



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

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

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALT KARIŞIMLARINDA ATIK YAĞ
KULLANIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE YAPISAL PERFORMANS
KRİTERLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİLARA ÇELİK

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ YAVUZ ABUT

**YALOVA
TEMMUZ 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ULAŞTIRMA VE LOJİSTİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALT KARIŞIMLARINDA ATIK YAĞ KULLANIMININ
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE YAPISAL PERFORMANS
KRİTERLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİLARA ÇELİK
238123001

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ YAVUZ ABUT

YALOVA
TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALT KARIŞIMLARINDA ATIK YAĞ KULLANIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE YAPISAL PERFORMANS KRİTERLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ” başlıklı bu tez çalışmada; 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 çalışmada 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.

Dilara ÇELİK

ÖNSÖZ

Lisans eğitim dönemimden bu yana bilgisine, deneyimine ve bakış açısına her zaman imrenerek baktığım ayrıca bu uzun ve zorlu süreç boyunca tezin fikir aşamasından sonuç aşamasına kadar her adımda beni yönlendiren, değerli görüşlerini esirgemeyen, yapıcı eleştirileri ve yol göstericiliği ile yanımda olan saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ABUT'a, laboratuvar çalışmaları boyunca bilgi, deneyim ve destekleriyle güç olan değerli hocam Arş. Gör. Merve CEYHAN ERDOĞAN'a teşekkürlerimi borç bilirim. Bu yoğun çalışma sürecim boyunca deneylerimin her aşamasını beraber yürüttüğüm, yardımlarıyla yükümü azaltan, desteğiyle sürecimi kolaylaştıran kıymetli arkadaşım ve meslektaşım Kader FENERCİ'ye teşekkür ederim. Tezimin en ince detayına kadar her aşamasında yardımını esirgemeyen, her aşaması için ayrıca vakit ayıran çok değerli arkadaşım ve meslektaşım İzzet Onur BERBER'e teşekkür ederim.

Nefes almaya başladığım ilk andan itibaren hayatımın her anında şartsız koşulsuz bana kol kanat geren, inançlarıyla beni cesaretlendiren, maddi manevi her türlü desteği sağlayan ablam Dilek ÇELİK KESKİNOĞLU'na, annem Mehtap ÇELİK ve babam Ahmet Ziya ÇELİK'e minnettarlığımı belirtmek isterim.

Temmuz – 2025

Dilara ÇELİK



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	3
2.1. Bitümlü Sıcak Karışım (Asfalt)	3
2.2. Asfalt Endüstrisinde Geri Dönüşüm Uygulamaları.....	5
2.3. Atık Motor Yağı (AMY) ve Atık Bitkisel Yağ (ABY)	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM	15
3.1. Malzeme	17
3.1.1. Doğal agrega	17
3.1.2. Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama (RAP)	18
3.1.3. Bitüm	19
3.1.4. Atık motor yağı (AMY) ve atık bitkisel yağ (ABY)	19
3.2. Malzemelerin Ön İncelenmesi.....	20
3.2.1. Elek analizi	20
3.2.2. Penetrasyon ve özgül ağırlık deneyi	26
3.3. Karışım Optimizasyonu.....	28
3.3.1. Karışım gradasyonunun tespiti	28
3.3.2. Optimum bitümün seçimi	29
3.4. Marshall Deneyi ile Optimum RAP Oranının Tespiti	30
3.4.1. Marshall briketi hazırlama	30
3.4.2. Optimum RAP oranının belirlenmesi	43
3.5. RAP İçerikli Numuneler İçin Atık Yağ Uygulaması.....	50
3.5.1. Atık yağ ilaveli briket üretimi.....	50
3.5.2. Optimum yağ oranının tespiti	54
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	64
EKLER	68

EK-1		69
EK-2		70
EK-3		72
EK-4		73
ÖZGEÇMİŞ		75



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

G*	: Kayma Sertliği
δ	: Faz Açısı

KISALTMALAR

ABY	: Atık Bitkisel Yağ
ADTPF	: Alaska Ulaştırma ve Kamu Tesisleri Departmanı
AI	: Asfalt Enstitüsü
AMY	: Atık Motor Yağı
ARRA	: Asfalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Derneği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
BBR	: Kiriş Eğilme Reometresi
DSR	: Dinamik Kesme Reometresi
FHWA	: Federal Karayolları İdaresi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
PG	: Performans Sınıflandırma
RAP	: Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama
RTFO	: Dönen İnce Film Etüvü



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (KGM, 2023).....	22
Tablo 3.1. (Devam) Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (KGM, 2023).....	23
Tablo 3.2. İnce agreganın özellikleri (KGM, 2023).....	23
Tablo 3.3. Doğal agregalara ait fiziksel özellikler	24
Tablo 3.4. Doğal agrega elek analizi sonuçları	24
Tablo 3.5. RAP malzemeye ait elek analizi sonuçları.....	26
Tablo 3.6. Bitüme ait penetrasyon ve özgül ağırlık deney sonuçları	28
Tablo 3.7. Aşınma (TİP-1) tabakası karışım gradasyonu.....	28
Tablo 3.8. Optimum bitüm seçimi	29
Tablo 3.9. Deney sonuçları (1-12 numune arası).....	44
Tablo 3.10. Deney sonuçları (13-24 numune arası).....	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bitüm örneği	5
Şekil 3.1. Ulaştırma Geotekniği Laboratuvarı	15
Şekil 3.2. Deneysel çalışma akış diyagramı	16
Şekil 3.3. Efor Madencilik'e ait taş ocağı	17
Şekil 3.4. Temin edilen doğal agregalar	17
Şekil 3.5. Temin edilen RAP malzeme	18
Şekil 3.6. RAP malzemenin stok alanı	18
Şekil 3.7. AC 50/70 bitüm.....	19
Şekil 3.8. Atık motor yağı ve atık bitkisel yağ.....	20
Şekil 3.9. Doğal agregaların el ile eleme yöntemi ile elenmesi	21
Şekil 3.10. Doğal agregaların gruplandırılması	22
Şekil 3.11. RAP malzemenin gruplandırılmadan önceki görüntüsü	25
Şekil 3.12. RAP malzemenin el ile elenmesi	25
Şekil 3.13. RAP malzemenin gruplandırıldıktan sonraki görüntüsü.....	26
Şekil 3.14. Bitüme uygulanan penetrasyon deneyi	27
Şekil 3.15. Bitüme ait özgül ağırlık deneyi.....	27
Şekil 3.16. Doğal agrega ve RAP malzemenin tartım işlemi.....	30
Şekil 3.17. Fraksiyonlarına ayrılmış agregalar.....	31
Şekil 3.18. Fraksiyonların paketlenmesi	31
Şekil 3.19. Agrega ve RAP'in ısıtma işlemi için hazırlanması	32
Şekil 3.20. Etüvün uygun sıcaklığa getirilmesi.....	33
Şekil 3.21. Isıtılmaya bırakılan kalıplar, karıştırma kabı	33
Şekil 3.22. Isıtılmaya bırakılan agrega ve RAP	34
Şekil 3.23. Etüvden çıkarılan agrega ve RAP'in kuru karışımı	34
Şekil 3.24. Bitümün ilave edilmesi	35
Şekil 3.25. Karıştırma işlemi.....	35
Şekil 3.26. Karışımın briket kalıplarına yerleştirilmesi	36
Şekil 3.27. Briket kalıbının Marshall tokmağı cihazına yerleştirilmesi	36
Şekil 3.28. Marshall tokmağında briketlere darbe uygulaması	37
Şekil 3.29. Soğumaya bırakılan numune.....	37
Şekil 3.30. 24 saat bekletilen numunenin kalıptan çıkarılması	38
Şekil 3.31. Kalıptan çıkarılan numunelerin numaralandırılması.....	38
Şekil 3.32. Kumpas yardımı ile briket kalınlığı ölçümü	39
Şekil 3.33. Briketlerin havadaki ağırlığının ölçülmesi.....	40

Şekil 3.34. Briketlerin sudaki ağırlığının ölçülmesi	40
Şekil 3.35. Briketlerin kurulanması	41
Şekil 3.36. Briketlerin doymuş yüzey kuru ağırlıklarının ölçülmesi	41
Şekil 3.37. Su banyosu sıcaklık kontrolü.....	42
Şekil 3.38. Briketlerin su banyosuna yerleştirilmesi	42
Şekil 3.39. Briketin Marshall test cihazına yerleştirilmesi	43
Şekil 3.40. Marshall test sonuçlarının alınması	43
Şekil 3.41. Numunelere ait Hacim Özgül Ağırlık sonuçları.....	45
Şekil 3.42. Numunelere ait Su Absorpsiyonu sonuçları	46
Şekil 3.43. Numunelere ait Stabilite sonuçları	47
Şekil 3.44. Numunelere ait Akma sonuçları	48
Şekil 3.45. Numunelere ait Marshall oranı sonuçları	49
Şekil 3.46. RAP malzemeye AMY ilave öncesi.....	51
Şekil 3.47. RAP malzemeye AMY ilave sonrası.....	51
Şekil 3.48. RAP malzeme ile AMY karışımı	52
Şekil 3.49. AMY ile kütleme sonrası RAP malzemenin görüntüsü	52
Şekil 3.50. RAP malzemeye ABY ilave öncesi.....	53
Şekil 3.51. RAP malzemeye ABY ilave sonrası	53
Şekil 3.52. ABY ile kütleme sonrası RAP malzemenin görüntüsü.....	54
Şekil 3.53. Atık yağ bazlı numunelerin Hacim Özgül Ağırlık sonuçları.....	55
Şekil 3.54. Atık yağ bazlı numunelerin Su Absorpsiyonu sonuçları	56
Şekil 3.55. Atık yağ bazlı numunelerin Stabilite sonuçları	57
Şekil 3.56. Atık yağ bazlı numunelerin Akma sonuçları.....	58
Şekil 3.57. Atık yağ bazlı numunelerin Marshall Oranı sonuçları	59

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALT KARIŞIMLARINDA ATIK YAĞ KULLANIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE YAPISAL PERFORMANS KRİTERLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde dünya nüfusunun hızla artması, atık yönetimini küresel ölçekte önemli bir sorun haline getirmiştir. Bu bağlamda, geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik kavramları çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla ön plana çıkmakta ve bütüncül yaklaşımlar gerektirmektedir. Sınırlı doğal kaynakların etkin kullanımı, gelecek nesillere yaşanabilir bir çevre bırakma sorumluluğu ile birleştiğinde, atıkların yeniden değerlendirilmesi hayati bir önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, çevreye zararlı etkileri bulunan atık motor yağları (AMY) ile atık bitkisel yağların (ABY), asfalt sektöründe katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Araştırmada, geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) oranları %0, %10, %30 ve %50 olarak belirlenmiş ve her karışım için hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı gibi temel mühendislik parametreleri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, %30 RAP oranı optimum değer olarak belirlenmiş; bu oranla hazırlanan karışımlarda %5 ve %10 oranlarında AMY ile ABY ayrı ayrı kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, atık yağ katkılarının bitümlü sıcak karışımlarının mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. En iyi performans, AMY için %10, ABY için ise %5 oranlarında elde edilmiştir. Bu çalışma hem çevresel kirliliğin azaltılması hem de asfalt performansının iyileştirilmesi açısından atık yağların değerlendirilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmakta; aynı zamanda inşaat sektöründe sürdürülebilir malzeme kullanımını teşvik etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm Yaşlanması, Atık Motor Yağı, Atık Bitkisel Yağı, Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama, Geri Dönüşüm



INVESTIGATION OF THE USE OF WASTE OIL IN RECYCLED ASPHALT MIXTURES WITH REGARD TO SUSTAINABILITY AND STRUCTURAL PERFORMANCE CRITERIA

ABSTRACT

The rapid growth of the global population has made waste management a critical issue on a global scale. In this context, the concepts of recycling and sustainability have come to the forefront with their environmental, economic, and social dimensions, requiring holistic approaches. The efficient use of limited natural resources, combined with the responsibility to leave a livable environment for future generations, has made the reuse of waste materials vitally important. This study investigates the potential use of waste engine oil (WEO) and waste vegetable oil (WVO), both of which have environmentally harmful effects, as additive materials in the asphalt industry. Reclaimed asphalt pavement (RAP) contents were determined as 0%, 10%, 30%, and 50%, and for each mixture, fundamental engineering parameters such as bulk specific gravity, water absorption, stability, flow, and Marshall quotient were analyzed. Based on the obtained results, 30% RAP was identified as the optimal ratio. Mixtures were then prepared by adding 5% and 10% of WEO and WVO separately at this RAP level, and their performances were compared. The experimental results demonstrated that the addition of waste oils improved the engineering properties of hot mix asphalt and contributed to preventing bitumen aging. The best performance was achieved with 10% WEO and 5% WVO. This study offers an innovative approach to the utilization of waste oils, contributing both to the reduction of environmental pollution and the enhancement of asphalt performance. Furthermore, it promotes the sustainable use of materials in the construction sector.

