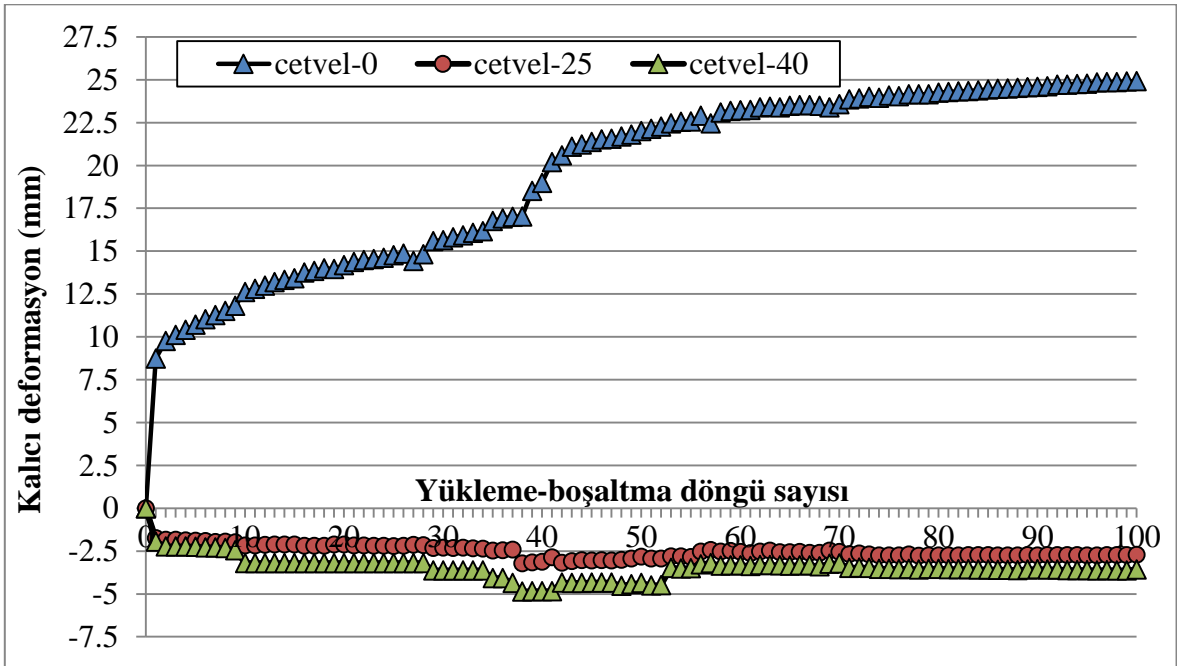
### 3.1.6.2. %20 RAP - %80 DA Karışımıyla Hazırlanan Test Kesiti

Test tankına yerleştirilen %20 RAP - %80 DA karışımıyla hazırlanan PMT tabakası üzerinde yapılan tekrarlı plaka yükleme testi ile yüzey deformasyonları ve birim şekil değiştirmeler elde edilmiştir.

#### 3.1.6.2.1. Yüzey Deformasyonları

##### 3.1.6.2.1.1. Kalıcı Deformasyonlar

%20 RAP - %80 DA karışımı ile hazırlanan PMT tabakasının yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı olarak değişen, plaka merkezinden 0, 25 ve 40 cm uzaklıktaki LVDT cetveller (cetvel-0, cetvel-25, cetvel-40) sayesinde elde edilen kalıcı deformasyon değerleri grafiği Şekil 42'de gösterilmektedir. Oturmalar (+), kabarmalar ise (-) işaret ile gösterilmiştir. Deformasyonlar, ilk döngüde ani bir artış göstermiştir. Plaka altında oluşan kalıcı deformasyonlar, yükleme-boşaltma döngüsü boyunca azalan bir oranla artmaya devam ederken, 25 ve 40 cm uzaktaki ölçümlerde ise yükleme-boşaltma döngü sayısından neredeyse etkilenmeyip sabit kaldığı gözlemlenmiştir.



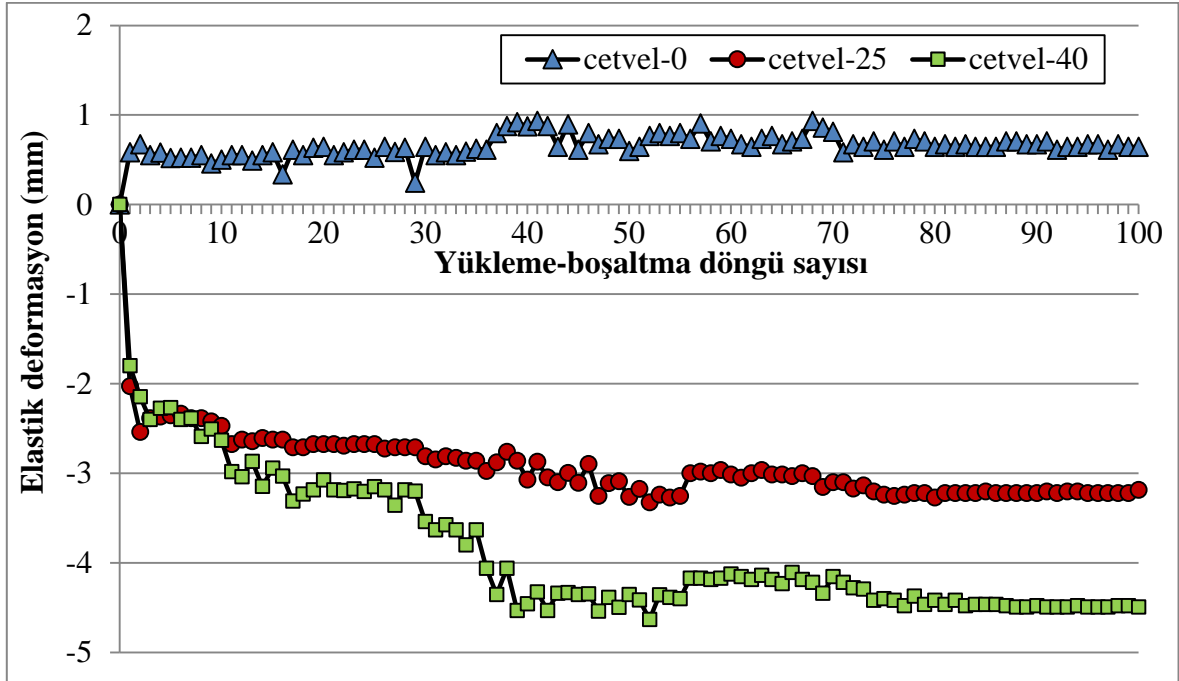
Şekil 42. %20 RAP-%80 DA ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri

Plaka merkezindeki kalıcı deformasyonlar yükleme-boşaltma döngü sayısı ile artmaktadır. %20 RAP - %80 DA karışım malzemesiyle hazırlanan PMT tabakası için plaka merkezinde 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda elde edilen kalıcı deformasyon değerinin yaklaşık 25 mm olduğu belirlenmiştir. Bu değer %100 DA ile yapılan tabakanın kalıcı deformasyon değerinden (12,5 mm) yaklaşık iki kat daha fazladır. Bennert ve Maher (2005) de çalışmasında, RAP-DA karışımlarındaki RAP oranı arttıkça yükleme-boşaltma döngüsü sonunda elde edilen kalıcı deformasyonların, %100 DA malzemesine kıyasla arttığını belirtmektedir. Bu sebeple en büyük kalıcı deformasyonların %100 RAP malzemesinde elde edildiği sonucuna varmıştır (Yuan vd. 2010).

Yükleme plakası altında oturma meydana gelirken, plakadan 25 ve 40 cm uzaklıktaki noktalarda kabarmalar oluşmuştur. Plakanın zemine oturma miktarı yaklaşık 25 mm iken, 25 ve 40 cm uzaklıkta oluşan kabarmalar sırasıyla yaklaşık olarak 2,5 ve 3,5 mm'dir. %20 RAP - %80 DA karışım tabakasında cetvel-25 ve cetvel-40'tan yapılan okumalar, kalıcı deformasyonların %100 DA malzemesinin yaklaşık 2 katı olduğunu göstermektedir. Sonuçlar aynı sıkışma oranında (%98 modifiye proktor sıklığı) sıkıştırılan %20 RAP - %80 DA karışımı ve %100 DA malzemesinden yapılan test tabakalarında %20 RAP karışımının geleneksel olarak %100 DA'dan yapılan PMT tabakasına göre kalıcı deformasyon direncinin yarı yarıya daha az olduğunu göstermiştir.

### **3.1.6.2.1.2. Elastik Deformasyonlar**

LVDT cetveller ile elastik deformasyonların yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı değişimi gözlemlenmiştir. Oturma (+), kabarma (-) ile ifade edilmektedir. Elde edilen grafik Şekil 43'te gösterilmektedir. Plaka merkezindeki elastik deformasyonların ilk yükleme-boşaltmanın ardından hemen kararlı hale gelerek sabit kaldığı, 25 ve 40 cm uzaktaki elastik deformasyonların ise yaklaşık 75. yüklemenin sonunda sabit kaldığı görülmüştür.



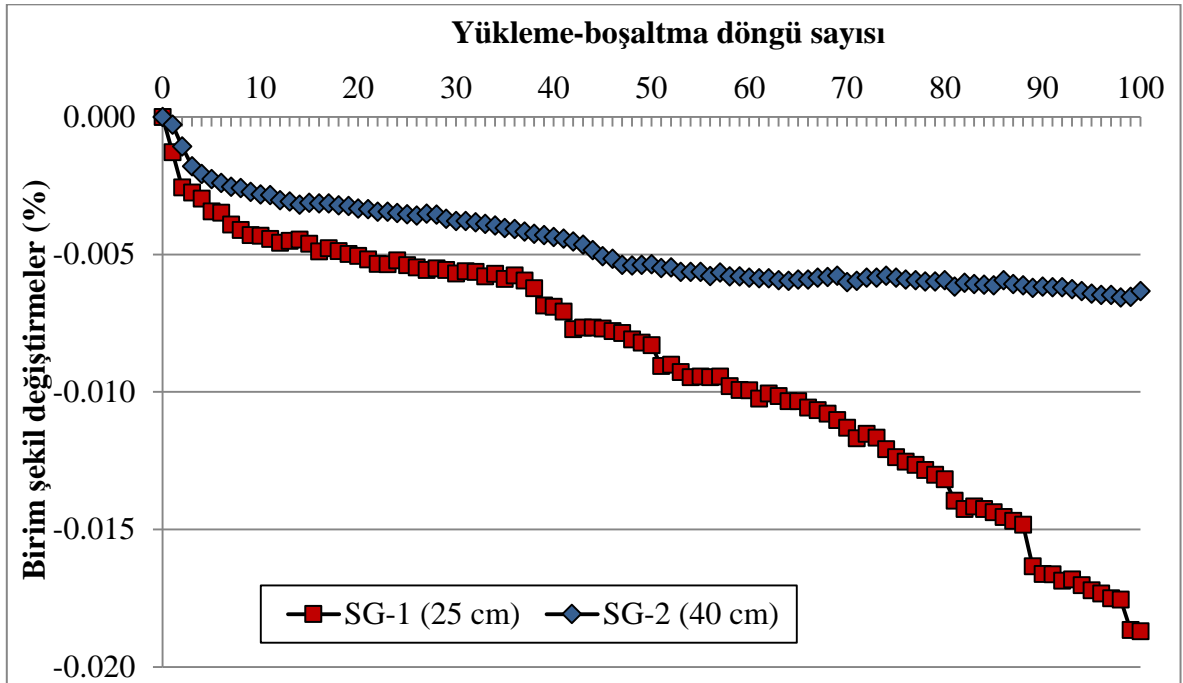
Şekil 43. %20 RAP-%80 DA ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri

100 yüklem-boşaltma döngüsü sonucunda plaka merkezinin altında oturma şeklinde yaklaşık 0,6 mm'lik bir elastik deformasyon göstermektedir. Plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaktaki LVDT cetvellerden alınan verilere göre elastik deformasyon miktarları yaklaşık olarak sırasıyla 3,2 ve 4,5 mm civarında olup kabarma şeklinde bir deformasyon gözlemlenmiştir. %20 RAP - %80 DA karışımında plaka altında elde edilen elastik deformasyon değeri, geleneksel olarak %100 DA ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerinden (1,4 mm) 2 kat daha az olduğu gözlemlenmiştir. Fakat plaka merkezinden 25 ve 40 mm uzaklıktaki elastik deformasyonlar ise %100 DA kesitinden elde edilen değerlerden (3,2 ve 4,5 mm) daha fazla çıkmıştır. Cetvel-25'ten elde edilen elastik deformasyon değeri %100 DA malzemesininin 16 katıyken, cetvel-40'taki değer %100 DA malzemesininin yaklaşık 6,5 katıdır. Bu durum tekrarlı yüklemelerle plaka altında sıkışan asfalt içerikli RAP malzemesinin döngü sayısı arttıkça birbirine yapıştığını, ancak sıkışmanın olmadığı 25 cm ve 40 cm uzaklıktaki noktalarda kabarmaların daha fazla olduğunu göstermiştir. Yani plaka merkezinde oluşan elastik deformasyon direnci %20 RAP karışımlı kesitte %100 DA kesitine göre daha fazlayken, plaka merkezinden uzaklaştıkça bu direnç de azalmaktadır. Bu bağlamda Highter vd. (1997)'nin çalışmasında öne sürdüğü RAP-DA karışımlarındaki RAP oranının artması durumunda daha büyük

elastik deformasyon değerlerinin elde edileceği görüşünün plaka altında kalmayan malzeme için geçerli olduğu görülmüştür.

### 3.1.6.2.2. Birim Şekil Değişimleri

%20 RAP - %80 DA karışımından hazırlan PMT tabakası kesitinde plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaklığa yerleştirilen SG-1 ve SG-2 ile ölçümler alınarak yükleme-boşaltma döngüsüyle oluşan değişimler Şekil 44'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 44. %20 RAP-%80 DA ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değiştirme değerleri

İlk yüklemeyle plaka merkezinden 40 cm uzaktaki noktalarda birim şekil değişimlerinin sabit hale geldiği, 25 cm uzaklıktaki noktalarda ise bu değişimlerde ilk döngü ile ani bir artışın olduğu yaklaşık 70. döngüde ise sabit hale geldiği görülmüştür.

100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda SG-2'de yaklaşık %0,006 seviyesinde bir birim şekil değiştirme gözlenirken SG-1'de yaklaşık %0,018 seviyesinde bir birim şekil değiştirme oluşmuştur. Yani, plaka merkezinden uzaklaştıkça birim şekil değiştirme azalmıştır.

