



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ULAŞTIRMA VE LOJİSTİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**GERİ KAZANILMIŞ ASFALT KAPLAMADAN ELDE EDİLEN
AGREGALARIN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN DAVRANIŞI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEFA GÜNDOĞDU

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ YAVUZ ABUT

**YALOVA
AĞUSTOS 2023**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ULAŞTIRMA VE LOJİSTİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

GERİ KAZANILMIŞ ASFALT KAPLAMADAN ELDE EDİLEN
AGREGALARIN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEFA GÜNDOĞDU
205115021

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ YAVUZ ABUT

YALOVA
AĞUSTOS 2023

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “GERİ KAZANILMIŞ ASFALT KAPLAMADAN ELDE EDİLEN AGREGALARIN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ” başlıklı bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Sefa GÜNDOĞDU

ÖNSÖZ

Söz konusu çalışmanın fikir aşamasından nihai durumuna varana kadar her türlü desteği sağlayan ve çalışma boyunca sürekli yol gösteren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ABUT'a, her konuda desteğini esirgemeyen ve müspet telkinleri ile mütemadiyen yardımcı olan arkadaşım Uğur Eren UZAR'a, yoğun çalışma sürecinde desteğini esirgemeyen değerli büyüklerim Cemal ÖNAL ve Fethi TURGUT'a teşekkür ederim. Dünyaya geldiğim ilk günden buyana desteğini sürekli yanımda hissettiğim, bana her daim güvenen annem Hülya GÜNDOĞDU ve babam Yalçın GÜNDOĞDU'ya, kardeşlerim Hasan ve İrem GÜNDOĞDU'ya başta olmak üzere akademik eğitim sürecimim her anında bana destek olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Semiha GÜNDOĞDU ve oğlum Hamza GÜNDOĞDU'ya sonsuz şükranlarımı sunarım.

Laboratuvar ortamında numunelerin üretilmesi ve deneylerin yapılması için Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı himayesindeki Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Beton ve Asfalt Şube Müdürlüğü Laboratuvarının kullanımına izin veren değerli hocam ve Altyapı Yatırımları Genel Müdürü Dr. Yalçın EYİĞÜN'e, ekibi de başta olmak üzere desteğini esirgemeyen Teknik Araştırma ve Kalite Yönetimi Dairesi Başkanı Dr. Yavuz YEGİN'e müteşekkirim. Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü uhdesinde bulunan Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nı kullanmamıza imkân sağlayan ve teknik açıdan desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU ve Dr. Onur ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Ağustos – 2023

Sefa GÜNDOĞDU



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	5
2.1. RAP Endüstrisinin Ortaya Çıkışı	5
2.2. RAP'ın Esnek Üstyapılarda Kullanılması.....	9
2.3. RAP'ın Çimento Esaslı Karışımlarda Kullanılması.....	11
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	23
3.1. Malzemeler.....	23
3.1.1. Çimento.....	23
3.1.2. Agregası (Kum ve RAP)	24
3.1.3. Su	26
3.2. Karışım Tasarımı	26
3.4. Kırılma	28
3.5. Deneyler	29
3.5.1. Kıvam (Yayılma).....	29
3.5.2. Eğilme dayanımı.....	30
3.5.3. Basınç dayanımı.....	30
3.5.4. Birim ağırlık ve su emme	31
3.5.5. Kılcallık	32
3.5.6. Kuruma rötresi	33
3.5.7. Ultrasonik ses dalgası hızı (UPV)	34
3.5.8. Enerji yutma kapasitesi (Tokluk).....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
4.1. Kıvam (Yayılma).....	39
4.2. Eğilme Dayanımı.....	39
4.3. Basınç Dayanımı	41

4.4. Birim Ağırlık ve Su Emme.....	43
4.5. Kılcallık	46
4.6. Kuruma Rötresi	48
4.7. Ultrasonik Ses Dalgası Hızı (UPV).....	50
4.8. Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk).....	51
4.9. RAP Miktarının Optimizasyonu.....	54
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR.....	59
EKLER	65
Ek.1 – Çalışma Programı.....	66
ÖZGEÇMİŞ	67
TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER.....	67

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

ρ	: Birim hacim ağırlık (kg/m^3)
L_C	: Boy değişimi (%) (n. günde ki)
T	: Dalga geçiş süresi (μs)
E_d	: Dinamik elastisite modülü (Pa)
W_0	: Eksenel Yük-CMOD grafiğinde eğrinin altında kalan alan (N.mm)
m_2	: Göçme anına kadar numune üzerinde bulunan plakanın ağırlığı (kg)
A_{lig}	: Kesit alanı (mm^2)
G_F	: Kırılma enerjisi (N/mm)
L_1	: Komparatör okuması (0. günde ki)
L_2	: Komparatör okuması (n. günde ki)
$CMOD_C$	: Maksimum yükteki çatlak ağzı deplasmanı (mm)
S	: Mesnet açıklığı (mm)
m_1	: Numune ağırlığı (kg)
W_1	: Numune ağırlığı ve yükleme plakasının yaptığı iş (N.mm)
G	: Numune boyu (mm)
L	: Numune boyu (mm)
μ	: Poisson oranı
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
V	: Ultrasonik ses dalgası hızı (m/sn)
g	: Yerçekimi ivmesi ($9,807 \text{ m/s}^2$)

KISALTMALAR

AKA	: Asfalt Kırıklılı Agrega
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CMOD	: Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı
COV	: Coefficient of Variation (Değişim Katsayısı)
FRAP	: Parçalara Ayrılmış Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama
GBA	: Geri Dönüştürülmüş Bitümlü Asfalt Agrega
KAM	: Kazınmış Asfalt Malzemesi
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavements (Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama)
UPV	: Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
0K100R	: %0 Kum %100 RAP İçeren Karışım
20K80R	: %20 Kum %80 RAP İçeren Karışım
40K60R	: %40 Kum %60 RAP İçeren Karışım
60K40R	: %60 Kum %40 RAP İçeren Karışım
80K20R	: %80 Kum %20 RAP İçeren Karışım
100K0R	: %100 Kum %0 RAP İçeren Karışım



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Çimentonun özellikleri	23
Tablo 3.2. Ekstraksiyon kalıntısına elek analizi.....	26
Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları.....	26
Tablo 3.4. 1 m ³ karışım için kullanılan malzeme miktarları.....	26
Tablo 3.5. Karıştırıcı hızları	27
Tablo 4.1. Eğilme dayanımı sonuçları	40
Tablo 4.2. Basınç dayanımı sonuçları	42
Tablo 4.3. Kuru birim ağırlık ve su emme sonuçları	44
Tablo 4.4. Kılcallık deneyi hesaplama tablosu	46
Tablo 4.5. Numunelerin zamana bağlı boy değişimi	49
Tablo 4.6. UPV test sonuçları	50
Tablo 4.7. Enerji yutma kapasitesi parametre bulguları	52
Tablo 4.8. RAP miktarının optimizasyonu	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yıllara göre petrol fiyatları [15].....	6
Şekil 2.2. RAP [22]	8
Şekil 2.3. Asfalt tabakasından geçen çatlak (kohezyon göçmesi) [11].....	17
Şekil 3.1. Portland çimentosunun tartılması	24
Şekil 3.2. 0-4 mm ebatlarındaki doğal kumun deneye hazırlanması	24
Şekil 3.3. Doğal kum için granülometri eğrisi	25
Şekil 3.4. RAP için ön eleme prosesi	25
Şekil 3.5. İnce-RAP için granülometri eğrisi	25
Şekil 3.6. Karışımın kalıplara yerleştirilmesi.....	28
Şekil 3.7. Numunelerin etiketlenmesi ve kürlenmesi.....	29
Şekil 3.8. Yayılma miktarının ölçülmesi	30
Şekil 3.9. Eğilme dayanımı test düzeneği ve 100K0R setine ait deney sonrası görsel	30
Şekil 3.10. Basınç dayanımı test düzeneği ve 40K60R setine ait deney sonrası görsel	31
Şekil 3.11. Birim ağırlık ve su emme deneyine ait görseller	32
Şekil 3.12. Kılcallık deneyi.....	33
Şekil 3.13. Kuruma rötresinin tayininde kullanılan numuneler ve test düzeneği	34
Şekil 3.14. UPV testi.....	35
Şekil 3.15. Enerji yutma kapasitesinin belirlenmesi için hazırlanan numuneler	35
Şekil 3.16. Enerji yutma deneyi test düzeneği	36
Şekil 3.17. Numunede çatlak gelişimi ve kırılmadan sonraki en kesit görüntüsü	37
Şekil 3.18. 0K100R numune setine ait deney sonrası görseller	38
Şekil 4.1. Yayılma çapının numunelerdeki dağılımı.....	39
Şekil 4.2. Eğilme dayanımının numunelerdeki dağılımı.....	41
Şekil 4.3. Basınç dayanımının numunelerdeki dağılımı	43
Şekil 4.4. Birim ağırlığın numunelerdeki dağılımı	45
Şekil 4.5. Su emmenin numunelerdeki dağılımı	45
Şekil 4.6. Kılcal su emme katsayısının numunelerdeki dağılımı	47
Şekil 4.7. Kılcal su emme katsayısı ile kütlece su emme yüzdesi arasındaki ilişki.....	47
Şekil 4.8. Kılcal su emme yüzdesinin numunelerdeki dağılımı.....	48
Şekil 4.9. Numunelerde zamana bağlı kuruma rötresi gelişimi	50

Şekil 4.10. Numunelerde RAP oranına bağlı olarak Dinamik Elastisite Modülü değişimi	51
Şekil 4.11. Numunelerde Eksenel Yük – CMOD değişimi.....	52
Şekil 4.12. Eğilme dayanımının numunelerdeki dağılımı	53
Şekil 4.13. Kırılma enerjisinin numunelerdeki dağılımı	53
Şekil 4.14. Kırılma enerjisinin eğilme dayanımına oranının numunelerdeki dağılımı.....	53



GERİ KAZANILMIŞ ASFALT KAPLAMADAN ELDE EDİLEN AGREGALARIN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

ÖZET

Geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) genel olarak bitümlü sıcak karışımlarda bileşenlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle RAP malzemesinin içerdiği bitüm, bu tercihin temel etkenlerinden birisidir. Söz konusu malzemenin alternatif bir alanda kullanılabilirliğinin araştırılması konusunda yapılan çalışmalardan birisi de ince olarak hazırlanmış RAP malzemesinin çimento harcı ile oluşturduğu karışımlardır. Bu tez çalışması kapsamında, çimento miktarı sabit (400 kg/m^3) ve su/çimento oranı sabit (0,60) olmak üzere, RAP oranları değiştirilerek altı farklı karışım oluşturulmuştur. %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında 0-4 mm boyutundaki RAP malzeme, aynı boyutlardaki doğal kuma ikame edilerek, sırasıyla kıvam (yayılma), eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim ağırlık, su emme, kılcallık, kuruma rötresi, ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) ve enerji yutma kapasitesi (tokluk) deneyleri gerçekleştirilmiştir. DeneySEL bulgulara göre, karışımlarda ciddi bir kıvam kaybının gerçekleşmediği, eğilme ve basınç dayanımının kür süresi ile artış gösterdiği, fakat artan RAP içeriğinin her iki dayanım gelişimi üzerinde negatif bir etki yarattığı tespit edilmiştir. Birim ağırlık, RAP miktarına bağlı olarak sürekli düşme eğilimi göstermesine karşın, su emme miktarı %80 RAP içeriğine kadar artmış, daha sonra düşme eğilimine geçmiştir. Bütün numunelerde kılcallık özelliklerinin su emme davranışı ile benzer olduğu tespit edilmiştir. Kuruma rötresi gelişiminin, RAP oranı arttıkça genellikle artma eğiliminde olduğu gözlenmiş, RAP içermeyen kontrol numunelerinde boy kısalması 112. gün sonunda %0,075 iken, %100 RAP içeren numunelerde yaklaşık 4 kat artışla %0,288 mertebesinde kaydedilmiştir. Artan RAP içeriği bütün numunelerde %0,200-0,288 aralığında kuruma rötresine neden olmuştur. UPV deney bulgularına göre, %80 ve %100 RAP içerikli numunelerin “orta”, diğer numune gruplarının ise “iyi” beton sınıfına girebileceği sonucuna varılmıştır. RAP kullanılmayan kontrol karışımlarında kırılma enerjisi $0,0444 \text{ N/mm}$ düzeyindeyken, %60 ve %80 RAP kullanılması durumunda kırılma enerjisi düzeyindeki gelişme yaklaşık %12 artışla sırasıyla $0,0500 \text{ N/mm}$ ve $0,0496 \text{ N/mm}$ düzeyinde hesaplanmıştır. Kırılma enerjisinin eğilme dayanımına oranının bir süneklik parametresi olarak değerlendirilmesi durumunda ise, RAP kullanımının her türlü senaryoda %5,5-%60 aralığında pozitif bir katkısının olabileceği gözlenmiştir. Elde edilen tüm deney sonuçları göstermektedir ki, RAP malzemesi eğilme ve basınç dayanımı gibi önemli özelliklerde azalmaya neden olsa da belirli kalitedeki beton üretiminde alternatif olabilecek bir malzemedir. RAP’in enerji yutma kapasitesindeki önemli katkısı ise bu malzemenin atık olarak değerlendirilmesinden ziyade, iyileştirici malzeme olarak itibar görmesine neden olacak seviyededir. Özellikle beton bariyer gibi enerji sönmeme ihtiyacı yüksek olan yapılar, rijit üstyapılarda esnekliğin sağlanmasının istendiği kaplama durumları, deprem izolatörleri, dayanımdan ziyade hafifliğin, sünekliğin ve tokluğun istendiği yapı elamanlarında RAP malzemesinin kontrollü deneyler ışığında çimento harcı içeriğinde kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geri Kazanılmış Asfalt, Çimento Harcı, Kuruma Rötresi, Tokluk



THE EFFECTS OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT AGGREGATES ON THE BEHAVIOR OF CEMENT-BASED MORTARS

ABSTRACT

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is generally considered as one of the components in bituminous hot mixtures. The presence of bitumen in RAP is particularly one of the main factors for this preference. One of the research efforts to explore the alternative use of this material is the investigation of mixtures prepared with finely crushed RAP and cement mortar. In this thesis, six different mixtures were created by varying the RAP content while keeping the cement content constant (400 kg/m^3) and the water-to-cement ratio constant (0.60). RAP with particle sizes of 0-4 mm were substituted for natural sand of the same size in proportions of 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%. Tests were conducted to evaluate the workability (spread), flexural strength, compressive strength, unit weight, water absorption, capillarity, drying shrinkage, ultrasonic pulse velocity (UPV), and energy absorption capacity (toughness) of the mixtures. According to the experimental findings, it was determined that there was no significant loss of workability in the mixtures, and the flexural and compressive strengths increased with curing time, but increasing RAP content had a negative effect on both strength developments. While the unit weight showed a continuous decrease with increasing RAP content, the water absorption increased up to 80% RAP content and then started to decline. The capillary properties of all specimens were found to be similar to their water absorption behavior. The development of drying shrinkage generally increased as the RAP content increased. The control specimens without RAP showed a shrinkage of 0.075% at the end of 112 days, while specimens with 100% RAP recorded an approximately fourfold increase to 0.288%. Increased RAP content resulted in drying shrinkage ranging from 0.200% to 0.288% in all specimens. According to the UPV test results, it was concluded that specimens with 80% and 100% RAP content could be classified as "medium," while the other specimen groups could be classified as "good" concrete class. In the control mixtures without RAP, the fracture energy was 0.0444 N/mm, while with 60% and 80% RAP utilization, an improvement in fracture energy level was calculated to be approximately 12% with values of 0.0500 N/mm and 0.0496 N/mm, respectively. When the ratio of fracture energy to flexural strength was evaluated as a ductility parameter, it was observed that the use of RAP could have a positive contribution ranging from 5.5% to 60% in all scenarios. The results of all the experiments indicate that RAP, despite causing a decrease in important properties such as flexural and compressive strength, can be an alternative material in the production of concrete with certain quality. The significant contribution of RAP in energy absorption capacity is at a level that would make this material be considered as an enhancing material rather than being treated as waste. In particular, structures with high energy dissipation requirements such as concrete barriers, surface coatings where flexibility is desired in rigid pavements, seismic isolators, and structural elements where lightweight, ductility, and toughness are desired rather than strength, it is concluded that RAP can be used in cement mortar content based on controlled experiments.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement, Cement Mortar, Drying Shrinkage, Toughness



1. GİRİŞ

Dünya genelinde nüfusun hızlı artışı ile birlikte insani ihtiyaçlara olan talep de paralel olarak artmaktadır. Kırsalda yaşamdan ziyade ekonomik hareketliliğin fazla olduğu şehir merkezlerinde yaşamının talep edilmesi ile birlikte insanların tüketim kültürü de değişiklik göstermektedir. Söz konusu tüketim kültürü ile birlikte artan nüfusun olumsuz etkisi en çok doğal kaynaklar ve çevre üzerinde etkili olmaktadır. İnsanoğlunun çevreye ve doğal kaynaklara ölçsüz şekilde müdahale etmeye başlaması ile çevre kirliliğinin arttığı ve tabiatın çoğu yerinde biyolojik çeşitliliğin azaldığı görülmektedir. Çölleşme ve kuraklık gibi olumsuz süreçlere yol açan bu davranışlar insan hayatını etkilemektedir. Özellikle sera gazı salınımının çok fazla artması, iklim değişikliğine sebep olurken birçok doğal afetin yaşanmasını da tetiklemektedir. İsteklerin daha da önemlisi ihtiyaçların arttığı bu günlerde sürdürülebilir yaşam alanlarının oluşturulması gün geçtikte daha da önemli hale gelmektedir [1]. Çevrenin ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı; plansız tüketimin etkisini azaltmak ve yönetmek, böylece çevreyi korumak için uzun vadeli sosyal, ekonomik ve çevresel kalkınma faktörleri dengesi yoluyla doğal kaynakları yönetmeyi amaçlamaktadır [2].

Atık yönetiminin genel ilkelerine göre, atıklar öncelikle kaynağında azaltılmalı, tekrar kullanıma uygun hale getirilmeli, harcanan enerji geri kazanılmalı ve nihayetinde ortadan kaldırma metotlarına yönlendirilmelidir [2]. Sağlıklı bir geri dönüşüm ve ortadan kaldırma sistemi oluşturmak için, atığın kaynağında en aza indirilmesi, hafriyat toprağının inşaat atığına karıştırılmaması, geri dönüştürülmesi, şartların imkân verdiği ölçüde altyapı malzemesi olarak tekrar kullanılması ve seçici yıkım tekniklerinin kullanılması önemlidir. Geri dönüşüm sürecinde yan ürün olarak ortaya çıkan asfalt atığı, özellikle asfalt üretim merkezlerinde veya trafiğin az olduğu yol kesimlerinde dolgu maddesi olarak kullanılabilir [3].

Yolun mevcut üstyapısını şekillendiren katmanlar belirli bir süre trafik etkisine ve çevresel koşullara maruz kaldıktan sonra kullanım ömrünün sonuna gelir. Yorulmuş, deformasyona uğramış ve ömrünü tamamlamış olan kaplamalar, artık amacına uygun hizmet edememesinden kaynaklı trimmer veya muadili ekipmanlar ile platformdan planlanan derinlikte kazınır ve yeniden serim için uygun zemin oluşturulmuş olur. Kazıma sonucu ortaya çıkan malzemeye Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama (Reclaimed

Asphalt Pavement, RAP) denir. RAP malzemesinin uygun tekniklerle elde edilmesini sağlayarak yeniden kullanım imkân sağlanması ile ekonomiye katkısı büyük ölçüde arttırılabilir [4].

Karayolunda vuku bulan hasarların türüne ve yolun yapısal ihtiyaçlarına bağlı olarak çeşitli geri kazanım yöntemleri kullanılmaktadır. Geri kazanım metotlarını beş kategoride sınıflandıran Asphalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Birliği'ne (ARRA; Asphalt Recycling and Reclaiming Association) göre bu yöntemler;

- Tam derinlikli geri kazanım,
- Sıcak geri dönüşüm,
- Sıcak yerinde geri dönüşüm,
- Soğuk düzeltme,
- Soğuk geri dönüşümdür [5].

RAP stoklardan kolay temin edilebilir veya proje sahasında elde edilip dönüştürülebilir. Ayrıca RAP kullanımı, üstyapı performansından ödün vermeden doğal agrega ihtiyacını azaltabilir. RAP kullanılarak yapılan uygulamalardan elde edilen olumlu veriler söz konusu geri dönüşüm malzemesinin kullanımını teşvik etmektedir [6]. Shi vd., RAP ile hazırlanan harcın, doğal kum içeren harca kıyasla çok daha düşük basınç, eğilme dayanımı ve Elastisite Modülü ortaya çıkardığını belirtmiştir. Dayanım azalması %50'yi aşarken, Elastisite Modülü neredeyse %70 oranında azalmıştır. Ancak RAP harcının tokluk düzeyi 28 günlük numunelerde %481 artış göstermiştir [7].

En temel anlamda beton, tasarıma uygun oranlarda iri ve ince agrega, çimento ve sudan oluşan karma bir malzemedir. Betona hizmet edeceği alana göre gerekli katkı malzemeleri de eklenebilmektedir. Geçmişte yapılan tasarımlar incelendiğinde betonun %75'ini oluşturan agregaların yalnız dolgu malzemesi olarak düşünüldüğü görülmektedir. Bu çalışmalarda agreganın tane boyutu dağılımı ve ölçüsüne ayrıntılı şekilde dikkat edilirken, kimyasal ve mineralojik yapısına gerekli ilgi gösterilmemiştir. Beton hakkında yapılan ayrıntılı analizler neticesinde farklı evrelerden müteşekkil karma bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Sonrasında yapılan testlerle agregaların fiziksel ve çimento hamurunun mekanik özelliklerinin betonun performansını

etkilediği sonucuna varılmıştır. Günümüzde atık malzemelerin yeniden kullanımı ve dolayısı ile doğal kaynakların korunması için atıkların kompozit bir yapıya sahip olan betona ikame edilerek değerlendirilmesi önemli hale gelmiştir [8].