Keywords: Bitumen Aging, Waste Engine Oil, Waste Vegetable Oil, Reclaimed Asphalt Pavement, Recycling



1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışı, endüstriyel üretim ve tüketimin giderek çoğalmasına neden olmaktadır. Bu durum beraberinde atık oluşumunun hızlanmasını, ayrıca çevresel sorunların artmasını getirmektedir. Böylelikle modern çağımızda geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik kavramları ön plana çıkmıştır ve bu kavramlar oldukça kritik bir önem arz etmeye başlamıştır. Geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik kavramları çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır. 1970'lerden bu yana kullanılan sürdürülebilirlik kavramı, modern dünyada merkezi bir konu haline gelmiştir. 1992 senesinde yürütülen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda sunulan Rio Deklarasyonu ile sürdürülebilir kalkınma uluslararası bir perspektifle benimsenmiştir. Ülkemize bakıldığında ise, Türkiye'de sürdürülebilir yönetim yaklaşımı ilerleme sürecindedir (T.C Kalkınma Bakanlığı, 2018). Gelecek nesillere daha yaşanılabilir bir yaşam alanı bırakabilmemiz için, kaynaklarımızın sınırlı olduğu bu dünyada, atıkların yeniden kullanılabilirliği ön plana çıkmaktadır. Bu noktada harekete geçen atık yönetimi hayati rol oynayan bir sistemdir. Doğal rezervlerin korunması, çevresel bozulmanın önüne geçilmesi ve sürdürülebilir bir yaşam modeli gibi çeşitli hedefleri olan atık yönetim sistemi şu aşamaları kapsamaktadır; Atıkların kaynağında ayrıştırılması, toplama ve taşıma, geri dönüşüm ve geri kazanım, bertaraf, atık azaltma ve yeniden kullanım. Örneğin, yüksek sera gazı emisyonları iklim bozulmalarının hızını arttırmaktadır ve bu durum insanlık için ciddi bir risk oluşturmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019). Bu aşamaların etkin bir şekilde uygulanması çevre ve toplum sağlığını koruma, enerji ve doğal kaynak tasarrufu, sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi önemli katkılar sunmaktadır.

Karayolu kaplamalarında oldukça yaygın kullanılmakta olan asfalt, yeniden değerlendirme imkânı ile öne çıkan bir yapı malzemesidir. Bu kapsamda, geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP), teknik olarak gerçekleştirilebilir yöntemler arasında bulunmaktadır. RAP içerisinde bulunan bitümün zaman içerisinde yaşlanmasıyla, RAP malzeme sertleşir ve oksidasyona uğrar. Böylelikle oluşturulan yeni karışımlarda, işlenebilirlik problemleri, verimliliğin düşmesi ve mühendislik özelliklerinin negatif etkilenmesi gibi durumlar ortaya çıkar. Bu tür olumsuzlukların giderilebilmesi için, zaman içerisinde yaşlanmış olan bitümün fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Yol yapım ve bakım çalışmalarında oldukça sık kullanılan bitüm, gençleştirici katkı maddeleri ilavesiyle tekrar işlevsel hale getirilebilir.

Atık konusunda başlı başına bir çevre sorunu olan atık motor yağları (AMY) ve atık bitkisel yağlar (ABY) yenilikçi bir çözümle değerlendirilerek asfalt sektöründe kullanılabilirler. Atık yağların bitüm gençleştirici olarak kullanılması yaklaşımı sadece çevresel kirliliğin önüne geçmek için değil, aynı zamanda asfaltın dayanıklılığını artırma potansiyelinin değerlendirilmesi açısından da oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Büyük oranda RAP içeren asfalt karışımlarda hem AMY hem de ABY, çevresel ve ekonomik anlamda yüksek bir değerlendirme potansiyeline sahiptir. Buna karşın, uygulamanın verimlilik ve güvenlik kriterlerini bir arada karşılayabilmesi için dozaj optimizasyonunun doğru yapılması, birleşik modifikasyon tekniklerinin uygulanması ve sıcaklıkla birlikte uzun dönem performans takibi yapılması elzemdir.

Bu tez çalışmasında, doğal agrega yerine %10, %30 ve %50 oranlarında RAP ilavesi ile yeni karışımlar elde edilmiş ve Marshall özellikleri, kontrol karışımlarına göre kıyaslanmıştır. İkinci aşamada optimum RAP içeriği belirlenen karışımlara AMY (%5 ve %10) ve ABY (%5 ve %10) ilavesi yapılarak yeni karışımlar oluşturulmuştur. Detaylı bir şekilde planlanan deneyler kapsamında, laboratuvar ortamında 24 adet Marshall briketi elde edilmiştir. İlk 12 briket optimum RAP oranını belirlemek amacıyla üretilirken, sonraki 12 briket belirlenen optimum RAP oranı doğrultusunda atık yağ ilavesinin etkisini incelemek amacıyla üretilmiştir. Laboratuvar ortamında hazırlanmış olan briketlerin sırasıyla; hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı değerleri tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, elde edilen veriler doğrultusunda, gençleştirici katkı malzemesi olarak kullanılan atık yağların, yaşlanan bitümün mühendislik özelliklerini iyileştirmede alternatif bir çözüm olup olmadığının tespiti yapılabilecektir. Deneylerde hedeflenen sonuçlara ulaşıldığı takdirde, bu tez çalışması, bitümün tekrar işlevsel hale getirilmesi, ekonomik anlamda fayda ve maliyet avantajı, çevresel kirliliğin önüne geçerek doğal kaynakların korunması, enerji tasarrufu sağlanması ve karbon ayak izinin indirgenmesi, atık yönetiminin uygulanması gibi alanlarda önemli katkılar sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölümde, asfalt geri dönüşüm süreçlerinde bitümün yaşlanma etkilerini azaltmaya yönelik olarak AMY ve ABY'nin gençleştirici katkı maddesi olarak kullanımını ele alan ulusal ve uluslararası çalışmalar incelenmiştir. Literatür değerlendirmesi; bitümlü sıcak karışımlar, asfalt endüstrisinde geri dönüşüm uygulamaları ve AMY ile ABY malzemelerine ilişkin alt başlıklar altında yapılandırılmıştır.

2.1. Bitümlü Sıcak Karışım (Asfalt)

Asfalt, doğal ya da sentetik olarak elde edilebilen, kuvvetli bağlayıcılık özelliği olan, hidrokarbon bileşenleri içeren, viskoz ve termoplastik nitelikli, yoğun, siyah ve yapışkan bir maddedir. Yol yapımı, su yalıtımı, otoparklar, havaalanı pistleri gibi alanlarda genellikle yapı malzemesi olarak mühendislik alanında sıkça kullanılan asfalt, çoğu zaman petrol rafinasyonunun bir yan ürünü olarak elde edilir. Asfaltın performansı, üzerine etki eden sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olarak farklılık arz eder (Arıkan Öztürk ve Çubuk, 2004). Asfalt, yüksek sıcaklıklarda akışkanken, düşük sıcaklıklarda katı veya yarı katı formda bulunur.

Asfalt, geniş kullanım alanları olan, makul şekilde tasarlandığında çeşitli kaplama ve diğer uygulamalar için optimal malzeme özelliklerini sunan bir yapı malzemesidir. Kullanım alanları;

- i. Tarım alanları,
- ii. Binalar,
- iii. Hidrolik ve erozyon kontrol,
- iv. Endüstriyel alanlar,
- v. Kaplamalar,
- vi. Demiryolu alanları,
- vii. Rekreasyon alanları,
- viii. Muhtelif uygulamalar (kuşaklama, briket harcı, kil kaplar)

olmak üzere oldukça çeşitlidir (Tunay, 2008). Yaygın olarak üretilen üç farklı asfalt kaplama türü mevcuttur. Bunlardan birincisi sıcak karışım asfalt veya bitümlü sıcak karışım (BSK) olarak bilinen üretim türüdür. Bitümlü sıcak karışımda agrega ve bitümün sıcaklık aralığı 145-160 °C olmakla birlikte karışım tasarımına uygun bir şekilde plentte karıştırılır. Bu karışımda genellikle agrega %95, bitüm ise %5 oranlarında bulunmaktadır. Soğuk asfalt, bir diğer adıyla

bitümlü harç kaplama, farklı bir kaplama türü olup; sınıflandırılmış tek tip ince agrega, asfalt emülsiyonu, mineral filler ve su kullanılarak tasarlanan harç tipi bir karışımdır. Sathi kaplamada ise agrega ve bağlayıcılar art arda serilmektedir. Ayrıca tek tabaka olabileceği gibi birden fazla tabaka (iki veya üç) halinde de olabilir (Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, n.d.). Asfalt kaplamaların yol inşaatlarında sıklıkla kullanılmasının pek çok sebebi bulunmaktadır. Düzgün, derzsiz ve sessiz yüzey özellikleri sayesinde sürüş rahatlığı ve güvenliği sağlamaktadır. Ayrıca asfalt kaplamalarda yol çizgileri daha belirgin gözüktüğü için sürücülere görüş mesafesi açısından avantaj sunmaktadır. Asfalt yolların bozulan kısımları bakım ve onarım gerektiğinde süreç oldukça hızlı ve kolay şekilde gerçekleştirilebilir. Bu durum zamandan, maliyetten ve iş gücünden tasarruf edilmesini sağlamaktadır. Asfalt kaplamaların altyapı projelerinde de avantajı oldukça fazladır. Bu tür kaplamalar hızlı açılıp kapanabilme özelliğine sahip olduğundan trafik devinimi en aza indirgenir. İklim açısından incelendiğinde asfalt, elastik yapısı sebebiyle sıcaklık değişkenliği karşısında daha dayanıklıdır. Günümüzde büyük bir öneme sahip olan geri dönüşüm konusunda ise asfalt avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. %100 geri dönüştürülebilirliği sayesinde atık problemlerini azaltmakla kalmayıp enerji, kaynak ve maliyet gibi konularda da tasarruf sağlamaktadır.

Bitüm genel itibariyle, doğal veyahut pirojenik kökenlere sahip hidrokarbonlardan oluşabilen, petrol damıtımıyla ortaya çıkan, uçuculuğu olmayan ve yüksek viskoz özelliğine sahip, karbon disülfür ve trikloretilende çözünebilen, ısı verildikçe yumuşama gösteren, sıvı veya katı halde olan, siyah ile koyu kahve arasında renge sahip hidrokarbon bir atık olarak tanımlanmaktadır (KGM, 2021; Kuloğlu, 2008; Lesueur, 2009; Salta, 2010). Bitümün temel niteliklerinin büyük ölçüde üretim ve işleme aşamalarına ve kullanılan ham petrolün karakteristiklerine bağlı olduğu yaygın olarak bilinmektedir (Porto ve diğ., 2019). Bitüm uygulama alanları açısından en yaygın olarak yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Bu sebeple kullanıldığı durumlarda asfalt çimentosu veya bağlayıcı olarak nitelendirilmektedir (Salta, 2010). Bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki farklı kısımda incelenirler. Asfalt ise kendi içinde doğal asfalt ve yapay asfalt olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Asfalt kaplama verimliliğini önemli ölçüde etkileyen en temel özellik, bitümlü bağlayıcının dayanıklılığıdır. Bitümlü bağlayıcının farklı etkenler nedeniyle sertleşip kırılganlaşması "yaşlanma" ya da "zamanla gerçekleşen yaşlanma" olarak tanımlanmaktadır. Yapılan kapsamlı çalışmalar sonucunda yaşlanmanın kısa dönem yaşlanma ve uzun dönem yaşlanma olarak iki farklı aşaması olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bitümlü malzemelerin yaşlanmasıyla alakalı değerlendirmeler de iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlardan bir tanesi bitüm üzerinde yapılan analizler diğeri ise bitümlü

karişımlar üzerinde yapılan analizlerdir. Yaşlanma üzerinde etkili olan parametreler ilk defa Dow tarafından öne sürölmüştür (Dow, 1903). Bu parametreleri; oksidasyon, buharlaşma ya da uçucu madde kaybı, yoğunlaşma ve polimerizasyon olmak üzere dört ayrı alanda değerlendirmiştir (Aghazadeh Dokandari ve diğ., 2014; Airey, 2003).