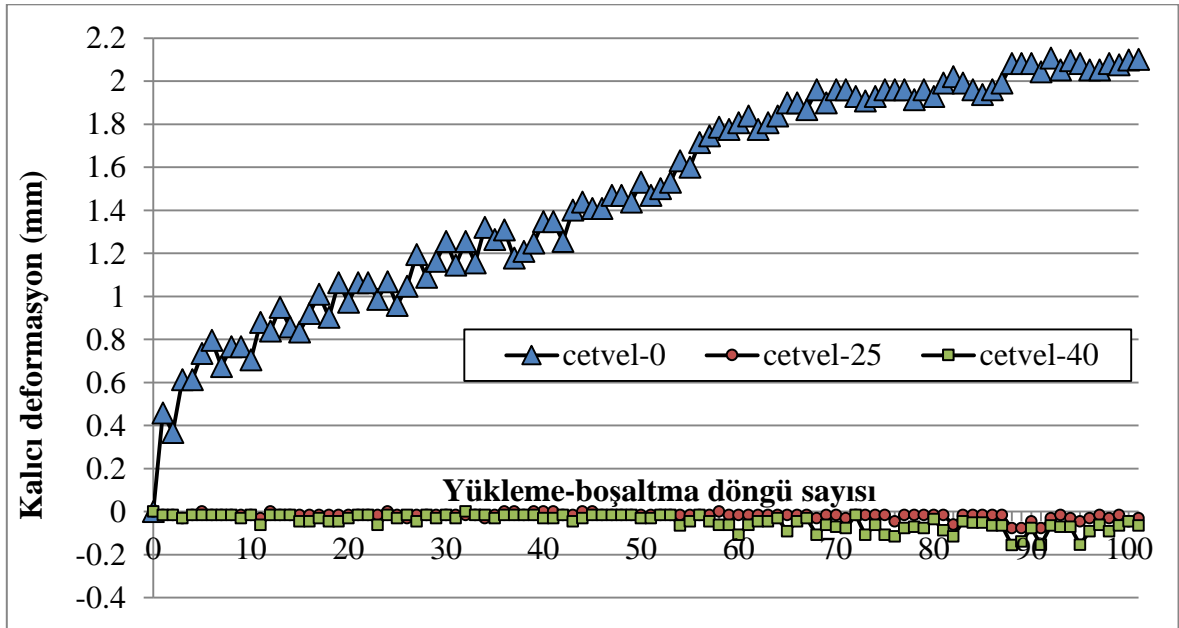
### 3.1.6.3. %60 RAP-%40 DA-%3 Çimento Karışımıyla Hazırlanan Test Kesiti

Test tankına yerleştirilen %60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışımıyla hazırlanan PMT tabakası üzerinde yapılan tekrarlı plaka yükleme testi ile yüzey deformasyonları ve birim şekil değiştirmeler elde edilmiştir.

#### 3.1.6.3.1. Yüzey Deformasyonları

##### 3.1.6.3.1.1. Kalıcı Deformasyonlar

%60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışımı ile hazırlanan PMT tabakasının yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı olarak değişen, plaka merkezinden 0, 25 ve 40 cm uzaklıktaki LVDT cetveller (cetvel-0, cetvel-25, cetvel-40) sayesinde elde edilen kalıcı deformasyon değerleri grafiği Şekil 45'te gösterilmektedir. Oturmalar (+), kabarmalar ise (-) işaret ile gösterilmiştir. Plaka altında oluşan kalıcı deformasyonlar, yükleme-boşaltma döngüsü boyunca azalan bir artış oranıyla artmaya devam ederken, 25 ve 40 cm uzaktaki ölçümlerde ise yaklaşık 75. yükleme-boşaltma döngüsüne kadar neredeyse deformasyon gözlemlenmezken, 75. döngüden sonra az miktarda bir kabarma gözlemlenmiştir.



Şekil 45. %60 RAP-%40 DA-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri

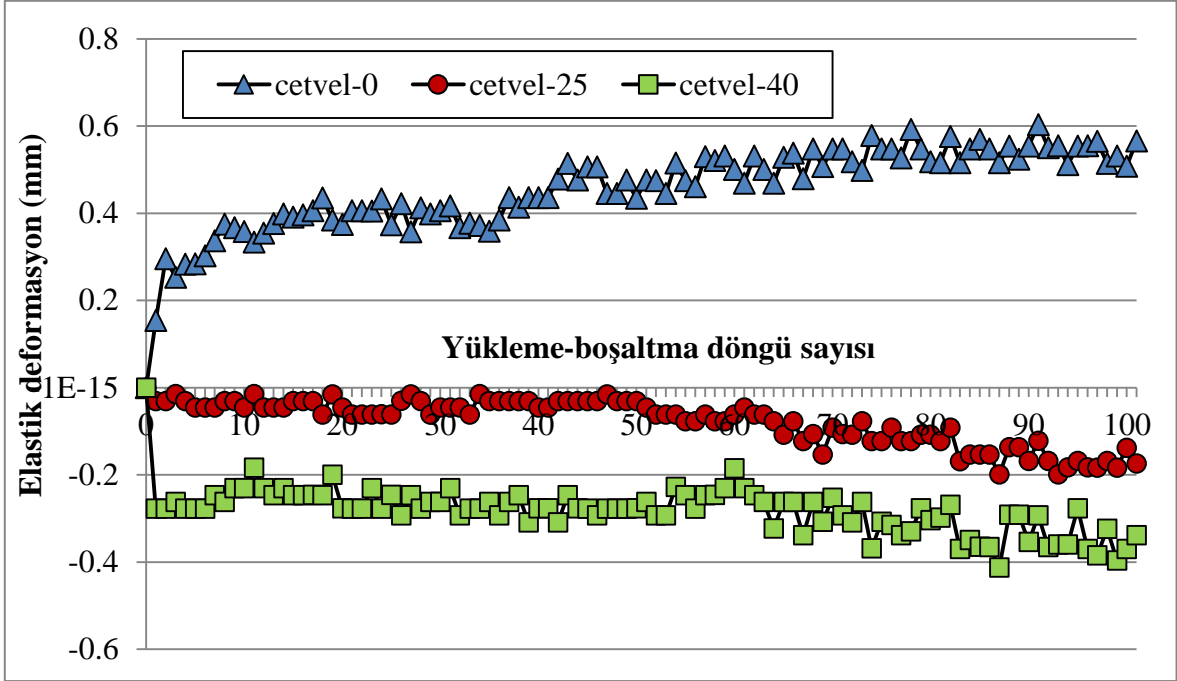
Plaka merkezindeki kalıcı deformasyonlar yükleme-boşaltma döngü sayısı ile artmaktadır. %60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışım malzemesiyle hazırlanan PMT tabakası için plaka merkezinde 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda elde edilen kalıcı deformasyon değerinin yaklaşık 2,1 mm olduğu belirlenmiştir. Bu değer %100 DA ile yapılan tabakanın kalıcı deformasyon değerinden (12,5 mm) yaklaşık %80 daha küçüktür.

Yükleme plakası altında oturma meydana gelirken, plakadan 25 ve 40 cm uzaklıktaki noktalarda kabarmalar oluşmuştur. Plakanın zemine oturma miktarı yaklaşık 2,1 mm iken, 25 ve 40 cm uzaklıkta oluşan kabarmalar sırasıyla yaklaşık olarak 0,05 mm ve 0,1 mm'dir. %60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışımı için cetvel-25 ve cetvel-40 cetvellerinden yapılan kalıcı deformasyon okumaları, %100 DA malzemesinden yaklaşık 20 kat daha az olduğunu göstermiştir. Yani gerek plaka merkezinde ve gerekse plakadan farklı uzaklıklarda meydana oluşan yüzey deformasyonları, tamamı ocak malzemesinden yapılan bir PMT test kesitinden çok daha az deformasyon meydana getirmiştir. Bunun sebebi olarak çimentonun, yüzeyi asfalt ile kaplı olmayan DA malzemelerinin yüzeyine yapışarak agregaları birbirine bağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### **3.1.6.3.1.2. Elastik Deformasyonlar**

LVDT cetveller ile elastik deformasyonların yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı değişimi gözlemlenmiştir. Oturma (+), kabarma (-) ile ifade edilmektedir. Elde edilen grafik Şekil 46'da gösterilmektedir. Plaka merkezindeki elastik deformasyonların yaklaşık 70. döngüye kadar azalan bir artış oranı ile arttığı, 70. döngüden sonra ise sabit kaldığı görülmüştür. Ayrıca 25 ve 40 cm uzaktaki elastik deformasyonların ise yaklaşık 70. yüklemenin sonunda bir miktar artış gösterdikten sonra sabit kaldığı görülmüştür.



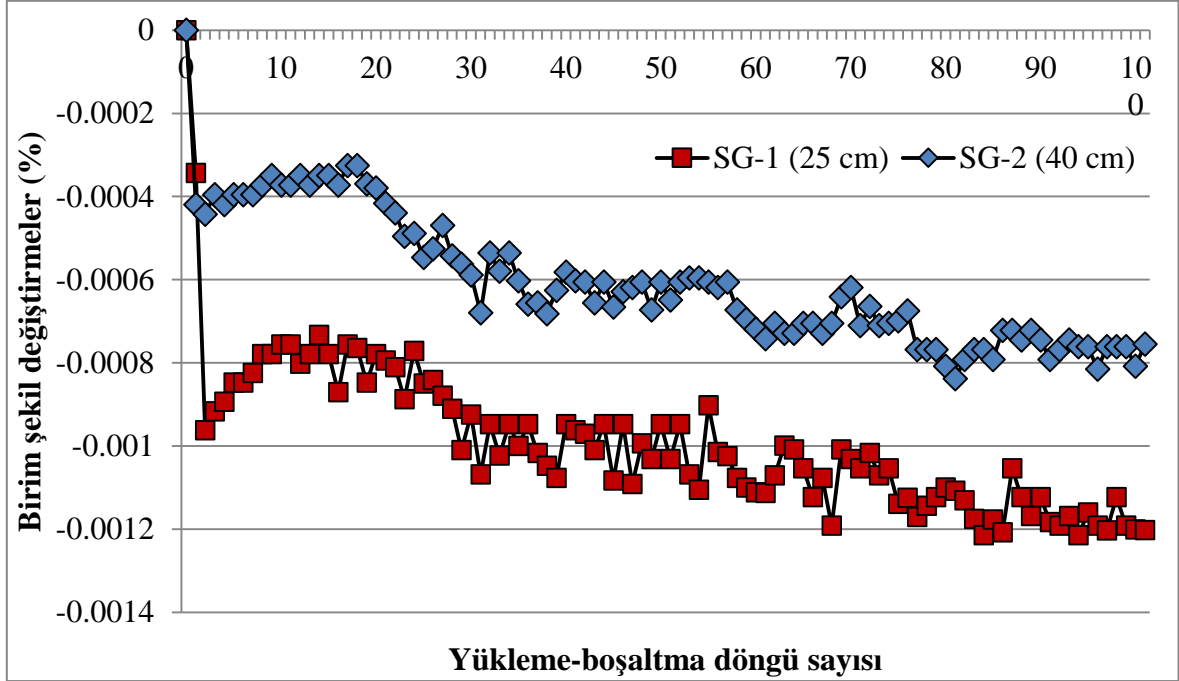


Şekil 46. %60 RAP-%40 DA-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri

100 yükleme-boşaltma döngüsü sonucunda plaka merkezi altında, oturma şeklinde yaklaşık 0,55 mm'lik bir elastik deformasyon göstermektedir. Cetvel-25 ve cetvel-40'a göre elastik deformasyon miktarları yaklaşık olarak sırasıyla 0,2 mm ve 0,3 mm civarında olup kabarma şeklinde bir deformasyon gözlemlenmiştir. %60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışımında plaka altında elde edilen elastik deformasyon değeri, tamamı ocak malzemesiyle (%100 DA) yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerinden (1,4 mm) %60 daha az olduğu gözlemlenmiştir. Cetvel-25 ile alınan elastik deformasyon değeri, %100 DA kesitinden elde edilen değer ile aynı olup 0,2 mm olarak belirlenmiştir. Cetvel-40 ile alınan ölçüm ise elastik deformasyonun 0,3 mm olarak %100 DA kesitinden elde edilen 0,7 mm'lik deformasyonun neredeyse yarısı kadar olduğunu göstermiştir.

### 3.1.6.3.2. Birim Şekil Değiştirmeler

%60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışımından hazırlan PMT tabakası kesitinde plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaklığa yerleştirilen SG-1 ve SG-2 cihazları ile birim şekil değiştirme ölçümleri alınarak yükleme-boşaltma döngüsüyle oluşan değişimler Şekil 47'de gösterilmiştir.



Şekil 47. %60 RAP-%40 DA-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değiştirme değerleri

İlk yüklemelerle SG-1 ve SG-2'deki birim şekil değiştirmelerin hızla arttığı, yaklaşık 75. döngüye kadar azalma gösterdiği ve daha sonraki döngülerde neredeyse sabit kaldığı belirlenmiştir.

SG-1'de yaklaşık %0,0012 seviyesinde bir birim şekil değiştirme gözlenirken, SG-2'de yaklaşık %0,0008 seviyesinde bir değişim oluşmuştur. Yani plaka merkezinden uzaklaştıkça birim şekil değiştirme oranı azalmıştır.

%100 DA ile yapılan PMT tabakası kesitine göre birim şekil değiştirme oranları azalma göstermiştir. 100 yüklem-boşaltma döngüsü sonunda SG-1'deki birim şekil değiştirme miktarı %100 DA'dan yaklaşık % 85 daha düşük çıkmıştır. %100 DA %0,009 iken %60 RAP - %40 DA - %3 çimento %0,0012 olarak belirlenmiştir. Ayrıca SG-2'de %100 DA malzemesi için birim şekil değiştirme %0,004 iken %80 azalarak %0,0008 seviyesine düşmüştür.

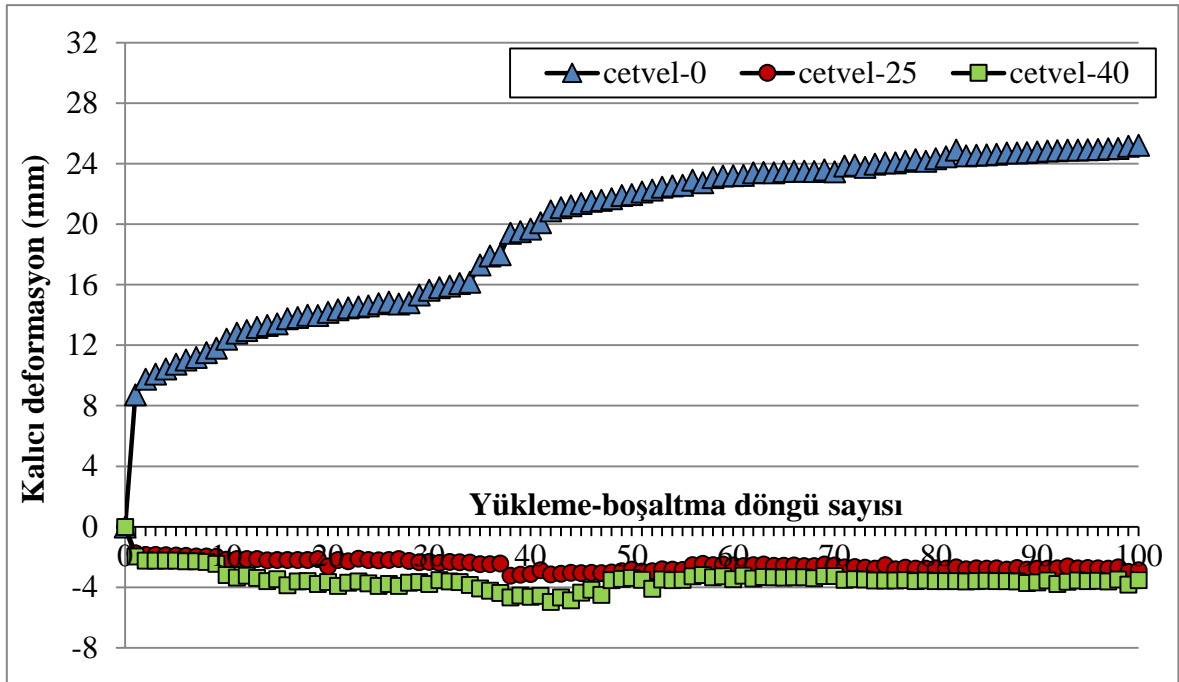
### 3.1.6.4. %100 RAP - %3 Çimento Karışımıyla Hazırlanan Test Kesiti

Test tankına yerleştirilen %100 RAP - %3 çimento karışımıyla hazırlanan PMT tabakası üzerinde yapılan tekrarlı plaka yükleme testi ile yüzey deformasyonları ve birim şekil değiştirmeler elde edilmiştir.