RAP ilavesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki zararlı etkisinin aksine, betonun sünekliği ve tokluğunu büyük ölçüde iyileştirdiği bildirilmiştir [9, 10, 11, 12]. İnce RAP (4 mm elek altı) genel olarak iri RAP'ten (4 mm elek üstü) daha yüksek bitüm içeriğine sahip olduğu için, ince RAP'in betonun süneklik, tokluk ve kırılma özelliklerini iyileştirme potansiyeli daha da önemli olabilmektedir. Bu bağlamda, Topçu ve Işıkdağ, karışımlara ince RAP eklenmesinin kontrol numunelerine göre daha düşük çatlak genişliği ve gecikmiş çatlama süresi verdiğini bildirmiştir [13].

Bu tez çalışması, belirli oranlarda (%0, %20, %40, %60, %80, %100) 0-4 mm boyutundaki RAP içeren  imento harcının mekanik özellikleri, rötre düzeyleri ve kırılma enerjisi kapasitelerinin kapsamlı bir deney çalışması aracılığıyla araştırılmasını kapsamaktadır. Laboratuvarda üretilen numuneler üzerinde sırasıyla; yayılma tablası, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim ağırlık, su emme, kılcallık, kuruma rötresi, ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ve enerji yutma kapasitesi deneyleri yapılarak numunelerdeki değişimleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, potansiyel olarak RAP içeren harç malzemesinin kullanılabileceği yapı grupları irdelenebilecek, sürdürülebilir geri dönüşüm malzemeleri kapsamında ortaya çıkması muhtemel fayda maliyetler araştırılabilecektir. Kazınmış asfalt kaplamaların, bir plentte elenerek yeniden kullanılabilir hale getirilmesi ile tabiatın muhafaza edilmesi sağlanırken, doğal kaynakların tahrip edilmesi azaltılacaktır. Aynı zamanda bu alandaki doğal agrega ihtiyacı ve dolayısı ile tüketim hızı bir miktar baskılanmış olacaktır.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çimento harcına RAP ikame edilmesi hakkında ulusal ve uluslararası ölçekte yapılan çalışmaların bir taraması yapılmıştır. Kıvam, kılcallık, rötre, yoğunluk, enerji yutma kapasitesi, ultrasonik ses dalgası yayılma hızı, eğilme ve basınç dayanımı çerçevesinde yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Literatür araştırması üç bölümden oluşmaktadır: İlk olarak, RAP endüstrisinin ortaya çıkışı hakkında genel bir bakış ortaya konmuştur. İkinci bölümde RAP malzemesinin esnek üstyapılarda (asfalt yollarda) kullanımı, üçüncü bölümde ise çimento esaslı karışımlarda kullanımı araştırılmıştır.

2.1. RAP Endüstrisinin Ortaya Çıkışı

Modern asfalt kaplamanın tarihi, 1970'lerin petrol ambargosuna kadar uzanmaktadır. O dönemdeki asfalt kıtlığı, malzeme tedarikini genişletmenin pratik yollarını bulmayı gerekli kılmıştır. O sıralarda kaplama hazırlığında asfalt kaplama yüzeylerini kaldırmak için freze makineleri kullanılmaya başlanmıştır. Hazır malzeme tedarikini keşfeden endüstri, RAP malzemesini kullanmanın yollarını araştırmaya başlamıştır. 1970 ve 1980 yıllarında %80'e varan RAP içeriği ile sahada uygulamalar yapılmıştır. O zamanki ekipmanlar ve üretim süreci, tutarlı RAP elde edilmesini mümkün kılmamaktaydı. 1980'lerden sonra kalite kontrol sürecinin yaygınlaşması, nihai sonuca uygun üretimlerin yapılmasını mümkün kılmıştır. 1980'li yılların sonuna doğru petrol fiyatları düşme eğilimine geçmiştir (Şekil 2.1). Düşen petrol fiyatlarından kaynaklı çoğu asfalt üreticisi az miktarda (%20'den az) RAP kullanımını benimsemiştir [14]. Yıllara göre petrol fiyatları incelendiğinde, belirli aralıklarla fiyatların zirve yaptığı görülmektedir. Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü (OPEC; Organization of the Petroleum Exporting Countries) tarafından kontrol edilen sektörde fiyat artışı talebin azalmasına yol açtığı gibi, aynı zamanda kullanıcıları alternatif ürün arayışına yöneltmektedir. Kömür ve nükleer enerji gibi alternatif enerji kaynaklarına yönelen idareler, RAP gibi malzemeler ile geri dönüşüm çalışmalarını da daha kapsamlı hale getirerek ihtiyaçlarını karşılamaktadır.



Şekil 2.1. Yıllara göre petrol fiyatları [15]

RAP, yollardan kazıma yöntemi ile elde edilen aynı zamanda yapısında asfalt ve agrega bulunduran kaplama malzemesi olarak tanımlanır. Bu malzemeler, yeniden yol yapım, yeniden yüzey kaplama veya altyapı sistemlerine ulaşmak için yapılan kazılardan elde edilir. Aynı zamanda operasyonel durumların bir sonucu olarak stoklara geri dönmesi sonucu da elde edilebilir. RAP malzemesi, belirlenen standartlara uygun şekilde konkasörlerde kırılıp elekten geçirildiğinde, gradasyonu ve kalitesi iyi olan asfalt kaplı agregalar ortaya çıkmaktadır. Temin edilmesi ve işlenmesi açısından bakıldığında RAP, doğal agregaların yerine kullanılabilecek önemli bir üründür. RAP uzun yıllardır görece düşük oranlarda kullanılsa da günümüzde daha yüksek oranlarda kullanılmasına ilişkin bir yönelim bulunmaktadır [16]. RAP hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük öneme sahiptir. Atık olarak düşünülebilecek RAP malzemesinin yeniden kullanımından ve elde edilen ekonomik kazançtan kaynaklı söz konusu ürünü, zengin bir kaynak veya çok değerli bir keşif olarak görmek mümkündür. RAP'ın kullanımını artırarak, doğal malzeme kullanımını azaltmak ve kaynakların korunmasına yardımcı olunmaktadır [17]. RAP, idarelerin doğal kaynak tüketimini azaltmak, çevresel koşulları iyileştirmek ve yol inşaat maliyetini azaltmak için kullandıkları efektif bir malzemedir. Yeni yapılan asfalt yollarda RAP kullanmak, Amerika Birleşik Devletleri'nde günlük bir uygulama haline gelmiştir. Ulusal Asfalt

Kaplama Birliği (NAPA; National Asphalt Pavement Association) tarafından yayınlanan raporda RAP kullanımının sağladığı avantajlar;

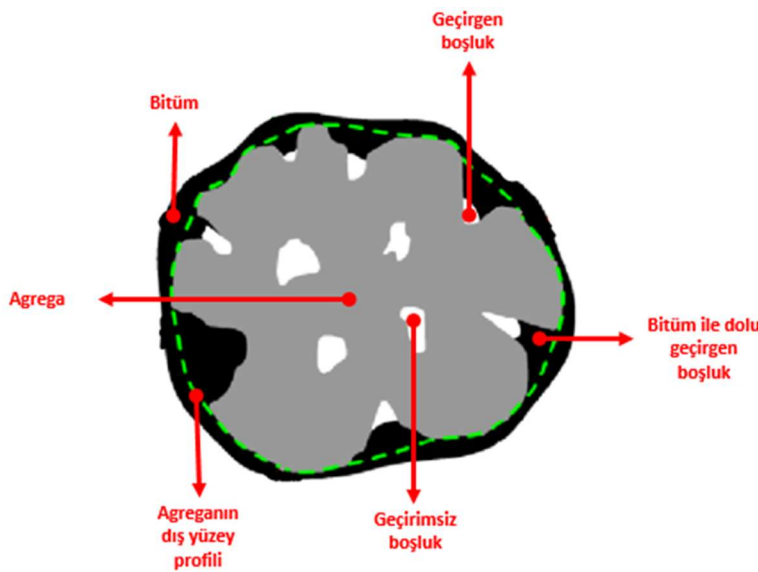
- Asfalt karışımlarının üretiminde bağlayıcı ve agrega ikamesi nedeniyle maliyette azaltma,
- Kaynak çıkarma, taşıma ve işletme dâhil olmak üzere işlenmemiş bağlayıcı ve agregaların korunmasından elde edilen çevresel faydalar,
- Malzeme bertaraf etme maliyetinde azalma,
- Atık malzemenin düzenli depolama alanlarında muhafaza edilmesi ihtiyacında azalma,
- Sera gazı üretimi ve diğer emisyonların azaltılması olarak belirtilmiştir [18].

NAPA tarafından paylaşılan 2020 inşaat sezonu ile ilgili raporda, 2020 yılında tahmini 87 milyon ton RAP malzemesinin karışımlarda kullanıldığı belirtilmiştir. 2009’da kullanılan tahmini RAP miktarı göz önüne alındığında %55,4’lük artışın meydana geldiği gözlenmiştir. Asfalt karışımı üreticileri, RAP’in %90’ından fazlasının yeni yol kaplamalarında tekrar kullanıldığını ve kalan %10’luk kısmın bağlayıcısız agrega temelleri (granüler temel, granüler alt temel vb.) gibi diğer inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanıldığını bildirmişlerdir. Söz konusu raporda, 2020 yılında RAP kullandığını bildiren üreticilerin %98,9 olduğu belirtilmiştir [19].

Avrupa Komisyonu 1996 tarihinde aldığı karar ile Topluluk Atık Yönetim Stratejisi kapsamında yeni yapılacak yollarda alternatif ürünlerin kullanılmasını, dolayısı ile çevreye verilen zararın azaltılmasını ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasını hedeflemiştir. Avrupa Birliği’ne katılmak isteyen ve bu doğrultuda çalışmalarını sürdüren ülkemiz de atıkların geri dönüştürülmesine yönelmiştir. Aynı zamanda geri dönüştürülmüş malzemelerin olası kullanım alanları ile ilgili yapılan çalışmalar da önemli ölçüde artmıştır. Refah seviyesi yüksek ülkeler mercek altına alındığında, RAP malzemesini tesislerde yeni üretilen asfalt karışımlarına belirli oranlarda ilave ederek değerlendirdiği, bu sayede de ekonomik fayda sağlarken sürdürülebilir doğal kaynak kullanımına da destek verdiği görülmektedir. Ülkemiz ölçeğinde bakıldığında ise, RAP malzemesi atıl bir malzeme olarak değerlendirilerek atık sahalarına gönderilmekte ya da genellikle köy yollarında kullanılmaktadır. Nihai durumda söz konusu ürünün ekonomik değeri oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır [20].

RAP malzemesi ile ilgili ülkemizde yapılan uygulamalara bakıldığında, ilk olarak İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) iştiraki olan İstanbul Asfalt Fabrikaları'nın (İSFALT) 1996 tarihinde yaptığı çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Ankara ve İstanbul illerinin birbirine bağlantısını sağlayan Anadolu Otoyolu'nun (O_4) Gümüşova ile Sakarya KöprülÜ Kavşağı mevkileri arasında kalan kesiminde asfaltta oluşan deformasyonların onarılması esnasında ortaya çıkan RAP'in, bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakasında değerlendirilmesi planlanmıştır. İlgili işin gerçekleştirilmesi için 2006'da Karayolları 17. Bölge Müdürlüğüne ihale yapılmıştır. Otoyolun bu bölümü hizmete başladığı 1990'lı yıllardan bu yana büyük onarım görmemiştir. Enine çatlaklar ve timsah sırtı çatlakların ön plana çıktığı birçok hasar aşınma tabakasında gözlemlenmiştir. Çalışmanın yapılacağı yol kesimi uygun yöntemlerle analiz edilmiş ve rehabilite edilmesi gereken tabakalar belirlenmiştir. Çalışma kapsamında geri dönüşüm yöntemlerinden sıcak geri dönüşüm yöntemi seçilmiştir. Bu metot, RAP malzemesinin plentte bulunan ilave ekipmanlar vasıtası ile ısıtılarak karışıma eklenmesini kapsamaktadır. Yöntemin ilave ekipman gerektirmesi, plent işletme maliyetini arttıran bir unsur olmuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde, ülkemizde RAP'in soğuk besleme yöntemi ile değerlendirilmesi yönünde karar alınmıştır [21].

RAP malzemesi (Şekil 2.2.) bünyesindeki geçirimli ve geçirimsiz boşluklar, bitüm içeriği ve heterojen olan yapısından kaynaklı doğal agregaya oranla kontrolsüz bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar ve saha uygulamaları ile RAP malzemesin kullanılabilirliği araştırılmaya devam edilmektedir.



Şekil 2.2. RAP [22]

2.2. RAP'in Esnek Üstyapılarda Kullanılması

Salta, yaptığı çalışmada bitümlü sıcak karışımların geri dönüşüm yöntemlerini incelemiştir. Çalışma bulgularına göre; servis ömrünü tamamlamış veya deformasyonlara uğramış olan kaplamaların analiz edilerek hangi bozulma sınıfına dahil edileceği, dolayısı ile hangi katmanların kazınacağı belirlenmektedir. Sorunun çözülmesine yönelik hangi yöntemin kullanılacağı belirlendikten sonra, asfalt üretim tesislerinde ya da yerinde ilgili ekipmanlar ile RAP'in tekrar kullanılabilir hale getirilmesi, çalışmada “geri dönüşüm süreci” olarak tarif edilmektedir. Türkiye'deki kent içi yolların inşası esnasında bir yılda 16 milyon ton civarında asfaltın kullanıldığı bildirilmiştir. Söz konusu asfaltın üretiminde %1 mertebesinde RAP kullanılması durumunda, BSK elde etme maliyetinin önemli ölçüde azalacağı belirtilmiştir. Tonu 45 \$'a elde edilen BSK'nın, %1 RAP içermesi ile ülke ekonomisine 7,2 milyon \$ civarında katkı sağlanacağı ifade edilmiştir. İBB uhdesinde bulunan yolların İSFALT tarafından onarımı esnasında yılda 550 bin ton mertebesinde RAP elde edildiği, söz konusu RAP malzemesinin plentte sıcak geri dönüşüm yöntemi ile değerlendirildiği belirtilmiştir. Bu geri dönüşüm yöntemi sayesinde yılda 23 milyon TL civarında tasarruf edildiği bildirilmiştir [20].

Falchetto vd., farklı miktarlarda RAP ve Elektrik Ark Ocağı Çelik Cürufunun (EAFSS) birlikte kullanımının asfalt karışımının düşük sıcaklık özellikleri üzerindeki etkisini iki deneysel yöntemle araştırmışlardır. Bunlar, Eğilme Kirişi Reometresi (BBR) ve Yarı Dairesel Eğilme (SCB) deneyleridir. İki farklı asfalt bağlayıcı ile sekiz farklı asfalt karışımı hazırlanmış ve teste tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda sünme rijitliği, m değeri, termal gerilme, kritik çatlama sıcaklığı, kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu elde edilmiştir. EAFSS (%75) ve RAP (%25) kombinasyonunu içeren karışımlar, sadece RAP içeren karışımlara kıyasla daha yüksek termal gerilme ve kritik çatlama sıcaklığı göstermiştir. Bu durum, RAP'in kullanılan asfalt bağlayıcıdan bağımsız olarak, karışım üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. %100 EAFSS ve %75 EAFSS + %25 RAP karışımların geleneksel asfalt karışımlara göre daha iyi kırılma performansına sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak EAFSS agregalarının özellikleri ve EAFSS içeren karışımların, optimizasyon için gerekli olan artan bağlayıcı miktarını göstermişlerdir [23].

Oruç vd., RAP'in sıcak asfalt karışımlarında kullanımı ile ilgili çalışmasında, global ve Türkiye ölçeğinde RAP uygulamaları, yöntemleri ve tecrübeleri irdelenmiştir. Aynı zamanda geri dönüşüm yöntemlerinin sağladığı kazanımlar araştırılmıştır. Çalışmanın ana maddesini oluşturan RAP, İstanbul sınırlarında bulunan ve servis ömrü nihayete ermiş yollardan trimer vasıtası ile kazınarak elde edilmiştir. RAP'in %10, %25 ve %40 oranlarında karışımlara eklenmesi ile deneye tabi tutulacak numuneler oluşturulmuştur. Numunelere yapılan deneyler sonucunda, artan RAP miktarı ile stabilite değerlerinin düştüğü, fakat bu düşüşün standartların izin verdiği sınırlar içerisinde kaldığı bildirilmiştir. Karışıma eklenen RAP oranının artışı ile porozitenin de artış göstermesinin öngörülen bir durum olduğu belirtilmiştir. Elde veriler neticesinde, Karayolu Teknik Şartnamesinin (KTŞ) öngördüğü sınırlar içerisinde kaldığı, karışıma ait fiziksel özelliklerin kabul edilebilir seviyede olduğu tespit edilmiştir [24].

Ünlü, ülkemizin en kalabalık nüfusuna ve araç sahiplik oranına sahip olan İstanbul ilinin Avrupa yakasını çalışmasında mercek altına almıştır. Avrupa yakası sınırlarında bulunan muhtelif lokasyonlarda herhangi bir nedenle yenilenmesi veya onarılması gereken yollardan kazınan RAP veya hatalı üretim sonucu kullanılamayacak nitelikte olan asfalt malzemesinin geri dönüşümünün sağlanarak, binder tabakasında tekrar değerlendirilmesi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında RAP, standart şekilde sıcak yöntem ile üretilen karışımlara belirlenen miktarlarda ikame edilmiştir. Binder tabakasında RAP malzemesinin kullanılması ile üstyapı performansının nasıl değişeceği; tekerlek izi, Marshall ve dolaylı çekme dayanımı gibi bazı testler yardımı ile analiz edilmiştir. Elde edilen verilere göre, RAP miktarının artması ile performans değerlerinin çoğunlukla ters yönde değiştiği gözlemlenmiştir. Söz konusu çalışmalara bakıldığında en efektif RAP oranının %15 olduğu tespit edilirken, %30 seviyesine kadar arttırılacak oranın tasarım kriterlerinin sınır şartlarını sağladığı belirtilmiştir. Çalışma regresyon analizinin verdiği sonuçlar çerçevesinde incelendiğinde ise %35 mertebesinde karışıma RAP ilave edilmesinin, binder tabakasında makul bir oran olabileceği sonucuna varılmıştır. Yapılan deneyler ve elde edilen tüm çıkarımlar kapsamında yapılan fayda/maliyet analizleri, karışımlarda kullanılan RAP oranının artması ile maliyetlerin tatmin edici düzeyde azaldığını göstermiştir [5].

Seferoğlu vd., KTŞ’de belirtilen tasarım şartlarına uygun olacak şekilde, Plent-Miks Temel (PMT) tabakasında belirlenen miktarlarda RAP kullanımının sağlayacağı ekonomik kazanımların araştırılması için çalışma yapmışlardır. İçeriğine RAP dahil edilen karışımların sağladığı faydalar incelenirken, bütçeye etkisi de analize tabi tutulmuştur. Depodan veya direkt sahadan temin edilebilecek RAP malzemesi ekonomik açıdan irdelendiğinde, hangi mesafede başa baş noktasını geçeceği ve mali açıdan fayda sağlayacağı araştırılmıştır. Yapılan deneyler ve analizlere göre, RAP’in PMT tabakasında %100’e kadar çimento ilavesi ile birlikte kullanılabileceği tespit edilmiştir. PMT’de doğal agreganın alternatifi olarak RAP kullanımının sağladığı ekonomik fayda ise %16 mertebesinde tespit edilmiştir. Nihai durumda PMT Tip-I’de RAP kullanılmasının mali açıdan daha fizibil olduğu ve doğal agregaya kıyasla güçlü bir alternatif olduğunu bildirilmiştir. [4].

2.3. RAP’in Çimento Esaslı Karışımlarda Kullanılması

Huang vd., RAP katkılı Portland çimentosu betonunun mekanik özelliklerini laboratuvar deneyleri yoluyla incelemiştir. Deneysel çalışma kapsamında iri ve ince taneli olarak iki grupta sınıflandırılabilen RAP malzemesi kullanılmıştır. Çalışmada karayolundan temin edilmiş ideal RAP malzemesi kullanmak yerine, laboratuvar koşullarında üretilmiş RAP malzemesi kullanılmıştır. 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresine sahip sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini değerlendirmek için, basınç ve yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. RAP ile üretilen betonun karıştırılması, dökülmesi ve kürlenmesi için geleneksel ekipman ve yöntemleri kullanan yazarlar, söz konusu ekipman ve yöntemlerin RAP’li tasarımlarda da rahatlıkla kullanılabileceğini belirtmişlerdir. RAP ile hazırlanan beton numunelerin hem basınç hem de yarmada çekme dayanımlarında sistematik bir düşüş olduğunu gözlemlemişler ve genel olarak betona katılan RAP oranı arttıkça, tokluğun da arttığını tespit etmişlerdir. Yapılan deneyler neticesinde, iri agreganın yerine belirli bir miktarda iri RAP eklemenin efektif olabileceği önerilmiştir [10].