Bitöümün kullanım alanları ve kullanım sıklığına bakıldığında ekonomik açıdan da oldukça büyük bir yer kapladığı görölmektedir. Bu sebeple yaşlanan malzemeyi gençleştirme çalışması büyük bir katkı sağlayacaktır. şekil 2.1.'de bitöüm örneği gösterilmiştir.



şekil 2.1. Bitöüm örneği

2.2. Asfalt Endüstrisinde Geri Dönüşüm Uygulamaları

Yer altı ve yer üstü kaynaklarının giderek azalması, sanayileşme sürecinin hızlanması ve küresel ölçekte nüfus yoğunluğunun artması gibi sorunlar dünya çapında geri dönüşümün ve sürdürülebilirliğin multidisipliner bir inceleme alanına dönüşmesine yol açmıştır. Kritik mesele haline gelen geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik asfalt konusunda 1970 senelerinde petrol sorunlarının öne çıkmasıyla ilk kez ele alınmıştır. Ülkemizde ise 1980'li yıllarda uygulamalar başlamış, fakat 2000'li yıllarda ivme kazanmıştır (Mazlum, 2014). 1980'lerin bitiminde petrol maliyetlerinde azalmalar görölmüştür ve bu durum asfalt üreticilerinin RAP uygulamasını kabul etmeye başlamasına sebep olmuştur. RAP, zamanla eskiyen ancak hala işlevsel olan asfalt yol kaplamalarının geri kazanılarak ve belirli tekniklerle yeniden işlenerek elde edilen malzemedir. RAP malzemesi, belirlenen standartlara uygun olarak konkasörlerde kırılıp elekten geçirildiği zaman, kaliteli ve uygun gradasyona sahip asfalt kaplı agregalar elde edilmektedir. Temin ve işlenme bakımından değerlendirildiğinde, doğal agregaların yerini alabilecek değerli bir alternatif malzeme olduğu belirtilmiştir (Gündoğdu, 2023). Asfalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Derneği (Asphalt Recycling and Reclaiming Association - ARRA) geri dönüşüm tekniklerini;

- i. Soğuk düzeltme (cold planing),
- ii. Sıcak geri dönüşüm (hot recycling),
- iii. Sıcak yerinde geri dönüşüm (hot in-place recycling),
- iv. Soğuk yerinde geri dönüşüm (cold in-place recycling),
- v. Tam derinlikten geri kazanma (full depth reclamation)

olacak şekilde beş farklı kategoride tanımlamıştır (Güngör ve diğ.). Belirtilen teknikler kullanılarak sağlanan geri dönüşümün faydalarını şu şekilde sıralamak mümkündür;

- i. Atık malzemenin tekrar değerlendirilmesi sayesinde ulusal kaynakların muhafazası ve ekonomik kazanç elde edilmesi,
- ii. Yeni malzeme gereksinimlerini en aza indirgeyerek doğal kaynakların güvence altına alınması,
- iii. Atık alanlarının gereksinimin azalması ve bu sayede çevresel etkilerin minimize edilmesi,
- iv. Mevcut kaplama üzerinde yenilik yapılmadığı için kot yükselmesi ve yeni tabakadaki yansıma çatlakları gibi olası sorunların önlenmesi,
- v. Tabaka eklenmesi yerine geri dönüşüm teknikleriyle yapılan onarımlar neticesinde yolun daha dayanıklı olması,
- vi. Enerji kullanımının optimize edilmesi (Ünlü, 2019).

Literatürde RAP malzeme ile ilgili birçok araştırma ve değerlendirmeler mevcuttur;

Karacasu ve Bilgiç (2009), farklı şekil ve boyuttaki atık lastiklerin asfalt betonuna katılmasıyla yapılan Marshall ve sünme deneylerinin sonuçlarını incelemiş ve atık lastiklerin asfalt betonunun işlevselliği üzerindeki tesirini araştırmışlardır. Analizleri sonucunda atık lastiklerin daha düşük mukavemet gerektiren binder tabakasında uygulanmasının makul olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak atık lastiklerin kullanımının sürdürülebilir bir yaşam ve ülke ekonomisi için olumlu katkılar sağlayabileceği aktarılmıştır.

Salta (2010), yaptığı çalışma sonucunda, geri dönüşüm sayesinde asfalt kaplamaların maliyetlerinin düştüğüne, doğal zenginliklerin kullanımının indirgendiğine, enerji verimliliğinin sağlandığına dikkat çekmiştir.

Mazlum (2014), çalışmasında, asfalt kaplamaların geri dönüşüm oranlarını değerlendirmek adına bitümlü sıcak karışım içerisine %10, %25 ve %40 oranlarında RAP malzemesi ilave etmiştir. Değerlendirmeleri neticesinde yansıma çatlaklarının önüne geçildiğini, asfalt üretim masraflarının düştüğünü ve atık alanların oluşumunun önlenerek çevre kirliliğinin indirildiğini tespit etmiştir.

Arapoğlu (2015), %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında RAP bulunduran bileşimlerin maliyet düzeylerini ele almış ve bu değerlendirmede bileşimin içerdiği RAP oranının yükselmesiyle paralel olarak ekonomik getirinin de yükseldiği sonucuna varmıştır.

Yavuz (2018), plent atıklarını bitümlü sıcak karışımlarda %0, %25, %30, %40 ve %50 oranlarında harmanlayarak bileşimlerin verimliliğini incelemiştir. İnceleme neticesinde atıkların geri kazanımı durumunda hem çevresel hem de ekonomik anlamda olumlu sonuçlar ortaya çıkardığını vurgulamıştır.

Keskin ve Karacasu (2018), çalışmalarında atık bor malzemelerinin asfalt betonu üretiminde uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Küresel çaptaki bor minerallerinin büyük kısmını barındırmakta olan Eskişehir ve çevre illerinde tezahür eden bor atıklarını yol inşaatı alanında faaliyete geçirmeyi hedeflemişlerdir. Elde ettikleri analiz sonuçları doğrultusunda uygulanan alternatif malzemelerin şartnameye uygunluk gösterdiğini kanıtlamışlardır.

Singh ve Singh (2019), laboratuvar analizlerini ve bazı kayda değer inceleme sonuçlarını irdeleyerek geri dönüştürülmüş ve atık malzemelerin uygulanabilir seçeneklerine bir çerçeve sunmuşlar, ayrıca bu atıkların çevre dostu yapı malzemelerine dönüşüm potansiyelini analiz etmişlerdir. Bunlara ek olarak geleneksel malzemeler yerine uygulanabilecek en elverişli atık malzemeleri değerlendirerek, bu malzemelerin plan ve projelerde ne şekilde kullanılabileceğini araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda çoğu firmanın bu malzemelerin faydalarından habersiz olduğu için malzemelerin inşaat alanında kullanımının kısıtlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

2.3. Atık Motor Yağı (AMY) ve Atık Bitkisel Yağ (ABY)

Çağımızda sürdürülebilirlik kavramı oldukça geniş bir yelpazede tanımlanmaktadır. Sürdürülebilirliğe çevresel farkındalık bağlamında bakıldığında AMY ve ABY konularının büyük bir paydaş olduğu görülmektedir. Literatürde, AMY ve ABY gibi çevresel açıdan tehdit oluşturan atıkların yalnızca bertaraf edilmesi değil, aynı zamanda bu atıkların alternatif katkı malzemesi olarak değerlendirilebilirliği de incelenmektedir. Yapılan çalışmalar, atık motor ve

bitkisel yağların uygun prosedürler doğrultusunda geri kazanılması durumunda hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Arshad ve diğ. (2015), çalışmaları kapsamında, araçlardan elde edilmiş olan AMY'nin yaşlanmış bitümün gençleştirilmesi için bir geri kazanım malzemesi olarak kullanılmasını irdelemişlerdir. İncelemelerinde, saf bitüm, yaşlanmış bitüm ve AMY katkısı (birbirini takiben %0, %3, %6 ve %9 miktarlarında) ile karıştırılmış, harmanlanmış bitümün (%50 taze bitüm + %50 yaşlanmış bitüm) reolojik niteliklerinin analizine yoğunlaşmışlardır. Hazırlanan bitüm numunelerinin reolojik niteliklerini belirlemek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve dinamik kesme reometresi (DSR) testlerini uygulamışlardır. AMY ilave edilen bitümün penetrasyon değerinin, AMY miktarı arttıkça yükseldiği tespit edilmiştir. Bitümdeki atık motor yağı miktarı arttıkça, yumuşama noktası azalmıştır. AMY katkısıyla bitümün viskozitesi, AMY oranı arttıkça düşmüştür. Bitümde AMY miktarının yükselmesi ile birlikte $G^*/\sin \delta$ parametresinin düştüğü tespit edilmiştir. Toplam bitüm ağırlığına göre %6 AMY miktarı, Malezya Bayındırlık Bakanlığı'nın şartnamelerine uygunluk gösterdiği için, bu miktar optimum oran olarak belirlenmiştir. Çalışmalarının sonucunda, AMY'nin yaşlanmış bitümdeki sertleşmeyi tersine döndürme ve onu saf bitüme benzer hale getirme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Wu ve Muhunthan (2018), AMY katkısının saf asfalt bağlayıcısının nispeten yerine kullanılabilirliğini analiz etmişlerdir. İki çeşit temel asfalt bağlayıcı (PG 64-28 ve PG 76-22), birbirini takiben %0, %5 ve %10 miktarlarında üç çeşit AMY yüzdesiyle karıştırılmıştır. İlk etapta, AMY'nin bu iki temel asfalt bağlayıcısı üzerindeki etkileri, dönen ince film etüvü (RTFO) ile kütle kaybı ve performans sınıflandırma (PG) testiyle incelenmiştir. Sonrasında, geliştirilen WEO-PG formülü esas alınarak, düşük sıcaklık PG değeri eşit olacak şekilde iki bağlayıcı üretilmiştir. Analizler sonucunda, daha fazla AMY içeriğinin temel asfalt bağlayıcısının PG değerini azalttığı, ancak bu azalış miktarının bağlayıcının çeşidine bağlı olduğu tespit edilmiştir. AMY varlığında, düşük sıcaklık PG'si eşdeğer olan bağlayıcılar, benzer sertlik veya kırılma özellikleri sergilememiştir. AMY'nin asfalt üzerinde yumuşatıcı bir etkisinin olduğu, elastikiyetini ve geri kazanım özelliğini olumlu yönde değiştirdiği sonucuna varılmıştır.

Qurashi ve Swamy (2018), AMY'nin hem yaşlanmış hem de saf bağlayıcı içeren asfalt karışımların viskoelastik özellikleri üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çeşitli miktarlarda AMY, saf bağlayıcı ve yaşlanmış bağlayıcı kullanılarak farklı asfalt karışımları üretmişler, bu karışımların mühendislik ve viskoelastik niteliklerini analiz

etmişlerdir. AMY katkısının, kontrol karışımıyla (yalnızca saf ve yaşlanmış bağlayıcı barındıran) karşılaştırıldığında, viskozite ve yumuşama noktası değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. AMY'nin %2-4 miktarında eklenmesinin, yaşlanmış bağlayıcı ilavesinin neden olduğu problemleri giderdiğini aktarmışlardır. Sonuç olarak, AMY'nin asfalt bağlayıcısına elastikiyet sağlamak üzere bir yenileyici olarak işlev görebileceğini tespit etmişlerdir.