#### 3.1.6.4.1. Yüzey Deformasyonları

##### 3.1.6.4.1.1. Kalıcı Deformasyonlar

% 100 RAP - %3 çimento karışımı ile hazırlanan PMT tabakasının yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı olarak değişen, plaka merkezinden 0, 25 ve 40 cm uzaklıktaki LVDT cetveller sayesinde (cetvel-0, cetvel-25, cetvel-40) elde edilen kalıcı deformasyon değerleri grafiği Şekil 48'de gösterilmektedir. Oturmalar (+), kabarmalar ise (-) işaret ile gösterilmiştir. Plaka altında oluşan kalıcı deformasyonlar, yükleme-boşaltma döngüsü boyunca azalan bir oranla artmaya devam ederken, 25 ve 40 cm uzaktaki ölçümlerde ise 10. yüklemeden sonra deformasyon değerlerinde belirgin bir değişim gözlenememiştir.



Şekil 48. %100 RAP-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının kalıcı deformasyon değerleri

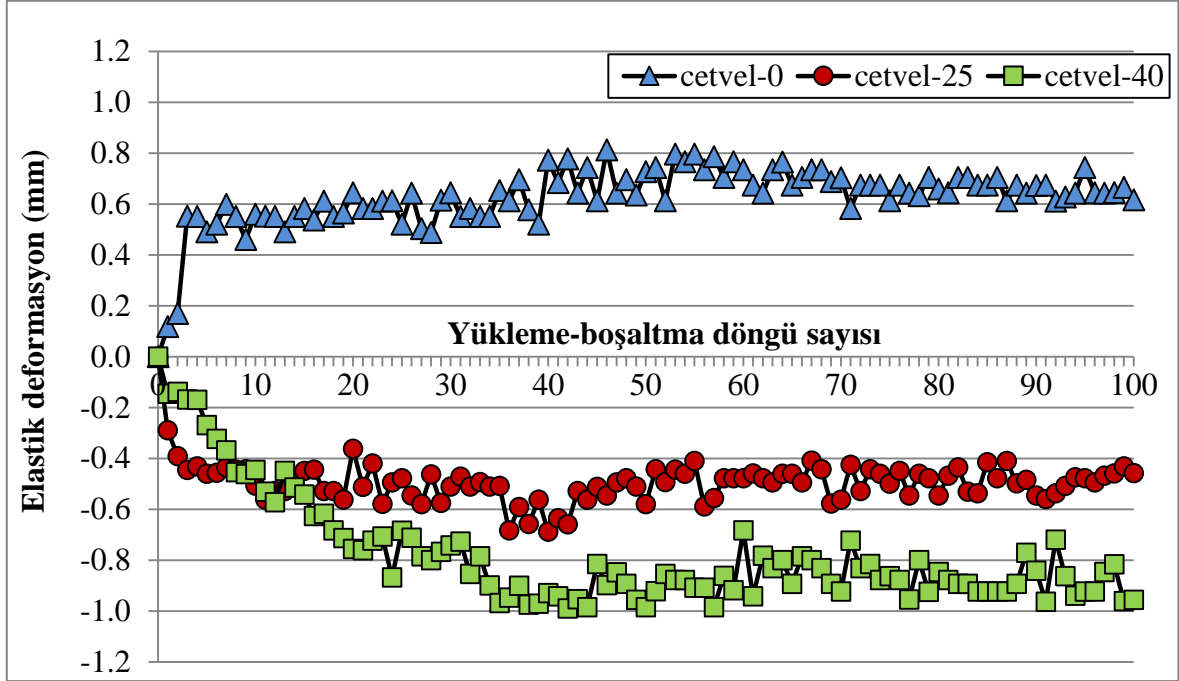
Plaka merkezindeki kalıcı deformasyonlar yükleme-boşaltma döngü sayısı ile artmaktadır. %100 RAP - %3 çimento karışım malzemesiyle hazırlanan PMT tabakası için plaka merkezinde 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda elde edilen kalıcı deformasyon değerinin yaklaşık 25 mm olduğu belirlenmiştir. Bu değer %100 DA ile yapılan tabakanın kalıcı deformasyon değerinin iki katı kadardır. Ayrıca %20 RAP - %80 DA karışımından elde edilen değere yaklaşık olarak eşittir. %100 RAP malzemesinin çimento takviyesine rağmen, çimento takviyesiz %20 RAP karışımıyla aynı kalıcı deformasyonu göstermesinin sebebinin, çimentonun RAP agregası yüzeyini saran asfalt sebebiyle tam aderans sağlayamaması olduğu düşünülmektedir.

Thakur (2011), çalışmasında, %100 RAP malzemesiyle yaptığı 150 mm kalınlığındaki temel tabakası kesitinde tekrarlı plaka yükleme testi gerçekleştirmiştir. Test neticesinde 40-0,5 kN yükleme periyodunda 30 cm plaka ile 100. yükleme-boşaltma döngüsünde plaka merkezinde yaklaşık 75 mm bir kalıcı deformasyon elde etmiştir.

Yükleme plakası altında oturma meydana gelirken, plakadan 25 ve 40 cm uzaklıktaki noktalarda kabarmalar oluşmuştur. Cetvel-0'da oturma miktarı yaklaşık 25 mm iken, cetvel-25 ve cetvel-40'ta okunan kabarmalar sırasıyla yaklaşık olarak 3,5 mm ve 4 mm'dir. %100 RAP - %3 çimento karışımı için cetvel-25 ve cetvel-40'tan elde edilen kalıcı deformasyon değerleri, %100 DA malzemesinin yaklaşık 2 katı olduğunu, %20 RAP - %80 DA karışımı ile ise neredeyse aynı olduğunu göstermiştir.

#### **3.1.6.4.1.2. Elastik Deformasyonlar**

LVDT cetveller ile elastik deformasyonların yükleme-boşaltma döngü sayısına bağlı değişimi gözlemlenmiştir. Oturma (+), kabarma (-) ile ifade edilmektedir. Elde edilen grafik Şekil 49'da gösterilmektedir. Plaka merkezindeki ve plakadan 25 ve 40 cm uzaktaki elastik deformasyonların ilk döngülerle arttığı daha sonra neredeyse sabit bir seviyede kaldığı belirlenmiştir.



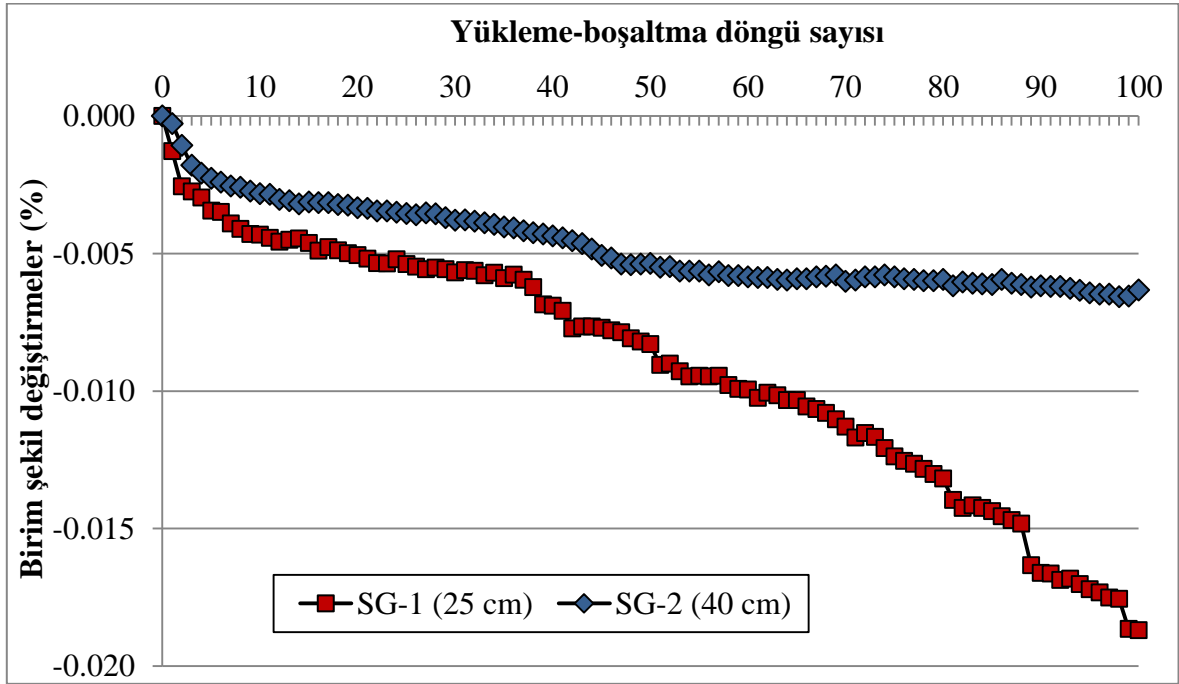
Şekil 49. %100 RAP-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının elastik deformasyon değerleri

100 yüklem-boşaltma döngüsü sonucunda cetvel-0'da oturma şeklinde yaklaşık 0,6 mm'lik bir elastik deformasyon gözlemlenmiştir. Cetvel-25 ve cetvel-40'tan alınan verilere göre elastik deformasyon miktarları yaklaşık olarak sırasıyla 0,5 mm ve 0,9 mm civarında olup kabarma şeklinde bir deformasyon oluşmuştur. %100 RAP - %3 çimento karışımında plaka altında elde edilen elastik deformasyon değeri, tamamı ocak malzemesiyle (%100 DA) yapılan PMT tabakasından (1,4 mm) %55 daha az olduğu gözlemlenmiştir. Cetvel-25 ile alınan elastik deformasyon değeri, %100 DA kesitinden elde edilen değer 2,5 kat fazla olduğu belirlenmiştir. Cetvel-40 ile alınan ölçüm ise elastik deformasyonun 0,9 mm olarak %100 DA kesitinden elde edilen 0,7 mm'lik deformasyondan %20 daha fazla olduğunu göstermiştir.

10. döngü sonunda plaka merkezinde meydana gelen elastik deformasyon miktarı yaklaşık 0,6 mm civarında olmuştur. Thakur (2011), %100 RAP malzemesiyle hazırladığı 150 mm kalınlığındaki temel tabakasından tekrarlı plaka yüklem testi neticesinde 100. döngü sonunda plaka merkezi altında yaklaşık 2,5 mm elastik deformasyon değerleri elde etmiştir.

### 3.1.6.4.1.3. Birim Şekil Değişirmeler

%100 RAP - %3 çimento karışımından hazırlan PMT tabakası kesitinde plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaklığa yerleştirilen SG-1 ve SG-2 ile ölçümler alınarak yükleme-boşaltma döngüsüyle oluşan birim şekil değiştirme değişimleri Şekil 50'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 50. %100 RAP-%3 çimento ile yapılan PMT tabakasının birim şekil değiştirme değerleri

En büyük birim şekil değişirmeler %100 RAP - %3 çimento karışımından elde edilmiştir. 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda %100 RAP - %3 çimento karışımı için SG-1'de yaklaşık %0,018, SG-2'de ise yaklaşık %0,007 seviyelerinde bir birim şekil değişimi oluşmuştur. SG-1'den elde edilen birim şekil değiştirme değerlerinin yaklaşık 50 döngüden sonra sabit bir şekilde devam ettiği, fakat SG-1'deki değerlerin lineer bir şekilde arttığı görülmüştür.

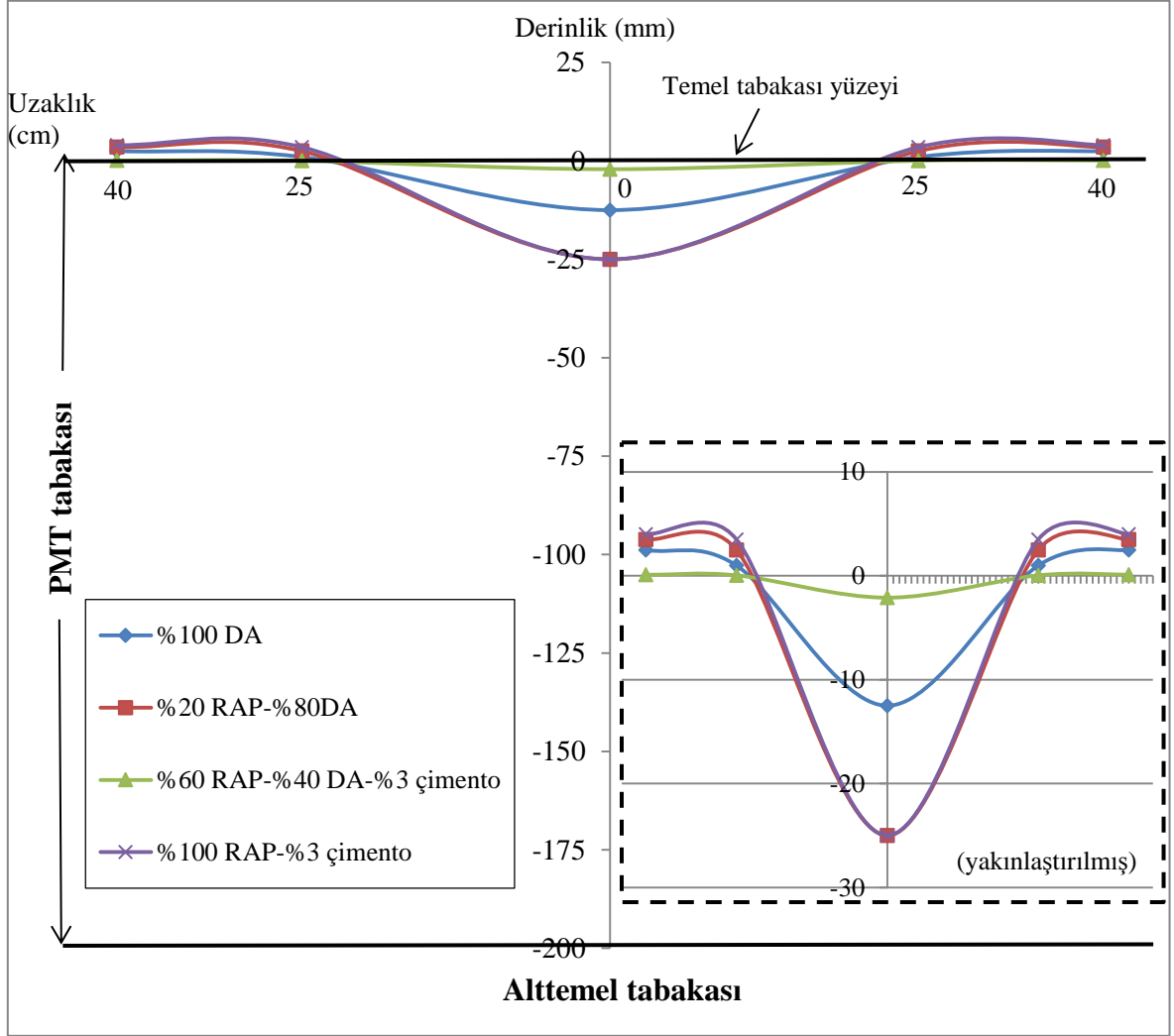
%100 DA ile yapılan PMT tabakası kesitine göre birim şekil değiştirme miktarları artmıştır. 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda SG-1'deki birim şekil değiştirme miktarı %100 DA'ya kıyasla iki kat artarak %0,018 olarak belirlenmiştir. Ayrıca SG-2'deki

ölçüme göre %100 DA malzemesi için birim şekil değıştirme %0,004 iken yine iki kata yakın bir artış göstererek %0,007 seviyesine çıkmıştır.