Akpınar, beton karışımı tasarlanırken doğal agrega yerine asfalt kırıklı agrega (AKA) malzemelerinin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu doğrultuda AKA ilavesi ile oluşturulan beton numunelerinin kimyasal ve fiziksel niteliklerinin değişimini gözlemlemek amacı ile bir dizi deney gerçekleştirmiştir. İlk olarak, laboratuvar ortamında hazırlanmış harçlara kıvam (yayılma), çökme ve birim hacim ağırlık testleri

uygulanmıştır. Akabinde standartlara uygun olarak üretilen kontrol ve AKA katkılı sertleşmiş beton numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları, gerilme ve şekil değiştirme analizleri, ultrasonik ses dalgası hızı, aşınma değerleri, dinamik elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi gibi özelliklerini ilgili deney başlıkları altında mukayese ederek, performans kriterlerindeki değişimleri tespit etmeyi amaçlamıştır. AKA'lı numunelerde eğilme dayanımlarının 5,95 MPa'dan 6,50 MPa mertebesine yükseldiğini, buna karşılık basınç dayanımlarının ise 40,3 MPa civarından 24,5 MPa civarına gerilediğini tespit etmiştir. Birim hacim ağırlık değerleri ortalamalarının 2406 kg/m³ seviyelerinden 2308 kg/m³ seviyesine, ultrasonik ses dalgası hızının ise 4,75 km/sn'den 3,90 km/sn'ye düştüğünü gözlemlemiştir. Azalma trendlerinden bir diğerini de yarmada çekme dayanımında gözlemleyen yazar, 3,33 MPa olan değer 1,83 MPa seviyesine düştüğünü bildirmiştir. Elde edilen bulgulara göre; AKA katkısının çatlak yayılma hızını azalttığını, dolayısı ile AKA katkılı beton numunelerdeki kırılmanın kontrol numunesine kıyasla daha uzun sürede gerçekleştiğini belirtmiştir. Sonuç olarak, AKA'nın belirli oranlarda beton harcına ikame edilmesi ile, C20 ve C40 sınıflarında betonların üretilebileceğini tespit etmiştir. Üretilen betonun kullanım alanı noktasında öneride bulunan yazar, elde edilen AKA katkılı betonun, beton yol kaplamalarında hiçbir çekinceye mahal vermeden kolaylıkla kullanılabileceğini belirtmiştir [25].

Işıkdag, yollardan kazınarak elde edilen asfalt kırığı agregalarının (AKA) betonda kullanılabilirliği ve kullanıldığı takdirde optimum oranın ne olması gerektiği ile ilgili deneysel bir çalışma yapmıştır. AKA'ları 4 ile 16 mm ve 16 ile 31,5 mm elekleri arasında olacak şekilde iki grupta sınıflandırmış ve kullanmıştır. Numuneler oluşturulurken AKA'lar, %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılacak şekilde doğal agrega ile birlikte değerlendirilmiştir. CEM-I 42,5R tipi çimento dozajı 300 kg/m³, 350 kg/m³ ve 400 kg/m³ olacak şekilde numuneler teşkil edilmiştir. AKA'lar 0-4 mm boyutlarına tekabül edecek şekilde elekten geçirildikten sonra, yukarıda belirtilen oranlarda CEN standardındaki kumun alternatifi olarak karışımlarda kullanılmıştır. Deney sonuçları irdelendiğinde, betonun işlenebilirliğindeki iyileşme dikkat çekmiştir. Elde edilen verilere göre, 20 MPa ile 40 MPa arasında mukavemete sahip AKA'lı betonların (AKAB) üretilmesinin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda yapılan analizlerin sonucunda, geri kazanılmış AKA'nın %50'ye varan seviyelerde rijit üstyapı tabakalarında kullanılabileceği

belirtilmiştir. AKA'lı harçların (AKAH) eğilme dayanımındaki performansı ve enerji yutma kapasitesindeki olumlu etkisinin beton endüstrisine sağlayacağı faydaya dikkat çekilmiştir. Eğilme dayanımının araştırıldığı deneylerde, AKA cidarında bulunan bitümünün çatlak oluşma başlangıcını geciktirdiği ve çatlak oluşuktan sonra ilerleme hızının yavaş bir şekilde seyretmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. AKAB'ın yapısındaki suyun zamanla azalması sonucu oluşan rötre çatlaklarının yapısı, hızı ve adedinin tokluk değerindeki iyileşmeyi destekleyici şekilde olduğu belirtilmiştir. Olumlu çıktılardan bir diğerinin ise, AKA'nın betondaki miktarının artması ile azalan birim ağırlıklar olduğu ifade edilmiştir. AKAB'a yapılan su emme deneyleri neticesinde suyun beton içerisinde yayılma miktarının az olduğu, dolayısı ile rijit üstyapı inşaatlarında kullanımının mümkün olduğu bildirilmiştir. Doğal agrega yerine %100 mertebesinde AKA kullanıldığında beton performansının olumsuz yönde etkilendiği, ancak %50'ye varan AKA ikamesinin KTŞ'nin izin verdiği sınırlarda ürünler elde edilmesine imkân sağladığı belirtilmiştir. %50'ye varan AKA kullanımı ile üretilen AKAB'ların yaklaşık olarak 30 MPa ile 40 MPa arasında basınç dayanımlarına ulaştığını, bu seviyedeki betonlarında bazı yapı ve yol inşaatlarında kullanılabileceğini ifade etmiştir. Konkasör marifeti ile kırılarak ya da eleme tesislerinde işleme tabi tutularak belirlenen granülometriye uygun hale getirilen AKA'ların elde edilmesi ve bunların beton üretim tesislerinde kullanılması ile doğal kaynaklara olan ihtiyacın azalacağı, maliyetler azalırken, doğal agreganın elde edilmesi için çevrenin tahrip edilmesinin de belirli ölçüde engellenebileceği bildirilmiştir. Aynı zamanda muhtemel bir çevresel atık olacak AKA'nın değerlendirilmesi ile çevrenin kirlenmesinin engellendiği ve bu yöntem sayesinde de ülkemiz ekonomisinin desteklendiği vurgulanmıştır [8].

Topçu ve Işıkdag, farklı çimento dozajları ve ikame oranları ile geri kazanılmış asfalt kaplama harçları (RAPM) üretmiştir. RAPM'nin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için numuneler üzerinde tahribatlı ve tahribatsız testler yapılmıştır. Harçların kırılma davranışını tahmin etmek için RAPM üzerinde ayrıca serbest ve kontrollü rötre testleri uygulanmıştır. Rötre testlerinin amacı, çatlak oluşumunu geciktirmek ve harçların çatlamadan önce şekil değiştirme kapasitesini iyileştirmektir. Mekanik özelliklerde optimum RAP içeriği %25 ile %50 serileri arasında elde edilmiştir. RAP içeriğinin artmasıyla çatlak genişlikleri azalmıştır. Aynı zamanda çatlak oluşumları ve ilk çatlama gecikmiştir. Nihai durumda RAPM, mekanik

özelliklerdeki azalmaya rağmen, harçların şekil değiştirme kapasitesini arttırmıştır [13].

Hossiney vd., beton kaplamalarda RAP'in kullanılabilirliğini araştırmıştır. %0, %10, %20 ve %40 RAP içeren betonlar laboratuvarda üretilmiş ve performansları değerlendirilmiştir. Laboratuvar test sonuçları, RAP yüzdesi arttıkça betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülünün azaldığını göstermiştir. Termal genleşme katsayısı ve kuruma rötresi, RAP içeriğinden önemli derecede etkilenmiştir. Kritik sıcaklık ve yük koşulları altında Florida'daki tipik beton kaplamalardaki maksimum gerilmeleri belirlemek için, bir sonlu elemanlar analizi yapıldığında, beton için elde edilen maksimum gerilmenin eğilme mukavemetine oranı, RAP'siz bir referans betonuna kıyasla genel olarak azalmıştır. Bu durum, RAP içeren bir beton kullanmanın beton kaplamaların performansında iyileşme sağlayacağını göstermektedir [26].

Khay vd., bir yol taban zemininde kullanılacak çimento ve RAP karışımının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. RAP'in mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için RAP içeriği %0 ile %100 arasında değiştirilmiştir. Portland çimentosu içeriği, kuru bileşenlerin ağırlıkça %6'sında sabit tutulmuştur. Gerçekleştirilen testlerin sonucunda RAP içeriğindeki bir artış, ölçülen tüm mekanik özelliklerde (Elastisite modülü, basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve eğilme dayanımı) azalmaya neden olmuştur. Buna rağmen, çimento ile işlenmiş RAP karışımının, kaplama yapılarında kullanılmak üzere kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip olduğu bildirilmiş ve %60'lık RAP içeriğinin önerilen basınç dayanımı kriterlerini sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, rastgele rötre gelişimini önlemek için, kaplamalarda 8 m'lik derz aralığı önerilmiştir [27].

Brand vd., çimento, cüruf ve uçucu kül içeren üçlü bir karışıma, RAP ve geri dönüşüme tabi tutulmuş agrega katarak yeni bir karışım oluşturmuşlardır. RAP'in karışıma katılması sonucunda, betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımlarının yanı sıra elastisite modülü değerlerinde azalma gözlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre, geri dönüştürülmüş agregalı beton karışımlarının, doğal agregalı betona göre %60'a kadar daha düşük dayanıma sahip olduğu gözlenmiştir. Ancak, kırılma testi

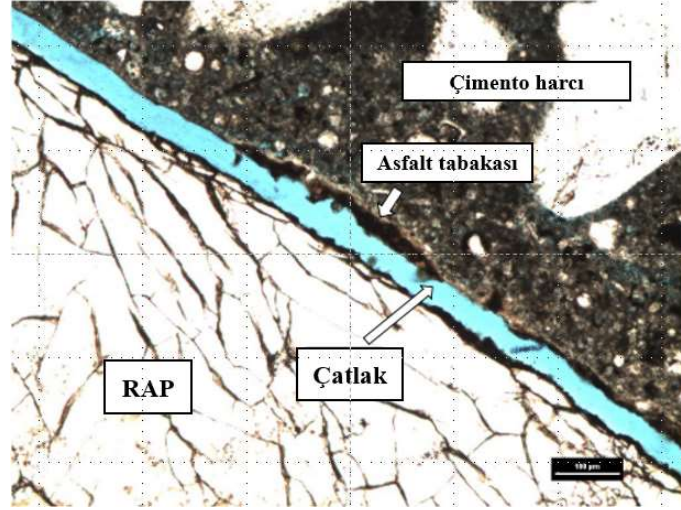
sonuçlarına göre, geri dönüştürülmüş beton agregasının istatistiksel olarak doğal agregayla benzer kırılma özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir [28].

Brand ve Roesler, %50'ye kadar parçalara ayrılmış geri kazanılmış asfalt kaplamanın (FRAP) ve çelikhane cürufunun (SFS) beton içeriğinde iri agrega yerine kullanılabilirliğini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Genel olarak literatür bulguları, betonda RAP veya FRAP varlığının betonun mukavemetini ve sertliğini azaltacağını, ancak dayanıklılık ve kırılma özelliklerinin büyük ölçüde etkilenmeyeceğini göstermiştir. Literatür araştırması ve kendi deneysel çalışmalarını sentezleyen yazarlar, dayanım, elastisite modülü, büzülme ve kırılma özelliklerinin kontrol numuneleri ile benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmada, %100 doğal SFS'ye sahip karışımlar yüksek donma/çözülme dayanıklılığı sergilediğinden, muhtemelen FRAP içeriğindeki SFS'den ziyade, FRAP içeriğindeki bitüm nedeniyle, daha yüksek SFS FRAP içerikleriyle donma/çözülme dayanıklılığının azalabileceği bildirilmiştir. Ayrıca FRAP içeriğindeki bitümün, SFS içeriğindeki serbest CaO ve MgO'nun hidratasyonunda sorun yaratabileceği vurgulanmıştır. Bu nedenle yapısal bir beton tabakasında kullanmadan önce ilgili bileşenlerin ayrıntılı test edilmesi önerilmiştir. Aynı zamanda SFS FRAP'ın geçici yol ve banketlerde test yapılmaksızın hemen kullanılabilirliğinin mümkün olabileceği belirtilmiştir [29].

Abut, Kocaeli ilinde yaptığı çalışmasında, SSB yoldan alınan numuneler ile laboratuvar ortamında oluşturulan numunelerin mukayeseli bir değerlendirmesini yapmıştır. Araştırmaya SSB karışımına %15 ve %20 oranlarında RAP ekleyerek mekanik özelliklerin belirlenmesi ile başlayan Abut, elde ettiği çıkarımlar neticesinde iyi bir granülometriye sahip RAP katkılı betonun her ne kadar dayanımında düşüşler olsa da rijit üstyapı imalatı için kullanılabileceğini tespit etmiştir. Yürüttüğü çalışmanın ikinci etabında, deneysel bulgular sonucunda elde ettiği doneleri kullanarak 2,2 km'lik bir pilot yol uygulaması gerçekleştirmiştir. Söz konusu yoldan tahribatlı yöntem metotları kullanılarak numuneler alınmıştır. Yoldan alınan ve laboratuvar ortamında üretilen numuneler mukayeseli bir analize tabi tutulmuştur. Elde edilen bulgulara göre; RAP cidarındaki bitümün, betonun mekanik performansını olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. SSB karışımına 4,75 mm ile 19 mm boyutlarında %15'lik bir RAP ikamesi ile (dayanımlarda bir miktar düşüşe neden olmasına rağmen) beton yol kaplamaları teknik şartnamesinde (BYŞ) belirtilen 35

MPa düzeyindeki dayanım kriterlerinin sağlandığı bildirilmiştir. Uygun gradasyona sahip RAP malzemesinin %20 mertebesine kadar rijit üstyapı imalatlarında değerlendirilebileceği vurgulanmıştır. Kontrol numunelerinde 112. günde %0,050 olan kuruma rötresi değerinin, %15 ve %20 RAP katkılı numunelerde %0,060 mertebesinde olduğu gözlenmiştir. Tüm karışımlar için yoğunluğun %2 civarında azaldığı, betonun porozitesinin ise %6,2 ile %12,9 aralığında değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Muhteviyatında RAP bulunan karışımlarda kuruma rötresinin kontrol numunesine göre fazla olması sebebinin, nispeten geçirimsiz olan bitümlü RAP malzemeleri arasında oluşan su hazneleri olduğu bildirilmiştir. Laboratuvarında hazırlanan ve araziden temin edilen numunelerin içerisine nüfuz eden su miktarının, betonun dayanıklılığı açısından iyi bir seviyede olduğunu ifade edilmiştir [30].

Shi, kaliteli agrega kaynaklarının tükenmesi ve aşırı RAP stoklarının yönetimi ile ilgili potansiyel zorluklar nedeniyle Portland çimentolu betonda (PCC) iri agrega ikamesi olarak RAP kullanımının teşvik edilmesi gerektiğini bildirmiştir. RAP içerikli PCC'nin mekanik özellikleriyle ilgili mekanizmaları araştırmak için optik mikroskop, X ışını CT ve SEM olmak üzere üç gelişmiş aracı birlikte kullanmıştır. Asfalt tabakada kohezyon göçmesi (yani asfalt tabakasında çatlak oluşumu) RAP-PCC sistemindeki birincil göçme mekanizmasıdır. Şekil 2.3'te asfalt tabakasından geçen çatlak gösterilmiştir. İncelenen RAP malzemelerinin hiçbirinde RAP partiküllerinin çevresinde temiz bir asfalt tabakasının (başka bir malzeme olmadan tek başına asfalt tabakası) varlığı gözlenmemiştir. Genel olarak asfalt tabakası değişen miktarlarda ince agrega ve hava boşlukları içermektedir. RAP-PCC sisteminin ana zayıf bölgesi asfaltdır. Asfalt tabakada kohezyon göçmesi RAP-PCC'nin mukavemet azalmasından sorumlu ana mekanizmadır. RAP'in varlığı, incelenen RAP-PCC karışımlarında referans PCC numunelerine kıyasla daha yüksek miktarda hava boşluğuna neden olmuş ve bu durum da mukavemet ve rijitlik azalmalarının başka bir nedeni olarak gösterilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, RAP-PCC, geleneksel PCC'ye göre daha yüksek sünekliğe ve daha iyi kırılma özelliklerine sahip bir yapı malzemesidir. Söz konusunu malzemenin artan sürdürülebilirlik ihtiyacını karşılayacağı, bu yüzden de büyük ölçüde savunulması ve teşvik edilmesi gereken bir proses olması gerektiği bildirilmiştir [11].



Şekil 2.3. Asfalt tabakasından geçen çatlak (kohezyon göçmesi) [11]

Abraham vd., RAP agregalarının ince parçalarının çimento harcının mekanik, durabilite ve porozite özelliklerine etkisini incelemiştir. Bu bağlamda doğal ince agregası ile birlikte %25, %50, %75 ve %100 oranında RAP malzemesi kullanmıştır. Deney bulgularına göre; RAP harç karışımlarının basınç, eğilme ve yarmada çekme gibi dayanım değerleri, kontrol numunelerine kıyasla daha düşük seviyelerde tespit edilmiştir. Fakat RAP25 ve RAP50 karışımları, öngörülen 28 günlük karakteristik basınç dayanımı olan 43 MPa değerine ulaşmıştır. Mukavemetlerdeki maksimum azalma sırasıyla basınç, eğilme ve yarma çekme mukavemeti için %30, %25 ve %45 olmuştur. Kür sürelerinin artması veya gerekli katkıların eklenmesiyle %75 ve %100 RAP karışımları için de dayanım şartlarının sağlanabileceği belirtilmiştir. MIP (mercury intrusion porosimetry) tekniği ile belirlenen porozitenin, RAP içeriği arttıkça artması, RAP harcındaki ara yüzeyin gözenekliliğinin artmasından kaynaklandığı öngörülmektedir. 100°C'deki konvansiyonel fırında kurutma işlemi bitümün erimesine yol açtığından, 35°C'deki vakumlu kurutma işlemi benimsenmiştir. Mukavemet parametrelerinde olduğu gibi, kuruma rötresi için RAP içeriğinde artış eğilimi gözlenmemiş, zamanla düzensiz davranışlar yaşandığı tespit edilmiştir. RAP içerikli karışımların, kontrol karışımına kıyasla daha fazla rötreye maruz kaldığı ve rötreye oranının, kurumanın ilk günlerinde daha yüksek olduğu gözlenmiştir [31].

Shi vd., RAP içeren Portland çimentolu betonun (RAP-PCC), normal PCC'ye kıyasla daha iyi kırılma özelliklerine ve sünekliğe sahip olabileceğini göstermiştir. Çalışmalarında kolay ama etkili bir yaklaşım sağlamak için, RAP-PCC karışımların kırılma özelliklerini karakterize etmek amacıyla yarı dairesel eğilme (SCB)

geometrisini kullanan yenilikçi bir kırılma testi geliştirmişlerdir. Deneysel bulgulara göre; mekanik dayanımlardaki azalmaya rağmen, RAP ilavesinin PCC'nin CTOD_c ve G_f değerlerini iyileştirdiği gözlenmiştir [12].

Chyne vd., altyapı atığı olan RAP malzemesinin son zamanlarda farklı inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanıldığını gözlemlemiştir. Bu bağlamda fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler bakımından doğal agregalar ile RAP agregalarının özelliklerini incelemiştir. Agregalar özelliğinin yanı sıra, RAP içeren betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini de çalışmaya dahil etmişlerdir. Deneysel bulgulara göre; doğal agregaların %25'i işlenmiş RAP agregaları ile ikame edildiğinde, ilk çökme değeri işlenmemiş RAP agregalarına kıyasla %9,68'e yükselmiştir. RAP ile hazırlanan karışımların basınç ve eğilme dayanımlarının standart bir eğilim izleyerek azaldığını tespit etmişlerdir. Ancak, yüklerin döngüsel ve darbe niteliğinde olduğu yapısal betonlarda tokluk değerinin anahtar bir özelliğe sahip olduğu ve RAP oranı arttıkça tokluğun da arttığı belirtilmiştir. Kanıt olarak, RAP'siz numunelerde çatlak oluşumlarının net bir şekilde görülebildiği, RAP'li numunelerin ise çok küçük çatlaklara sahip olması gösterilmiştir. Çatlak büyüklüklerinin farklılığında agregalar etrafındaki asfalt filminin olumlu bir etkisinin olduğu bildirilmiştir. Tokluk açısından iri ve ince RAP karşılaştırılması yapıldığında ise sadece ince RAP içeren betonun, doğal agregalar içeren betonla benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [32].

Shi vd., %100 ince RAP ile hazırlanmış çimento harcının mikroyapısal, mekanik ve rötre değerlerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında, mikroyapısal özellikleri ve çimento hidratasyon ısısını araştırmak için petrografik teknoloji ve izotermal mikrokaleorimetri kullanılmıştır. Mekanik özellikler belirlendikten sonra, kontrollü kurutma şartlarında çekme özellikleri ve çatlama potansiyeli, sırasıyla çekme testi ve özelleştirilmiş halka testi ile gerçekleştirilmiştir. RAP harcı, doğal kum içeren çimento harcına (CON) kıyasla çok daha düşük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü ortaya koymuştur. Dayanım azalmaları %50'yi aşarken, elastisite modülü de neredeyse %70 oranında azalmıştır. RAP harcının tokluk kapasitesi ise 3, 7, ve 28. gün için sırasıyla %563, %1182 ve %481 artış göstermiştir. Artan tokluk kapasitesi, RAP harcının büyük çatlaklar meydana geldikten sonra bile enerjiyi emmeye devam edebileceğini göstermiştir. Mikroyapısal çalışma, RAP harcının CON harcından daha büyük boyutlarda ve daha çok miktarda hava boşluğuna sahip

olduğunu göstermiştir. Yüksek hava içeriği ve ince RAP çeperindeki asfalt tabakasının kohezyon göçmesi, mukavemet düşüşlerinin başlıca nedeni olarak tespit edilmiştir. RAP harcı, CON harcına göre sürekli olarak daha yüksek kuruma rötresi göstermiştir. Bunun nedeninin kuma kıyasla daha az sert RAP partiküllerinden kaynaklanan çimento hamurundaki daha az kısıtlama olabileceği tahmin edilmektedir. RAP harcı numunelerinin kütle kaybı düzeyleri de CON harcına kıyasla daha yüksek oranlarda tespit edilmiştir. RAP harcı yüksek rötne kapasitesine rağmen, düşük elastisite modülü, yüksek visko-elastik gevşeme ve artan tokluk nedeniyle, kontrollü kuruma koşulu altında, daha iyi bir çatlama direnci sergilemiştir. RAP harcının ortalama çatlama süresi 15,6 gün olarak tespit edilmiştir. Bu da CON harcının (8,6 gün) neredeyse iki katıdır. Sonuç olarak RAP harcı önemli bir mukavemet kaybı ve yüksek rötreye maruz kalmasına rağmen, normal çimento harcına göre daha yüksek süneklik, tokluk ve çatlama direnci sergilemiştir. RAP harcının bu performansı, malzemenin yüksek enerjiyi azaltmak için kullanılması için bir fırsat oluşturmaktadır. Mukavemet gereksinimi düşük, ancak çatlama sorunlarına karşı hassas olan yapılarda, RAP'in potansiyel ve alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceği önerilmiştir [7].