Mostafa ve diğ. (2019), geleneksel asfalt ile %0, %15, %20 ve %25 RAP oranlarına sahip karışımların özelliklerini incelemiştir. Bu bağlamda AMY, polipropilen ve stiren-bütadien-kauçuk etkilerini katkı malzemesi çerçevesinde değerlendirmişlerdir. Çalışmada, AMY katkısını %0, %3, %5, %7, ve %9 oranlarında kullanmışlardır. AMY'nin RAP içeren sıcak karışım asfaltın işlevselliği hakkındaki etkilerini inceleyen laboratuvar çalışmalarında, AMY'nin RAP sebebi ile artan sertliği dengelediği sonucuna varılmıştır. Farklı AMY içeriklerine sahip karışımlarda, Marshall stabilitesinin azaldığı ve AMY'nin bitüm viskozitesini düşürmesi nedeniyle akma değerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, AMY ilavesinin, RAP'in sertliği artırıcı etkisinin aksine, karışımın sertliğini azalttığı vurgulanmıştır.

Gökalp ve diğ. (2019), çalışmalarında, ortadan kaldırılmadığı takdirde insan ve çevre sağlığı açısından oldukça tehlikeli olan AMY'ler ile %1 ve %5 oranları arasında değişiklik gösteren beş çeşit oran kullanılarak karışımlar hazırlanmışlar ve 70/100 penetrasyon sınıfında bulunan bitüme karıştırılarak modifiye etmişlerdir. Çalışmada hedeflenen noktanın bitümün temel performansındaki farklılıkları gözlemlemek olduğunu belirtmişlerdir. Hedeflenen sonuca ulaşmak için penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve parlama noktası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak penetrasyon indeksini tespit ederek sıcaklığa karşı tepkisellik gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde penetrasyon oranlarında yükseliş, viskozite, yumuşama ve parlama noktalarında düşüş, sıcaklığa karşı gösterilen tepkisellikte artış, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında düşüş görülmüştür. Ayrıca farklı test metodlarının, farklı miktarlarda modifikasyon indeksi ölçütleri gösterdiği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, AMY katkılı modifiye edilmiş bitümler saf bitümler ile karşılaştırıldığında daha düşük karıştırma ve serme sıcaklıklarına gereksinim duyduğundan, sıcak kaplama çeşitlerinde enerji tüketimini önemli miktarda indirgeyerek hem çevresel hem de ekonomik anlamda kayda değer faydalar sağlayacağı tespit edilmiştir.

Tadele ve Quezon (2021), çalışmaları kapsamında, asfalt bağlayıcılarında meydana gelen yaşlanmanın zamana bağlı olduğunu belirterek, 80/100 penetrasyon sınıfına ait olan bitümün zaman içerisinde kısa süreli yaşlanma özelliği ile yüksek derecede yaşlanmış olan asfalt bağlayıcının işlevselliğini AMY katkısıyla yenileme ihtimalini incelemişlerdir. Bu kapsamda,

en çok yaşılanmış olan bitüm numunesini, ağırlıkça %2, %5 ve %10 oranlarında olan AMY ile yenilemeyi denemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, yaşılanma süresi arttıkça penetrasyon ve süneklik değerlerinin azaldığını; yumuşama noktası, parlama noktası ve kütle kaybının ise arttığını tespit etmişlerdir. 145 dakikalık yaşılanma süresine sahip olan numunenin en fazla yaşılanmış bitüm olduğunu vurgularken; söz konusu numunede ideal AMY katkı miktarının %10 olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, 70°C üzerinde olan sıcaklıkta, yenilenmiş bağlayıcının tekerlek izi oluşumuna yatkın olduğu vurgulanmıştır.

Al-Saffar ve diğ. (2021), yaşılanmış asfaltın modifiye edilmesi için kullanılan AMY katkı çalışmalarını incelemiş; bu katkıların avantajlarını, dezavantajlarını ve olumsuz yan etkilerini ele almışlardır. İncelemeleri sonucunda, AMY katkısının yaşılanmış asfalt üzerinde hem artı hem de eksi yönlerinin olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebepten ötürü, diğer modifiye edici katkılarla birlikte AMY katkı kullanımının, yaşılanmış asfaltın her iki uçtaki (düşük ve yüksek değerlerde) sıcaklık performansını geliştirmek açısından verimli olabileceğini göstermişlerdir.

Sun ve diğ. (2024), yaşılanmış asfalt bağlayıcılarında AMY'lerin gençleştirici olarak kullanım potansiyeline yönelik son dönemde artan ilgiyi vurgulamışlardır. Çalışmalarında, farklı oranlarda (%3, %6, %9 ve %12) AMY içeren saf, yaşılanmış ve gençleştirilmiş asfalt bağlayıcıların moleküler dinamik yaklaşımıyla modellemesini gerçekleştirmişlerdir. İncelemeleri sonucunda AMY'nin yaşılanmış olan asfalt bağlayıcılarının yoğunluk ve viskozitesini kritik oranda düşürdüğünü vurgulamışlardır. Bunun yanında çatlak oluşumundaki direncin arttığına dikkat çekilmiştir. %9 oranında AMY içeriğinin, difüzyon katsayısını saf asfalt bağlayıcılarda bulunan değerlerin %93,17'sine kadar geri kazandırabilmekte olduğu görülmüştür.

Mehmood ve diğ. (2024), asfalt bağlayıcılarında yenileyici ve modifiye edici niteliğinde olabilecek AMY'leri ele almışlardır. Yol altyapısının zamanla artış göstermesi ile birlikte asfalt talebinin yükseldiğini, bununla birlikte çevresel ve ekonomik anlamda problemlerin çıktığını vurgulamışlardır. Sonuç olarak, kompozit modifikasyonun, asfalt bağlayıcının %8–15'inin kısmen ikame edilmesini mümkün kıldığı, ayrıca bu yöntemin kaplama endüstrisi açısından ekonomik alanda verimlilik sağlarken, sürdürülebilirlik kriterleri doğrultusunda da uzun vadeli bir çözüm alternatifi olabileceğine ulaşılmıştır.

Albayati ve diğ. (2024), petrol kaynaklarının azalması ve artmakta olan çevresel endişenin, çevreci asfalt bağlayıcı çözümlerinin üretilmesini harekete geçirdiğini belirtmişlerdir. Bu kapsamda, geleneksel petrol asfaltına sürdürülebilir bir seçenek olarak AMY ile modifiye

edilmiş doğal asfaltın performansını gözlemlemişlerdir. Araştırmalarının amacı ise, asfalt ağırlığına göre %10, %20 ve %30 oranlarında AMY ilavesi yapılan doğal asfaltın, bağlayıcının esnekliğini ve işlenebilirliğini arttırmak ve yüksek sıcaklık stabilitesini koruyan ideal karışım miktarını belirlemektir. Ulaştıkları bulgular neticesinde, %20 AMY içermekte olan doğal asfaltın, geleneksel petrol asfaltına oranla benzer işlevsellik gösterirken, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunan karayolu uygulamaları için gelecek vadettiği görülmüştür.

Abd Ali ve diğ. (2024a), yapmış oldukları çalışmada, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında RAP kullanıldığında, okside asfalt ve AMY ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarında mekanik verimlilik ile soyulmaya karşı dirençte artış gözlemlenmiştir. RAP malzeme %20, %30, %40 ve %50 miktarında sıcak karışım asfalta eklendiğinde ise, Marshall stabilite değerleri birbirini izleyen şekilde %10, %20, %28 ve %9,5 miktarlarında yükselme görülürken; akma değeri bütün RAP miktarlarında %1 oranında düşmüş, sadece %50 RAP ilavesinde bu düşme %3 oranında olmuştur. Birim ağırlık artmış, karışımdaki hava boşlukları uygun görülen sınırlar içerisinde kalmış ve soyulmaya karşı direnç sırasıyla %62, %77, %85 ve %76 oranlarında yükselmiştir.

Abd Ali ve diğ. (2024b), çalışmalarındaki amacın, bilhassa Irak gibi sıcak iklim bölgelerinde, AMY katkısı ile yenilenmiş RAP asfalt karışımlarının tekerlek izi ve neme karşı direnç niteliklerini analiz etmek olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, AMY ile modifiye edilmiş RAP içerikli asfalt karışımları, geleneksel asfalt karışımlarına oranla mekanik verimlilikte gelişmeler göstermiştir. Marshall stabilitesi %30'a, dolaylı çekme dayanımı %29'a, neme karşı direnç %19'a, soyulmaya karşı direnç %97'ye ve tekerlek izi direnci %64,5'e varan miktarlarda yükselme göstermiştir.

Chen ve diğ. (2014), ABY'lerin, yaşlanmış asfalt bağlayıcılarının fiziksel, reolojik ve kimyasal nitelikleri üzerindeki tesirini irdelemişlerdir. Neticede, ABY kullanımının optimum dozajında, yaşlanmış asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerinin, saf asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Ji ve diğ. (2017), geleneksel ağır yağ bazlı bitüm gençleştiricilerin yüksek sıcaklıklarda buharlaşma eğiliminden kaynaklanan sınırlamalarına bir alternatif olarak, ABY'lerin (mısır ve soya yağı) asfalt bağlayıcıların yenilenmesindeki etkinliğini araştırmıştır. ABY bazlı gençleştiriciler %2, %4, %6, %8 ve %10 olacak şekilde kullanılmıştır. Bunun sonucunda yaşlanmış haldeki asfaltın viskozite ve sertliğinin büyük bir oranda indirgendiği ve bunun sayesinde yorulmalar, düşük sıcaklıklardaki çatlamlar gibi durumlara karşı mukavemetin

arttığı görülmüştür. Özellikle önerdikleri oranın %6-8 olduğunu vurgulamışlardır. Elde edilen sonuca göre ABY'lerin, asfalt geri dönüşüm süreçlerinde yenilikçi ve çevre dostu bir çözüm olarak değerlendirilebileceğini ortaya koyulmuştur.

Azahar ve diğ. (2016), ABY kullanarak modifiye edilmiş olan asfalt bağlayıcısının işlevselliğini araştırmıştır. İşlenmemiş halde bulunan ABY'nin asidik değeri kimyasal modifikasyonla 1,66 mL/g'den 0,54 mL/g'ye gerilemiştir. Bu durum ABY'nin düşük doygunluğunu göstermekle birlikte asfalt bağlayıcısı ve ABY arasındaki etkileşim bağlarını kuvvetlendirmektedir. Testler sonucunda penetrasyon değerinin düştüğü, viskozite ve yumuşama noktasında artış olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda ise modifiye asfalt bağlayıcısının, öncesine oranla daha sert ve dayanıklı olduğu belirtilmiştir. ABY'nin asfalt bağlayıcısına ilave edilmesi, bağlayıcının reolojik verimliliğinin iyileşmesinde büyük bir rol oynarken, fiziksel niteliklerinde devam etmekte olan bazı kısıtlamalar olsa da temel verimlilik bakımından kayda değer bir ilerleme göstermektedir. Sonuç olarak, ABY'nin asfalt modifikasyonunda uygulanması hem ekonomik hem de çevresel olarak sürdürülebilir bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Singh-Ackbarali ve diğ. (2017), kullanılmış kızartma yağı atığının, asfalt yol yapımında performans artırıcı bir katkı malzemesi olarak uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Kullanılmış kızartma yağı atığının asfalt bağlayıcısına ilavesi kayma sertliği (G^* değeri) ve elastikiyet (faz açısı, δ) üzerinde kayda değer etkiler bırakmıştır. Kullanılmış kızartma yağı atığının oranı yükseldikçe bağlayıcılarının sertliği düşmüş ve elastikiyet yükselmiştir. Sonuçlar, kullanılmış kızartma yağı atıklarının çevre dostu bir biçimde tekrar uygulanabileceğini ve özel asfalt karışımları üretmek için potansiyel taşıdığını göstermiştir.