%100 RAP - %3 çimento karışımı temelde SG-1'den elde edilen birim şekil değıştirmeler %20 RAP - %80 DA karışımı temel ile aynı olmuştur (%0,018). SG-2'de ise %20 RAP - %80 DA karışımından elde edilen %0,006 değeri, sadece 0,17 kat artarak %100 RAP - %3 çimento karışımı temel için %0,007 seviyesine çıkmıştır. Karışımındaki RAP oranının artması birim şekil değıştirmeleri arttırmasına rağmen, RAP oranının %20'den %100'e çıkması durumunda elde edilen birim şekil değıştirmeler SG-1 ve SG-2'de aynı olmuştur. Birim şekil değıştirmelerin artmamasının sebebi olarak, %100 RAP - %3 çimento karışımındaki çimentonun deformasyonları azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### **3.1.6.5. Kalıcı Yüzey Deformasyon Profilleri**

Kalıcı yüzey deformasyon profilleri, her bir PMT tabakası için yapılan karışım için 100. yükleme-boşaltma döngüsü sonunda elde edilen LVDT verileri kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıcı deformasyon profilleri "y" eksenine göre simetrisi alınarak plaka testine tabi tutulan tüm karışım PMT tabaka kesitlerinde plaka altında ve plaka merkezinden 25 ve 40 cm uzaktaki ölçümlerden elde edilen kalıcı deformasyonlar Şekil 51'deki gibi hazırlanmıştır.



Şekil 51. Kalıcı yüzey deformasyon profilleri

100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda temel tabakalarında meydana gelen kalıcı deformasyonlara bakıldığında %100 RAP - %3 çimento karışımından yapılan PMT tabakası ile %20 RAP - %80 DA karışımından yapılan tabakanın plaka merkezinde meydana getirdiği oturma miktarı aynı olmuştur. Karışımın RAP içeriğindeki artışın kalıcı deformasyonları arttırdığı, çimentonun ise deformasyonları azalttığı gözlemlenmiştir.



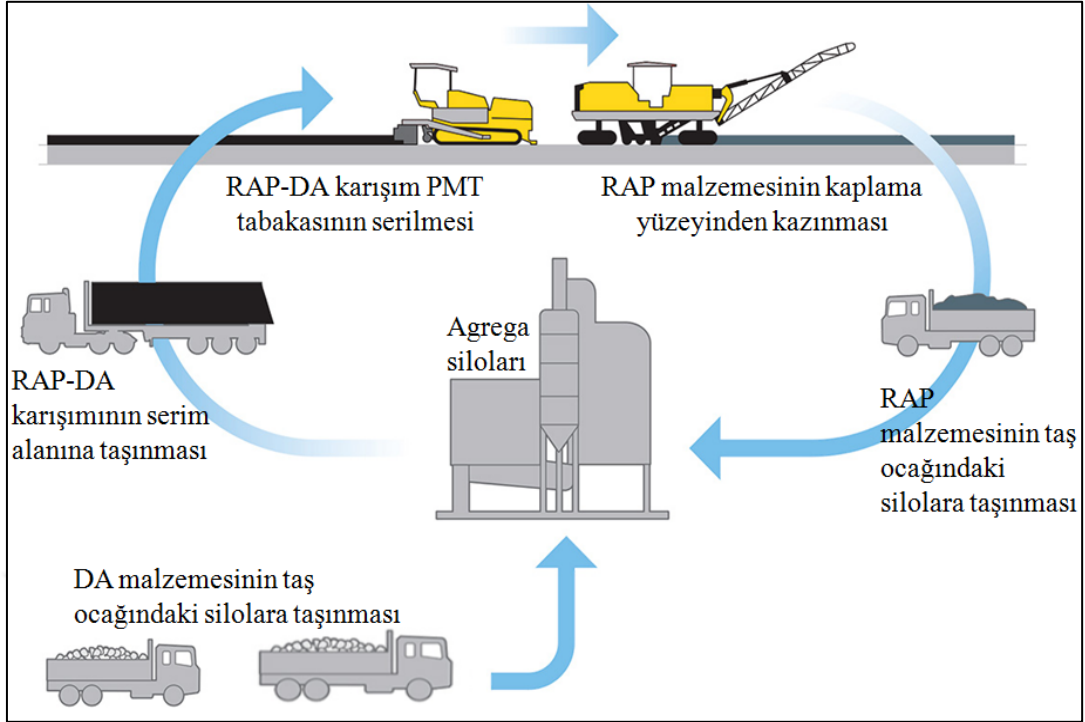
#### **4. MALİYET ANALİZİ**

Dünyada her yıl yaklaşık 1.500 milyon ton asfalt üretimi için 1.425 milyon agrega ve 75 milyon ton bitüm tüketilmekte, sökülen asfaltın oluşturduğu atık yığınları doğaya kontrolsüz olarak terk edilmektedir. Amerika Birleşik Devletlerinde her yıl yaklaşık 500 milyon ton asfalt üretimi, yaklaşık %15'ini sökülmiş asfaltın geri kazanılması ile asfalt ile yapılmakta ve yılda 300 milyon \$ tasarruf sağlanmaktadır (URL-1).

DA, DA-RAP ve DA-RAP-çimento karışımlarından yapılacak bir PMT tabakası için yapılacak maliyet hesaplarında maliyeti oluşturan; malzemelerin taşıma maliyetleri ve PMT yapımı için belirtilen kalemlerdir. Bu çalışmada, RAP malzemesinin kazıma maliyeti, zaten yol yüzeyinden kazınıp atık sahalarına boşaltılacağı için ekstra bir kazı maliyeti oluşturmadığı, malzeme için de para ödenmediği için malzeme maliyetinin olmadığı hesaba katılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada hazırlanan karışımların silodan-serim alanına taşıma maliyetlerinin taşınan karışım ne olursa olsun mesafeye bağlı olarak aynı olması sebebiyle taşıma maliyetleri hesaplara katılmamıştır. Hesaba katılan taşıma maliyetleri yalnızca RAP malzemesinin kazıma alanından-siloya, çimentonun da temin noktasından-siloya olan maliyetler olarak hesaplanmış ve tutarlara dâhil edilmiştir.

##### **4.1. Malzeme Taşıma Maliyeti**

RAP-DA-çimento karışım malzemesi ile yapılacak yeni bir PMT tabakası için malzemelerin taşınma maliyetleri; DA'nın ocaktan siloya taşınması, RAP malzemesinin kazındığı alandan siloya taşınması, çimentonun taş ocağına en yakın noktadan temin edilip siloya taşınması ve silo bantlarından daha önceden belirlenen oranlarda geçerek kamyonlara yüklenip PMT tabakası yapım alanına taşınması kalemlerinden oluşmaktadır (Şekil 52). Bu tez kapsamında yapılan malzeme taşıma maliyetleri hesaplamalarında karışım malzemelerinin PMT tabakası yapım alanına taşınma maliyeti hesaplara katılmamıştır. Bunun sebebi, RAP malzemesi kullanılsın ya da kullanılsın DA'nın yapım alanına taşınacak olmasından ötürü ekstra bir maliyet doğurmayacak oluşudur.



Şekil 52. PMT tabakası yapımı için malzemelerin taşınması (URL-7).

#### 4.1.1. %100 DA'nın Ocaktan Konkasöre Taşınma Maliyeti

Taş ocağından elde edilen DA malzemesi konkasöre götürülüp belirlenen gradasyonlara ayrılarak silolarda depolanmak üzere şantiye sahasına getirilir. DA'nın ocaktan konkasöre getirilmesi için gereken nakliye ücreti; taşıma mesafesinin ortalama 150 m olması durumunda PMT tabakası yapımı için gereken poz birim fiyatına dâhildir. KGM/6100/3 pozuna göre PMT tabakası yapımında (kırılmış ve elenmiş ocak taşıyla) ocak-konkasör arası mesafenin 150 m'den fazla 10.000 m'den az olması durumunda taşıma bedeli (5) No'lu eşitlik kullanılarak hesaplanır. 10.000 m'den daha fazla taşıma bedelleri için ise (6) No'lu eşitlik kullanılır (URL-8).

$$F = A \times 1,25 \times 0,00017 \times K \times \sqrt{M} - 0,0026 \times K \quad (\text{TL/ton}) \quad (5)$$

$$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01) - 0,0026 \times K \quad (\text{TL/ton}) \quad (6)$$

Burada; F mali tutar (TL), M ortalama taşıma mesafesi (m), K motorlu araçlara ait taşıma katsayısı ve A güçlük katsayısıdır.

#### 4.1.2. Çimento ve RAP Malzemesini Siloya Taşıma Maliyeti

PMT tabakası için kullanılan çimento cinsi CEM IV 32,5 R olan puzolanik çimento olarak belirlenmiştir. Kazıdan başka inşaat malzemelerinin taşınmasına ilişkin pozlar için KGM tarafından kullanılan iki poz vardır. Bunlar formülasyonları ile birlikte Tablo 23'te gösterilmektedir (URL-9, URL-10).

Tablo 23. Kazıdan başka inşaat malzemelerinin taşınmasına ilişkin pozlar ve tanımları

Poz No	Tanımı	
KGM 07.005/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması $\leq 10000$ m	$F = A \times 1,25 \times K \times 0,00017 \times M^{1/2}$
	F	Tutar (TL)
	M	m cinsinden ortalama taşıma mesafesi
	K	Motorlu araçlara ait taşıma katsayı
	A	Güçlük katsayısı
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması $> 10000$ m	$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01)$
	F	Tutar (TL)
	M	km cinsinden ortalama taşıma mesafesi
	K	Motorlu araçlara ait taşıma katsayı
	A	Güçlük katsayısı

K=196 olup rayiç cetvelinde yazılı olan (poz no:02.017) her cins ve tonajda motorlu araca ait taşıma katsayısıdır.

M= Taşıma yolu üzerinden ölçülen mesafeler esas alınarak hesaplanan ortalama taşıma mesafesidir.

Güçlük katsayısı, güç şartlar altında yapılacak taşımalarda taşıma yollarının özelliklerini, iklimi ve taşımanın o bölgenin ticari nakliyesinin yoğun olduğu zamana rastlaması gibi faktörlerden birinin veya birkaçının aynı anda olması halinde ayrıca işin özelliğine bağlı olarak ilk keşif sırasında veya ihaleden önce olmak üzere idarece yetkili makamlarca tespit edilen A katsayısı 1 (dâhil) - 3 (dâhil) arasında bir değerdir. Kolay şartlar altında yapılan çalışmalardan 1'den küçük de tespit edilebilir. Eğer ilk keşif veya ihaleden önce A için bir değer tespit edilmemişse A=1 alınarak uygulama yapılmaktadır.

#### 4.2. Plent-miks Temel (PMT) Tabakası Yapım Maliyeti

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından 1 ton kırılmış ve elenmiş ocak taşıyla PMT tabakası yapımı için gerekli gradasyonda malzemelerin hazırlanmasından arazöz ile sulanmasına kadar malzemelerin miktarları Tablo 24'teki KGM/6100/3 pozunda gösterilmektedir. Ocak-konkasör arası ortalama 150 m'den fazla mesafeye taşıma, agreganın plent sahasına, suyun iş başına ve plente, karışımın ise serilme yerine taşınma maliyeti birim fiyata dâhil değildir (URL-8).

Tablo 24. KGM/6100/3 pozunu analizi (URL-8).

Rayiç No	Tanımı	Birimi	2017 Birim Fiyat (TL)	Miktarı
KGM/4101/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm (1 1/2")'lik agregası hazırlanması	ton	16,62	0,239
KGM/4102/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 25 mm (1") ve 19 mm (3/4")'lik agregası hazırlanması	ton	18,58	0,239
KGM/4105/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 12,5 mm (1/2") ve 9,5 mm (3/8")'lik agregası hazırlanması	ton	21,06	0,239
KGM/4107/B	Ocak taşından kırılmış ve elenmiş 4,75 mm (No.4) ve daha küçük agregası hazırlanması	ton	22,28	0,24
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	ton	4,59	1
KGM/4269	Malzemenin kantar ile tartılması	ton	0,05	1
KGM/4466/5	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyarlı fişişlerle serilmesi ve silindirle sıkıştırılması	ton	9,94	1
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	8,86	0,01

KGM/6100/3 pozunda agregalar için belirtilen elek numaraları taş ocağından PMT tabakası için temin edilen 0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm boyutlarındaki agregalar için verilmemektedir. Bu boyutlardaki ocak taşından kırılmış elenmiş agregası hazırlanması için de bir poza rastlanmamıştır. Fakat KGM'de yapım işleri tarafından keşfe çıkılarak agregası malzemeleri için özel pozlar hazırlanabilmektedir. Bu sebeple bu tez çalışmasında kullanılan 0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm ocak taşından kırılmış ve elenmiş agregası malzemesi hazırlanması için özel bir poz hazırlanarak 2017 birim fiyatları KGM/6100/3

pozundaki birim fiyat listesinden yaklaşık olarak hesap edilmiştir. Kaba daneli agreganın ince daneli agregaya göre daha ucuz olması göz önünde bulundurulmuştur. Belirlenen agrega birim fiyatları ve özel hazırlanan poz numaraları Tablo 25'teki gibi yapılmıştır.

Tablo 25. Belirlenen özel pozlar ile PMT yapım maliyeti hesabında kullanılan veriler

Poz No	Tanımı	Birim	Miktarı	2017 Birim Fiyat (TL)
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	ton	1	17,5
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	ton	1	20,0
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	ton	1	22,0
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesi hazırlanması	ton	1	0
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5 R)	ton	1	150,0
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	ton	1	4,59
KGM/4466/5	Malzemenin kantar ile tartılması	ton	1	0,05
KGM/4269	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindirle sıkıştırılması	ton	1	9,94
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	1	8,86
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhil				

KGM/6100/3 pozuna göre yapılan bir PMT tabakasının yapım maliyeti, belirlediğimiz özel pozlara göre yapılan PMT tabakasından daha ucuz olmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan DA malzemesinin ince dane içeriğinin fazla olması, malzeme birim fiyatlarını arttırmıştır. Fakat daha fazla ince dane boyutunda malzeme kullanılarak daha iyi kalitede bir PMT tabakası teşkil edilmiştir.