Şahan vd., doğal kaynaklardan elde edilen agregalara olan ihtiyacı azaltmak ve çevreye olumsuz etkileri olan atıkların kazanımını sağlamak için bir çalışma yapmayı hedeflemişlerdir. Bu bağlamda, yol yenilemesi veya onarımı esnasında kaplamadan çeşitli ekipmanlar ile kazınarak elde edilen ve genel olarak atık muamelesi gören kazanmış asfalt malzemesinin (KAM) beton içeriğinde iri agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında, 4,0 mm ile 22,4 mm arasında tane boyutuna sahip KAM yığını, beton karışımına %5, %10, %20 ve %30 oranında ilave edilmiştir. Bir kenarı 150 mm boyutunda olan küp numuneler üretilerek, 28 gün boyunca küre tabi tutulmuştur. Sıcaklık değişiminin betonun dayanımına etkisini görebilmek için 28. gün sonunda numuneler üç gruba ayrılmış, 1. grup 25°C'de, 2. grup 50°C'de ve 3. grup ise 75°C'de 1 gün boyunca bekletilmiştir. Belirlenen sıcaklıklarda bekletilen numuneler gün sonunda standartlara uygun olarak basınç dayanımının belirlenmesi için teste tabi tutulmuştur. Ölçümler sonucu elde edilen çıktılar irdelendiğinde, literatürü destekleyecek şekilde KAM ilavesinin betonun dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımının azalmasına sebep olan faktörün bitümün varlığı olduğu bildirilmiştir. Aynı zamanda, KAM'ın ilave edilmesi ile betonda porozitenin arttığı, dolayısı ile dayanımın boşluğun varlığıyla da

olumsuz etkilendiği vurgulanmıştır. Test sonuçları, KAM'ın beton karışımlara derecelendirilmesine dikkat edilerek katılmasının, C20/25 ile C30/37 mertebesinde dayanıma haiz beton üretimini mümkün kılabileceğini göstermiştir. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde ise, KAM'ın yüksek performans beklenmeyen yapılarda kullanılabileceği belirtilmiştir. KAM'ın bu ve buna benzer yöntemler ile değerlendirilmesi sayesinde çevreye ve ülke ekonomisine katkı sağlanacağını belirten yazarlar, bu sayede doğal kaynakların da daha az tahrip olacağını vurgulamışlardır [33].

Akkum, ömrünü doldurmuş veya herhangi bir nedenle yoldan kazınmış asfaltın betonda agrega olarak yeniden değerlendirilmesi kapsamında bir çalışma yapmıştır. Atık malzeme kimliği yüklenen kazınmış asfaltın geri kazanılması ile çevreye ve beton sektörüne fayda sağlanacağını belirtmiştir. Su/Çimento oranının 0,4 olarak alındığı çalışmada, 1 m³ beton üretimi için 400 kg çimento kullanılmıştır. Deney kapsamında 3 grup numune üretilmiştir. Birinci grupta geri dönüştürülmüş bitümlü asfalt agrega (GBA) ve kırmataş agrega %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında olacak şekilde kullanılmıştır. İkinci grupta GBA, bazalt ve kırmataş agrega %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Üçüncü grupta ise kırmataş ve bazalt agregası %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 olacak şekilde karışıma ilave edilmiştir. Belirtilen oranlara göre hazırlanan karışımlar kalıplara dökülmüş, numuneler elde edilmiş ve 28 gün boyunca kürlenmiştir. Akabinde numunelere eğilme ve basınç dayanımı testi, yüzey sertliğini belirlemek için test çekici testi, aşınma değeri testi, beton kalitesini belirlemek için UPV testi, sızan suyu belirlemek için su emme testi, kılcallık testi ve betonun klor geçirimsizliğine karşı direncini ölçmek için hızlı klor testi gibi bazı deneyler uygulanmıştır. DeneySEL bulgulara göre; karışıma sırasıyla %20 ve %40 GBA eklenmesi ile, basınç dayanımının %3 ve %4,5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu seviyeden sonra (GBA'nın %40'tan fazla kullanılması durumunda) basınç dayanımı değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Numunelerin aşırı sıcak ortamda bekletilmesinden sonra yapılan basınç dayanımı deneylerinde ise, GBA içeren çoğu numunenin kontrol numunesine kıyasla daha iyi basınç dayanımı değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Söz konusu iyileşmenin ise yaklaşık 50°C'den sonra yumuşamaya başlayan bitümün eriyerek hava boşluklarını doldurması, dolayısı ile numunenin daha az geçirimsiz ve sağlam bir hale gelmesi ile açıklanabileceği ifade edilmiştir. Eğilme mukavemeti perspektifinden bakıldığında ise %20 GBA içeren

numuneler, kontrol numunesine kıyasla %4 daha iyi performans göstermiştir. Literatüre paralel olarak, deneylerde kullanılan sıcaklıkların farklılık göstermesine rağmen, nihai durumda tüm setlerde GBA'lı numunelerin su emme değerlerinin daha düşük seviyelerde olduğu belirtilmiştir. Yine bu noktada yüksek sıcaklıklarda eriyen ve gözenekleri dolduran bitümün olumlu etkisi vurgulanmıştır. Kapilarite deney sonuçlarının, su emme deney sonuçları ile paralel olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen tüm deney sonuçları ve ilgili literatür irdelendiğinde, betonun hafif ve geçirimsiz olması istenen durumlarda GBA'nın önemli bir alternatif malzeme olabileceği vurgulanmıştır. GBA'nın basınç dayanımı noktasındaki olumsuzluklarının bazalt gibi sağlam ve dirençli agregalar vasıtası ile giderilebileceğinin mümkün olabileceği bu deneysel çalışma ile gösterilmiştir [34].

Marin-Urbe vd., doğal agregaların alternatifi olarak betonun içerisine %0, %20, %50 ve %100 oranlarında RAP ikame etmiş ve numuneler üretmişlerdir. Söz konusu çalışma, RAP içeren bir beton karışımın basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak, eğilme dayanımının tahmin edilmesini sağlayan logaritmik denklemler önermektedir. Karışımında artan RAP içeriği ile basınç ve eğilme dayanımının azaldığı belirtilmiştir. Basınç dayanımı, %20 RAP ikame edilmesiyle önemli ölçüde azalmıştır. Basınç dayanımına kıyasla daha az duyarlı olan eğilme dayanımının, numunenin şekline, boyutuna ve test tipine bağlı olduğu ifade edilmiştir. Üç test numunesi için basınç dayanımı özelliklerini eğilme dayanımı ile ilişkilendirmek için temsili denklemler önerilmiştir. Bu ilişkinin kullanılan test numunesinin şekline ve karışıma dahil edilen RAP miktarına bağlı olduğu bildirilmiş, ancak sertleşme süresi boyunca bu parametrelerin sabit olduğu kabul edilmiştir [35].

Kır vd., karayollarından kazınarak çıkarılan RAP'in geri kazanımı ile ilgili süreçleri ve metotları araştırmıştır. Deneysel bulgulara göre, RAP katkılı harcın kıvam ve basınç dayanımının düşme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Buna karşılık, numuneler don olayına ve tuza maruz bırakıldığında dayanımın tatmin edici seviyede kaldığı belirtilmiştir. Çevrenin korunması açısından da konuya yaklaşan yazarlar, RAP'in kullanılması ile doğal kaynakların tahribatının da azalacağını belirtmiştir [36].



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmaların büyük bir bölümü Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'ne bağlı Teknik Araştırma ve Kalite Yönetimi Dairesi Başkanlığı bünyesindeki Yapı Malzeme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) ve enerji yutma kapasitesi (tokluk) deneyleri ise Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan çalışma programı EK-1'de verilmiştir.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Çimento

Deneysel çalışmada bağlayıcı madde olarak Limak Çimento Güvercinlik Tesisinden temin edilen CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Söz konusu çimentonun özellikleri Tablo 3.1'de, görseli ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çimentonun özellikleri

Bileşen (%)	CEM I	TS EN 197-1	Fiziksel Özellikleri			TS EN 197-1	
	42,5 R						
CaO	64,50		Priz Süresi (Min.)	Başlama	135	Min. 60	
SiO ₂	18,24	C+S≥%50		Bitiş	195	-	
Al ₂ O ₃	4,75		Yoğunluk (g/cm ³)			3,15	-
Fe ₂ O ₃	3,52		Blaine İnceliği (cm ² /g)			3193	-
MgO	1,69	Lim≤%5	Toplam Hacim Genleşmesi (mm)			1	Max. 10
SO ₃	2,83	Lim≤%4	32μ Elekte Kalan			8,1	-
Na ₂ O	0,21		90μ Elekte Kalan			0,1	-
K ₂ O	0,65		Basınç Dayanımı (MPa)	2 günlük	26,8	Min. 20	
Cl-	0,009	Lim≤%0,10		7 günlük	43,7	-	
Kızdırma Kaybı	3,31	Lim≤%5		28 günlük	56,1	Min. 42,5	
Kalıntı	0,29	Lim≤%5				Max. 62,5	



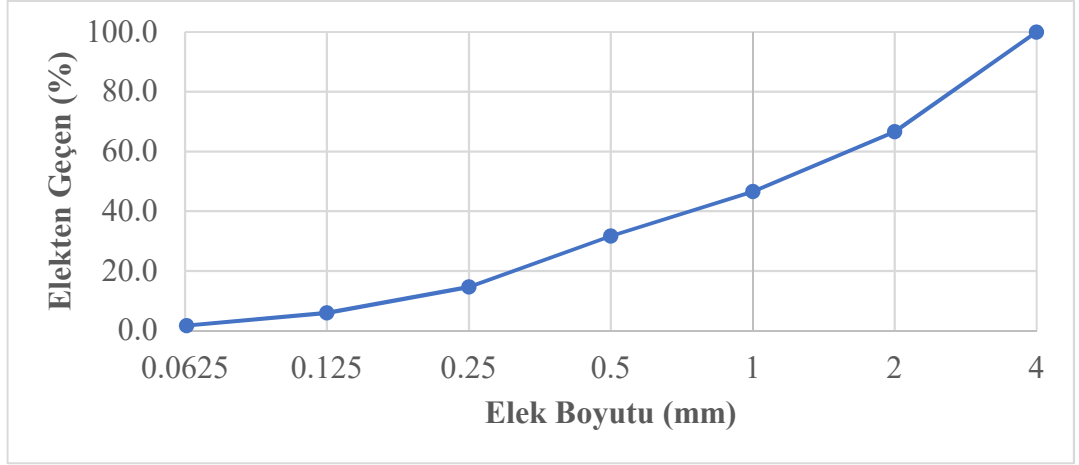
Şekil 3.1. Portland çimentosunun tartılması

3.1.2. Agrega (Kum ve RAP)

Deney kapsamında kullanılan doğal kum, Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (Şekil 3.2). Özgül ağırlığı $2,49 \text{ g/cm}^3$ ve dane çapı 0 mm ila 4 mm arasında değişen doğal kumun granülometri eğrisi Şekil 3.3'te verilmiştir. RAP malzemesi ise, Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü himayesindeki şantiyelerden temin edilmiştir. Trimer marifeti ile kazınmış asfalt öncelikle ön elemenden geçirilmiş, TS 3530 EN 933-1 [37] standardına göre 4 mm'den büyük olan kısımlar ayrıştırılmıştır (Şekil 3.4). Özgül ağırlığı $2,38 \text{ g/cm}^3$ ve 0-4 mm tane boyutuna sahip olan ince-RAP malzemesine ait granülometri eğrisi Şekil 3.5'te verilmiştir.



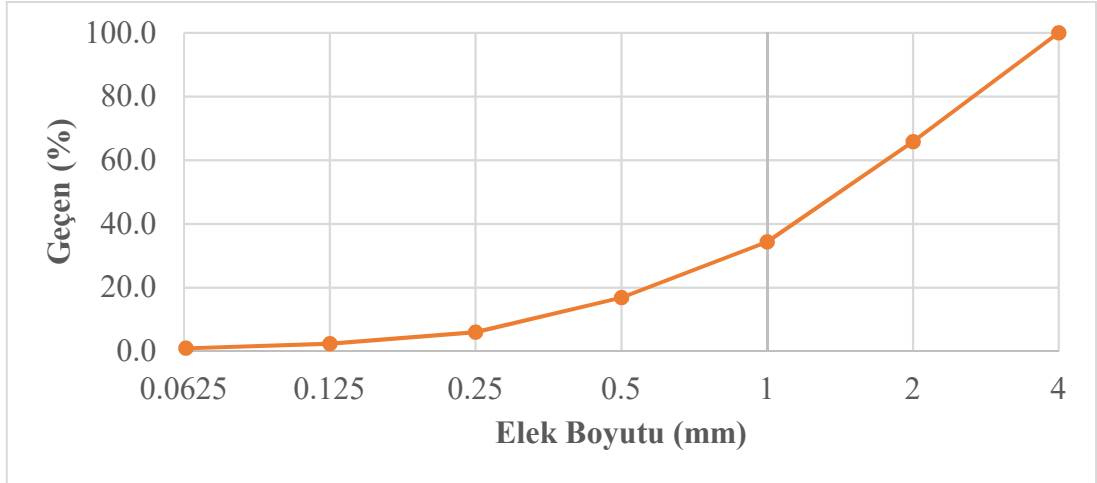
Şekil 3.2. 0-4 mm ebatlarındaki doğal kumun deneye hazırlanması



Şekil 3.3. Doğal kum için granülometri eğrisi



Şekil 3.4. RAP için ön eleme prosesi



Şekil 3.5. İnce-RAP için granülometri eğrisi

Ekstraksiyon tekniği kullanılarak ve ASTM D2172 [38] standardına uygun olarak ince RAP malzemesindeki bitüm ayrıştırılmış olup, kuru mıcıra göre bitüm miktarı %6,62 olarak tespit edilmiştir. AASHTO T 30 [39] standardı çerçevesinde ekstraksiyon kalıntısına yapılan elek analizinin sonuçları Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Ekstraksiyon kalıntısına elek analizi

Elek Açıklığı		% Geçen
(mm)	(inç)	
4,76	No.4	100,0
2,00	No.10	80,3
0,42	No.40	38,8
0,177	No.80	27,0
0,075	No.200	19,5

3.1.3. Su

Çalışma kapsamında karma suyu işlevini görmek üzere Ankara, Yenimahalle mevkiindeki şebeke suyundan yararlanılmıştır.

3.2. Karışım Tasarımı

Deneyisel çalışma kapsamında çimento miktarı sabit (400 kg/m^3) ve su/çimento oranı sabit (0,60) olmak üzere; RAP oranları değiştirilerek 6 farklı karışım oluşturulmuştur. %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında ince-RAP kullanılan karışımlarda sırasıyla 100K0R, 80K20R, 60K40R, 40K60R, 20K80R ve 0K100R kodlu numuneler üretilmiştir (K: KUM, R: RAP). Karışımında kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları TS EN 1097-6 [40] standardı kapsamında piknometre deneyi ile tespit edilmiş olup Tablo 3.3'te, 1 m^3 harç bileşimi için tasarlanan karışım oranları ise Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları

Malzeme	Özgül Ağırlık (g/cm^3)
Çimento	3,15
Su	1,00
Kum	2,49
İnce-RAP	2,38

Tablo 3.4. 1 m^3 karışım için kullanılan malzeme miktarları

Numune Kodu	Çimento (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	Kum (kg/m^3)	İnce-RAP (kg/m^3)
100K0R	400	240	1551,3	0,0
80K20R	400	240	1241,0	296,6
60K40R	400	240	930,8	593,1
40K60R	400	240	620,5	889,7
20K80R	400	240	310,3	1186,2
0K100R	400	240	0,0	1482,8

3.3. Numune Üretimi

Tablo 3.4’te verilen ağırlıklar baz alınarak, malzemeler hassas tartı yardımıyla ile tartılmış ve TS EN 196-1 [41] standardı referans alınarak karışım harcı hazırlanmıştır. Laboratuvar sıcaklığının 20 °C ve bağıl nemin %50 olduğu ortamda ilk olarak beton mikserinin haznesine kum eklenmiştir. Kum ve RAP kullanılan karışımlarda ise ilk olarak kum, daha sonra RAP hazneye eklenmiş ve 30 sn karıştırılarak, harcın homojen bir hal alması sağlanmıştır. İkinci adımda, karışıma çimento eklenerek, hazırlanan harç düşük hızda 30 sn süre ile karıştırılmıştır. Üçüncü adımda, su yavaş yavaş ilave edilerek 60 sn süre ile karıştırma işlemine devam edilmiştir. Dördüncü adımda, karıştırıcı yüksek hıza alınarak 30 sn boyunca karma işlemine tabi tutulmuştur. Beşinci adımda, karıştırıcı durdurulup harç 90 sn süreliğine dinlendirilmiştir. İlk 15 sn’de kabın çeperlerine toplanan harç sıyırılarak merkezde toplanmıştır. Bekleme esnasında kabın üzeri nemli bir bez ile kapatılmıştır. Altıncı adımda, karıştırma işlemi yüksek hızda 60 sn daha devam etmiştir. Karıştırma hızları TS EN 196-1’de [41] belirtilen limitlerde olup, Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5. Karıştırıcı hızları

Hız	Kendi eksen etrafında dönme hızı dakika ⁻¹	Yörüngesel dönme hızı dakika ⁻¹
Düşük	140 ± 5	62 ± 5
Yüksek	285 ± 10	125 ± 10

İlk olarak, hazırlanan harçtan numune alınarak yayılma tablasında kıvamı kontrol edilmiştir. Akabinde hazırlanan harç, yağlanmış olan kalıpların yarısına kadar spatula yardımı ile yerleştirilmiştir. Harç dolu kalıp, sarsma cihazına yerleştirilip 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. Daha sonra, diğer yarısı da harçla doldurularak yeniden 60 sarsma uygulanmış, yerleştirme işlemine devam edilmiştir (Şekil 3.6). Devamında sarsma cihazından çıkarılan harç dolu kalıbın üzeri, mastar yardımıyla testere hareketi yapılarak düzeltilmiştir. Sıyırma işleminden sonra kalıp kenarları temizlenmiş, kalıbın üzeri 6 mm kalınlığındaki cam plaka ile kapatılmıştır. Kür kabiniinde 24 saat bekletilen numuneler, kalıplarından çıkartılmıştır. Suya dayanıklı asetatlı kalem ile karışım dizaynlarına göre kodlanan numuneler, deney gününe kadar bekletilmek üzere kürlenecekleri su dolu havuza yerleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Karışımın kalıplara yerleştirilmesi

3.4. Kürleme

Deneye tabi tutulacak tüm numuneler, 20 ± 1 °C’ deki su dolu kür havuzuna aralarında en az 5 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Suyun prizmatik numunelerin tüm yüzeyine teması için, bütün numuneler imtina ile ızgara üzerine yerleştirilmiştir. Numunelerin üzerindeki su derinliği belirli aralıklarla kontrol edilmiş olup, minimum değeri de dikkate alınarak gerekli su derinliği kürleme boyunca sağlanmıştır. Numuneler 7 gün, 14 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 gün olacak şekilde beş değişik zaman diliminde kürleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.7). Kürleme süresini tamamlayan numuneler, TS EN 196-1’de [41] belirtilen limitler içerisinde havuzdan çıkartılarak testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Numunelerin etiketlenmesi ve kurlenmesi

3.5. Deneyler

Kür süresini tamamlayan numunelere sırasıyla kıvam (yayılma), eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim ağırlık ve su emme, kılcallık, kuruma rötresi, ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) ve enerji yutma kapasitesi (tokluk) deneyleri uygulanmıştır. Kuruma rötresi deneyi için her bir karışım için üçer adet olmak üzere 25 mm x 25 mm x 285 mm boyutlarındaki kalıplar kullanılarak toplam 18 adet prizmatik numune üretilmiştir. Diğer deneyler için 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki kalıplar kullanılarak toplamda 126 adet prizmatik numune üretilmiştir.

3.5.1. Kıvam (Yayılma)

Karıştırma kabında karma işlemi yapıldıktan sonra oluşan taze harç, ilk olarak kıvam deneyine tabi tutulmuştur. Deney gerçekleştirilirken ASTM C230 [42] standardı referans alınmıştır. İlgili standart çerçevesinde konik kalıp yardımıyla tablaya yerleştirilen taze harca, 15 saniyede 25 düşüş yapacak şekilde titreşim uygulanmıştır. 15 saniye sonundaki yayılma miktarı, farklı noktalardan ölçülüp ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Yayılma miktarının ölçümüne ait resim Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Yayılma miktarının ölçülmesi

3.5.2. Eğilme dayanımı

40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki prizmatik numunelerin 7, 14, 28, 56 ve 90. günlerin sonunda kür havuzundan çıkartılarak, TS EN 196-1 [41] standardına göre 50+10 N/s hızında eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karışıma ait üçer numune eğilme dayanımının belirlenmesi için teste tabi tutulmuş olup, sonuçların ortalaması test sonucu olarak kaydedilmiştir. Üç nokta eğilme dayanımı deney düzeneği ve 100K0R setine ait deney sonrası görsel Şekil 3.9’da verilmektedir.



Şekil 3.9. Eğilme dayanımı test düzeneği ve 100K0R setine ait deney sonrası görsel

3.5.3. Basıncı dayanımı

Eğilme testi sonucunda ikiye ayrılan numunelerin (28 günlükler hariç) her bir parçasına basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Söz konusu test, TS EN 196-1 [41]

standardına uygun bir şekilde 40 mm x 40 mm boyutlarındaki iki plaka arasına yerleştirilen prizmatik parçalara 2400 + 200 N/s deney hızı ile gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deney düzeneği ve 40K60R setine ait deney sonrası görsel Şekil 3.10’da verilmektedir.