Gökalp ve diğ. (2018), %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında olacak şekilde ABY'leri, 70/100 penetrasyon kategorisindeki bitüme ilave ederek, homojen bir karışım elde etmişlerdir. Elde edilen homojen karışımlı örneklerle penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, düktilite ve iki ayrı sıcaklıkta dönel viskozimetre deneyleri yapılmıştır. Deneyler neticesinde ABY oranının artmasıyla penetrasyon değerinin de arttığı, fakat yumuşama ve parlama noktalarının düştüğü, ayrıca uzama oranının ve viskozitenin azaldığı kanaatine varılmıştır.

Majidifard ve diğ. (2018), ABY'lerin katkı malzemesi niteliğinde uygulanmasıyla, yüksek miktarda RAP içermekte olan asfalt karışımların verimliliğini araştırmışlardır. ABY, düşük sıcaklık mukavemetini ve işlenebilirliği arttırmıştır, fakat nem ve tekerlek izi direncini azaltmıştır. Asıl kritik olanın, yağ miktarının iyi seçilmesinin gerektiği vurgulanmıştır. Granül

kauçuk katkısının ise nem direncini arttırdığı, ayrıca işlenebilirliği iyileştirdiği görülmüştür. Sonuçta, iklim koşulları dikkate alınarak geri dönüştürücü katkı oranının optimize edilmesi gerektiği vurgulanmış ve yüksek RAP uygulamasının, uygun katkılarla birlikte mümkün olduğu gösterilmiştir.

Xinxin ve diğ. (2018), ABY'lerin yaşlanma özelliklerini daha iyi hale getirerek, asfaltın niteliklerini saf asfaltın niteliklerine çok benzer bir hale getirdiğini belirtmişlerdir. ABY'nin optimum oranının %13,4 olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, ABY'ler hem asfaltın performansını hem de güvenlik ile yaşlanma özelliklerini geliştiren, geri kazanımda uygulanabilecek etkili bir yenileyici madde olarak yüksek potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir.

Zahoor ve diğ. (2021), asfalt yenileme kapsamında ABY kullanımının en güncel özelliklerinden bahsetmişlerdir. ABY'nin asfalt bağlayıcısı üzerindeki kimyasal, reolojik, mekanik ve mikroskobik özelliklere tepkisini gözden geçirmişlerdir. Yapmış oldukları derlemelerin sonucunda, ABY'nin katkı olarak kullanılması, eğer ilave polimerik modifikasyon yapılmazsa tekerlek izi pahasına gerçekleştiğini, fakat karışımın yorulma ve termal çatlama niteliklerini olumlu yönde değiştirdiğini belirtmişlerdir. Genel açıdan bakıldığında, ABY'nin çevresel olarak sürdürülebilir yenileme malzemesi olarak uygulanmasının hem olumlu hem de olumsuz sonuçlar doğurabileceğini vurgulamışlardır.

Ali ve diğ. (2024), AMY ve ABY gibi gençleştirici katkıların, yaşlanmış asfalt bağlayıcıları üzerindeki verimliliğini ve performansını incelemişlerdir. Deney analizleri, bu gençleştirici katkıların asfaltın düşük sıcaklık niteliklerini daha iyi hale getirdiğini, sertliğini düşürdüğünü ve bunun sonucunda geri kazanım sürecinde asfaltın tekrar kullanımını mümkün kıldığını göstermiştir. 18%'lik bir gençleştirici dozajı, asfalt karışımının niteliklerini daha iyi hale getirmiştir. Bu sonuçlar, gelecekte bu gençleştirici katkıların maksimum verimlilik için optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu yöntem hem maliyetleri hem de çevresel etkiyi azaltmaktadır.

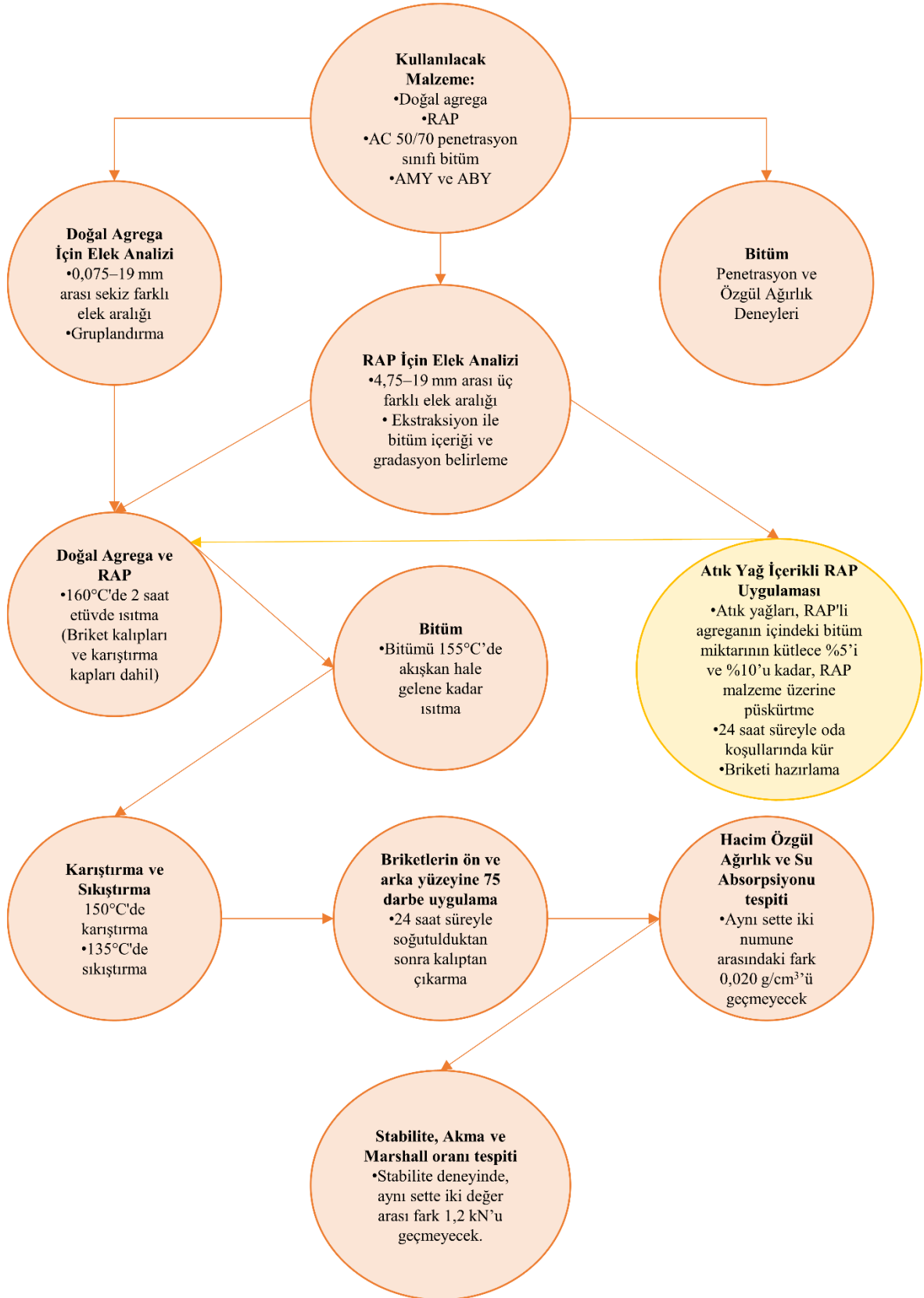


3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, belirli hipotezlerin incelenmesi amacı ile deneysel bir araştırma yöntemi benimsenmiştir. Deneysel çalışma, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin ilişkilerini saptamak ve bu ilişkilerin niteliğini çözümleyebilmek adına en uygun, etkili ve verimli araştırma stratejisi olarak seçilmiştir. Deneyler, Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Geotekniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın güvenilirliğini arttırmak adına, veri toplama aşamasında kullanılmış olan teknikler ve araçlar özenle seçilmiştir. Şekil 3.1'de deneylerin yapıldığı Ulaştırma Geotekniği Laboratuvarı gösterilmiştir. Deneysel çalışmanın kapsamını gösterir akış diyagramı ise Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Ulaştırma Geotekniği Laboratuvarı



Şekil 3.2. Deneysel çalışma akış diyagramı

3.1. Malzeme

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemeler; doğal agrega, RAP, bitüm, AMY, ABY ve bir takım yardımcı laboratuvar ekipmanlarından oluşmaktadır. Yapılan deneylerin amacı ve güvenilirliği doğrultusunda temel yol yapım malzemeleri ve alternatif katkı malzemeleri dahil olmak üzere bütün malzemeler dikkatli ve özenli seçilmiştir.

3.1.1. Doğal agrega

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, dayanıklılığı ve sertliği ile ön plana çıkan bazalt esaslı doğal agregalar seçilmiştir. Bahsi geçen agregalar, Bursa-İznik bölgesinde faaliyet yürüten lisanslı Efor Madencilik taş ocağından tedarik edilmiştir. Kırma-eleme işlemi gerçekleştirilen bazalt esaslı agregalar, asfalt uygulamalarında sıklıkla kullanılan ve üstün performans niteliklerine sahip malzemelerdir. Şekil 3.3'te söz konusu bazalt esaslı agregaların kırma-eleme işlemine tabi tutulduğu taş ocağı ve Şekil 3.4'de deneyde kullanılmak üzere temin edilen agregalar gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Efor Madencilik'e ait taş ocağı



Şekil 3.4. Temin edilen doğal agregalar

3.1.2. Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama (RAP)

Bu deneysel çalışmada kullanılmış olan RAP malzemesi, ömrünü kısmen tamamlamış yol kaplamalarının freze tekniği uygulanarak yüzeyin sökülmesi ile elde edilmiştir. RAP malzemesi Yalova sınırlarında bulunan Taşköprü Belediyesi'ne ait stok alanından temin edilmiştir. RAP malzemesi dengeli bir yapıya ulaşması amacıyla söküm işleminden sonra elenerek ayrıştırılmış ve büyük halde bulunan parçalar ayrıştırılmıştır. Şekil 3.5'te RAP malzemesi, Şekil 3.6'da ise RAP malzemesine ait stok alanı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Temin edilen RAP malzeme



Şekil 3.6. RAP malzemenin stok alanı

3.1.3. Bitüm

Deneyssel çalışmada bağlayıcı malzeme olarak AC 50/70 bitüm kullanılmıştır. Belirtilen bitüm Tüpraş, İzmit Rafinerisi'nden temin edilmiştir. AC 50/70 bitüm asfalt karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak sıklıkla uygulanan ve orta derecede sertliğe sahip bir bitüm çeşididir. Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen söz konusu bitüm Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. AC 50/70 bitüm

3.1.4. Atık motor yağı (AMY) ve atık bitkisel yağ (ABY)

Deneyssel çalışmada kullanılan AMY ve ABY asfalt geri dönüşümünde bitüm gençleştirici olarak kullanılması için temin edilmiştir. AMY'ler, çoğu zaman araçların bakım ve onarım aşamalarında ortaya çıkan yağlardır. AMY'nin temini Yalova Oto Sanayi'den yapılmıştır. ABY, çoğu zaman gıda üretimi ve yemek yapımından sonra ortaya çıkan yağlardır. Bu çalışmada kullanılan ABY, kızartma yapımı sonucunda oluşan atık yağlardan elde edilmiştir. Şekil 3.8'de söz konusu AMY ve ABY gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Atık motor yağı ve atık bitkisel yağ

3.2. Malzemelerin Ön İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında, doğal agrega, RAP ve bitüm malzeme karakterizasyonları için bir ön inceleme yapılmıştır. Yapılan ön incelemeler sıralı ve detaylı olarak irdelenmiştir.