### 4.3. RAP-DA-Çimento Karışımlarından Yapılan PMT Tabakalarının Ekonomik Analizi

DA, RAP ve çimento malzemeleri ocaktaki silolara hesaplanan gradasyonlarda ayrı ayrı yerleştirildikten sonra DA-RAP-çimento oranına göre gereken ağırlıktaki malzemenin

gereken gradasyonlarından alınmak üzere sisteme ağırlık verileri girilerek bantlardan gelen malzemeler plente yüklenerek harmanlanır.

PMT tabakası için yapılan çalışmalarda KTŞ'nin yaş CBR ve gradasyon limitlerini sağlayan RAP-DA ve RAP-DA-çimento karışımları ve bu karışımlar için plente yüklenecek malzemelerin dane boyutlarının karıştırılma oranları Tablo 26'da verilmektedir.

Tablo 26. Eleklerden alınan malzeme miktarı ve cinsleri

Malzeme	%DA	%DA	%RAP	%DA
Karışım elek boyutları	19-38	7-19	0-25	0-7
Karışım oranları (%)				
%100 DA	26	30	0	44
%10 RAP - %90 DA	24	26	10	40
%20 RAP - %80 DA	24	22	20	34
%30 RAP - %70 DA - %1 çimento	18	18	30	34
%30 RAP - %70 DA - %2 çimento	18	18	30	34
%30 RAP - %70 DA - %3 çimento	18	18	30	34
%40 RAP - %60 DA - %1 çimento	15	17	40	28
%40 RAP - %60 DA - %2 çimento	15	17	40	28
%40 RAP - %60 DA - %3 çimento	15	17	40	28
%50 RAP - %50 DA - %2 çimento	13	13	50	24
%50 RAP - %50 DA - %3 çimento	13	13	50	24
%60 RAP - %70 DA - %2 çimento	11	11	60	18
%60 RAP - %40 DA - %3 çimento	11	11	60	18
%100 RAP - %3 çimento	0	0	100	0

Yapılması planlanan PMT tabaka kesitinin boyutları, kullanılacak malzemelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ( $\bar{Y}_{kmax}$ ) ve toplam malzeme miktarları Tablo 27'de gösterilmektedir.

Tablo 27. 1 km uzunluğundaki PMT tabakasında kullanılacak malzeme miktarları

Malzeme	Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Kalınlık (m)	$\gamma_{\text{kmaks}}$ (t/m <sup>3</sup> )	Toplam malzeme miktarı (ton)
% 100 DA	8	1000	0,20	2,23	3.568
% 10 RAP - %90 DA				2,181	3.489,6
%20 RAP - %80 DA				2,15	3.440
%30 RAP - %70 DA - %1 çimento				2,178	3.484,8
%30 RAP - %70 DA - %2 çimento				2,184	3.494,4
%30 RAP - %70 DA - %3 çimento				2,21	3.536
%40 RAP - %60 DA - %1 çimento				2,141	3.425,6
%40 RAP - %60 DA - %2 çimento				2,158	3.452,8
%40 RAP - %60 DA - %3 çimento				2,176	3.481,6
%50 RAP - %50 DA - %2 çimento				2,138	3.420,8
%50 RAP - %50 DA - %3 çimento				2,142	3.427,2
%60 RAP - %40 DA - %2 çimento				2,064	3.302,4
%60 RAP - %40 DA - %3 çimento				2,100	3.360,0
% 100 RAP - %3 çimento				2,092	3.347,2

#### 4.3.1. %100 DA Malzemesinden Yapılan PMT Tabakasının Maliyet Analizi

%100 DA malzemesinden serilecek bir PMT tabakası için malzeme temininden arazöle sıkıştırmaya kadar malzemenin boyutlarına göre kullanım oranlarına göre yapılan maliyet hesabı Tablo 28'deki gibidir. Bu hesaba, karışımın konkasörden serim alanına olan taşıma maliyeti dâhil değildir. Ocak-konkasör arası mesafenin 150 m'den az olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla ocak-konkasör nakliye masrafı PMT tabakası yapım fiyatına dâhildir. Tablo 27'de yapılan hesaba göre 1 km yol için PMT tabakasında kullanılacak toplam %100 DA ağırlığı 3.568 ton'dur. Hesaplarda miktarlar bu ağırlığa göre belirlenmiştir.

Tablo 28. %100 DA malzemesi ile PMT tabakası yapım maliyeti

Poz No	Tanımı	Kullanım oranı (%)	Birimi	Miktar (ton)	2017 Birim Fiyat (TL/t)	Tutar (TL)
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	26	ton	927,68	17,5	16.234,4
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	30	ton	1.070,4	20,0	21.408
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	44	ton	1.569,92	22,0	34.538,24
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesi hazırlanması	0	ton	0	0	0
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5R)	0	ton	0	150,0	0
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	ton	3.568	4,59	16.377,12
KGM/4466/5	Malz. kantar ile tartılması	-	ton	3.568	0,05	178,4
KGM/4269	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyarlı finişerle serilmesi ve silindirle sıkıştırılması	-	ton	3.568	9,94	35.465,92
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	ton	3.568	8,86	31.612,48
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhil					<b>TOPLAM</b>	<b>155.814</b>

#### 4.3.2. DA-RAP Karışımlarından Yapılan PMT Tabakasının Maliyet Analizi

DA-RAP karışımından serilecek bir PMT tabakası için malzeme temininden arazözle sıkıştırmaya kadar yapılan maliyet hesabı Tablo 30'daki gibidir. Bu hesaba, karışımın konkasörden serim alanına olan taşıma maliyeti dâhil değildir. Ocak-konkasör arası mesafenin 150 m'den az olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla ocak-konkasör nakliye masrafı PMT tabakası yapım fiyatına dâhildir. RAP malzemesinin kazıma alanından siloya taşıma maliyeti Tablo 23'te verilen hesaba göre analize dâhil edilerek RAP malzemesinin kazındığı yerden siloya taşınması için gereken taşıma maliyetinin hesabında kullanılmıştır.



Kazıma alanı ile silo arasındaki mesafenin 50 km olduğu ve dolayısıyla 10.000 m'den uzak mesafe olması sebebiyle 07.006/K pozundaki formülasyondan faydalanılmıştır.

Yapılan laboratuvar testlerinde KTŞ limitlerine göre kullanılabilir çimento takviyesiz RAP-DA oranları %10 RAP ve %20 RAP karışımı malzemeler olarak belirlenmiştir. Yapılan maliyet analizlerinde de bu karışımlar için hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 27'de yapılan hesaba göre 1 km yol için %10 RAP + %90 DA malzemesinden oluşan karışımda PMT tabakasında kullanılacak RAP-DA ağırlığı 3.489,6 ton'dur (Tablo 29).

Tablo 29. %10 RAP - %90 DA karışımından PMT tabakası yapım maliyeti

Poz No	Tanımı	Kullanım oranı (%)	Birimi	Miktar (ton)	2017 Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)	
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	24	ton	837,504	17,50	14.656,32	
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	26	ton	907,296	20,00	18.145,92	
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	40	ton	1.395,84	22,00	30.708,48	
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesi hazırlanması	10	ton	348,96	0	0	
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5 R)	0	ton	0	150,00	0	
KGM/4465/3	PMT alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	ton	3.489,6	4,59	16.017,26	
KGM/4466/5	Malz. kantar ile tartılması	-	ton	3.489,6	0,05	174,48	
KGM/4269	PMT alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyarlı finişerle serilmesi ve silindirle sıkıştırılması	-	ton	3.489,6	9,94	34.686,62	
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	ton	3.489,6	8,86	30.917,86	
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması >10000 m (RAP nakliyesi)	$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01)$		3.847,284			
		A	1				
		K	196				
		M (km)	50				
		Miktar (t)	348,96				
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhil						<b>TOPLAM</b>	<b>149.154,2</b>

Tablo 27'de yapılan hesaba göre 1 km yol için %20 RAP - %80 DA malzemesinden oluşan karışımda PMT tabakasında kullanılacak malzeme ağırlığı 3.440 ton'dur. Hesaplarda miktarlar bu ağırlığa göre belirlenmiştir (Tablo 30).

Tablo 30. %20 RAP - %80 DA karışımından PMT tabakası yapım maliyeti

Poz No	Tanımı	Kullanım oranı (%)	Birimi	Miktarı (ton)	2017 Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	24	ton	825,6	17,50	14.448,00
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	22	ton	756,8	20,00	15.136,00
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	34	ton	1.169,6	22,00	25.731,20
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesi hazırlanması	20	ton	688	0	0
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5R)	0	ton	0	150,00	0
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	ton	3.440	4,59	15.789,6
KGM/4466/5	Malzemenin kantar ile tartılması	-	ton	3.440	0,05	172,00
KGM/4269	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindire sıkıştırılması	-	ton	3.440	9,94	34.193,6
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	ton	3.440	8,86	30.478,4
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması >10000 m (RAP nakliyesi)	F = A × 1,25 × K × (0,0007 × M + 0,01)		7.585,2		
		A	1			
		K	196			
		M (km)	50			
		Miktar (t)	688			
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhil					<b>TOPLAM</b>	<b>143.534</b>

#### **4.3.4. DA-RAP-Çimento Karışımlarından Yapılan PMT Tabakasının Maliyet Analizi**

DA-RAP-çimento karışımından serilecek bir PMT tabakası için malzeme temininden arazözle sıkıştırmaya kadar 1 ton malzemenin boyutlarına göre kullanım oranlarına göre yapılan maliyet hesapları yapılmıştır. Bu hesaplarda, karışımın konkasörden serim alanına olan taşıma maliyeti dâhil değildir. Ocak-konkasör arası mesafenin 150 m'den az olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla ocak-konkasör nakliye masrafı PMT tabakası yapım fiyatına dâhildir.

RAP malzemesinin kazıma alanından siloya ve çimentonun da temin noktasından siloya taşıma maliyetinin hesabı Tablo 23'e göre hesaba katılmıştır. Kazıma yeri ile silo arasındaki mesafenin ortalama 50 km olduğu ve dolayısıyla 10.000 m'den uzak mesafe olması sebebiyle 07.006/K pozundaki formülasyondan faydalanılmıştır.

Çimentonun kolay temin edilebilir bir malzeme olması sebebiyle silo civarındaki yaklaşık 5 km mesafe içinde bir noktadan temin edilebileceği düşünülerek hesap yapılmıştır. Temin noktasından siloya olan mesafe 5.000 m olarak 10.000 m'den daha yakın olması sebebiyle 07.005/K pozu kullanılarak maliyet hesaplanmıştır.

Çimento takviyeli %60 ve %100 RAP içeren karışımlar için hesaplamalar ayrıntılı olarak aşağıda verilmiş olup (Tablo 31-33) diğer karışımların maliyet analizleri ile ilgili bilgiler hesaplama sonuçları şeklinde verilmiştir.

Tablo 31. %60 RAP - %40 DA - %2 çimento karışımından PMT tabakası yapım maliyeti

Poz No	Tanımı	Kullanım oranı (%)	Birimi	Miktarı (ton)	2017 Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	11	ton	0,363	17,50	6.357,12
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	11	ton	0,363	20,00	7.265,28
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	18	ton	0,594	22,00	13.077,5
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesi hazırlanması	60	ton	1.981,44	0	0,00
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5 R)	2	ton	66,048	150,00	9.907,2
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	ton	3,302,4	4,59	15.158,02
KGM/4466/5	Malzemenin kantar ile tartılması	-	ton	3,302,4	0,05	165,12
KGM/4269	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindirle sıkıştırılması	-	ton	3,302,4	9,94	32.825,86
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	ton	3,302,4	8,86	29.259,26
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması >10000 m (RAP nakliyesi)	$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01)$				21.840
		A	1			
		K	196			
		M (km)	50			
		Miktar (t)	1.981,44			
KGM 07.005/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması <10000 m (Çimento nakliyesi)	$F = A \times 1,25 \times K \times 0,00017 \times M^{1/2}$				275,09
		A	1			
		K	196			
		M (m)	10.000			
		Miktar (t)	66,048			
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhil					<b>TOPLAM</b>	<b>136.135,8</b>

Tablo 27'de yapılan hesaba göre 1 km yol için %60 RAP - %40 DA - %3 çimento malzemesinden oluşan karışımda PMT tabakasında kullanılacak RAP-DA-çimento miktarı 3.360 ton'dur. Hesaplarda miktarlar bu ağırlığa göre belirlenmiştir. Bu karışım oranıyla yapılacak 1 km'lik bir PMT tabakasının maliyeti Tablo 32'teki gibidir.

Tablo 32. %60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışımından PMT tabakası yapım maliyeti

Poz No	Tanımı	Kullanım oranı (%)	Birimi	Miktarı (ton)	2017 Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	11	ton	369.6	17,50	6.468,00
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	11	ton	369,6	20,00	7.392,00
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	18	ton	604,8	22,00	13.305,60
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesi hazırlanması	60	ton	2.016	0	0.00
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5R)	3	ton	100,8	150,00	15.120
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	ton	3.360	4,59	15.422,4
KGM/4466/5	Malz. kantar ile tartılması	-	ton	3.360	0,05	168,00
KGM/4269	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyarlı finişerle serilmesi ve silindire sıkıştırılması	-	ton	3.360	9,94	33.398,4
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	ton	3.360	8,86	29.769,6
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması >10000 m (RAP nakliyesi)	$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01)$				22.226,4
		A		1		
		K		196		
		M (km)		50		
			Miktar (t)	2.016		
KGM 07.005/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması <10000 m (Çimento nakliyesi)	$F = A \times 1,25 \times K \times 0,00017 \times M^{1/2}$				419,832
		A		1		
		K		196		
		M (m)		10.000		
			Miktar (t)	100,8		
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhil					<b>TOPLAM</b>	<b>143.690,2</b>

Tablo 27'de yapılan hesaba göre 1 km yol için %100 RAP - %3 çimento malzemesinden oluşan karışımda 1 km'lik PMT tabakasında kullanılacak RAP-çimento ağırlığı 3.347,2 ton'dur. Hesaplarda miktarlar bu ağırlığa göre belirlenmiştir. Bu karışım oranlarıyla yapılacak 1 km'lik bir PMT tabakasının yapım maliyeti Tablo 33'teki gibidir.

Tablo 33. %100 RAP - %3 çimento karışımından PMT tabakası yapım maliyeti

Poz No	Tanımı	Kullanım oranı (%)	Birimi	Miktarı (ton)	2017 Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	0	ton	0	17,50	0
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	0	ton	0	20,00	0
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	0	ton	0	22,00	0
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesi hazırlanması	100	ton	3.347,2	0	0
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5R)	3	ton	100,416	150,00	15.062,4
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	-	ton	3.347,2	4,59	15.363,65
KGM/4466/5	Malz. kantar ile tartılması	-	ton	3.347,2	0,05	167,36
KGM/4269	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindire sıkıştırılması	-	ton	3.347,2	9,94	33.271,17
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	-	ton	3.347,2	8,86	29.656,19
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması >10000 m (RAP nakliyesi)	$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01)$		36.902,88		
		A	1			
		K	196			
		M (km)	50			
		Miktar (t)	3.347,2			
KGM 07.005/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması <10000 m (Çimento nakliyesi)	$F = A \times 1,25 \times K \times 0,00017 \times M^{1/2}$		418,233		
		A	1			
		K	196			
		M (m)	10.000			
		Miktar (t)	100,416			
Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhil					<b>TOPLAM</b>	<b>130.841,9</b>

Her bir karışım için kazıma alanı-silo arası mesafelerin 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 ve 100 km olması durumlarında taşıma maliyetleri ayrıca hesaplanmıştır. Taşıma mesafesinin 10 km olması durumunda 07.005/K poz numaralı formülden faydalanılmıştır. Daha uzak mesafeler için 07.006/K pozunu kullanılmıştır.