Şekil 3.10. Basınç dayanımı test düzeneği ve 40K60R setine ait deney sonrası görsel

3.5.4. Birim ağırlık ve su emme

Altı farklı karışımdan 28 günlük olup eğilme testine tabi tutulan numunelerin bir parçası basınç dayanımı testlerinde kullanılırken, diğer parçası birim ağırlık ve su emme deneylerinde kullanılmıştır. Deney kapsamında ASTM C 642 [43] prosedürü referans alınmış olup, RAP içeriğindeki bitümün yumuşama ya da erime hassasiyeti nedeniyle kaynatma (boiling) prosesi uygulanamamıştır. Deney kapsamında numunelerin ilk ağırlık okumaları yapıldıktan sonra, bütün numuneler kür havuzunda 48 saat süre ile bekletilmiştir. Havuzdan çıkartılan numunelerin yüzeyindeki serbest sular kuru bir havlu yardımıyla alındıktan sonra, numunelerin doymuş kuru yüzey (DKY) ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra bütün numuneler su dolu kap içerisine tel sepet yardımı ile daldırılmış ve Arşimet ilkesi çerçevesinde ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Su içerisindeki ağırlıkları belirlenen numuneler, sabit kütle ölçümü için laboratuvar ortamında (doğal ısı kaybı yöntemi ile) 75 gün boyunca kurutulmuştur. Her karışım için üçer numune teste tabi tutulmuş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Deney yapım sürecine ait görseller Şekil 3.11’de görülmektedir.



Şekil 3.11. Birim ağırlık ve su emme deneyine ait görseller

3.5.5. Kılcallık

Kılcallık, numunenin suyla temasından itibaren suyun numune içerisindeki boşluklarda zamanlarda ilerlemesi olayıdır. Prizma içerisindeki boşluk oranı ile suyun yayılması arasında büyük ölçüde doğru orantı bulunmaktadır.

Birim ağırlık ve su emme deneyine tabi tutulan numuneler, sabit kütleye kadar kurutulduktan ve ağırlıkları hassas terazi yardımıyla belirlendikten sonra BS EN 1015-18 [44] standardı çerçevesinde kılcallık deneyinde kullanılmıştır. Söz konusu standardın minimum 20 mm su derinliği şartını sağlayacak şekilde bir tepsiye su doldurulmuştur (yaklaşık 25-30 mm). Numunelerin kırık yüzeyleri suyla temas edecek ve birbirlerine teması olmayacak şekilde tepsiye yerleştirilmiştir. Buharlaşmayı azaltmak amacı ile tepsinin üzeri kapatılmıştır. Numuneler 10. dakika, 90. dakika ve 1440. dakikada (24. saatte) tepsiden çıkartılıp, yüzeyleri nemli bir bez ile kurulanmıştır. Her süre sonunda numuneler hassas terazi yardımıyla tartıldıktan sonra tepsiye konmuş ve üzerleri kapatılmıştır. Deneye ait görsel Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Kılcallık deneyi

3.5.6. Kuruma rötresi

Kuruma rötresi deneyi kapsamında 25 mm x 25 mm x 285 mm boyutlarında, iki ucunda pim teşkil edilebilen kalıplar kullanılmıştır. Pimler 25 mm x 25mm ölçülerinde ve 2 mm kalınlığında plakalar ile kalıplara monte edilmiştir. Harç, iki aşamada kalıplara yerleştirildikten sonra, kalıplar 24 saat boyunca kür dolabında muhafaza edilmiştir. Akabinde kalıplarından çıkarılan numuneler, 28 gün boyunca 23±2 °C su dolu havuzda kürlenmiştir. Kür periyodu biten numuneler, havuzdan çıkartılıp yüzeyleri bir havlu ile kurulandıktan sonra, komparatör yardımıyla ilk ölçümleri yapılmıştır. İlk ölçümlerin akabinde laboratuvar ortamında bekletilen numuneler ASTM C157 [45] standardı kapsamında sırası ile 4, 7, 28, 56, 90 ve 112. günlerde komparatör okumasına tabi tutulmuştur. RAP oranına göre altı guruba ayrılan karışımlar için üçer tane numune üretilmiş olup, numuneler karışım oranlarına göre kodlanmıştır. Yapılan ölçümlerin hassasiyeti açısından söz konusu kodlar baz alınarak numuneler her seferinde aynı şekilde komparatöre yerleştirilmiştir. Numunelerin boy değişimi Denklem (3.1) yardımıyla elde edilmiştir. Deneye ait görseller Şekil 3.13'te verilmiştir.

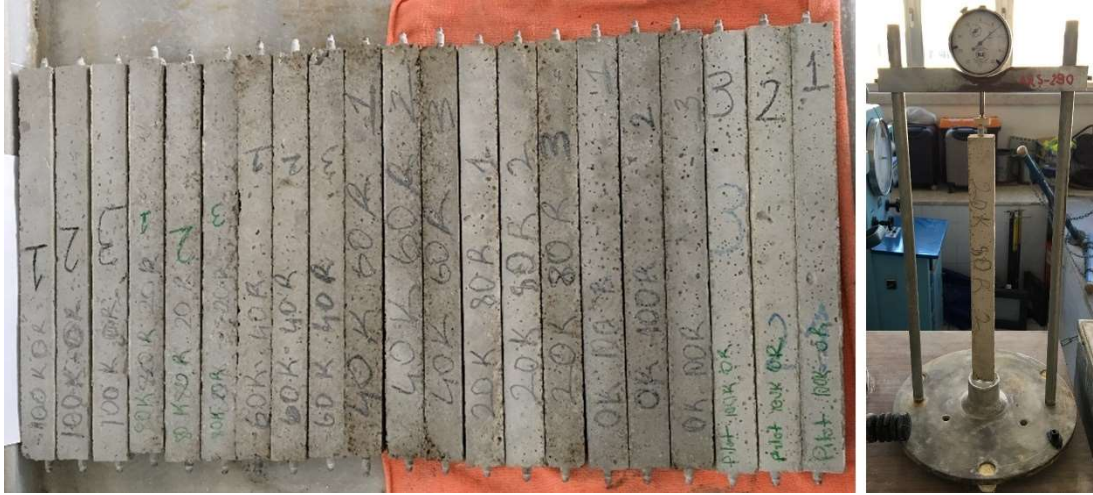
$$L_c = \frac{[L_2 - L_1]}{G} * 100 \quad (3.1)$$

L_c = Boy değişimi (%) (n. günde ki)

L_1 = Komparatör okuması (0. günde ki)

L_2 = Komparatör okuması (n. günde ki)

G = Numune boyu (285 mm)



Şekil 3.13. Kuruma rötresinin tayininde kullanılan numuneler ve test düzeneği

3.5.7. Ultrasonik ses dalgası hızı (UPV)

UPV, beton kalitesini kısa sürede ve düşük maliyet ile belirlemek için tercih edilen en yaygın testlerden biridir. Numuneye zarar verilmeden testlerin yapılabilmesi bu yöntemi ön plana çıkaran mühim unsurlardan birisidir. Söz konusu deney ekipmanının çalışma prensibindeki en önemli rolü dönüştürücüler üstlenmektedir. Transformatörler mekanik ile elektrik enerjisinin birbirine dönüşümünü sağlamaktadır. Piezoelektrik kristal ile numuneye gönderilen uyarıya malzemenin verdiği direnç baz alınarak gerekli doneler elde edilmekte ve bilgisayar sistemleri sayesinde bu veriler istenen parametrelere dönüştürülebilmektedir [46].

UPV testi gerçekleştirilirken, ASTM C597 [47] standardına uygun şekilde, boyuna doğrultuda numunenin üç farklı noktasından okuma yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır (Şekil 3.14). Dalga geçiş süresi (T) cihaz yardımıyla tespit edilirken, numune boyu (L) mm hassasiyetinde tekrar ölçülerek kaydedilmiştir. Elde edilen değerler Denklem (3.2)'de yerine koyularak UPV değerleri hesaplanmıştır.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.2)$$

V: Ultrasonik ses dalgası hızı (km/s)

L: Numune boyu (mm)

T: Dalga geçiş süresi (µs)

Ultrasonik ses dalgası hızı belirlendikten sonra, numunelere ilişkin Dinamik Elastisite Modülü Denklem (3.3)'e göre hesaplanmıştır.

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (3.3)$$

E_d : Dinamik Elastisite Modülü (Pa)

μ : Poisson oranı (0,2 alınmıştır)

ρ : Birim hacim ağırlık (kg/m^3)

V : Ultrasonik ses dalgası hızı (m/s)



Şekil 3.14. UPV testi

3.5.8. Enerji yutma kapasitesi (Tokluk)

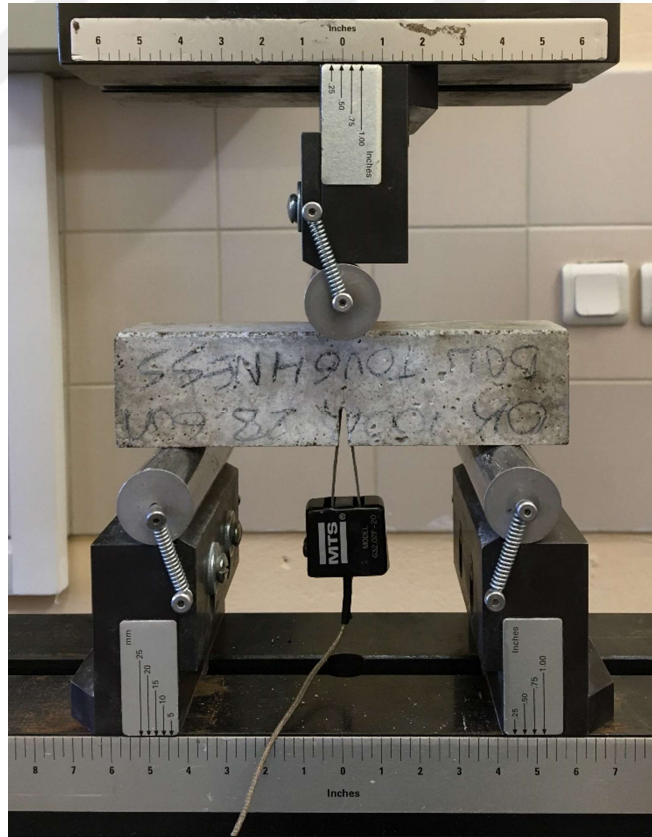
Enerji yutma kapasitesinin belirlenmesi kapsamında yürütülen deneylerde her bir karışım için dörder adet 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında numune TS EN 196-1 [41] standardına uygun bir şekilde üretilmiştir. Karışım oranlarına göre kodlanan numuneler, 28 gün boyunca su dolu havuzda kürlenmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Enerji yutma kapasitesinin belirlenmesi için hazırlanan numuneler

28 gün sonra kür havuzundan çıkarılan numuneler, Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda teste tabi tutulmak üzere hazırlanmıştır. Numunelerin dış ortamla etkileşimini minimize etmek amacıyla bütün numuneler paketlenmiştir. Paketlenen numunelerin taşıma esnasında deforme olmaması için gerekli önlemler alınmıştır.

Enerji yutma deneyi için ilk olarak numunelerin 160 mm'lik pürüzsüz yüzeyinin orta noktası işaretlenmiştir. Disk testere yardımıyla, bu doğrultuya dik olacak şekilde 12 mm derinliğinde bir çentik açılmıştır. Açılan çentiğin sağına ve soluna, çatlak ağzı ölçerin tırnaklarının oturması için küçük plakalar yapıştırılmıştır. Maksimum 100 kN yükleme kapasitesine sahip MTS Test Cihazı (Landmark Servo Hydraulic Test System) kullanılarak enerji yutma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında çatlak ağzı açılma hızı 0,03 mm/dk, testin data toplama hızı ise 10 Hz'dir. 12 cm mesnet açıklığı bulunan deney düzeneğine prizmatik numune yerleştirildikten sonra, çatlak ağzı açılmasını ölçen klipsli cihaz (Clip-On Displacement Gage) çentik kenarındaki plakalar arasına yerleştirilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Enerji yutma deneyi test düzeneği

Data logger yardımıyla; çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD), eksenel yük (axial force), eksenel deplasman (axial displacement) ve zaman (time) gibi parametreler elde edilmiştir. JCI S001 2003 [48] standardına göre yapılan deneyler sonucunda enerji yutma kapasite parametreleri her bir karışım için elde edilmiş ve kırılma enerjisinin hesaplanmasında Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'den faydalanılmıştır.

$$G_F = \frac{0,75 * W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (3.4)$$

$$W_1 = 0,75 * \left(\frac{S}{L} * m_1 + 2m_2 \right) * g * CMOD_C \quad (3.5)$$

Burada;

G_F : Kırılma enerjisi (N/mm)

W_0 : Eksenel Yük-CMOD grafiğinde eğrinin altında kalan alan (N.mm)

W_1 : Numune ağırlığı ve yükleme plakasının yaptığı iş (N.mm)

A_{lig} : Kesit alanı (mm²)

m_1 : Numunenin ağırlığı (kg)

S : Mesnet açıklığı (mm)

L : Numunenin toplam uzunluğu (mm)

m_2 : Test cihazına bağlı olmayan ama göçme anına kadar numune üzerinde bulunan plakanın ağırlığı (kg)

g : Yerçekimi ivmesi (9,807 m/s²)

$CMOD_C$: Maksimum yükteki çatlak ağzı deplasmanı (mm)

Numunede çentik etrafına yayılan çatlak gelişimi ve OK100R setine ait deney sonrası görseller sırasıyla Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Numunede çatlak gelişimi ve kırılmadan sonraki en kesit görüntüsü



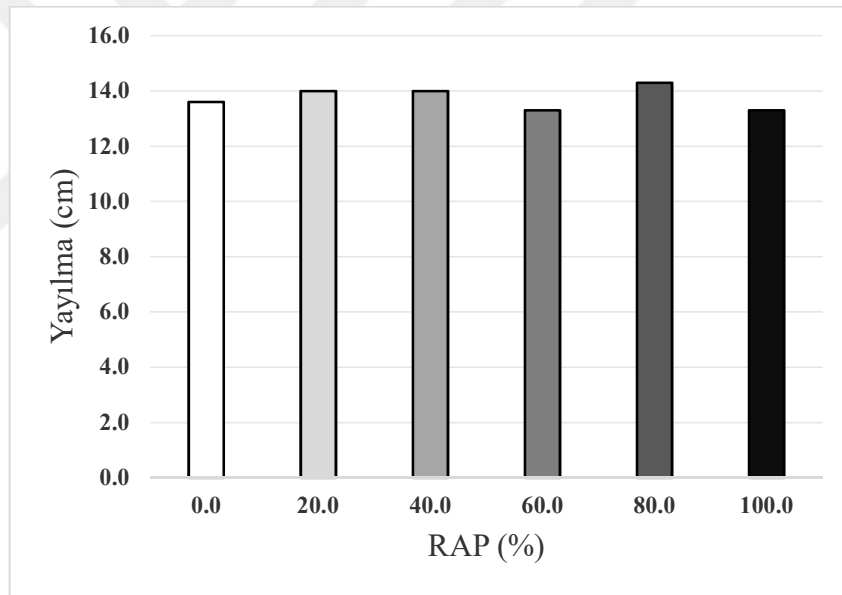
Şekil 3.18. OK100R numune setine ait deney sonrası görseller

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney sonuçlarından elde edilen bulgular bu bölümde değerlendirilmiştir.

4.1. Kıvam (Yayılma)

Üretilen numunelerin işlenebilirlik özellikleri ASTM C230 [42] standardı kapsamında sarsma tablası ile belirlenmiş olup Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara istinaden, sabit s/ç oranında karışımlarda ciddi bir kıvam kaybının gerçekleşmediği söylenebilir. %0 ince RAP içeren harcın yayılma çapı 13,6 cm iken %20, %40, %60 ve %100 RAP içeren harcın yayılma çapları maksimum %7,0 değişim aralığında sırasıyla 14,0 cm, 14,0 cm, 13,3 cm, 14,3 cm ve 13,3 cm olacak şekilde tespit edilmiştir. Yıldırım, RAP kullanılmayan taze harca yaptığı kıvam deneyinde yayılma çapını ortalama 15-16 cm aralığında tespit etmiştir [49].



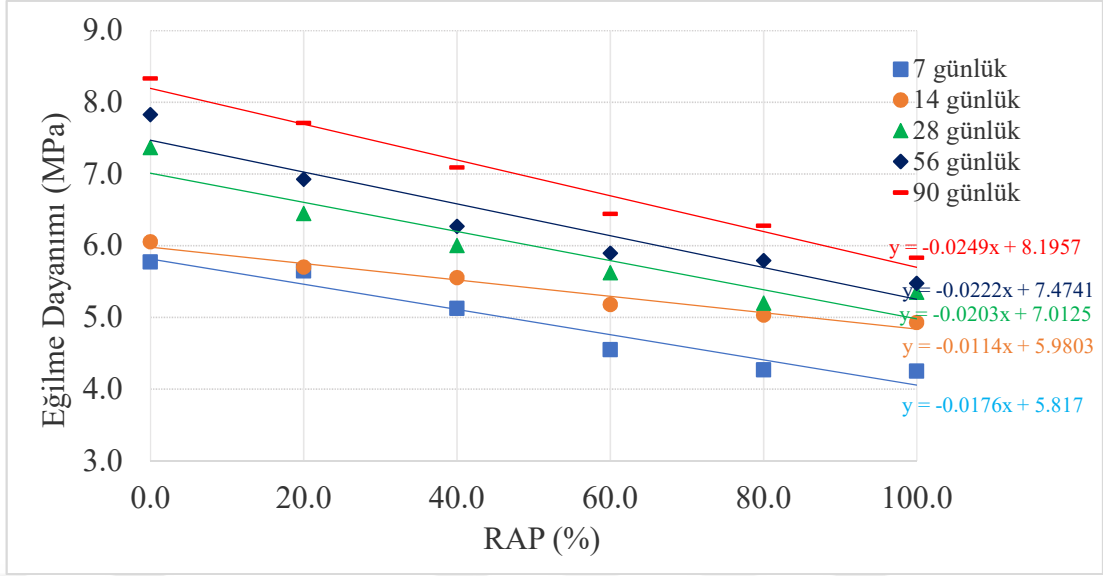
Şekil 4.1. Yayılma çapının numunelerdeki dağılımı

4.2. Eğilme Dayanımı

6 farklı orana sahip olarak üretilen ve her bir karışım için 3 adet olan numuneler 7, 14, 28, 56 ve 90 gün müddetince 20 ± 2 °C’de su dolu havuzda kürlenme işlemine maruz bırakılmıştır. Kürlenme sürecini tamamlayan numunelerin üç nokta altındaki eğilme dayanımı TS EN 196-1 [41] standardına göre tespit edilmiştir. Eğilme dayanımına ait neticeler Tablo 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Eğilme dayanımı sonuçları

Numune Kodu	Numune No	7. gün (MPa)	14. gün (MPa)	28. gün (MPa)	56. gün (MPa)	90. gün (MPa)
100K0R	1	5,40	5,90	7,29	7,95	8,88
	2	6,15	5,87	7,40	8,00	8,14
	3	5,77	6,39	7,41	7,53	7,98
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,38</i>	<i>0,29</i>	<i>0,07</i>	<i>0,26</i>	<i>0,48</i>
Ortalama (MPa)		5,8	6,1	7,4	7,8	8,3
<i>COV (%)</i>		<i>6,50</i>	<i>4,82</i>	<i>0,90</i>	<i>3,30</i>	<i>5,76</i>
80K20R	1	5,38	6,05	6,51	6,51	7,33
	2	5,74	5,61	5,99	7,30	8,03
	3	5,83	5,45	6,84	6,97	7,78
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,24</i>	<i>0,31</i>	<i>0,43</i>	<i>0,40</i>	<i>0,35</i>
Ortalama (MPa)		5,7	5,7	6,4	6,9	7,7
<i>COV (%)</i>		<i>4,21</i>	<i>5,45</i>	<i>6,65</i>	<i>5,73</i>	<i>4,60</i>
60K40R	1	5,30	5,80	5,96	5,80	7,58
	2	4,92	5,25	5,84	6,79	6,96
	3	5,16	5,61	6,21	6,22	6,73
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,19</i>	<i>0,28</i>	<i>0,19</i>	<i>0,50</i>	<i>0,44</i>
Ortalama (MPa)		5,1	5,6	6,0	6,3	7,1
<i>COV (%)</i>		<i>3,75</i>	<i>5,03</i>	<i>3,14</i>	<i>7,92</i>	<i>6,20</i>
40K60R	1	4,55	5,18	5,63	6,01	6,89
	2	4,49	5,07	5,83	5,71	6,20
	3	4,61	5,29	5,40	5,96	6,24
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,06</i>	<i>0,11</i>	<i>0,22</i>	<i>0,16</i>	<i>0,39</i>
Ortalama (MPa)		4,6	5,2	5,6	5,9	6,4
<i>COV (%)</i>		<i>1,32</i>	<i>2,12</i>	<i>3,83</i>	<i>2,73</i>	<i>6,01</i>
20K80R	1	4,35	5,24	5,22	5,73	6,42
	2	4,10	4,96	5,29	5,97	6,26
	3	4,36	4,9	5,09	5,68	6,16
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,15</i>	<i>0,18</i>	<i>0,10</i>	<i>0,16</i>	<i>0,13</i>
Ortalama (MPa)		4,3	5,0	5,2	5,8	6,3
<i>COV (%)</i>		<i>3,45</i>	<i>3,61</i>	<i>1,95</i>	<i>2,68</i>	<i>2,09</i>
0K100R	1	4,11	4,76	5,23	5,47	5,86
	2	4,32	5,13	5,46	5,38	5,67
	3	4,33	4,90	5,36	5,57	5,96
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,12</i>	<i>0,19</i>	<i>0,12</i>	<i>0,10</i>	<i>0,15</i>
Ortalama (MPa)		4,3	4,9	5,4	5,5	5,8
<i>COV (%)</i>		<i>2,92</i>	<i>3,79</i>	<i>2,16</i>	<i>1,74</i>	<i>2,53</i>



Şekil 4.2. Eğilme dayanımının numunelerdeki dağılımı

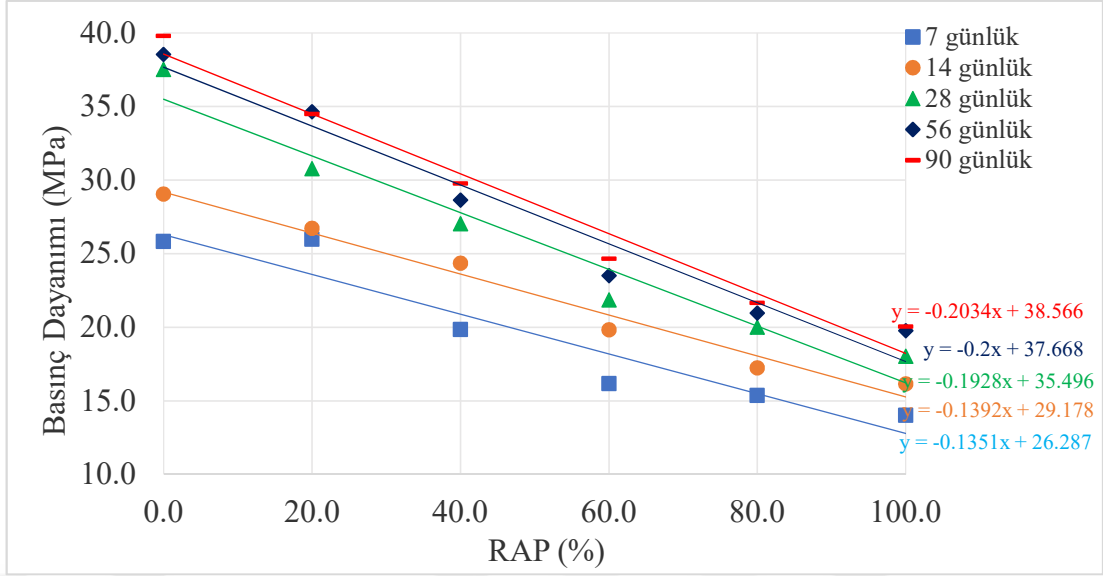
Tablo 4.1 ve Şekil 4.2'ye göre eğilme dayanımının kür süresi ile artış gösterdiği tespit edilmiştir. 7 ile 90 gün arasında dayanım artışı dağılımı %0-%100 aralığındaki RAP içeriğine göre benzer olup sırasıyla, %44, %37, %38, %42, %47 ve %37'dir. Dayanım gelişmesi her bir karışımın benzer eğilim gösterdiği Şekil 4.2 incelendiğinde, RAP malzemesinin oranı arttıkça eğilme dayanımının düştüğü gözlenmektedir. Örneğin 100K0R karışımının 7. günde kazandığı eğilme dayanımı değerine 0K100R karışımı 90. günde erişebilmiştir. Kumun RAP ile %100 oranında yer değiştiği karışımlarda (0K100R) eğilme dayanımı kaybı 28. günden sonraki periyotlarda %30 mertebelerindedir.