3.2.1. Elek analizi

Elek analizi deneyi yapılmasındaki amaç, çeşitli boyutlardaki dane bölümlerinin eleme tekniğiyle fraksiyonlarına ayırarak dane çaplarının boyut spektrumunu incelemektir (ASTM C136/C136M, 2019). Elekler çoğunlukla en geniş çaplı elekten en dar çaplı eleğe doğru sıralanır ve üst üste olacak şekilde yerleştirilir. Elek seti uygun sıraya yerleştirildikten sonra, mekanik bir sarsıcı yardımıyla titreştirilebilir veya elle eleme şeklinde gerçekleştirilebilir. Her bir elek üstünde kalan malzeme miktarları ayrı ayrı olarak tartılır ve toplam numunedeki yüzde dağılımları hesaplanır. Buradan alınan verilerle agregaların veya benzeri malzemelerin dane boyutları hakkında hem grafiksel hem de istatistiksel olarak bilgiler analiz edilir. Kullanılan malzemelerin mühendislik niteliklerini ve performanslarını anlamada büyük rol oynayan dağılım eğrileri, önemli ölçüde yol yapımı, asfalt üretimi gibi uygulamalarda ön plana çıkar ve malzemelerin granülometrik yapısının denetimini sağlar.

Bu tez çalışması için yapılan elek analizi deneyinde, eleme yöntemi olarak el ile eleme yöntemi tercih edilmiştir. Hem doğal agregalar hem de RAP malzemeler ayrı ayrı olacak şekilde elenmiş ve gruplara ayrılmıştır.

Doğal agregalar için;

- i. 3/4"- 1/2" (19-12,5 mm arası)
- ii. 1/2"-3/8" (12,5-9,5 mm arası)
- iii. 3/8"-No.4 (9,5-4,75 mm arası)
- iv. No.4-No.10 (4,75-2,0 mm arası)
- v. No.10-No.40 (2,0-0,425 mm arası)
- vi. No.40-No.80 (0,425-0,180 mm arası)
- vii. No.80-No.200 (0,180-0,075 mm arası)
- viii. No.200 (0,075 mm altı)

olacak şekilde 8 farklı elek aralığı esas alınmıştır.

Şekil 3.9'da laboratuvar ortamında doğal agregaların el ile eleme yöntemi ile elenmesi gösterilirken, Şekil 3.10'da doğal agregaların gruplandırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Doğal agregaların el ile eleme yöntemi ile elenmesi



Şekil 3.10. Doğal agregaların gruplandırılması

Agregaların aşınma tabakalarında kullanılması uygunluğunun tespiti için, fiziksel özelliklerinin tayini gerekmektedir. Çalışmada kullanılacak olan agregaların uygunluğu için Karayolları Teknik Şartnamesi (2023) – Kısım 407’de bulunan 407-3 Kaba Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri ve 407-4 İnce Agreganın Özellikleri tabloları baz alınmıştır. Değerler Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (KGM, 2023)

Tablo-407-3 Kaba Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri		
Deney	Şartname Limitleri ^c	Deney Standardı
	Aşınma	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 27 (LA ₂₇)	TS EN 1097-2 ^a (AASHTO T 96)
Aşınma Direnci (Micro-Deval) ^b , % Kayıp	≤ 20 (M _{DE20})	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %	16 (MS ₁₆)	TS EN 1367-2
Kırılmış, ağırlıkça % (Tüm yüzeyi kırılmış - tüm yüzeyi yuvarlak)	$\geq 95 - \leq 0$ (C _{95/0})	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	≤ 25	BS 812
	≤ 20 (FL ₂₀)	TS EN 933-3 ^a

Tablo 3.1. (Devam) Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (KGM, 2023)

Tablo-407-3 Kaba Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri		
Deney	Şartname Limitleri ^c	Deney Standardı
	Aşınma	
Cilalanma Değeri, %	≥ 50 (PSV ₅₀)	TS EN 1097-8
Su Emme, %	$\leq 2,0$ (WA ₂₄ 2,0)	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, % Bitümle Kaplı Yüzey (24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	TS EN 12697-11 (Kısım 403 EK-A)
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	$\leq 0,3$	ASTM C 142 AASHTO T 112
^a Referans metot. ^b Gerek görüldüğünde yapılacaktır. ^c Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043'deki sınıfını gösterir.		

Tablo 3.2. İnce agreganın özellikleri (KGM, 2023)

Tablo-407-4 İnce Agreganın Özellikleri			
Deney		Şartname Limitleri	Deney Standardı
		Aşınma	
Plastisite İndeksi %		NP	TS 1900-1
Organik Madde, (% 3 NaOH ile)		Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %		≤ 2,0 (WA ₂₄ 2,0)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 1,5 (MB _{1,5})* ≤ 1,5 (MB _{3,0})*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 3,0 (MB _{3,0})*	
* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.			

Doğal agregalara ait fiziksel özellikler Efor Madencilik'ten temin edilmiştir. Söz konusu fiziksel özellikler Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Doğal agregalara ait fiziksel özellikler

DENEY	SONUÇ
Mg₂SO₄ Donma Kaybı, (%)	1,5
L.A. Aşınma Kaybı, (%)	15
Yassılık İndeksi, (%)	12
Plastisite İndeksi, (%)	NP
Su Absorpsiyonu, (%)	İri = 0,38 İnce = 0,42
Soyulma Mukavemeti, (%)	70-75
Metilen Mavisi Deneyi, (%)	0,8

Bir sonraki adımda doğal agregalar için (ASTM C136/C136M, 2019) kapsamında gerçekleştirilmiş olan elek analizi sonuçları Tablo 3.4'te yer almaktadır.

Tablo 3.4. Doğal agrega elek analizi sonuçları

ELEKLER (ASTM C-136)		GEÇEN %		
		12-19 mm arası	5-12 mm arası	0-5 mm arası
3/4"	19,1 mm	100	100	100
1/2"	12,7 mm	38,3	97,4	100
3/8"	9,52 mm	5,5	78,6	100
No.4	4,75 mm	3,0	16,3	94,2
No.10	2,00 mm	2,7	6,3	60,9
No.40	0,425 mm	2,2	3,2	22,7
No.80	0,180 mm	2,0	2,8	14,3
No.200	0,075 mm	1,9	2,4	10,2

RAP malzeme için;

- i. 3/4"- 1/2" (19-12,5 mm arası)
- ii. 1/2"-3/8" (12,5-9,5 mm arası)
- iii. 3/8"-No.4 (9,5-4,75 mm arası)

olacak şekilde 3 farklı elek aralığı esas alınmıştır.

Şekil 3.11’de RAP malzemenin gruplandırılmadan önceki görüntüsü, Şekil 3.12’de laboratuvar ortamında RAP malzemenin elenmesi ve Şekil 3.13’te gruplandırıldıktan sonraki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11. RAP malzemenin gruplandırılmadan önceki görüntüsü



Şekil 3.12. RAP malzemenin el ile elenmesi



Şekil 3.13. RAP malzemenin gruplandırıldıktan sonraki görüntüsü

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılan ekstraksiyon işlemi öncesi ve sonrası elek analizleri Tablo 3.5’te verilmiştir. RAP içeriğinde kuru mıcıra göre bitüm içeriği (Wa) ise %4,6 olarak bulunmuştur.

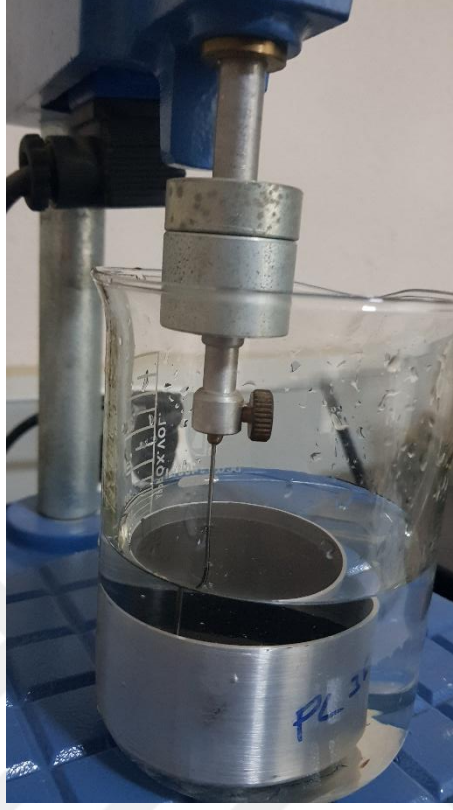
Tablo 3.5. RAP malzemeye ait elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (inç / mm) ASTM E- 11 / TS 1227 ISO 3310- 1		GEÇEN (%)	
		Ekstraksiyon Öncesi	Ekstraksiyon Sonrası
1½"	37,5 mm	100,0	100,0
1"	25 mm	100,0	100,0
¾"	19,1 mm	99,4	100,0
½"	12,7 mm	61,0	81,8
⅜"	9,52 mm	32,8	65,0
No.4	4,75 mm	2,7	29,6
No.10	2,00 mm	2,0	20,5
No.40	0,425 mm	1,5	13,0
No.80	0,180 mm	1,4	10,5
No.200	0,075 mm	1,2	7,8

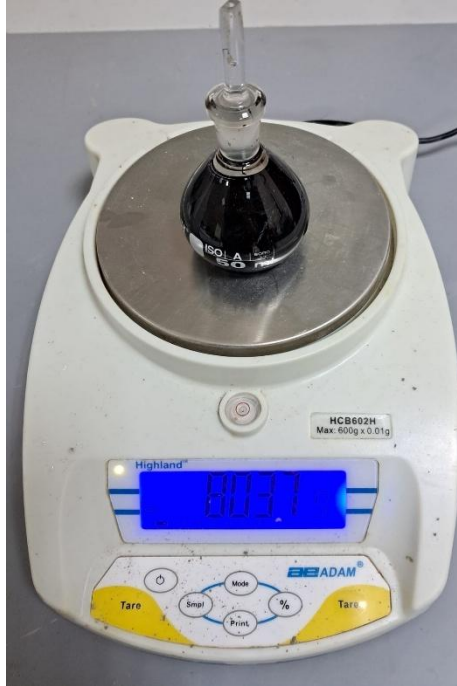
3.2.2. Penetrasyon ve özgül ağırlık deneyi

Deneyler kapsamında bağlayıcı olarak kullanılacak olan AC 50/70 bitüm üzerinde penetrasyon (TS EN 1426, 2024) ve özgül ağırlık deneyleri (TS EN 15326, 2009) uygulanmıştır.

Penetrasyon deneyine ait görsel Şekil 3.14’te, özgül ağırlık deneyine ait görsel Şekil 3.15’te verilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen bitüme ait sonuçlar ise Tablo 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.14. Bitüme uygulanan penetrasyon deneyi



Şekil 3.15. Bitüme ait özgül ağırlık deneyi

Tablo 3.6. Bitüme ait penetrasyon ve özgül ağırlık deney sonuçları

DENEY	SONUÇ	STANDART	Şartname (KTŞ 2023)
Penetrasyon (25 °C) (0,1 mm)	57	TS EN 1426	Max 70
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1,025	TS EN 15326	-

3.3. Karışım Optimizasyonu

3.3.1. Karışım gradasyonunun tespiti

Tezin bu bölümünde, Geleneksel Aşınma TİP-1 için Karayolları Teknik Şartnamesi (2023) tarafından tanımlanan karışım gradasyonu esas alınarak bir reçete oluşturulmuştur. Söz konusu karışım gradasyonu Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Aşınma (TİP-1) tabakası karışım gradasyonu

AŞINMA (TİP-1) TABAKASI KARISIM GRADASYONU									
KULLANIM ORANI (%)		10	45	45	KARIŞIM GRADASYONU	AŞINMA TİP-1 LİMİTLERİ (KTŞ-2023)			
		12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm		ŞARTNAME		TOLERANS	
3/4"	19,1 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100
1/2"	12,7 mm	38,3	97,4	100,0	92,7	88	100	88	95
3/8"	9,52 mm	5,5	78,6	100,0	80,9	72	90	76	84
No.4	4,75 mm	3,0	16,3	94,2	50,0	42	52	44	52
No.10	2,00 mm	2,7	6,3	60,9	30,5	25	35	27	33
No.40	0,425 mm	2,2	3,2	22,7	11,9	10	20	10	16
No.80	0,180 mm	2,0	2,8	14,3	7,9	7	14	7	12
No.200	0,075 mm	1,9	2,4	10,2	5,9	3	8	4	8

12-19 mm arası kullanım oranı %10, 5-12 mm arası %45 ve 0-5 mm arası %45 olacak şekilde toplamda 1100 gramlık bir agrega numunesi hazırlanmıştır. Belirlenmiş olan reçete sonrasında optimum bitüm seçimi, (ADTPF, 2024), (AI, 1986), (FHWA, 1997) ve (KGM, 2021) 'de uygulanan Denklem 3.1 doğrultusunda yapılmıştır.