Farklı RAP oranlarındaki karışımlar için gerekli olan RAP ağırlıkları ve bu RAP malzemelerinin farklı mesafelere bağlı taşıma maliyeti tutarları Tablo 34'te gösterilmektedir.



Tablo 34. RAP malzemelerinin farklı mesafelere bağlı taşıma maliyetleri

Karışım	%10 RAP - %90 DA	%20 RAP - %80 DA	%30 RAP - %70 DA - %1 çimento	%30 RAP - %70 DA - %2 çimento	%30 RAP - %70 DA - %3 çimento	%40 RAP - %60 DA - %1 çimento	%40 RAP - %60 DA - %2 çimento	%40 RAP - %60 DA - %3 çimento	%50 RAP - %50 DA - %2 çimento	%50 RAP - %50 DA - %3 çimento	%60 RAP - %40 DA - %2 çimento	%60 RAP - %40 DA - %3 çimento	%100 RAP - %3 çimento
RAP ağırl. (ton)	348,96	688,0	1.045,44	1.048,32	1.060,8	1.370,24	1.381,12	1.392,64	1.710,4	1.713,6	1.981,44	2.016,0	3.347,2
Taşıma mesafesi (km)	RAP taşıma maliyetleri (kazıma alanından siloya) (TL)												
10	1.453,418	2.865,52	4.354,258	4.366,253	4.418,232	5.707,05	5.752,365	5.800,346	7.123,816	7.137,144	8.252,698	8.396,64	13.941,09
20	2.051,885	4.045,44	6.147,187	6.164,122	6.237,504	8.057,011	8.120,986	8.188,723	10.057,15	10.075,97	11.650,87	11.854,08	19.681,54
30	2.650,351	5.225,36	7.940,117	7.961,99	8.056,776	10.406,97	10.489,61	10.577,1	12.990,49	13.014,79	15.049,04	15.311,52	25.421,98
40	3.248,818	6.405,28	9.733,046	9.759,859	9.876,048	12.756,93	12.858,23	12.965,48	15.923,82	15.953,62	18.447,21	18.768,96	31.162,43
50	3.847,284	7.585,2	11.525,98	11.557,73	11.695,32	15.106,9	15.226,85	15.353,86	18.857,16	18.892,44	21.845,38	22.226,4	36.902,88
60	4.445,75	8.765,12	13.318,91	13.355,6	13.514,59	17.456,86	17.595,47	17.742,23	21.790,5	21.831,26	25.243,55	25.683,84	42.643,33
70	5.044,217	9.945,04	15.111,84	15.153,47	15.333,86	19.806,82	19.964,09	20.130,61	24.723,83	24.770,09	28.641,72	29.141,28	48.383,78
80	5.642,683	11.124,96	16.904,76	16.951,33	17.153,14	22.156,78	22.332,71	22.518,99	27.657,17	27.708,91	32.039,88	32.598,72	54.124,22
90	6.241,15	12.304,88	18.697,69	18.749,2	18.972,41	24.506,74	24.701,33	24.907,37	30.590,5	30.647,74	35.438,05	36.056,16	59.864,67
100	6.839,616	13.484,8	20.490,62	20.547,07	20.791,68	26.856,7	27.069,95	27.295,74	33.523,84	33.586,56	38.836,22	39.513,6	65.605,12



RAP kullanım oranı arttıkça malzemenin taşınması için gereken taşıma maliyeti de lineer bir şekilde artmaktadır. Karışımda %10 RAP kullanılması durumunda 100 km mesafeye taşıma maliyeti %100 RAP karışımının taşıma maliyetinin yaklaşık 1/10'udur. Yapılan hesaplamalarda güçlük katsayısı 1 olarak alınmıştır. Arazi şartları göz önüne alındığında daha kolay çalışmalar için bu katsayının daha düşük alınabileceği ve bu durumda taşıma maliyetlerinin düşeceği aşikârdır.

KTŞ'nin PMT tip-1 tabakası için belirttiği yaş CBR ve gradasyon kriterlerini karşılayan tüm karışımların yapılacak olan 1 km'lik PMT tabakası için PMT yapımı, RAP malzemesinin ve çimentonun siloya taşınma maliyeti dâhil toplam tutarı, kazıma alanı-silo arası mesafenin 50 km olması durumunda ve çimento temin noktasının silonun 5 km civarında olması durumunda Tablo 35'te gösterilmektedir.

Tablo 35. Malzemelerin siloya taşınma ve PMT yapım maliyetleri dâhil toplam tutarlar

Karışım	Tutar (RAP ve çimento taşıma maliyeti ve PMT yapımı dâhil, TL)									
	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km	70 km	80 km	90 km	100 km
% 100 DA	155.814,0									
% 10 RAP - % 90 DA	146.760,4	147.358,8	147.957,3	148.555,8	149.154,2	149.752,7	150.351,2	150.949,6	151.548,1	152.146,6
% 20 RAP - % 80 DA	138.814,3	139.994,2	141.174,2	142.354,1	143.534,0	144.713,9	145.893,8	147.073,8	148.253,7	149.433,6
% 30 RAP - % 70 DA - % 1 Çimento	140.999,0	142.791,9	144.584,9	146.377,8	148.170,7	149.963,7	151.756,6	153.549,5	155.342,5	157.135,4
% 30 RAP - % 70 DA - % 2 Çimento	146.774,6	148.572,5	150.370,3	152.168,2	153.966,1	155.763,9	157.561,8	159.359,7	161.157,5	162.955,4
% 30 RAP - % 70 DA - % 3 Çimento	153.973,2	155.792,4	157.611,7	159.431,0	161.250,3	163.069,5	164.888,8	166.708,1	168.527,4	170.346,6
% 40 RAP - % 60 DA - % 1 Çimento	133.025,1	135.375,1	137.725,0	140.075,0	142.425,0	144.774,9	147.124,9	149.474,9	151.824,8	154.174,8
% 40 RAP - % 60 DA - % 2 Çimento	139.404,4	141.773	144.141,6	146.510,2	148.878,9	151.247,5	153.616,1	155.984,7	158.353,3	160.722,0
% 40 RAP - % 60 DA - % 3 Çimento	145.934,6	148.322,9	150.711,3	153.099,7	155.488,1	157.876,5	160.264,8	162.653,2	165.041,6	167.430,0
% 50 RAP - % 50 DA - % 2 Çimento	117.994,6	120.927,9	123.861,3	126.794,6	129.727,9	132.661,3	135.594,6	138.527,9	141.461,3	144.394,6
% 50 RAP - % 50 DA - % 3 Çimento	138.124,6	141.063,4	144.002,2	146.941,0	149.879,9	152.818,7	155.757,5	158.696,3	161.635,1	164.574
% 60 RAP - % 40 DA - % 2 Çimento	122.543,1	125.941,3	129.339,5	132.737,7	136.135,8	139.534,0	142.932,2	146.330,3	149.728,5	153.126,7
% 60 RAP - % 40 DA - % 3 Çimento	129.860,5	133.317,9	136.775,4	140.232,8	143.690,2	147.147,7	150.605,1	154.062,6	157.520,0	160.977,4
% 100 RAP - % 3 Çimento	107.880,1	113.620,5	119.361,0	125.101,4	130.841,9	136.582,3	142.322,8	148.063,2	153.803,7	159.544,1

Tablo 35'e göre tamamı ocak malzemesinden (%100 DA ile) serilecek 1 km uzunluğundaki bir PMT tabakası için konkasör-serim alanı taşıma maliyeti hariç toplam tutar yaklaşık 155.814,0 TL olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi %10 RAP - %90 DA, %20 RAP - %80 DA, %40 RAP - %60 DA - %1 çimento, %50 RAP - %50 DA - %2 çimento ve %60 RAP - %40 DA - %2 çimento karışımından hazırlanan karışımın toplam maliyeti 100 km uzaklıktan temin edilen bir RAP malzemesi için bile tamamı %100 DA malzemesinden teşkil edilecek bir PMT tabakasından daha ekonomik olmaktadır.

Tablo 35'te göze çarpan bir diğer husus, karışımda kullanılan çimento miktarının artması ve dolayısıyla siloya olan taşıma maliyetinin artmasından ötürü karışımın ekonomik kazanımını belirgin biçimde düşürdüğüdür. Örneğin %30 RAP - %70 DA - %1 çimento karışımı 90 km'ye kadar ekonomik bir alternatif olurken %30 RAP - %70 DA - %3 çimento karışımı sadece 20 km'ye kadar RAP taşınması durumunda ekonomiktir.

%30 RAP - %70 DA - %1 çimento karışımının toplam maliyetinin %100 DA malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasıninkine kıyasla %0,08 gibi bir zarar ettirdiği görülmektedir. Bu denli ufak bir farkın RAP kullanımının çevresel avantajları düşünüldüğünde kabul edilebilir olduğu düşünülmelidir.

%100 RAP - %3 çimento karışımının kullanılması durumunda RAP malzemesinin kazıma alanından siloya taşıma maliyetinin 90 km'nin üzerindeki bir uzaklıktan temini durumunda toplam maliyeti %100 DA malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasının üzerine çıkarttığı görülmektedir. Fakat karışımda DA kullanılmaması nedeniyle malzemelerin taş ocağındaki silolara taşınarak DA ile silolarda karıştırılma gereksinimi kalmadığı için RAP malzemesinin serim alanına en yakın yerdeki bir siloya taşınması taşıma maliyetini düşürecektir. RAP-DA-çimento malzemeleri siloda karıştırıldıktan sonra malzemelerin serim alanına taşınma maliyetleri de göz önüne alınırsa hem siloya taşınma maliyeti hem de serim alanına taşıma maliyetleri olacaktır. Bu sebeple silonun serim yerine yakın olması kazıma alanı - silo, silo - serim alanı malzeme taşıma maliyetlerinde belirgin bir azalma oluşturacaktır. Bu durumda da %100 RAP - %3 çimento malzemelerinin karışımından yapılacak bir PMT tabakasının toplam maliyeti %100 DA ile yapılan PMT tabakasından daha ekonomik olabilecektir.

%100 DA ile yapılan PMT tabakasını dikkate alarak, PMT tabakasından RAP malzemesi veya RAP-çimento karışımı kullanmanın sağlayacağı kâr veya zarar miktarları ve oranları Tablo 36'da sunulmuştur. Tablo 35 ve Tablo 36'da RAP malzemesinin kazıma

alanından-siloya olan uzaklığı 50 km, çimentonun siloya uzaklığı ise ortalama 5 km olarak hesaba katılmıştır.

Tablo 36. PMT tabakasında RAP/çimento kullanımından sağlanan kâr oranları

Malzeme	Tutar (TL/km)	Kâr (+) / Zarar (-) miktarı (TL)	Kâr oranı (%)
%100 DA	155.814,0	0	%0
%10 RAP - %90 DA	149.154,2	+6.659,8	%4,27
%20 RAP - %80 DA	143.534,0	+12.280,0	%7,88
%30 RAP - %70 DA - %1 çimento	148.170,7	+7.643,3	%4,90
%30 RAP - %70 DA - %2 çimento	153.966,1	+1.847,9	%1,19
%30 RAP - %70 DA - %3 çimento	161.250,3	-5.436,3	-%3,49
%40 RAP - %60 DA - %1 çimento	142.425,0	+13.389,0	%8,59
%40 RAP - %60 DA - %2 çimento	148.878,9	+6.935,1	%4,45
%40 RAP - %60 DA - %3 çimento	155.488,1	+325,9	%0,21
%50 RAP - %50 DA - %2 çimento	129.727,9	+26.086,1	%16,74
%50 RAP - %50 DA - %3 çimento	149.879,9	+5.934,1	%3,81
%60 RAP - %40 DA - %2 çimento	136.135,8	+19.678,2	%12,63
%60 RAP - %40 DA - %3 çimento	143.690,2	+12.123,8	%7,78
%100 RAP - %3 çimento	130.841,9	+25,167	%16,2

Tablo 36'da görüldüğü gibi çimentosuz karışımlarda RAP malzemesinin karışımdaki kullanım oranının artmasıyla birlikte sağlanan kâr artmaktadır. Karışımdaki çimento oranının artması ise kâr oranını düşürmektedir. En büyük kâr oranı %50 RAP - %50 DA - %2 çimento karışımından elde edilmiştir (%16,74). Sonraki sırada ise %100 RAP - %3 çimento karışımı gelmektedir (%16,2). RAP malzemesinin kazı alanının siloya olan taşıma mesafesinin 50 km olarak, çimentonun temin edildiği noktanın siloya olan uzaklığının da

5 km olarak baz alındığı düşünülduğünde daha kısa mesafelerde bu taşıma maliyetinin azalmasından ötürü kâr oranının artacağı aşikârdır. Bu sebeple serim alanına yakın bölgelere silo yapılması ve karışımların orada hazırlanması taşıma masraflarını düşürerek RAP kullanımının sağlayacağı kârı atarak ekonomiklik sıralamasında ilk sırayı alabilecektir. Ayrıca bozulan asfalt kaplamalar yeni kaplama serilmesi için yerinden kazınarak atık sahalarına taşınmaktadır. Dolayısıyla yine bir taşıma maliyeti oluşturmaktadır. Zaten taşıma maliyeti oluşturacak RAP malzemesinin atık sahasına olan taşıma mesafesi, siloya olan mesafeden çıkarılarak daha doğru ve daha karlı bir hesap yapılması mümkün olmaktadır.

Sonuçlarda dikkati çeken husus; karışımlarda çimento oranının artmasının maliyeti arttırması olmuştur. %2 çimento katkılı karışımların çoğu %100 DA ile yapılan PMT tabakası yerine 100 km için ekonomik bir çözüm olarak görünürken, %3 çimento kullanımı tüm karışımlar için ekonomik olmamıştır.



## 5. SONUÇLAR

Bu tezde, Karayolları Teknik Şartnamesi'nin (KTŞ) plent-miks temel (PMT) tabakası için belirttiği %100 doğal agrega (DA) malzemesi için yapım şartlarını sağlayan kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemesinin çimento takviyeli ve takviyesiz olarak özellikleri, Plent-miks temel (PMT) tabakasında kullanılabilirliği ve kullanım oranları, performansı ve son olarak da RAP kullanımının sağlayacağı ekonomik kazanımın belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

➤ Kullanılan RAP malzemesinin ince içerik (No.200) miktarı %3,3 olarak belirlenmiştir. Bu değer KTŞ PMT tip-1 tabakası için belirtilen No.200 elek altı malzeme için maksimum %10 oranının oldukça altında bir değerde olduğu gözlenmiştir.