4.3. Basınç Dayanımı

Eğilme dayanımı testinin akabinde ikiye bölünen numunelere TS EN 196-1 [41] kriterlerine uyacak şekilde basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Her bir karışıma ait 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımı test sonuçları Tablo 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.2. Basınç dayanımı sonuçları

Numune Kodu	Numune No	7. gün (MPa)	14. gün (MPa)	28. gün (MPa)	56. gün (MPa)	90. gün (MPa)
100K0R	1	26,43	29,81	37,54	38,88	41,18
	2	25,89	28,51		38,93	39,84
	3	25,64	28,81	36,78	38,57	40,64
	4	27,67	28,87		37,22	38,71
	5	23,50	28,83	38,22	39,08	37,55
	6	25,81	29,45		38,48	40,81
	<i>St. Sapma</i>	<i>1,36</i>	<i>0,48</i>	<i>0,72</i>	<i>0,68</i>	<i>1,41</i>
Ortalama (MPa)		25,8	29,0	37,5	38,5	39,8
<i>COV (%)</i>		<i>5,26</i>	<i>1,66</i>	<i>1,92</i>	<i>1,76</i>	<i>3,53</i>
80K20R	1	26,38	30,03	29,94	34,80	31,94
	2	25,98	27,00		35,61	35,04
	3	25,12	28,50	30,31	34,53	33,57
	4	25,98	27,74		34,98	34,37
	5	26,10	27,77	32,02	33,47	36,14
	6	26,30	19,24		34,41	35,86
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,45</i>	<i>3,80</i>	<i>1,11</i>	<i>0,71</i>	<i>1,57</i>
Ortalama (MPa)		26,0	26,7	30,8	34,6	34,5
<i>COV (%)</i>		<i>1,74</i>	<i>14,23</i>	<i>3,61</i>	<i>2,05</i>	<i>4,54</i>
60K40R	1	19,65	24,66	26,30	29,35	30,67
	2	17,58	24,18		28,23	31,71
	3	20,19	23,72	27,58	28,27	29,65
	4	21,03	25,24		29,26	28,08
	5	21,15	23,76	27,19	29,18	28,80
	6	19,52	24,51		27,51	29,67
	<i>St. Sapma</i>	<i>1,30</i>	<i>0,58</i>	<i>0,66</i>	<i>0,74</i>	<i>1,30</i>
Ortalama (MPa)		19,9	24,3	27,0	28,6	29,8
<i>COV (%)</i>		<i>6,57</i>	<i>2,39</i>	<i>2,43</i>	<i>2,60</i>	<i>4,35</i>
40K60R	1	14,84	20,46	20,77	23,81	24,72
	2	16,50	18,93		23,37	24,77
	3	16,22	20,20	23,22	22,24	24,24
	4	16,44	18,77		23,32	24,83
	5	16,55	21,00	21,52	24,84	24,15
	6	16,40	19,51		23,45	25,18
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,66</i>	<i>0,89</i>	<i>1,26</i>	<i>0,84</i>	<i>0,39</i>
Ortalama (MPa)		16,2	19,8	21,8	23,5	24,6
<i>COV (%)</i>		<i>4,06</i>	<i>4,48</i>	<i>5,75</i>	<i>3,58</i>	<i>1,57</i>
20K80R	1	15,37	16,76	20,06	20,67	22,31
	2	15,55	16,27		21,14	22,43
	3	15,10	19,29	20,11	20,69	20,98
	4	15,10	16,17		20,63	21,84
	5	15,72	17,37	19,80	21,47	21,19
	6	15,34	17,58		21,07	21,16
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,25</i>	<i>1,15</i>	<i>0,17</i>	<i>0,34</i>	<i>0,63</i>
Ortalama (MPa)		15,4	17,2	20,0	20,9	21,7
<i>COV (%)</i>		<i>1,60</i>	<i>6,69</i>	<i>0,83</i>	<i>1,61</i>	<i>2,91</i>
0K100R	1	14,03	16,66	18,05	20,19	20,31
	2	14,50	16,78		19,24	20,87
	3	13,48	17,12	18,16	19,48	20,39
	4	13,84	15,29		19,69	18,15
	5	14,00	15,17	17,86	18,89	20,26
	6	14,26	15,85		21,10	20,24
	<i>St. Sapma</i>	<i>0,35</i>	<i>0,82</i>	<i>0,15</i>	<i>0,79</i>	<i>0,95</i>
Ortalama (MPa)		14,0	16,1	18,0	19,8	20,0
<i>COV (%)</i>		<i>2,50</i>	<i>5,10</i>	<i>0,84</i>	<i>3,98</i>	<i>4,76</i>



Şekil 4.3. Basınç dayanımının numunelerdeki dağılımı

Tablo 4.2 ve Şekil 4.3'e göre, tıpkı eğilme dayanımında olduğu gibi kür süresi ile basınç dayanımında artış gözlenmiştir. 7 ile 90 gün arasında dayanım artışı dağılımı %0-%100 aralığındaki RAP içeriğine göre benzer olup sırasıyla %54, %33, %50, %53, %41 ve %43'dir. Dayanım gelişmesi her bir karışımın benzer eğilim gösterdiği Şekil 4.3 incelendiğinde, RAP malzemesinin oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü gözlenmektedir. Kumun RAP ile %100 oranında yer değiştiği karışımlarda (OK100R) basınç dayanımı kaybı 28. günden sonraki periyotlarda %52 mertebelerindedir.

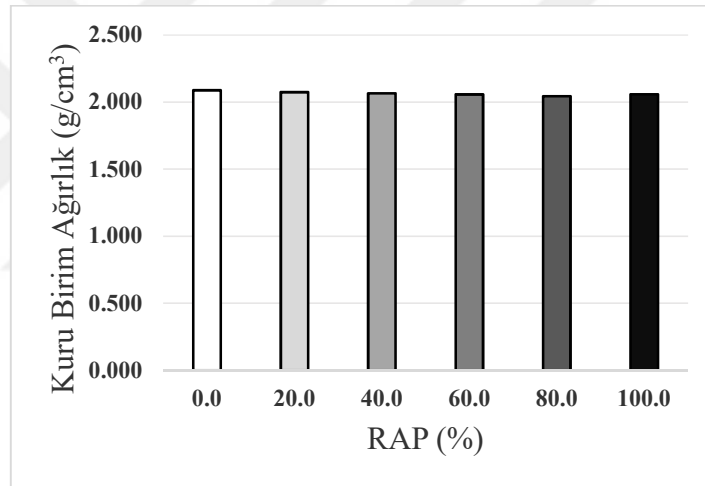
4.4. Birim Ağırlık ve Su Emme

ASTM C642 [43] standardı kapsamında yapılan deneyde kaynatma (boiling) prosedürü uygulanmadan numunelerin sabit kütle, kuru doymun yüzey ve tel sepet marifeti ile su içerisindeki kütle tartımları yapılmış olup deney sonuçları Tablo 4.3'te detaylandırılmıştır.

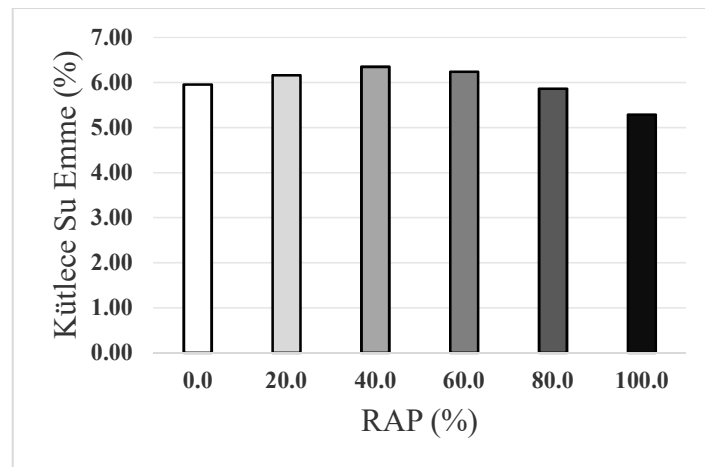
Tablo 4.3. Kuru birim ağırlık ve su emme sonuçları

Num. Kodu	Num. No	Kuru Ağırlık (g)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (g)	Su İçerisindeki Ağırlık (g)	Kütlece Su Emme (%)	Kuru Birim Ağırlık (g/cm ³)
		A	B	C	$100 \cdot (B-A) / A$	$A/(B-C)$
100K0R	1	287,8	305,1	167,6	6,01	2,093
	2	292,0	309,3	169,3	5,92	2,086
	3	264,9	280,6	153,5	5,93	2,084
St. Sapma					0,04	0,00
Ortalama					5,95	2,088
COV (%)					0,68	0,19
80K20R	1	281,6	298,9	163,3	6,14	2,077
	2	278,4	295,5	161,0	6,14	2,070
	3	272,6	289,5	158,1	6,20	2,075
St. Sapma					0,03	0,00
Ortalama					6,16	2,074
COV (%)					0,43	0,14
60K40R	1	283,3	301,2	164,6	6,32	2,074
	2	272,8	290,0	157,8	6,30	2,064
	3	288,2	306,7	166,6	6,42	2,057
St. Sapma					0,05	0,01
Ortalama					6,35	2,065
COV (%)					0,80	0,34
40K60R	1	292,2	310,4	168,9	6,23	2,065
	2	283,9	301,3	163,4	6,13	2,059
	3	281,5	299,4	161,8	6,36	2,046
St. Sapma					0,09	0,01
Ortalama					6,24	2,057
COV (%)					1,51	0,39
20K80R	1	257,4	272,8	146,9	5,98	2,044
	2	292,6	309,7	166,6	5,84	2,045
	3	276,5	292,4	156,9	5,75	2,041
St. Sapma					0,10	0,00
Ortalama					5,86	2,043
COV (%)					1,63	0,09
0K100R	1	273,2	287,6	154,6	5,27	2,054
	2	280,3	295,0	159,2	5,24	2,064
	3	297,8	313,7	168,9	5,34	2,057
St. Sapma					0,04	0,00
Ortalama					5,28	2,058
COV (%)					0,76	0,20

Birim ağırlık ve su emme kapasitesinin RAP içeriğine göre değişimi sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu grafiklere göre; RAP içermeyen karışımın kuru birim ağırlığı $2,088 \text{ g/cm}^3$ iken, RAP oranı arttıkça kuru birim ağırlığın az da olsa düştüğü tespit edilmiştir. %1,4 azalma ile bu değer %100 RAP içeren numunede $2,058 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. %0, %25, %50, %75 ve %100 RAP katkılı yapılan başka bir çalışmada da yoğunluğun $2,356$ ile $2,553 \text{ g/cm}^3$ aralığında RAP oranı arttıkça azaldığı bildirilmiştir [24]. Su emme kapasiteleri incelendiğinde ise, RAP içermeyen karışımın su emme değeri %5,95 iken, bu değer RAP oranı %20 olduğunda %3,5, %40 olduğunda ise %6,7 oranında arttığı tespit edilmiştir. %80 oranında RAP kullanımından sonra karışımlarda su emme kapasitesi düşme eğilimi göstermiştir. Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde, RAP oranı arttıkça su emme yüzdesinin ve dolayısı ile işlenebilirliğin arttığı belirtilmiştir [8, 50].



Şekil 4.4. Birim ağırlığın numunelerdeki dağılımı



Şekil 4.5. Su emmenin numunelerdeki dağılımı

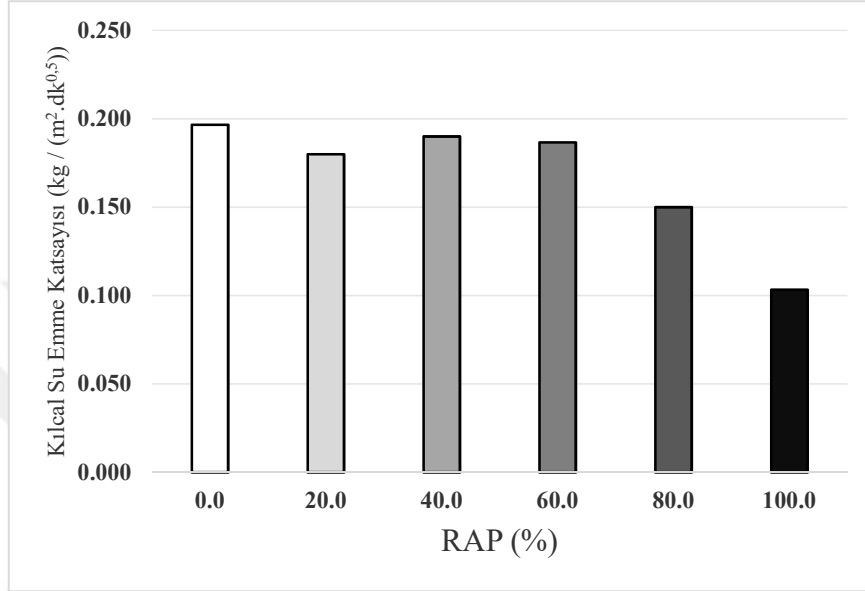
4.5. Kılcallık

Sabit kütle değerine ulaşan numuneler BS EN 1015-18 [44] standardı kapsamında kılcallık testine tabi tutulmuştur. Su ile temas anından itibaren 10, 90 ve 1440 (24 saat) dakika sonra hassas terazi marifeti ile elde edilen ağırlık değerleri kaydedilmiştir. Ağırlık ölçümlerine ait kapsamlı veriler ve hesaplanan kılcal su emme katsayıları Tablo 4.4'te verilmiştir.

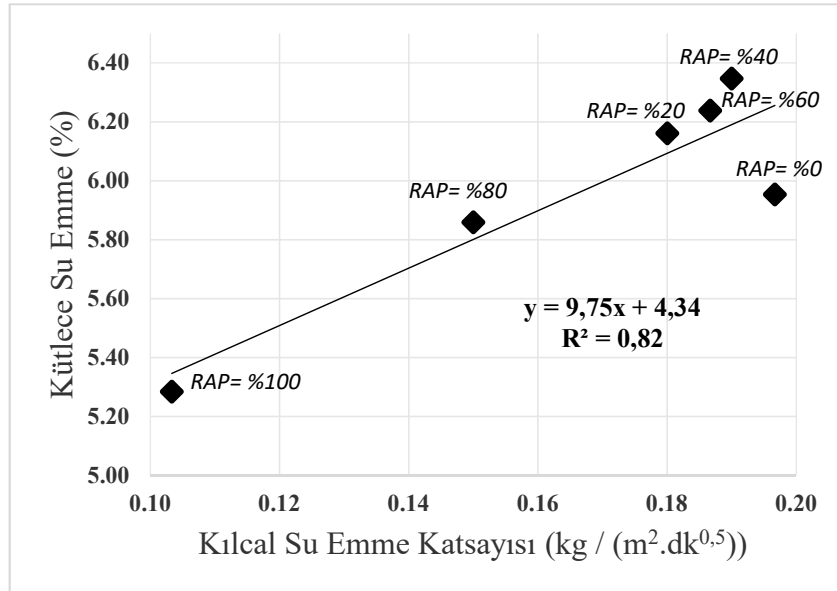
Tablo 4.4. Kılcallık deneyi hesaplama tablosu

Numune Kodu	Numune No	Kuru Tartım (g)	10 Dakika Sonra Yapılan Tartım (g) (M10)	90 Dakika Sonra Yapılan Tartım (g) (M90)	24 Saat Sonra Yapılan Tartım (g)	Kılcal Su Emme Katsayısı = $0,1 \cdot (M90 - M10) \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{dk}^{0,5})$
100K0R	1	287,8	289,4	291,4	297,0	0,197
	2	292,0	293,6	295,5	300,6	
	3	264,9	266,5	268,5	273,4	
	<i>St. Sapma</i>	<i>11,9</i>	<i>11,9</i>	<i>11,9</i>	<i>12,1</i>	
	Ortalama	281,6	283,2	285,1	290,3	
	<i>COV (%)</i>	<i>4,2</i>	<i>4,2</i>	<i>4,2</i>	<i>4,2</i>	
80K20R	1	281,6	283,0	284,7	290,0	0,180
	2	278,4	279,8	281,6	287,1	
	3	272,6	274,0	275,9	281,4	
	<i>St. Sapma</i>	<i>3,7</i>	<i>3,7</i>	<i>3,6</i>	<i>3,6</i>	
	Ortalama	277,5	278,9	280,7	286,2	
	<i>COV (%)</i>	<i>1,3</i>	<i>1,3</i>	<i>1,3</i>	<i>1,2</i>	
60K40R	1	283,3	284,7	286,6	291,6	0,190
	2	272,8	274,3	276,2	280,8	
	3	288,2	289,7	291,6	296,4	
	<i>St. Sapma</i>	<i>6,4</i>	<i>6,4</i>	<i>6,4</i>	<i>6,5</i>	
	Ortalama	281,4	282,9	284,8	289,6	
	<i>COV (%)</i>	<i>2,3</i>	<i>2,3</i>	<i>2,3</i>	<i>2,3</i>	
40K60R	1	292,2	293,5	295,4	300,4	0,187
	2	283,9	285,2	286,9	291,7	
	3	281,5	282,9	284,9	290,0	
	<i>St. Sapma</i>	<i>4,6</i>	<i>4,6</i>	<i>4,6</i>	<i>4,6</i>	
	Ortalama	285,9	287,2	289,1	294,0	
	<i>COV (%)</i>	<i>1,6</i>	<i>1,6</i>	<i>1,6</i>	<i>1,5</i>	
20K80R	1	257,4	258,6	260,2	264,1	0,150
	2	292,6	293,9	295,4	299,2	
	3	276,5	277,9	279,3	282,6	
	<i>St. Sapma</i>	<i>14,4</i>	<i>14,4</i>	<i>14,4</i>	<i>14,3</i>	
	Ortalama	275,5	276,8	278,3	282,0	
	<i>COV (%)</i>	<i>5,2</i>	<i>5,2</i>	<i>5,2</i>	<i>5,1</i>	
0K100R	1	273,2	274,0	275,0	277,8	0,103
	2	280,3	281,2	282,2	284,8	
	3	297,8	298,8	299,9	303,0	
	<i>St. Sapma</i>	<i>10,3</i>	<i>10,4</i>	<i>10,5</i>	<i>10,6</i>	
	Ortalama	283,8	284,7	285,7	288,5	
	<i>COV (%)</i>	<i>3,6</i>	<i>3,7</i>	<i>3,7</i>	<i>3,7</i>	

BS EN 1015-18 [44] standardında belirtilen hesaplama yöntemi ile elde edilen kılcal su emme katsayıları incelendiğinde, bir önceki bölümde hesaplanan kütlece su emme kapasiteleri ile benzerlikler olduğu tespit edilmiştir; %80 RAP içeriğine kadar kılcallık katsayıları benzerdir ve kütlece su emme yüzdesi ile kılcallık katsayısı arasında yüksek bir ilişki ($R^2=0,82$) bulunmuştur (Şekil 4.6, Şekil 4.7).