3.3.2.Optimum bitümün seçimi

Asfalt karışımlarının performanslarını, dayanıklılıklarını ve uzun ömürlülüklerini sağlamak üzere optimum bitüm seçimi yapılmaktadır. Söz konusu oran birçok parametreye bağlıdır. Denklem 3.1'de verilen eşitlik genellikle RAP içeren karışımların tasarımında uygulanmakta olup, yapılan laboratuvar deneyleri için başlangıç noktası niteliğinde yararlanılmaktadır.

$$P = 0,035 \times a + 0,045 \times b + Kc + F \quad (3.1)$$

P: Bitüm oranı (%)

a: Agreganın, 2 mm'lik elekten geçen kısmının ağırlıkça yüzdesi,

b: 2 mm ile 0,075 mm aralığındaki agrega miktarının ağırlıkça yüzdesi,

c: 0,075 mm'lik elekten geçen agrega miktarının ağırlıkça yüzdesi. (a, b, c değerleri tam sayıya yuvarlanır)

K, ince malzeme oranı olan c değerine bağlı olarak seçilir:

Eğer $c \leq 5$ ise, **K** = 0,20

$6 \leq c \leq 10$ aralığında ise, **K** = 0,18

$11 \leq c \leq 15$ aralığında ise, **K** = 0,15

F, 0 ile 2 arasında bir katsayıdır ve agreganın su emme kapasitesinin yaklaşık üçte biri olarak alınabilir. Bu tez çalışmasında Denklem (3.1) için tespit edilen değerler ve bunun sonucunda hesaplanan optimum bitüm oranı, Tablo 3.8'de gösterilmiştir. a, b, c ve K değerleri Tablo 3.7'deki karışım gradasyonundan, F değeri ise Tablo 3.3'deki agrega fiziksel özelliklerinden elde edilmiştir.

Tablo 3.8. Optimum bitüm seçimi

P (%)	4,75
a	69
b	25
c	6
K	0,18
F	0,4

3.4. Marshall Deneyi ile Optimum RAP Oranının Tespiti

Uygun olan optimum bitüm oranı seçimi yapıldıktan sonra, briket üretimi prosesinde (AI, 2014) yöntemi baz alınarak aşamalar gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Marshall briketi hazırlama

İlk aşamada, karışım gradasyonunda belirlenmiş olan doğal agrega ağırlıkları 12 numune için ayrı ayrı tartılmış ve paketlenmiştir. Ardından RAP malzeme doğal agregalar ile karışmaması için %0, %10, %30 ve %50 oranlarında olacak şekilde ayrıca tartılmış ve paketlenmiştir. Toplamda oluşturulan 12 paketleme için üretim seviyeleri şu şekildedir;

Seviye 1: %0 RAP içeriği (Kontrol Numunesi) = 3 adet üretilmiştir.

Seviye 2: %10 RAP içeriği = 3 adet üretilmiştir.

Seviye 3: %30 RAP içeriği = 3 adet üretilmiştir.

Seviye 4: %50 RAP içeriği = 3 adet üretilmiştir.

12 adet numuneye ait detaylı karışım oranları EK-1’de verilmiştir.

Şekil 3.16’da doğal agrega ve RAP malzemenin reçete gereğince uygun miktarda tartımına bir örnek gösterilirken, Şekil 3.17’de fraksiyonlarına ayrılmış agregalar ve Şekil 3.18’de fraksiyonların paketlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Doğal agrega ve RAP malzemenin tartım işlemi



Şekil 3.17. Fraksiyonlarına ayrılmış agregalar



Şekil 3.18. Fraksiyonların paketlenmesi

İkinci aşamada, öncelikle doğal agrega numuneleri bir tepsi üzerine serilmiştir. Ardından tepsi üzerine serilen doğal agregaların üzerine uygun RAP oranı ilavesi yapılmıştır (%0, %10, %30, %50). (AI, 2014)'te belirtildiği üzere etüv 160°C seviyesine ulaşana kadar beklenilmiştir. Isınan etüv içerisine, briket kalıpları, karıştırma kabı, agrega, RAP yerleştirilmiş ve iki saat süre ile ısıtılmıştır. Kullanılan bağlayıcı bitüm ise aynı etüvde 155°C'de 30 dakika süre ile

ısıtılmıştır. Isınan numuneler çıkartıldıktan sonra 150°C’de karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kuru karışım işlemi gerçekleştirilen numuneye belirlenmiş olan optimum bitüm ilavesi (%4,75) yapılmıştır. Bağlayıcı görevi gören bitüm, karışıma homojen bir şekilde yayılana kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, önceden etüvde ısıtılmış olan briket kaplarına sıcak karışım ilave edilmiştir. Karışım kalıba tabakalar halinde yerleştirilmiş ve her tabakanın eşit şekilde dağılması sağlamak amacıyla, ısıya dayanıklı, düz yüzeyli metal bir spatula kullanılmıştır. Aynı zamanda, spatula ile kalıp kenarlarına yapışan parçalar kazınarak tekrar karışıma dahil edilmiş, böylece numune içerisinde malzeme kaybı ve boşluk oluşumu engellenmiştir. Karışımın briket kalıplarına yerleştirilmesinin ardından 135°C’de sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Briket kalıpları, Marshall tokmağına oturtulduktan sonra, Karayolları Teknik Şartnamesi kapsamında Geleneksel Aşınma TİP-1 için uygun görülen 75 darbe uygulaması yapılmıştır. Briketin ön yüzüne 75, arka yüzüne 75 olacak şekilde toplamda 150 darbe uygulanmıştır. Marshall tokmağı cihazından çıkarılan briketler, 24 saat boyunca oda sıcaklığında beklemeye alınmıştır. Numuneler 24 saatin ardından kalıplarından titizlikle çıkartılmış ve her bir numune grubuna göre numaralandırılmıştır. Numune hazırlama süreci Şekil 3.19 – Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Agrega ve RAP’in ısıtma işlemi için hazırlanması



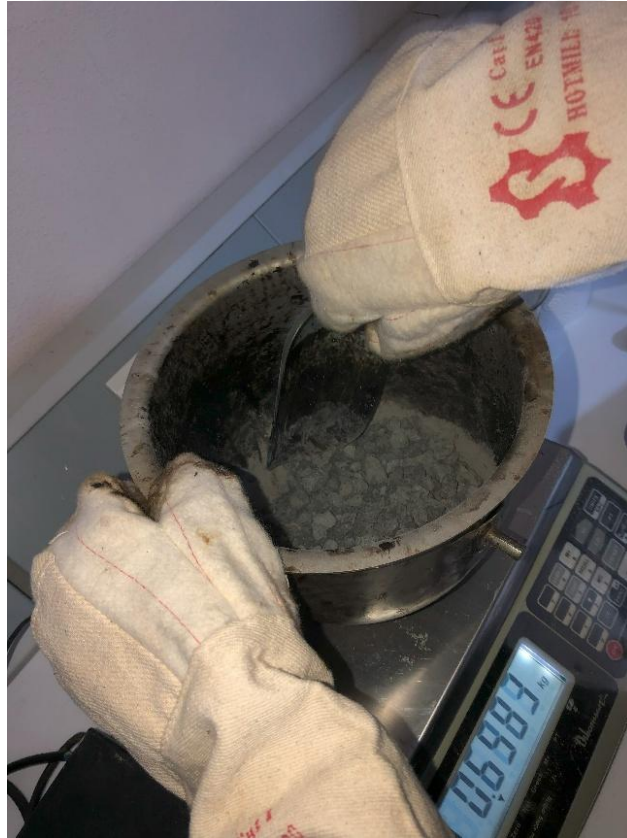
Şekil 3.20. Etüvün uygun sıcaklığa getirilmesi



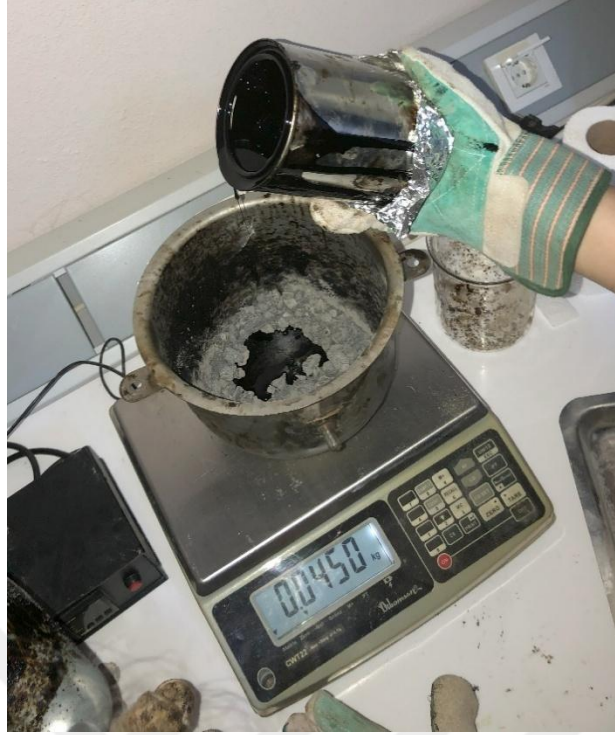
Şekil 3.21. Isıtılmaya bırakılan kalıplar, karıştırma kabı



Şekil 3.22. Isıtılmaya bırakılan agrega ve RAP



Şekil 3.23. Etüvden çıkarılan agrega ve RAP'in kuru karışımı



Şekil 3.24. Bitümün ilave edilmesi



Şekil 3.25. Karıştırma işlemi



Şekil 3.26. Karışımın briket kalıplarına yerleştirilmesi



Şekil 3.27. Briket kalıbının Marshall tokmağı cihazına yerleştirilmesi



Şekil 3.28. Marshall tokmağında briketlere darbe uygulaması



Şekil 3.29. Soğumaya bırakılan numune



Şekil 3.30. 24 saat bekletilen numunenin kalıptan çıkarılması



Şekil.3.31. Kalıptan çıkarılan numunelerin numaralandırılması

Üçüncü ve son aşamada, üretimi gerçekleştirilen 12 adet numunenin, hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı tespiti için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan her bir numune için, öncelikle kumpas yardımı ile briketlerin kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Ölçümü yapılan numunelerin ilk olarak hassas terazi yardımı ile havadaki ağırlığı tespit edilmiştir. Havadaki ağırlığı tespit edildikten sonra numunelerin sudaki

ağırlıkları ölçülmüştür. Sudaki ağırlıkları ölçülen numunelerin daha sonrasında doymuş yüzey koşullarına getirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, briketler sudan çıkarıldıktan sonra yüzeylerinde bulunan fazla suyun alınması için emici özellikte, tüy bırakmayan bir havlu kullanılmıştır. Kurulama işlemi sırasında, briket yüzeyine zarar vermemek ve gözeneklerdeki suyu etkilememek adına yumuşak ve bastırmadan silme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, sadece yüzeydeki serbest suyun alınmasını sağlamakta; agreganın iç yapısında yer alan veya gözeneklerde tutulan suyun ölçüm sonuçlarını etkilemesini önlemektedir. Bu şekilde yüzeysel kuruluğa getirilen briketler, doymuş kuru yüzey ağırlık ölçümüne hazır hale getirilmiştir. Elde edilen verilerin kaydedilmesinden sonra, briketlerin stabilite ve akma özelliklerinin tayin edilmesinde, suya doymuşluk seviyesine erişebilmesini sağlayabilmek için su banyosu yöntemi uygulanmıştır. Su banyosundaki kürlenme işlemi için suyun 60°C olması gerekmektedir. Briketler istenilen sıcaklığa ulaşan suya, altışar olmak üzere özenle yerleştirilmiş ve 30 dakika boyunca su banyosunda kürlenmiştir. Kürlenme işlemi tamamlanan briketlerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için Marshall stabilite test cihazı kullanılmıştır. Su banyosunda bekletme süresinin sonunda, numune hızlıca alınarak Marshall stabilite cihazının numune yatağına dikkatli şekilde yerleştirilmiştir. Numunenin cihaz içerisine yerleştirilmesinden sonra, testin hemen başlatılması gerekmektedir. Bu süreçte, numunenin sıcaklığını koruyarak cihaz içerisinde soğumasına fırsat verilmemesi, ölçüm doğruluğu açısından kritik önem taşımaktadır. Bütün numuneler için aynı işlemler tekrarlandıktan sonra, bilgisayar ile bütünleşik halde çalışan Marshall stabilite test cihazından sonuçlar kaydedilmiştir. Bu süreçte gerçekleştirilen aşamalar Şekil 3.32 – Şekil 3.40 arasında gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Kumpas yardımı ile briket kalınlığı ölçümü