➤ Karışımlardaki RAP oranı arttıkça  $V_{kmax}$  değeri azalmaktadır. RAP agregalarının yüzeyini saran bitümün ince malzemeleri birleştirerek, agregalar arasını doldurmak suretiyle kenetlenmeyi sağlayan ince malzeme miktarını azaltması sebebiyle  $V_{kmax}$  değerini düşürmektedir. Ayrıca RAP oranındaki artış  $W_{opt}$  değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. RAP malzemesinin etrafını saran bitüm, malzemenin suya doygunluğunu ve su ile sarılmasını önemli ölçüde kısıtladığından daha az su ile maksimum sıkışmanın elde edildiği görülmüştür. Puzolanik çimento takviyeli tüm RAP-DA karışımlarında, ilave edilen çimento oranı arttıkça  $V_{kmax}$  ve  $W_{opt}$  değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

➤ Yaş CBR testi sonuçlarına göre en yüksek CBR değeri %100 DA kullanılması durumunda elde edilirken, test sonuçları incelendiğinde karışımdaki RAP oranının artması CBR değerinin azalmasına neden olmuştur. Buna sebep olan etmenlerin başında bitümle kaplı RAP malzemesinin DA ile tam bir aderans sağlayamaması gelmektedir. Aderans sağlanamaması durumunda da CBR değerinde pozitif bir artış meydana gelemeyecektir. Hazırlanan karışımlarda çimento kullanılmadan RAP malzemesinin KTŞ tarafından belirtilen PMT tabakası için gerekli minimum CBR değerini (%120) sağlayan takviyesiz maksimum RAP oranı, bu çalışmada %20 olarak bulunmuştur. %1 çimento takviyesi ile %30 ve %40 RAP oranındaki karışım; %2 çimento takviyesi ile %30, %40, %50 ve %60 RAP oranındaki karışımlar ve %3 çimento takviyesi ile de tüm karışımlar %120 yaş CBR limitinin üzerine çıkarak KTŞ kriterini sağlamayı başarmıştır. Elde edilen verilere göre, puzolanik çimentonun malzemenin taşıma kapasitesini arttırması bakımından RAP için

oldukça uygun bir katkı maddesi olduğu ve düşük oranlarda ilave edilmesi durumunda bile CBR değerlerini %30 ila %90 arasında arttırdığı gözlemlenmiştir.

➤ RAP malzemesinin şişme yüzdesi %0,03 olarak tespit edilmiş olup, bu değer sifıra çok yakın bir değer olduğundan şişmesinin olmadığı kabul edilebilmektedir. Bu sebeple bazı numuneler 4 günden daha fazla süre suyun içinde bekletilmiş ve değişimin olmadığı gözlemlenmiştir.

➤ Permeabilite test sonuçlarına göre RAP malzemesinin permeabilite katsayısı (k)  $16,0 \times 10^{-3}$  cm/sn, DA malzemesinininki ise  $40,2 \times 10^{-3}$  cm/sn olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre sahada, tamamı ocak malzemesinden (%100 DA) yapılan bir PMT tabakasının permeabilitesinin, tamamı RAP malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasına göre %150 oranında daha fazla geçirimli olmaktadır. Karışımlardaki RAP oranı arttıkça permeabilite azalmaktadır. %100 RAP malzemesine ilave edilen çimento miktarı arttıkça malzemenin permeabilitesi azalmaktadır.

➤ Tüm karışımlarda plaka merkezindeki kalıcı deformasyonlar yükleme-boşaltma döngü sayısı ile artmaktadır. Kalıcı deformasyonun artış oranı ise döngü sayısı arttıkça azalmaktadır. Yükleme plakası altında oturma meydana gelirken, plakadan 25 ve 40 cm uzaklıktaki noktalarda ise kabarmalar oluşmuştur.

➤ Aynı sıkışma oranında (%98 modifiye proktor sıklığı) sıkıştırılan %20 RAP - %80 DA karışımı ve %100 DA malzemesinden yapılan test tabakalarında %20 RAP karışımının geleneksel olarak %100 DA'dan yapılan PMT tabakasına göre kalıcı deformasyon direncinin yarı yarıya daha az olduğunu göstermiştir.

➤ %20 RAP karışımında plaka altındaki elastik deformasyon %100 DA'dan daha az iken cetvel-25 ve cetvel-40'tan elde edilen elastik deformasyonlar çok daha fazla olmuştur. Bu durum tekrarlı yüklemelerle plaka altında sıkışan asfalt içerikli RAP malzemesinin döngü sayısı arttıkça birbirine yapıştığını, ancak sıkışmanın olmadığı 25 cm ve 40 cm uzaklıktaki noktalarda kabarmaların daha fazla olduğunu göstermiştir. Yani plaka merkezinde oluşan elastik deformasyon direnci %20 RAP karışımlı kesitte %100 DA kesitine göre daha fazlayken, plaka merkezinden uzaklaştıkça bu direnç de azalmaktadır.

➤ %60 RAP - %40 DA - %3 çimento karışımı için kalıcı, elastik deformasyonların ve birim şekil değiştirmelerin, %100 DA malzemesinden daha az olduğunu göstermiştir. Yani gerek plaka merkezinde ve gerekse plakadan farklı uzaklıklarda meydana gelen yüzey deformasyonları, tamamı ocak malzemesinden yapılan bir PMT test kesitinden çok daha az deformasyon meydana getirmiştir. Bunun sebebi olarak çimentonun, yüzeyi asfalt

ile kaplı olmayan DA malzemelerinin yüzeyine yapışarak agregaları birbirine bağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

➤ %100 RAP - %3 çimento karışım malzemesiyle hazırlanan PMT tabakası için plaka merkezinde 100 yükleme-boşaltma döngüsü sonunda elde edilen kalıcı deformasyon %100 DA ile yapılan tabakanın kalıcı deformasyonun iki katı kadardır. Ayrıca %20 RAP - %80 DA karışımından elde edilen değere yaklaşık olarak eşittir.

➤ Karışımlardaki RAP oranı arttıkça kalıcı deformasyonlar ve birim şekil değiştirmeler artmıştır. Çimento takviyesi, kalıcı deformasyonları, elastik deformasyonları ve birim şekil değiştirmeleri belirgin oranlarda azaltmıştır. En küçük deformasyon ve birim şekil değiştirmeler %60 RAP- %40 DA -%3 çimento karışımından elde edilmiştir.

➤ RAP oranı arttıkça malzeme nakliyesinden doğan taşıma maliyeti de lineer bir şekilde artmaktadır. Karışımda %10 RAP kullanılması durumunda 100 km mesafeye taşıma maliyeti %100 RAP karışımının taşıma maliyetinin yaklaşık 1/10'udur.

➤ Tamamı ocak malzemesinden (%100 DA ile) serilecek 1 km uzunluğundaki bir PMT tabakası için konkasör-serim alanı taşıma maliyeti hariç toplam tutar yaklaşık 155.814,0 TL olarak belirlenmiştir.

➤ %10 RAP - %90 DA, %20 RAP - %80 DA, %40 RAP - %60 DA - %1 çimento, %50 RAP - %50 DA - %2 çimento ve %60 RAP - %40 DA - %2 çimento karışımından hazırlanan karışımın toplam maliyeti 100 km uzaklıktan temin edilen bir RAP malzemesi için bile tamamı %100 DA malzemesinden teşkil edilecek bir PMT tabakasından daha ekonomik olmaktadır.

➤ Karışımda kullanılan çimento miktarının artması ve dolayısıyla siloya olan taşıma maliyetinin artmasından ötürü çimento takviyesi ekonomik kazanımını belirgin biçimde düşürmüştür. Örneğin %30 RAP - %70 DA - %1 çimento karışımı 90 km'ye kadar ekonomik bir alternatif olurken %30 RAP - %70 DA - %3 çimento karışımı sadece 20 km'ye kadar ekonomik olmuştur.

➤ %100 RAP - %3 çimento karışımının kullanılması durumunda RAP malzemesinin kazıma alanından siloya taşıma maliyetinin 90 km'nin üzerindeki bir uzaklıktan temininde toplam maliyeti %100 DA malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasının üzerine çıkarttığı görülmektedir. Fakat karışımda DA kullanılmaması nedeniyle malzemelerin taş ocağındaki silolara taşınarak DA ile silolarda karıştırılma gereksinimi kalmadığı için RAP malzemesinin serim alanına en yakın yerdeki bir siloya taşınması taşıma maliyetini düşürecektir. RAP-DA-çimento malzemeleri siloda karıştırıldıktan sonra malzemelerin



serim alanına taşınma maliyetleri de göz önüne alınırsa hem siloya taşınma maliyeti hem de serim alanına taşıma maliyetleri olacaktır. Bu sebeple silonun serim yerine yakın olması kazıma alanı-silo, silo-serim alanı malzeme taşıma maliyetlerinde belirgin bir azalma oluşturacaktır. Bu durumda da %100 RAP - %3 çimento malzemelerinin karışımından yapılacak bir PMT tabakasının toplam maliyeti %100 DA ile yapılan PMT tabakasından daha ekonomik olabilecektir.

➤ En büyük kâr oranı %50 RAP - %50 DA - %2 çimento karışımından elde edilmiştir (%16,74). Sonraki sırada ise %100 RAP - %3 çimento karışımı gelmektedir (%16,2). Serim alanına yakın bölgelere silo yapılması ve karışımların orada hazırlanması taşıma masraflarını düşürüp RAP kullanımının sağlayacağı karı arttırarak ekonomiklik sıralamasında %100 RAP kullanımı ilk sırayı alabilecektir.

➤ %100 RAP malzemesinin KTŞ'nin PMT tabakaları için yapım şartlarında belirttiği gradasyon ve yaş CBR test kriterlerini tek başına sağlayamadığı fakat %3 puzolanik çimento takviyesi ile karıştırıldığında taşıma kapasitesinin artarak PMT tabakalarında kullanımının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Teker yükü altında gösterdiği kalıcı deformasyonunun %100 DA ile yapılan PMT kesitine göre iki kat daha fazla olması dikkat edilmesi gereken bir husustur fakat KTŞ'nde kalıcı deformasyon ile ilgili bir kritere rastlanmaması sebebiyle kullanımında engel görülmemiştir. Mali analiz kısmındaki hesaplamalara göre de %100 RAP malzemesinin %100 DA yerine kullanılması durumunda büyük ekonomik kazanımların elde edildiği görülmüştür.

## 6. KAYNAKLAR

- AASHTO T 193, 2013. Standard Method of Test for The California Bearing Ratio, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO T 180, 2017. Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Akinwumi, I., I., 2014. Plasticity, Strength and Permeability of Reclaimed Asphalt Pavement and Lateritic Soil Blends, International Journal of Scientific and Engineering Research, 5, 6, 631-636.
- ARA, 2004. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Applied Research Associates Inc., Washington, DC.
- Arapoğlu, A. S., 2014. Bozulmuş Asfalt Kaplamaların Geri Dönüşümü ve Maliyet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- ARRA, 1992. Basic Asphalt Recycling Manuel, Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 4 s.
- ASTM D 2434, 2015. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), American Society for Testing and Materials.
- Attia, M., Abdelrahman, M. ve Alam, T., 2009. Investigation of Stripping in Minnesota Class 7 (RAP) and Full-Depth Reclamation Base Materials, Report MN/RC 2009-05, North Dakota State University, Fargo, North Dakota.
- Attia, M., I., E-S., 2010. Characterization of The Structural Behavior of Reclaimed Asphalt Pavement as Pavement Base Layer, Ph. D. Thesis, The North Dakota State University, Civil Engineering Department, North Dakota, Fargo.
- Ayan, V., 2011. Assessment of Recycled Aggregates for Use in Unbound Subbase of Highway Pavement, Ph. D. Thesis, Kingston University, Civil Engineering Department, London.
- Barksdale, R., D. ve Itani, S., Y., 1989. Influence of Aggregate Shape on Base Performance, Transportation Research Record 1227, Rigid and Flexible Design and Analysis, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 173-182.
- Baugh, J., S. ve Edil, T., B., 2008. Suitability of Cement Kiln Dust for Reconstruction of Roads, Final Report to Portland Cement Association, Report No: SN2980, University of Wisconsin-Madison, Department of Civil and Environmental Engineering.

- Bennert, T. ve Maher, A., 2005. The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material, Final Report No: FHWA-NJ-2005-003, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Bennert, T., Papp, W., J., Jr., Maher, A. ve Gucunski, N., 2000. Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1714, 33-39.
- Benson, C., H. ve Daniel, D., E., 1990. Influence of Clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay, Journal of Geotechnical Engineering, 116, 8, 1231-1248.
- Bleakley, A., M. ve Cosentino, P., J., 2013. Improving Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for 484 Roadway Base Applications Through Blending and Chemical Stabilization, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 486, 2335, 20-28.
- Carmargo, F., Wen, H., Edil, T., B. ve Son, Y., H., 2009. Laboratory Evaluation of Sustainable Materials at MnRoad, In Proceedings of the 86th TRB Annual Meeting, Paper No. 09-3160, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Carswell, I., Nicholls, J., C., Elliot, R., C., Harris, J. ve Strickland, D., 2005. Feasibility of Recycling Thin Surfacing Back Into Thin Surfacing Systems, TRL Report TRL645, Transport Research Laboratory, Wokingham, UK.
- CDOT, 2013. Revision of Sections 304 and 703-Aggregate Base Course (RAP), Colorado Department of Transportation, Denver.
- CDOT, 2012. Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Aggregate Base Course (RAP), Colorado Department of Transportation, Revision of Sections 304 and 703.
- Chesner, W., Collins, R., MacKay, M. ve Emery, J., 1998. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Final Report No: FHWA-RD-97-148, Federal Highway Administration, McLean, Virginia.
- Collins, R., J. ve Ciesielski, S., K., 1994. Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction, TRB National Research Council, Synthesis of Highway Practice 199, Nat'L Academy Press, Washington, DC, 92 s.
- Copeland, A., 2011. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of The Practice, Final Report No: FHWA-HRT-11-021, Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Cosentino, P., J., Kalajian, E., H., Bleakley, A., M., Diouf, B., S., Misilo, T., J., Petersen, A., J. ve Sajjadi, A., M., 2012. Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications, Final Report No: FL/DOT/BDK81 97702, Florida Department of Transportation.

- Department for Transport, 2014. Specification for Highway Works-Series 800, In Manual of Contract Documents for Highway Works, London.
- Dong, Q. ve Huang, B., 2014. Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material, Journal of Materials in Civil Engineering, 26, 2, 379-383.
- Edil, T., B., 2011. Specifications and Recommendations for Recycled Materials Used As Unbound Base Course, Recycled Materials Source Center, Report No: 68, University of Wisconsin-Madison.
- FDOT, 2013. Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Florida Department of Transportation, Tallahassee.
- Ganne, V., K., 2009. Long-Term Durability Studies on Chemically Treated Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials, Master Thesis, University of Texas, Arlington.
- Garg, N. ve Thompson, M., R., 1996. Lincoln Avenue Reclaimed Asphalt Pavement Base Project, Transportation Research Record, 1547, 89-95.
- Gray, J., E., 1962. Characteristics of Graded Base Course Aggregates Determined by Triaxial Tests, National Crushed Stone Association, Engineering Bulletin No. 12, Washington, DC.
- Gupta, S., C., Kang, D., H. ve Ranaivosoon, A., 2009. Hydraulic and Mechanical Properties of Recycled Materials, Final Report No: 2009-32, Minnesota Department of Transportation, Research Services Section, St. Paul.
- Guthrie, W., S., Cooley, D. ve Eggett, D., L., 2007. Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties of Base Materials, Transportation Research Board, 44-52.
- Güngör, A., G., Orhan, F., Kaşak S., Çalışkol A. ve Yönter, G., 2008. Kazılmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanılması, Karayolu 1. Ulusal Kongresi, Nisan, Ankara.
- Hanks, A., J. ve Magni, E., R., 1989. The Use of Bituminous and Concrete Material in Granular Base and Earth, Materials Information Report, Report No: MI-137, Engineering Materials Office, Ontario Ministry of Transportation, Downsview, Ontario.
- Highter, W., H., Clary, J., A. ve DeGroot, D., J., 1997. Structural Numbers for Reclaimed Asphalt Pavement Base and Subbase Course Mixes, University of Massachusetts Transportation Center Report, Report No: UMTC-95-2, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts, Amherst.
- Hoppe, E., J., Lane, D., S., Fitch, G., M. ve Shetty, S., 2015. Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use as Road Base and Subbase Material, Final Report No: VCTIR 15-R6, Virginia Center for Transportation Innovation and Research.