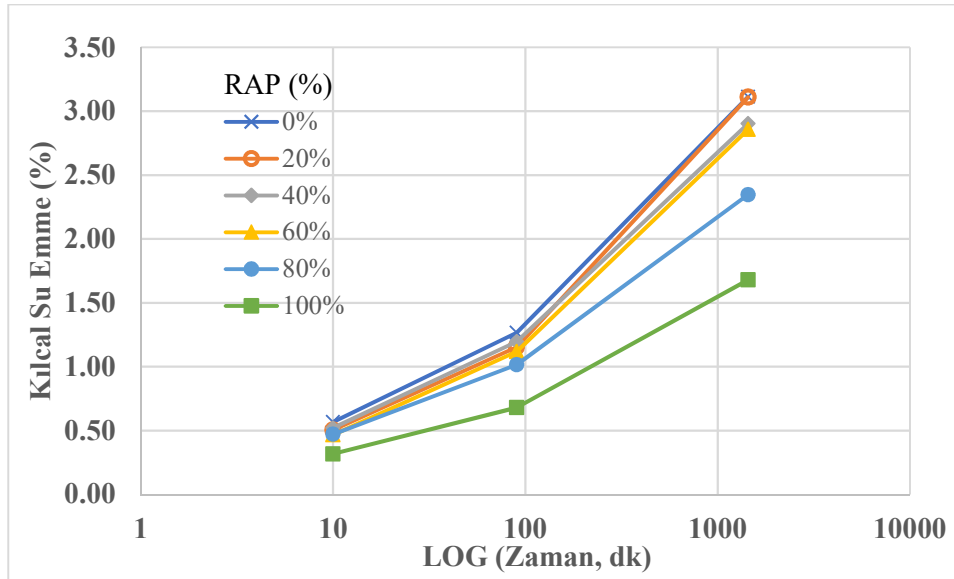
Şekil 4.6. Kılcal su emme katsayısının numunelerdeki dağılımı



Şekil 4.7. Kılcal su emme katsayısı ile kütlece su emme yüzdesi arasındaki ilişki

Numunelerde kılcal su emme yüzdesinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.8’de verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde, %80 RAP içeriğine kadarki bütün

numunelere ait zamana bağılı kılcal su emme eğilimlerinin, RAP içermeyen numunenin kılcal su emme eğilimi ile benzer olduğu gözlenmiştir.



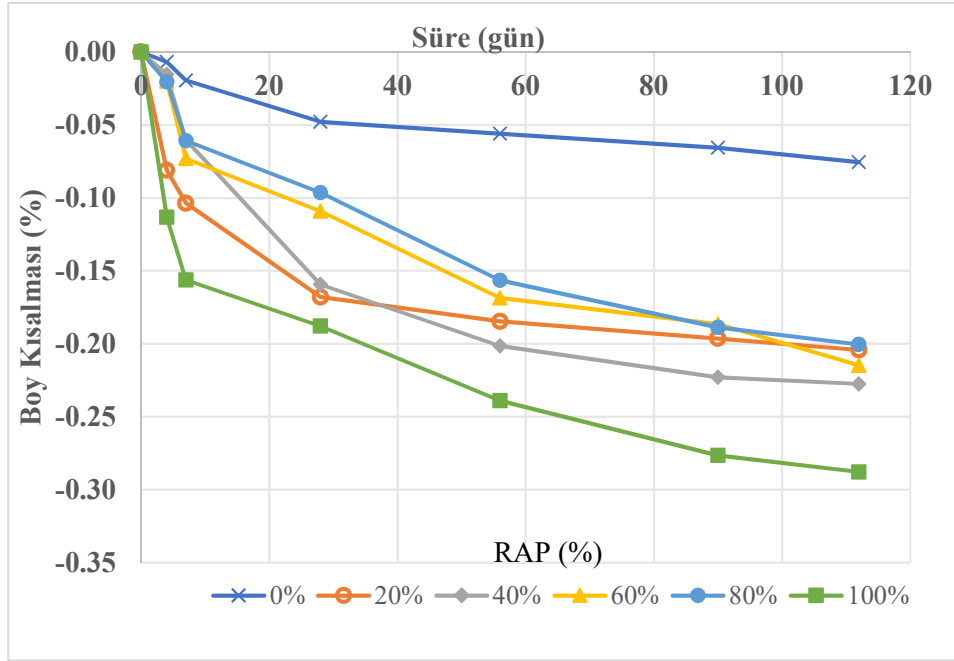
Şekil 4.8. Kılcal su emme yüzdesinin numunelerdeki dağılımı

4.6. Kuruma Rötresi

28 günlük kür süreci bittikten sonra laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin ASTM C157 [45] standardı kapsamında belirli periyotlarda boy ölçümleri yapılmış ve Tablo 4.5'te görüldüğü gibi kuruma rötresi (boy kısalması) değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.9'daki kuruma rötresi eğilimi grafiğinden de görüleceği üzere, kuruma rötresi gelişimi genellikle RAP oranı arttıkça artma eğilimindedir. RAP içermeyen 100K0R numunelerinde kuruma rötresi 112. gün sonunda %0,075 iken, %100 RAP içeren 0K100R numunelerinde yaklaşık 4 kat artışla %0,288 mertebesinde kaydedilmiştir. RAP içeriği numunelerde %0,200-0,288 aralığında kuruma rötresine neden olmuştur.

Tablo 4.5. Numunelerin zamana bağlı boy değişimi

Kodu	Numune No	1. Okuma (İlk Gün)	2. Okuma (4. Gün)	3. Okuma (7. Gün)	4. Okuma (28. Gün)	5. Okuma (56. Gün)	6. Okuma (90. Gün)	7. Okuma (112. Gün)
100K0R	1	410,2	405,5	402,3	394,6	392,5	388,4	385,8
	2	313,0	312,5	309,0	300,3	298,1	295,5	291,1
	3	209,5	208,8	204,6	196,9	194,2	192,6	191,2
	<i>St. Sapma</i>	<i>81,9</i>	<i>80,3</i>	<i>80,8</i>	<i>80,7</i>	<i>81,0</i>	<i>80,0</i>	<i>79,5</i>
	Ortalama	310,9	308,9	305,3	297,3	294,9	292,2	289,4
	<i>COV (%)</i>	<i>26,4</i>	<i>26,0</i>	<i>26,5</i>	<i>27,2</i>	<i>27,5</i>	<i>27,4</i>	<i>27,5</i>
	<i>BOY KISALMASI (%)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,007</i>	<i>0,020</i>	<i>0,048</i>	<i>0,056</i>	<i>0,066</i>	<i>0,075</i>
80K20R	1	335,5	331,1	326,2	310,8	306,9	300,6	299,4
	2	238,0	232,6	220,3	200,2	194,1	192,5	190,7
	3	402,0	342,4	340,4	320,9	316,6	314,5	310,8
	<i>St. Sapma</i>	<i>67,4</i>	<i>49,3</i>	<i>53,6</i>	<i>54,7</i>	<i>55,6</i>	<i>54,5</i>	<i>54,1</i>
	Ortalama	325,2	302,0	295,6	277,3	272,5	269,2	267,0
	<i>COV (%)</i>	<i>20,7</i>	<i>16,3</i>	<i>18,1</i>	<i>19,7</i>	<i>20,4</i>	<i>20,3</i>	<i>20,3</i>
	<i>BOY KISALMASI (%)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,081</i>	<i>0,104</i>	<i>0,168</i>	<i>0,185</i>	<i>0,196</i>	<i>0,204</i>
60K40R	1	530,6	525,7	512,8	502,4	491,4	488,5	487,2
	2	523,9	519,8	507,0	495,2	482,4	476,2	475,1
	3	407,5	403,4	390,6	328,2	316,0	306,6	305,2
	<i>St. Sapma</i>	<i>56,5</i>	<i>56,3</i>	<i>56,3</i>	<i>80,5</i>	<i>80,6</i>	<i>83,0</i>	<i>83,1</i>
	Ortalama	487,3	483,0	470,1	441,9	429,9	423,8	422,5
	<i>COV (%)</i>	<i>11,6</i>	<i>11,7</i>	<i>12,0</i>	<i>18,2</i>	<i>18,8</i>	<i>19,6</i>	<i>19,7</i>
	<i>BOY KISALMASI (%)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,015</i>	<i>0,060</i>	<i>0,159</i>	<i>0,201</i>	<i>0,223</i>	<i>0,227</i>
40K60R	1	517,3	511,3	490,0	482,9	470,2	462,6	456,6
	2	440,4	436,5	425,8	407,3	392,9	390,2	385,1
	3	511,6	504,3	490,9	485,9	462,1	457,0	443,9
	<i>St. Sapma</i>	<i>35,0</i>	<i>33,7</i>	<i>30,5</i>	<i>36,4</i>	<i>34,7</i>	<i>32,9</i>	<i>31,1</i>
	Ortalama	489,8	484,0	468,9	458,7	441,7	436,6	428,5
	<i>COV (%)</i>	<i>7,1</i>	<i>7,0</i>	<i>6,5</i>	<i>7,9</i>	<i>7,9</i>	<i>7,5</i>	<i>7,3</i>
	<i>BOY KISALMASI (%)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,020</i>	<i>0,073</i>	<i>0,109</i>	<i>0,169</i>	<i>0,187</i>	<i>0,215</i>
20K80R	1	145,0	139,5	126,7	117,4	101,3	93,0	90,2
	2	409,9	404,4	392,0	381,2	365,1	357,1	355,4
	3	322,7	316,2	306,9	296,6	277,4	266,1	260,6
	<i>St. Sapma</i>	<i>110,2</i>	<i>110,1</i>	<i>110,6</i>	<i>110,0</i>	<i>109,7</i>	<i>109,5</i>	<i>109,7</i>
	Ortalama	292,5	286,7	275,2	265,1	247,9	238,7	235,4
	<i>COV (%)</i>	<i>37,7</i>	<i>38,4</i>	<i>40,2</i>	<i>41,5</i>	<i>44,2</i>	<i>45,9</i>	<i>46,6</i>
	<i>BOY KISALMASI (%)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,020</i>	<i>0,061</i>	<i>0,096</i>	<i>0,156</i>	<i>0,189</i>	<i>0,200</i>
0K100R	1	348,4	347,6	334,6	324,8	313,5	306,4	304,3
	2	301,4	253,4	241,3	232,6	216,1	206,9	203,4
	3	600,6	552,5	540,9	532,4	516,4	500,6	496,6
	<i>St. Sapma</i>	<i>131,4</i>	<i>124,9</i>	<i>125,2</i>	<i>125,4</i>	<i>125,1</i>	<i>122,0</i>	<i>121,6</i>
	Ortalama	416,8	384,5	372,3	363,3	348,7	338,0	334,8
	<i>COV (%)</i>	<i>31,5</i>	<i>32,5</i>	<i>33,6</i>	<i>34,5</i>	<i>35,9</i>	<i>36,1</i>	<i>36,3</i>
	<i>BOY KISALMASI (%)</i>	<i>0,000</i>	<i>0,113</i>	<i>0,156</i>	<i>0,188</i>	<i>0,239</i>	<i>0,277</i>	<i>0,288</i>



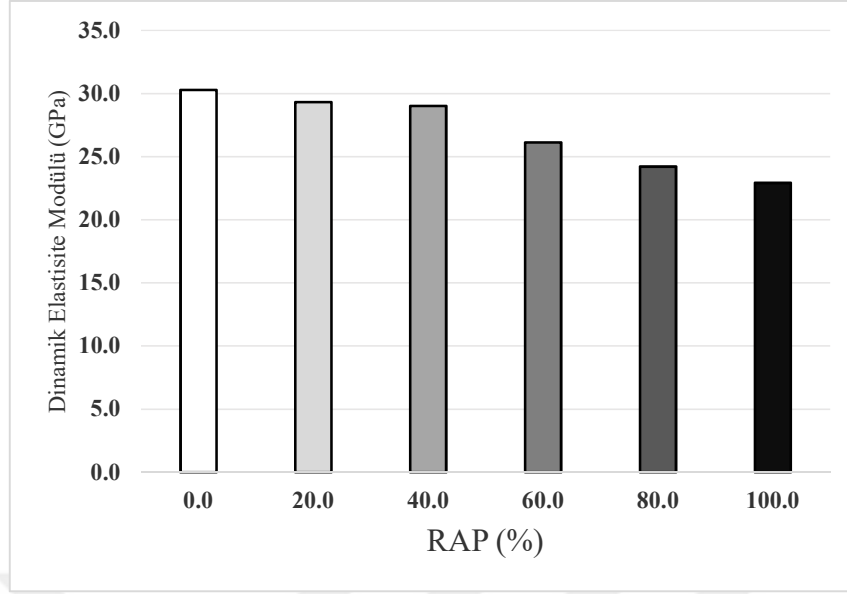
Şekil 4.9. Numunelerde zamana bağlı kuruma rötresi gelişimi

4.7. Ultrasonik Ses Dalgası Hızı (UPV)

ASTM C597 [47] standardı kapsamında numunelerde üç farklı noktadan ultrasonik ses dalgası hızı okumaları yapılarak, UPV test parametreleri hesaplanmıştır (Tablo 4.6). Denklem (3.3) yardımıyla elde edilen Dinamik Elastisite Modülü değerleri Tablo 4.6 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.6. UPV test sonuçları

Numune Kodu	Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Poisson Oranı	T: Dalga geçiş süresi (µs)	UPV: Ultrasonik Ses Dalgası Hızı Ortalaması (m/s)	E _d : Dinamik Elastisite Modülü (GPa)
100K0R	579,5	256,0	2263,7	0,2	41,5	3855,4	30,3
80K20R	581,0	256,0	2269,5	0,2	42,2	3788,5	29,3
60K40R	596,0	256,0	2328,1	0,2	43,0	3720,9	29,0
40K60R	576,5	256,0	2252,0	0,2	44,6	3590,1	26,1
20K80R	587,5	256,0	2294,9	0,2	46,7	3423,7	24,2
0K100R	580,0	256,0	2265,6	0,2	47,7	3352,0	22,9

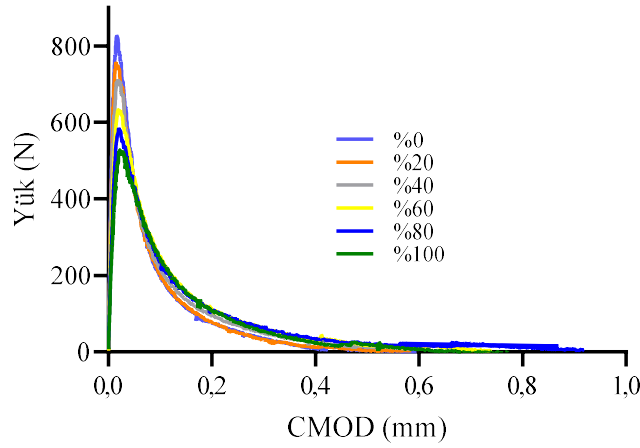


Şekil 4.10. Numunelerde RAP oranına bağlı olarak Dinamik Elastisite Modülü değişimi

Şekil 4.10'dan görüleceği üzere, Dinamik Elastisite Modülü değerleri RAP artışına bağlı olarak düşme eğilimindedir. Birçok beton özelliğinin (su muhtevası, gözenek yapısı, agrega türü, çimento ile agreganın arasındaki fazlar) UPV değerini etkilediği tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar, UPV değerinin 4500 m/s üzerinde olduğunda durabilite özellikleri açısından 'çok iyi', 4500 ile 3500 m/s arasında olduğunda 'iyi', 3500 ile 3000 m/s arasında olduğunda 'orta', 3000 m/s'nin altında olduğunda ise 'zayıf' beton kategorisinde sınıflandırılabilirliğini göstermiştir [29]. Bu bilgiler ışığında Tablo 4.6'ya göre %80 ve %100 RAP içerikli numunelerin "orta", diğer numune gruplarının ise "iyi" beton sınıfına girebileceği sonucuna varılmaktadır.

4.8. Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk)

TS EN 196-1 [41] standardına uygun olarak, her set için dörder adet numune hazırlanmış, üç nokta eğilme deneyi ile numunelerde enerji yutma kapasiteleri araştırılmıştır. JCI S0001 2003 [48] standardına uygun olarak yürütülen deneylerden elde edilen Eksenel Yük – CMOD grafiği Şekil 4.11'de, Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) yardımıyla hesaplanan kırılma enerjisi değerleri ise Tablo 4.7'de topluca verilmiştir.

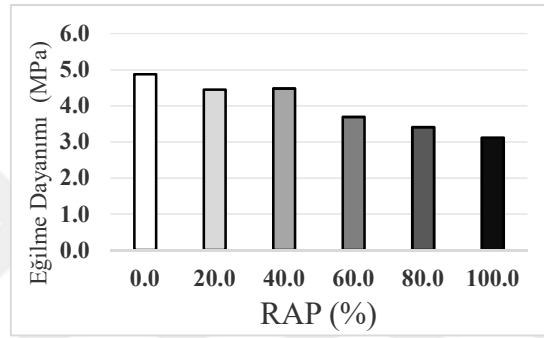


Şekil 4.11. Numunelerde Eksenel Yük – CMOD değişimi

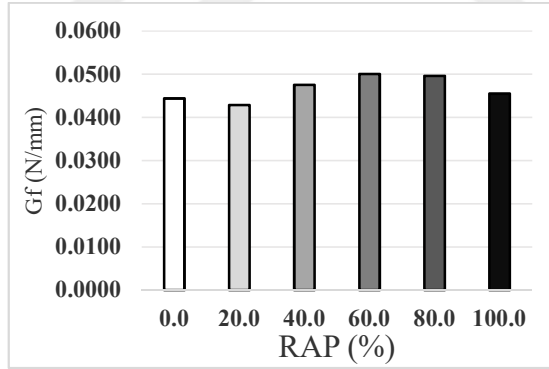
Tablo 4.7. Enerji yutma kapasitesi parametre bulguları

N. Kodu	Numune No	Max. Yük (N)	CMOD _c (mm)	Numune Ağırlığı (g)	W ₁ (Nmm)	W ₀ (Nmm)	Eğilme Dayanımı (MPa)	G _f (N/mm)	G _f / Eğilme Dayanımı (mm)
100K0R	1	833,7	0,0187	576,3	0,0593	69,4	4,8	0,0465	0,0097
	2	828,8	0,0138	583,3	0,0444	58,6	4,8	0,0393	0,0083
	3	892,4	0,0160	579,1	0,0512	75,1	5,1	0,0503	0,0098
	4	841,9	0,0160	580,2	0,0512	61,5	4,8	0,0413	0,0085
	Ort.	849,2	0,0161	579,7	0,0515	66,2	4,9	0,0444	0,0091
	<i>St. S</i>	29,3	0,0020	2,9	0,0061	7,5	0,2	0,0050	0,0008
80K20R	1	774,4	0,0180	580,2	0,0576	59,4	4,4	0,0398	0,0090
	2	816,5	0,0156	584,3	0,0504	66,4	4,7	0,0445	0,0095
	3	791,2	0,0152	577,6	0,0484	68,8	4,5	0,0461	0,0102
	4	717,4	0,0134	580,3	0,0429	60,9	4,1	0,0408	0,0099
	Ort.	774,9	0,0155	580,6	0,0498	63,9	4,4	0,0428	0,0096
	<i>St. S</i>	42,1	0,0019	2,8	0,0061	4,5	0,2	0,0030	0,0005
60K40R	1	746,1	0,0123	592,8	0,0401	74,7	4,3	0,0500	0,0117
	2	832,1	0,0160	590,1	0,0520	67,4	4,8	0,0452	0,0095
	3	797,0	0,0205	598,7	0,0676	79,6	4,6	0,0534	0,0117
	4	747,4	0,0163	597,4	0,0538	61,8	4,3	0,0414	0,0097
	Ort.	780,7	0,0163	594,8	0,0534	70,9	4,5	0,0475	0,0106
	<i>St. S</i>	41,7	0,0033	4,0	0,0112	7,9	0,2	0,0053	0,0012
40K60R	1	611,6	0,0172	570,4	0,0542	67,1	3,5	0,0450	0,0128
	2	597,3	0,0187	572,3	0,0589	55,9	3,4	0,0375	0,0109
	3	639,1	0,0228	578,9	0,0729	73,3	3,7	0,0491	0,0134
	4	724,0	0,0239	575,6	0,0759	102,2	4,2	0,0685	0,0165
	Ort.	643,0	0,0206	574,3	0,0655	74,6	3,7	0,0500	0,0134
	<i>St. S</i>	56,7	0,0032	3,7	0,0105	19,7	0,3	0,0132	0,0023
20K80R	1	601,5	0,0206	588,9	0,0669	68,0	3,5	0,0456	0,0132
	2	547,5	0,0230	586,7	0,0745	63,3	3,1	0,0425	0,0135
	3	613,8	0,0199	585,4	0,0642	90,4	3,5	0,0606	0,0172
	4	611,1	0,0207	590,3	0,0674	74,3	3,5	0,0498	0,0142
	Ort.	593,5	0,0210	587,8	0,0682	74,0	3,4	0,0496	0,0145
	<i>St. S</i>	31,1	0,0014	2,2	0,0044	11,8	0,2	0,0079	0,0018
0K100R	1	516,2	0,0259	579,3	0,0829	54,6	3,0	0,0366	0,0124
	2	501,8	0,0226	581,4	0,0723	64,2	2,9	0,0430	0,0149
	3	538,7	0,0216	580,6	0,0693	70,9	3,1	0,0476	0,0154
	4	616,6	0,0289	579,3	0,0924	81,5	3,5	0,0547	0,0154
	Ort.	543,3	0,0248	580,2	0,0792	67,8	3,1	0,0455	0,0145
	<i>St. S</i>	51,1	0,0033	1,0	0,0105	11,3	0,3	0,0076	0,0015

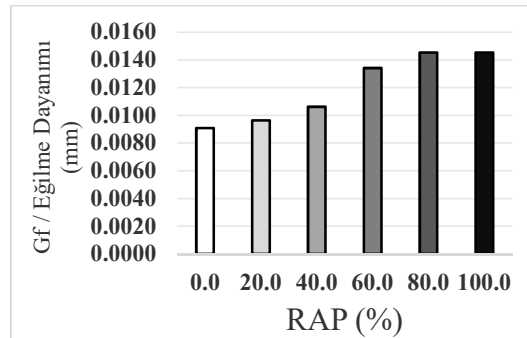
Şekil 4.12’den görüleceği üzere numunelerde eğilme dayanımı, Bölüm 4.2’deki sonuçlara paralel olarak RAP oranı arttıkça azalmasına rağmen, enerji yutma kapasitelerinde (kırılma enerjilerinde) RAP artışına bağlı olarak (%20 RAP içeriği dışında) artışlar gözlenmiştir (Şekil 4.13). RAP kullanılmayan 100K0R karışımlarında kırılma enerjisi 0,0444 N/mm düzeyindeyken, %60 ve %80 RAP kullanılması durumunda kırılma enerjisi düzeyindeki artış yaklaşık %12 artışla sırasıyla 0,0500 N/mm ve 0,0496 N/mm düzeyinde hesaplanmıştır. Kırılma enerjisinin eğilme dayanımına oranına bakıldığında ise RAP kullanımının her türlü senaryoda %5,5-%60 aralığında katkısı gözlenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.12. Eğilme dayanımının numunelerdeki dağılımı



Şekil 4.13. Kırılma enerjisinin numunelerdeki dağılımı



Şekil 4.14. Kırılma enerjisinin eğilme dayanımına oranının numunelerdeki dağılımı

4.9. RAP Miktarının Optimizasyonu

DeneySEL çalışmalar tamamlandıktan sonra, kum ve RAP malzemelerine ait kullanım oranlarının en iyi performansı verecek şekilde optimize edilmesi hedeflenmiş ve optimizasyon sonucu elde edilen bulgular Tablo 4.8’de verilmiştir. Eniyileme olarak da adlandırılan bu yöntemde asıl amaç, istenen performans kriterlerine sahip en uygun tasarımın belirlenmesidir. Bu bağlamda her bir deney sonucu, kontrol numunesi ile mukayese edilmiştir. Kontrol numunesine kıyasla azalan değerler “-” ile, artan değerler ise “+” işareti ile gōsterilmiřtir. “+/-” işaretlerinin beraber kullanıldığı durumlar ise anlamlı bir değişikliğin tespit edilemediği deneyleri ifade etmektedir. “+” veya “-” işaretinin birden fazla olması, söz konusu parametrenin artış veya azalış yönünde önem derecesinin arttığını ifade etmektedir. Örneğin, birim ağırlığın RAP içeriğine bağlı olarak azalması, hafif beton üretimi için önem arz eden bir değişim iken, tokluğun artması enerji sōnümleme yeteneğindeki iyileşme için önem arz etmektedir. Bahsedilen hususlar çerçevesinde, söz konusu tasarımlardan istenen hedeflere ulaşanlar gri dolgu ile işaretlenmiştir. Kıvam, birim ağırlık, su emme, kılcallık, enerji yutma ve tokluk/eğilme dayanımı değerlerinde kontrol numunesine kıyasla olumlu değişimler tespit edilmiştir. Olumlu değişimlerin en fazla olduğu karışımlar mercek altına aldığında ise, %60 ve %80 oranında RAP kullanımının gri dolgular içerisinde ön plana çıktığı gōr÷lmüştür.

Tablo 4.8. RAP miktarının optimizasyonu

	Kıvam	Eğilme dayanımı	Basınç dayanımı	Birim ağırlık	Su emme	Kılcallık	Kuruma rōtresi	UPV	Enerji yutma (Tokluk)	Tokluk / Eğilme dayanımı
100K0R	Kontrol	Kontrol	Kontrol	Kontrol	Kontrol	Kontrol	Kontrol	Kontrol	Kontrol	Kontrol
80K20R	- +	-	-	-	+	-	+	-	-	+
60K40R	- +	-	-	-	+	-	++	-	++	+
40K60R	- +	--	--	--	+	-	++	--	+++	++
20K80R	- +	--	--	--	-	--	+	---	+++	++
0K100R	- +	--	--	--	-	---	+++	---	+	++

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, RAP endüstrisinin ortaya çıkmasıyla bu malzemenin esnek ve rijit üstyapılarda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalara odaklanılmıştır. RAP'in çimento esaslı karışımlarda kullanımı mercek altına alınmış ve ayrıntılı şekilde irdelenmiştir. Bu minvalde literatür araştırmasından elde edilen bulgular derlenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmını oluşturan bölümünde, belirli oranlarda (%0, %20, %40, %60, %80 ve %100) 0-4 mm RAP içeren çimento harcının mekanik özellikleri ve rötre düzeyleri kapsamlı bir deney çalışması aracılığıyla araştırılmıştır. Laboratuvarda üretilen numuneler üzerinde sırasıyla; yayılma tablası, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim ağırlık, su emme, kılcallık, kuruma rötresi, ses dalgası yayılma hızı ve enerji yutma kapasitesi ölçüm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular yapılan literatür araştırmasının kazandırdığı bakış açısından incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sabit su/çimento oranı ve çimento dozajı ile yapılan deneylerde yayılma değerlerinin ortalama 13,6 cm mertebesinde olduğu tespit edilirken, RAP miktarı ile arasında net bir ilişki kurulamamıştır. Burada RAP'in kontrolsüz bir malzeme olmasının rolü ön plana çıkmaktadır.
- Eğilme dayanımı bulgularına göre; kontrol numunesine kıyasla RAP miktarı arttıkça, eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Betonun mukavemetini önemli ölçüde kazandığı 28. gün değerleri irdelendiğinde RAP'siz numunelerde ortalama 7,4 MPa olan seviye, %100 RAP'li numunelerde %27'lik azalma ile ortalama 5,4 MPa değerine düşmüştür.
- Basınç dayanımı bulgularına göre; literatürde yapılan çalışmaları da destekler şekilde RAP oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Kürleme süresinin tüm karışımlarda dayanıma olumlu etkisi olsa da 28 günlük dayanım baz alındığında %100 RAP kullanımının kontrol numunesine kıyasla dayanımı %52 oranında azalttığı görülmüştür.
- Basınç dayanımının düşmesinde de önemli rolü olan birim ağırlık değerleri incelendiğinde, kontrol numunesinde 2,088 g/cm³ olan değer, %100 RAP'li karışımda 2,058 g/cm³ mertebesine düştüğü tespit edilmiştir. Yaklaşık %1,4 civarında azalmanın yaşandığı birim ağırlık değerinde azalmaya neden olan en

önemli unsur, RAP'in yoğunluğun doğal kumdan daha az olmasına bağlanabilir. Taze harcın işlenebilirliğini önemli ölçüde etkileyen su emme yüzdesine bakıldığında, %40 RAP kullanımının su emme değerini %6,7'ye kadar arttırdığı, daha fazla RAP kullanımının ise su emme yüzdesinde azalmaya neden olduğu, hatta %80'den sonra kontrol numunesinin altındaki değerlere düştüğü gözlenmiştir.

- Hesaplanan kılcallık katsayıları su emme yüzdesi ile benzer çıktılar vermiştir. RAP oranının %80 ve üzerinde kullanıldığı durumlarda kılcal su emme katsayısının %48 civarında azalma gösterdiği ve $0,103 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{dk}^{0,5})$ mertebesine kadar gerilediği tespit edilmiştir.
- 112. günlük kuruma rötresi değerleri incelendiğinde, kontrol numunesinde %0,075 olan boy kısalması, %100 RAP'li karışımlarda %0,288 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Zamanla içerisindeki suyun buharlaşması ile büzölmeye maruz kalan betonda %100 RAP kullanımı, yaklaşık 4 kat daha fazla boy kısalmasının gerçekleşmesine neden olmuştur. RAP oranı arttıkça yoğunluğun azaldığı ve gözenekliliğin arttığı bilinmektedir. Söz konusu bu boşluklardaki suyun hidratasyon veya hava şartları gibi nedenlerle azalması sonucunda büzölme olayının yüksek oranlarda gerçekleşmesi ihtimalini artırmaktadır.
- UPV deneyinden elde edilen bulgulara göre; RAP miktarı arttıkça UPV değerinin $3855,4 \text{ m/s}$ 'den 3352 m/s 'ye düştüğü tespit edilmiştir. RAP miktarı arttıkça, artan boşluk oranı UPV değerini olumsuz etkilemiştir. Ancak karışımlarda %80'e kadar RAP kullanımı ile 'iyi' beton sınıfında üretime imkân sağlanabileceği görölmüştür.
- Numunelerde RAP artışına bağlı olarak, genellikle enerji yutma kapasitelerinde artışların olduğu tespit edilmiştir. Kontrol numunesinde $0,0444 \text{ N/mm}$ olan kırılma enerjisi, %60 RAP kullanıldığında $0,0500 \text{ N/mm}$ mertebelerine ulaşmıştır. İlk çatlak oluşumu ve çatlağın yayılma hızını geliştiren RAP katkısı ile %12 civarında iyileştirme sağlandığı görölmüştür. Enerji yutma kapasitesinin eğilme dayanımına oranlanması ile elde edilen bulgular incelendiğinde ise %60'a varan katkıların sağlanabileceği görölmüştür.

Elde edilen tüm deney sonuçları ve yapılan literatür araştırmaları göstermektedir ki RAP eğilme ve basınç dayanımı gibi önemli özelliklerde azalmaya neden olsa da belirli kalitede beton üretiminde alternatif olabilecek bir malzemedir. RAP'in enerji yutma kapasitesindeki önemli katkısı ise söz konusu malzemenin atık olarak değerlendirilmesinden ziyade iyileştirici malzeme olarak itibar görmesine neden olacak seviyededir. Özellikle beton bariyer gibi enerji sönümleme ihtiyacı yüksek olan yapılar, rijit üstyapılarda esnekliğin sağlanmasının istendiği kaplama durumları, dayanımdan ziyade hafifliğin, sünekliğin ve tokluğun istendiği yapı elamanlarında kullanılabileceği önerilmektedir.

Çimento esaslı kompozitlerde farklı özelliklerde ve boyutlardaki mikro ve makro ölçekteki liflerin tek başına veya bir arada kullanılması ile enerji yutma kapasitelerinin artış göstermesi, literatürdeki birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin daha dar bir alanda optimize edilip bu tarz liflerle birlikte kullanılarak sonuçların irdelenmesi hususu, ileride araştırılması gereken konuların başında gelmektedir.

Modern kentlerin getirdiği olumsuz yaşam koşullarının ve parasal değere dönüştürülmek için orantısız şekilde tüketilen ve tahrip edilen doğal kaynakların daha iyi değerlendirip tanzim edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma çimento harcına katılabilecek RAP'in optimum oranının belirlenmesi, dolayısı ile RAP'in verimli bir şekilde değerlendirilmesi, sürdürülebilir, daha ekonomik ve çevreci yapıların inşa edilmesine vesile olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), 100. Yıl Türkiye Planı, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019.
- [2] Çevre ve Doğal Kaynakların Sürdürülebilir Yönetimi Çalışma Grubu Raporu, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018.
- [3] Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı 2023, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016.
- [4] A. G. Seferoğlu, M. T. Seferoğlu, M. F. Akpınar, M. Çelik, “Plent-miks Temel Tabakası Yapımında Kazınmış Asfalt Kaplama (RAP) Malzemesi Kullanımı ve Ekonomik Analizi,” *Politeknik Dergisi*, 23(4):1327-1338, 2020.
- [5] F. Ünlü, “İstanbul’da Kazınmış Asfalt Kaplamaların Binder Tabakasında Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [6] Using Reclaimed Asphalt Pavement in Pavement-Preservation Treatments Federal Highway Administration, pp. 11, 2020.
- [7] X. Shi, Z. Grasley, J. Hogancamp, L. B. Norambuena, A. Mukhopadhyay, D. Zollinger, “Microstructural, Mechanical and Shrinkage Characteristics of Cement Mortar Containing Fine Reclaimed Asphalt Pavement,” *American Society of Civil Engineers*, 2020.
- [8] B. Işıkdag, “Atık Asfalt Kırıklarının Beton Yollarda Agregaya Yerine Kullanılmasının Araştırılması,” Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2009.
- [9] A. S. Brand, A. N. Amirkhanian, J. R. Roesler, “Flexural Capacity of Full-Depth and Two-Lift Concrete Slabs with Recycled Aggregates,” *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2014.
- [10] B. Huang, X. Shu, G. Li, “Laboratory Investigation of Portland Cement Concrete Containing Recycled Asphalt Pavements,” *Cement and Concrete Research*, pp. 2008-2013, 2005.
- [11] X. Shi, “Evaluation of Portland Cement Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement for Pavement Applications,” Doctor of Philosophy, *Texas A&M University*, 2018.
- [12] X. Shi, M. Mirsayar, A. Mukhopadhyay, D. Zollinger, “Characterization of Two Parameter Fracture Properties of Portland Cement Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates by Semicircular Bending Specimens”, *Cement and Concrete Composites*, pp. 56-69, 2019.

- [13] İ. B. Topçu, B. Işıkdag, “Effects of Crushed RAP on Free and Restrained Shrinkage of Mortars”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, pp. 91-95, 2009.
- [14] National Asphalt Pavement Association (NAPA), How to Increase RAP Usage and Ensure Pavement Performance, Asphalt Pavement Alliance (APA), https://www.driveasphalt.org/uploads/documents/PS34_How_to_Increase_RAP_Usage.pdf, (Erişim Tarihi: 8 Nisan 2023).
- [15] Crude Oil Prices – 70 Year Historical Chart, Macrotrends, <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>, (Erişim Tarihi: 09 Nisan 2023).
- [16] RDT, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, [https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm#:~:text=Reclaimed%20asphalt%20pavement%20\(RAP\)%20is,obtain%20access%20to%20buried%20utilities](https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm#:~:text=Reclaimed%20asphalt%20pavement%20(RAP)%20is,obtain%20access%20to%20buried%20utilities), (Erişim Tarihi: 08 Nisan 2023).
- [17] Major Advantages, Asphalt Pavement Association of Michigan, https://www.apa-mi.org/reclaimed_asphalt_pavement.php, (Erişim Tarihi: 08 Nisan 2023).
- [18] Use of RAP & RAS in High Binder Replacement Asphalt Mixtures: A Synthesis, National Asphalt Pavement Association, Special Report 213, 2016.
- [19] Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage, Information Series 198, 11th Annual Survey, National Asphalt Pavement Association, 2020.
- [20] İ. Salta, “Bitümlü Karışımların Geri Dönüşüm Yöntemlerinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [21] G. Güngör, F. Orhan, S. Kaşak, Y. Dost, “Kazılmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanılması”, *1. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, 2008.
- [22] B. Tran, “Maximising Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Content in Hot Mix Asphalt (HMA)”, PhD Dissertation, Swinburne University of Technology, Faculty of Engineering and Industrial Science, Victoria, 2014.
- [23] A. C. Falchetto, K. H. Moon, D. Wang, C. Riccardi, M. S. Kang, M. P. Wistuba, “Investigation on the Combined Recycling of Reclaimed Asphalt Pavement and Steel Slag in Asphalt Mixture at Low Temperature”, *5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, 2017.
- [24] S. Oruç, B. Yılmaz, M. S. Mazlum, “Geri Kazanılan Asfalt Kaplamaların Sıcak Asfalt Karışımlarda Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), pp. 87-93, 2018.

- [25] A. F. Akpınar, “Asfalt Kırığı Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2005.
- [26] N. Hossiney, M. Tia, M. J. Bergin, “Concrete Containing RAP for Use in Concrete Pavement”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(5):251-258, 2010.
- [27] S. E. E. Khay, S. E. E. B. Said, A. Loulizi, J. Neji, “Laboratory Investigation of Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001158, 2014.
- [28] A. S. Brand, A. N. Amirkhanian, J. R. Roesler, “Flexural Capacity of Full-Depth and Two-Lift Concrete Slabs With Recycled Aggregates”, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, DOI: 10.3141/2456-07, pp. 64-72, 2014.
- [29] A. S. Brand, J. R. Roesler, “Concrete with Steel Furnace Slag and Fractionates Reclaimed Asphalt Pavement”, Research Report, Illinois Center for Transportaion, 2014.
- [30] Y. Abut, “Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol: Kocaeli İlinde Bir Durum Çalışması”, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017.
- [31] S. M. Abraham, G. D. R. N. Ransinchung, “Influence of RAP Aggregates on Strength, Durability and Porosity of Cement Mortar”, *Construction and Building Materials*, 189, pp. 1105-1112, 2018.
- [32] J. M. Chyne, H. K. Sepuri, H. K. Thejas, “A Review on Recycled Asphalt Pavement in Cement Concrete”, *International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJLERA)*, ISSN: 2455-7137, Volue: 04, Issue: 02, pp. 09-18, 2019.
- [33] M. F. Şahan, A. D. Polat, O. Günaydın, “Kazınmış Asfalt Malzemelerin İri Agrega Yerine Kısmen İkame Edilmesinin Farklı Isı Altındaki Betonların Basınç Dayanımlarına Etkisi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, DOI: 10.35414/akufemubid.871841, pp. 660-667, 2021.
- [34] F. Akkum, “Geri Dönüştürülmüş Asfalt Agregası ile Üretilen Betonların Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hatay, 2021.
- [35] C. R. Marin-Urbe, R. Navarro-Gaete, “Empirical Relationships Between Compressive and Flexural Strenght of Concrete Containing Recycled Asphalt Material for Pavement Applications Using Different Specimen Configurations”, *Materiales de Construcción*, Vol. 71, Issue 342, 2021.
- [36] D. Kır, Y. Kır, “Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama Malzemesinin Betonda Kullanımı Üzerine Bir Araştırma”, *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 5(1):81-91, 2022.

- [37] TS 3530 EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini – Eleme Metodu, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [38] ASTM D2172 / D172M, Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken-PA, 2017.
- [39] AASHTO T30, Standard Method of Test for Mechanical Analysis of Extracted Aggregate, American Association of State Highway Officials, Washington DC., 2015.
- [40] TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [41] TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [42] ASTM C230/C 230M-03, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken-PA, 2009.
- [43] ASTM C642-97, Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken-PA, 1997.
- [44] BS EN 1015-18, Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 18: Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar, British Standards, 2002.
- [45] ASTM C157/C 157M-03, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic – Cement Mortar and Concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken-PA, 2003.
- [46] Z. Zebari, “Ultrasonik Dalga Hızı Ölçümü Yardımıyla Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2016.
- [47] ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken-PA, 2017.
- [48] JCI-S-001-2003, Method of Test for Fracture Energy of Concrete by Use of Notched Beam, Japan Concrete Institute Standard, 2003.
- [49] S. Yıldırım, “Farklı Sıcaklıklardaki Su Kürünün Harç Numuneleri Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2020
- [50] S. Debbarma, S. Sing, G.D. Ransinchung R.N., “Laboratory Investigation on The Fresh, Mechanical and Durability Properties of RCCP Containing RAP”





EKLER

Ek.1 – Çalışma Programı

DENEY PROGRAMI

Adım	Deney	Standart	Karışım	DENEY PROGRAMI												TEMMUZ 2022		
				ŞUBAT 2022	MART 2022	NİSAN 2022	MAYIS 2022	HAZİRAN 2022										
1	HARCIN HAZIRLANMASI	TS EN 196-1	100K-0R															
			80K-20R															
			60K-40R															
			40K-60R															
			20K-80R															
2	KALİPTAN ÇIKARMA + KUR HAYUZUNA KOYMA	TS EN 196-1	0K-100R															
			100K-0R															
			80K-20R															
			60K-40R															
			40K-60R															
3	EĞİLME DAYANIMI DENEYİ	TS EN 196-1	20K-80R															
			0K-100R															
			100K-0R															
			80K-20R															
			60K-40R															
4	BASINÇ DAYANIMI DENEYİ	TS EN 196-1	40K-60R															
			20K-80R															
			0K-100R															
			100K-0R															
			80K-20R															
5	BİRİM AĞIRLIK VE SU EMME	ASTM C642	60K-40R															
			40K-60R															
			20K-80R															
			0K-100R															
			100K-0R															
6	KILCALLIK DENEYİ	TS EN 1015-18	80K-20R															
			60K-40R															
			40K-60R															
			20K-80R															
			0K-100R															
7	KURUMA RÖTRESİ	ASTM C157 & ASTM C596	100K-0R															
			80K-20R															
			60K-40R															
			40K-60R															
			20K-80R															
8	ENERJİ YUTMA KAPASİTESİ	JCI SOO1 2003	0K-100R															
			100K-0R															
			80K-20R															
			60K-40R															
			40K-60R															

ÖZGEÇMİŞ

Sefa GÜNDOĞDU 2013 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Ulaştırma Mühendisliği Bölümünden 2018 yılında bölüm ikincisi olarak mezun olup söz konusu bölümün ilk mezunları arasında yer aldı. 2020 yılında aynı üniversitede Ulaştırma ve Lojistik Mühendisliği bölümünde öğrenimine başladı.

İş hayatına ilk olarak 2018 yılında Yılmaz Mühendislik firmasında Ulaştırma Mühendisi olarak başladı. Burada geometrik düzenleme ve simülasyon çalışmalarını yürüttü. Akabinde 2019 Yılında Güven İnşaat bünyesinde KGM 12. Şube Şefliği (Mimarsinan) rutin yol bakım, onarım ile kar ve buz mücadelesi işlerinde görev aldı. 2020 yılında KMO Avrupa Otoyolu Yatırım ve İşletme A.Ş. bünyesinde Trafik Mühendisi olarak görev aldı. Bu dönemde trafik devriye ekibinin yönetimi, kaza ve olay gibi durumlarda gerekli organizasyon, kontrol ve raporlama, alt yüklenici yönetimi, VMS, VTS ve CCTV yönetimi işlerini yürüttü. 2021 yılı itibariyle T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nda Ulaştırma Mühendisi olarak göreve başladı ve görevine devam etmektedir. Burada Karayolları Genel Müdürlüğü uhdesinde bulunan kavşaklarla ilgili simülasyon ve analiz çalışmalarını yürütmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Gündoğdu, S., Abut, Y., "Effect of reclaimed asphalt pavement (RAP) on workability of fresh cement mortars," In Proc. 1th International Congress on Engineering and Sciences, (E-ISBN: 978-625-7367-93-6), 2023, pp. 183-189.