- Hoyos, L., R., Puppala, A., J. ve Ordonez, C., A., 2011. Characterization of Cement-Fiber-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates: Preliminary Investigation, Journal of Materials in Civil Engineering, 23, 7, 977–989.
- IowaDOT, 2014. Production of Certified Aggregate From Reclaimed Roadways, Iowa Department of Transportation, Ames,
- Jorenby, B., N. ve Hicks, R., G., 1986. Design and Performance of Flexible Pavements, Transportation Research Board, Record No. 1095, Washington, DC.
- Kim, W. ve Labuz, J., F., 2007. Resilient Modulus and Strength of Base Course With Recycled Bituminous Material, Final Report No: MN/RC-2007-05, Minnesota Department of Transportation.
- Kim, W., Labuz, J., F. ve Dai, S., 2007. Resilient Modulus of Base Course Containing Recycled Asphalt Pavement, Journal of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2005, 1, 27-35.
- KTŞ 2013. Kısım 402: Temel, Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.
- Locander, R., 2009. Analysis of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) As a Base Course Material, Final Report No: CDOT-2009-5, Colorado Department of Transportation, Denver.
- Maher, M., H., Gucunski, N. ve Papp, W., J., Jr., 1997. Recycled Asphalt Pavement As a Base and Subbase Material, Testing Soil Mixed With Waste or Recycled Materials, ASTM Special Technical Publication, 1275, 42-53.
- McGarrah, E., J., 2007. Evaluation of Current Practices of Reclaimed Asphalt Pavement/Virgin Aggregate As Base Course Material, Final Report No: WA-RD 713.1, Washington State Department of Transportation.
- MacGregor, J., A., C., 1999. Highter, W., H. ve DeGroot, D., J., Structural Numbers for Reclaimed Asphalt Pavement Base and Subbase Course Mixes, Transportation Research Record, 1687, 1, 22–28.
- Mohammad, L., N., Herath, A., Rasoulia, M. ve Zhang, Z., J., 2006. Laboratory Evaluation of Untreated and Treated Pavement Base Materials-Repeated Load Permanent Deformation Test, Transportation Research Record, 1967, 1, 78–88.
- Mitchell, J., K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, New York.
- Mn/DOT, 2014. Quantitative Extraction of Bituminous Mixtures (Centrifuge), Minnesota Department of Transportation, Lab. Manual, St. Paul.
- Mokwa, R., L. ve Peebles, C., S., 2005. Evaluation of the Engineering Characteristics of RAP/Aggregate Blends, Final Report No: FHWA/MT-05-008/8117-24, Federal Highway Administration, Washington, DC.

- New York DOT, 2008. Section 300 – Bases and Subbases, New York State Department of Transportation, In Standard Specifications, Albany.
- Ooi, P., S., K., 2010. Application of Recycled Materials in Highway Projects, Final Report No: HWY-L-2005-04, Hawaii Department of Transportation, Highways Division University of Hawaii, Manoa.
- Ordonez, C., A., 2006. Characterization of Cemented and Fiber-Reinforced RAP Aggregate Materials for Base/Sub-Base Applications, Master Thesis, University of Texas Arlington, Texas.
- Özcanan, S., 2014. Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigurasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi, İMO Teknik Dergi, 25, 121, 6625-6654.
- Pokharel, S., K., 2010. Experimental Study on Geocell-Reinforced Bases under Static and Dynamic Loadings, Ph. D. Thesis, University of Kansas, Department of Civil, Environment and Architectural Engineering.
- Potturi, A., K., 2006. Evaluation of Resilient Modulus of Cement and Cement-Fiber Treated Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Aggregates Using Repeated Load Triaxial Test, Master Thesis, The University of Texas Arlington, Texas.
- Potturi, A., Puppala, A. J. ve Hoyos, L. R., 2007. Resilient Characteristics of Cement Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates, Transportation Research Board Annual Meeting, National Research Council, National Academy of Science, Washington, DC.
- Rana, A., S., M., A., 2004. Evaluation of Recycled Material Performance in Highway Applications and Optimization of Their Use, Ph. D. Thesis, Texas Technical University, Texas.
- Rathje, E., M., Rauch, A., F., Folliard, K., J., Trejo, D., Little, D., Viyanant, C., Ogalla, M. ve Esfeller, M., 2012. Recycled Asphalt Pavement and Crushed Concrete Backfill: Results From Initial Durability and Geotechnical Tests, Final Report No: FHWA/TX-02/4177-2, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Roberts, F., L., Kandhal, P., S., Brown, E., R., Lee, D., Y. ve Kennedy, T., W., 1996. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2. Baskı, NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland 20706-4413, 585 s.
- Saeed, A., 2008. Performance-Related Tests of Recycled Aggregates for Use in Unbound Pavement Layers, NCHRP Report 598, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Sayed, S., M., Pulsifer, J.M. ve Jackson, N.M., 2011. UNRAP: Are We Ready for It?, Journal of Materials in Civil Engineering, 23, 2, 188-196.

- SCDOT, 2008. Geotechnical Design Manuel, South Carolina Department of Transportation Field and Laboratory Testing Procedures, South Carolina.
- Schaefer, V., Stevens, L., White, D. ve Ceylan, H., 2008. Design Guide for Improved Quality of Roadway Subgrades and Subbases, Final Report No: IHRB Project TR-525, Iowa Highway Research Board, Iowa Department of Transportation, Ames.
- Sebesta, S., ve Scullion, T., 2004. Effectiveness of Minimizing Reflective Cracking in Cement Treated Bases by Microcracking, Final Report No: FHWA/TX-05/0-4502-1, Texas Transportation Institute, Texas.
- Senior, S., A., Szoke, S., I. ve Rogers, C., A., 1994. Ontario's Experience with Reclaimed Materials for Use in Aggregates, International Road Federation/Transportation Association of Canada Conference Proceedings, Calgary, Alberta, 6, 31-55.
- Sullivan, J., 1996. Pavement Recycling Executive Summary and Report, Final Report No: FHWA-SA-95-060, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Taha, R., 2003. Evaluation of Cement Kiln Dust-Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate Systems in Road Bases, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 1819, 11-17.
- Taha, R., Ali, G., Basma, A. ve Al-Turk, O., 1999. Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases, 7th Int. Conf. on Low Volume Roads, Transportation Research Board, May, Washington, DC, 1652, 1, 264-269.
- Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K. ve Al-Zubeidi, M., 2002. Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases, Journal of Materials in Civil Engineering, 14, 3, 239-245.
- Thakur, J., K., 2011. Experimental Study On Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Under Static and Cyclic Loading, Master Thesis, University of Kansas, Department of Civil, Environment and Architectural Engineering.
- Thakur, J., K. ve Han, J., 2015. Recent Development of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Treated for Roadway Applications, Transportation Infrastructure Geotechnology, 2, 2, 68-86.
- Thakur, J., K., Han, J., Pokharel, S., K. ve Parsons, R., L., 2012. Performance of Geocell Reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Over Weak Subgrade Under Cyclic Plate Loading, Geotextiles and Geomembranes, 35, 14-24.
- Thøgersen, F., Gregoire, C., Stryk, J., Hornych, P., Descantes, Y., Chazallon, C., Blasi, A., Broere, P., Bizjak, K., F., Hellman, F. ve Arm, M., 2013. Recycling of Road Materials Into New Unbound Road Layers-Main Practice In Selected European Countries, Road Materials and Pavement Design, 14, 2, 438-444.

- Thompson, M., R. ve Smith, K., L., 1990. Repeated Triaxial Characterization of Granular Bases, Transportation Research Record, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC., 1278, 7-17.
- Trzebiatowski, B., D., Edil, T., B. ve Benson, C., H., 2004. Case Study of Subgrade Stabilization Using Fly Ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin, Proceedings of the ASCE Conference on Recycled Materials in Geotechnics, Maryland, USA, 123–136.
- Trzebiatowski, B., D. ve Benson, C., H., 2005. Saturated Hydraulic Conductivity of Compacted Recycled Asphalt Pavement, Geotechnical Testing Journal, 28, 5, 514-519.
- TSE, 2012. TS EN 197-1: Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 2013. TS EN 12697/1: Bitümlü Karışımlar-Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri-Bölüm 1: Çözünür Bağlayıcı İçeriği Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 2015. TS 3530 EN 933-1: Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Eleme Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tunç, A., 2007. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, 2. Baskı, Nobel Basımevi, Ankara.
- TxDOT, 2011. Test Procedure for Laboratory Compaction Characteristics and Moisture-Density Relationship of Base Materials, Texas Department of Transportation, Austin.
- TxDOT, 2004a. Item 247: Flexible Base, Texas Department of Transportation, Austin.
- TxDOT, 2004b. Item 276: Cement Treatment (Plant-Mixed), Texas Department of Transportation, Austin.
- WashingtonDOT, 2012. Standard Specifications for Road, Bridge and Municipal Construction, Washington State Department of Transportation, Olympia.
- Wen, H., Warner, J., Edil, T. ve Wang, G., 2010. Laboratory Comparison of Crushed Aggregate and Recycled Pavement Material With and Without High Carbon Fly Ash, Geotechnical and Geological Engineering, 28, 4, 405-411.
- WisDOT, 2014. Section 301-General Requirements for Base Aggregates, In Standard Specifications, Wisconsin Department of Transportation, Madison.
- Wu, M., Q., 2011. Evaluation of High Percentage Recycled Asphalt Pavement As Base Course Materials, Master Thesis, Washington State University, Washington, DC.
- Yang, X., M., 2010. Numerical Analyses of Geocell-Reinforced Granular Soils Under Static and Repeated Loads, Ph. D. Thesis, University of Kansas, Department of Civil, Environment and Architectural Engineering.



Yuan, D., Nazarian, S., Hoyos, L., R. ve Puppala, A., J., 2010. Cement Treated RAP Mixes for Roadway Bases, Final Report No: FHWA/TX-10/0-6084-1, Federal Highway Administration, Washington, DC.

URL-1, <http://www.simgemat.com.tr/tr/CevreArge/AsfaltGeriKazanimi>. 20 Ekim 2017

URL-2, <http://www.pavementinteractive.org/cold-in-place-recycling/>. 20 Ekim 2017

URL-3, <http://yollarfennisartnamesi.blogspot.com.tr/p/asfalt-geri-donusum.html>.  
20 Ekim 2017.

URL-4, <https://drive.google.com/file/d/0B7DSgBjzQ21WczlYZnNROVJBQ2s/view>.  
04 Ekim 2017.

URL-5, <https://www.mdt.mt.gov/publications/docs/brochures/research/toolbox/ARRA/BARM%20-%20B/213-279-BARM3.pdf>. 24 Ekim 2017

URL-6, [http://ecs.fullerton.edu/~btiwari/geotech\\_Lab/mainpage\\_files/other/Permeability.pdf](http://ecs.fullerton.edu/~btiwari/geotech_Lab/mainpage_files/other/Permeability.pdf) 24 Ağustos 2017.

URL-7, <http://applications.dynapac.com/soil/millingrecycling/>. 24 Ağustos 2017.

URL-8, <http://www.birimfiyat.net/kgm-6100-3-plent-miks-temel-yapilmasi-kirilmis-ve-elenmis-ocak-tasi-ile>. 24 Ağustos 2017.

URL-9, <http://www.birimfiyat.net/07.005-k-kazidan-baska-insaat-malzemelerinin-tasinmasi-10-000-m.ye-kadar>. 24 Ağustos 2017.

URL-10, <http://www.birimfiyat.net/07.006-k-kazidan-baska-ins.malzemesinin-tasinmasi-10000-mt>. 24 Ağustos 2017.

## 7. EKLER

Ek 1. Kullanılan çimentonun analiz raporu

AŞKALE Çimento Sanayii T.A.Ş. Trabzon Şubesi				ANALİZ RAPORU				
Numune Cinsi		<b>CEM IV B-P 32,5 R SR</b>						
Alınış Yeri		Sevkiyat		Tarih		22.03.2017		
Alınış Tarihi		Aralık 16		Rapor No				
Analiz Tarihi		Aralık 16						
Numunenin Standardı		TS EN 197-1						
Fabrika Adı		Aşkale Çimento San. T.A.Ş. TRABZON Şubesi						
KİMYASAL ANALİZ		Standartlar	Sonuçlar (%)	FİZİKSEL DENEMELER		Standartlar	Sonuçlar (%)	
Toplam Katkı			37,10	32 mikron Elekte Kalıntı (%)			5,52	
Toplam SiO <sub>2</sub>			27,24	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)			4340	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			4,58	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )			2,89	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			3,22	Priz Süresi (Dakika)	Başl.	min 60	225	
CaO			48,93		Bitiş		285	
MgO			1,98	Su İhtiyacı (%)			33,70	
SO <sub>3</sub>		maks 3,0	2,32	Hacim Genişlemesi (mm)		maks 10	1	
K <sub>2</sub> O			0,97	<b>DAYANIM DENEMELERİ</b> TS EN 196-1 : 40x40x160 mm'lik prizmalar (Karışım : 1/3 - Su/Çimento : 0.50 - Kum : EN 196-1 CEN standard kum) (TS EN 196-1 : Prisms 40x40x160 mm) (Mix : 1/3 - Water/Cement : 0.50 - Sand : EN 196-1 CEN standard sand)				
Na <sub>2</sub> O			0,57					
Serbest CaO			1,51					
Cl <sup>-</sup>		maks 0,1	0,01					
Kızdırma Kaybı			8,51					
				Gün		Standartlar	Sonuçlar	
MİNERALOJİK BİLEŞİM	HM			BASINÇ DAYANIMI (MPa)	1			
	SM				2		min 10,0	18,5
	AIM				7			30,8
	KSt				28		min 32,5	40,3
	LSF						maks 52,5	
	C3S							
	C2S							
	C3A							
	C4AF							

## ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül Güneş SEFEROĞLU, 1986 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini 1992-2004 yılları arasında Trabzon'da tamamladı. 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı 'Lisans' eğitimini 2008 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2009 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'e araştırma görevlisi olarak atandı. 2011 yılında "Karayolu Tabakalarında Plaka Yükleme Deneyinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması" başlıklı tez ile Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. Halen Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki görevine devam eden SEFEROĞLU evli ve iki çocuk annesidir. İngilizce bilmektedir.