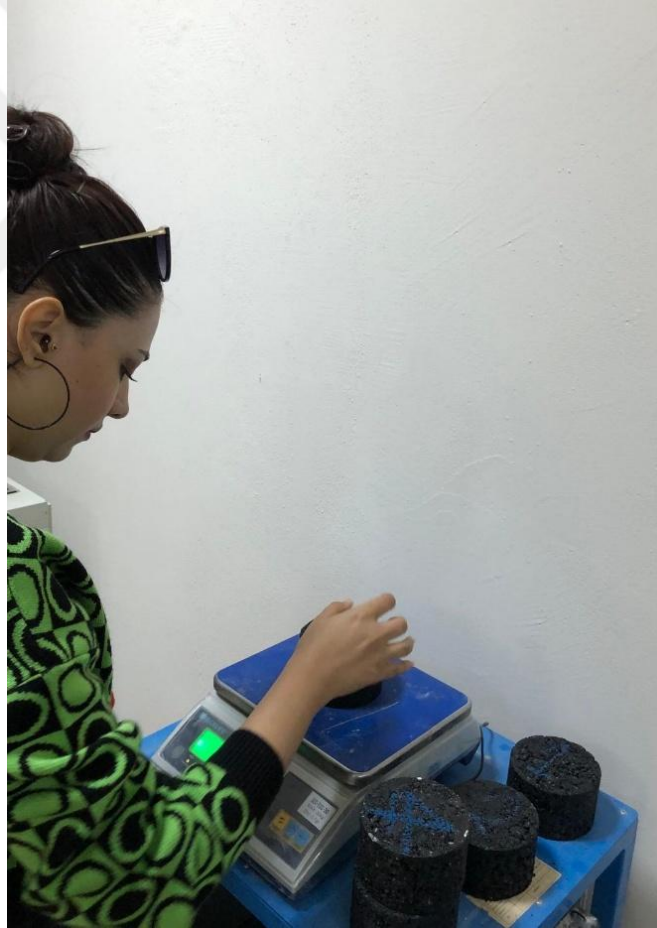
Şekil 3.33. Briketlerin havadaki ağırlığının ölçülmesi



Şekil 3.34. Briketlerin sudaki ağırlığının ölçülmesi



Şekil 3.35. Briketlerin kurulanması



Şekil 3.36. Briketlerin doymun yüzey kuru ağırlıklarının ölçülmesi



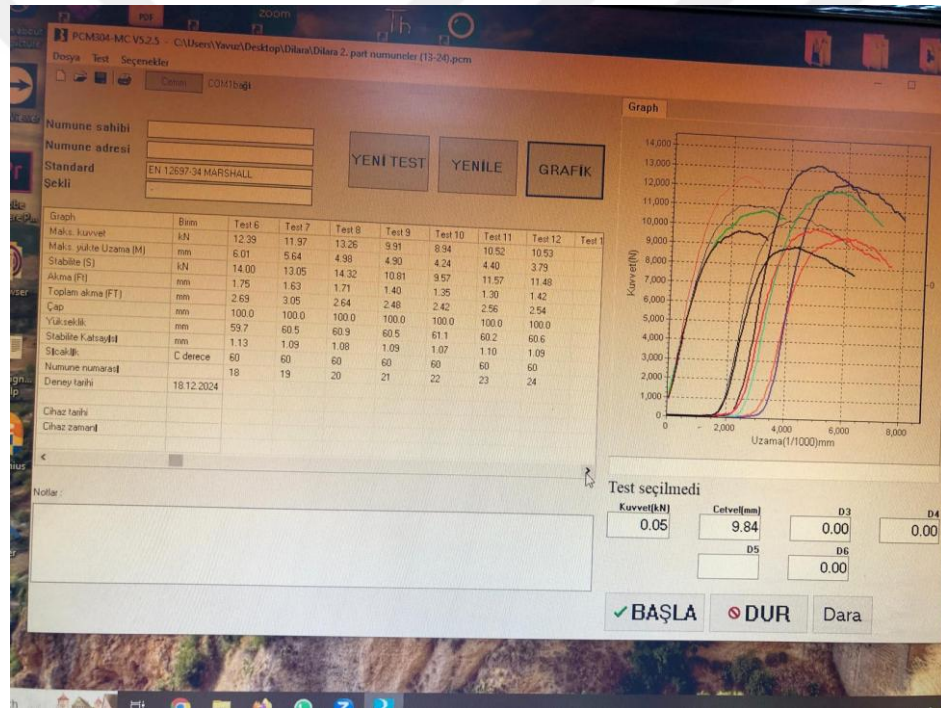
Şekil 3.37. Su banyosu sıcaklık kontrolü



Şekil 3.38. Briketlerin su banyosuna yerleştirilmesi



Şekil 3.39. Briketin Marshall test cihazına yerleştirilmesi



Şekil 3.40. Marshall test sonuçlarının alınması

3.4.2. Optimum RAP oranının belirlenmesi

Yapılan deneyler kapsamında numuneler için hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı değerleri elde edilmiştir. Değerlerin elde edilmesinin amacı ise, briketlerin mühendislik özelliklerini en doğru şekilde yorumlayabilmektir.

- **Hacim Özgül Ağırlık (g/cm^3):** Hacim özgül ağırlık, briketlerin yoğunluk özelliklerini göstermekle birlikte, birim hacimdeki kütleyi ifade etmektedir. İncelenen malzemenin gözeneklilik derecesini ve yapısal olarak sıklığını anlamak için önemli bir parametredir.

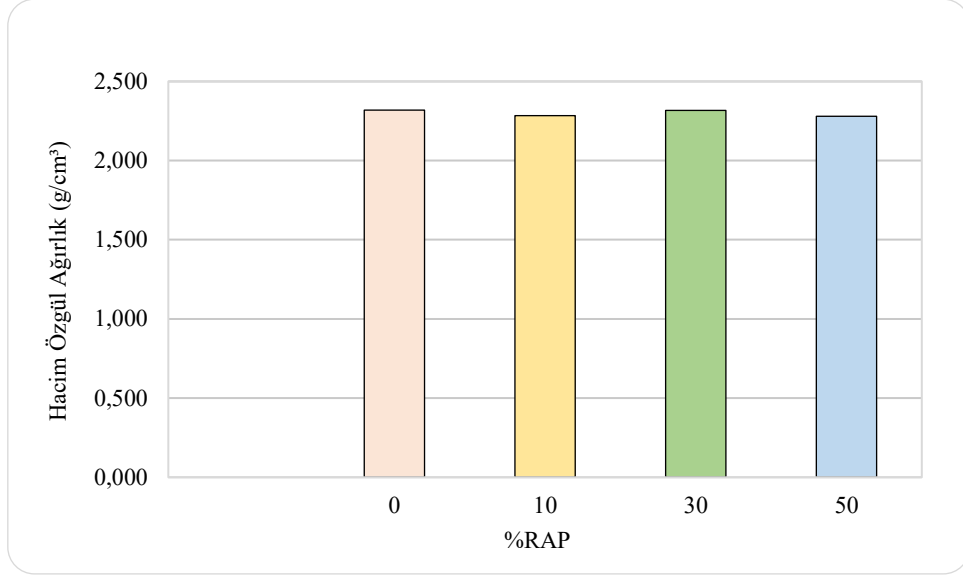
- **Su Absorpsiyonu (%):** Briketlerin gözeneklilik özelliklerini ve geçirimsizliklerini tespit edebilmek için su emme kapasitesi oldukça kritik bir ölçüttür.
- **Stabilite (kN):** Stabilite kavramı, briketin uygulanan yük karşısında gösterdiği direnci ifade etmektedir. Bu kavram genellikle Marshall stabilite test cihazı ile elde edilir ve briketin yapısal anlamda dayanımını, ayrıca servis yüklerine maruz kaldığında deformasyona uğramadan taşıyabileceği maksimum değeri göstermektedir.
- **Akma (mm):** Akma değeri genellikle, maruz bırakılan yük sonrasında briketin ne kadar şekil değiştirdiğini, bir başka deyişle deformasyon kapasitesinin ne kadar olduğunu gösterir.
- **Marshall Oranı (kN/mm):** Stabilitenin akmaya olan oranı Marshall oranını temsil eder. Bu oran malzemenin rijitliği (sertliği) hakkında bilgi verirken, yük uygulandığında ne derece dirençli ve formunu koruyabilir durumda olduğunu gösterir.

Deneyler sonucunda elde edilen bütün değerler tablolaştırılmış ve ayrıca tek tek grafik haline getirilmiştir. 12 adet numune için elde edilen hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı değerleri Tablo 3.9’da gösterilmiştir.

Tablo 3.9. Deney sonuçları (1-12 numune arası)

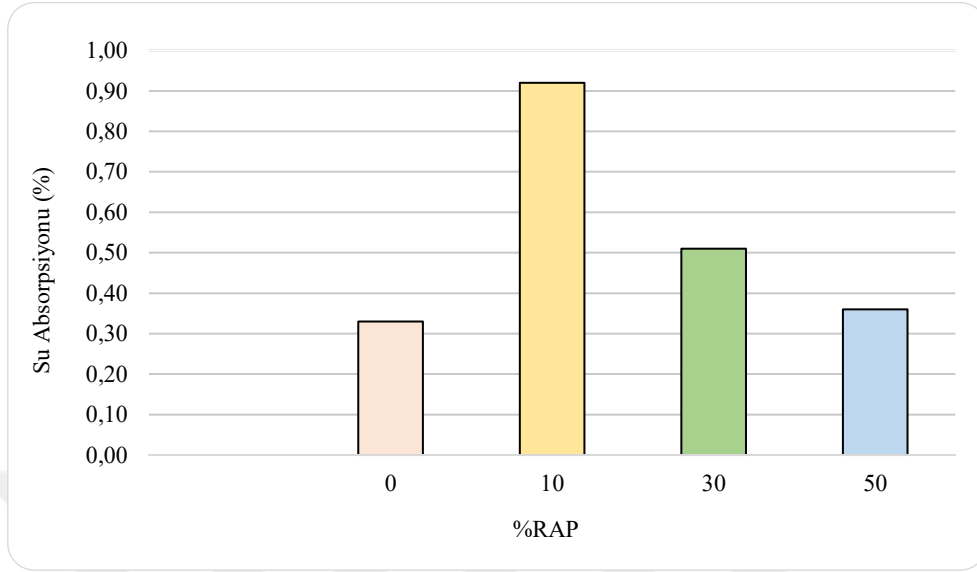
%RAP	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Su Absorpsiyonu (%)	Stabilite (kN)	Akma (mm)	Marshall Oranı (kN/mm)
0	2,319	0,33	8,79	2,4	3,5
10	2,284	0,92	7,92	3,4	2,3
30	2,317	0,51	11,62	4,0	2,8
50	2,280	0,36	11,44	3,4	3,3

Birinci aşamada belirtildiği üzere her seviyeden 3 adet briket numune üretimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda her seviyenin kendi içinde ortalaması alınarak tek bir sonuç ortaya konulmuştur. Bütün seviyelerin sonuçları grafik haline getirilmiş ve Şekil 3.41 ile Şekil 3.45 arasında gösterilmiştir.



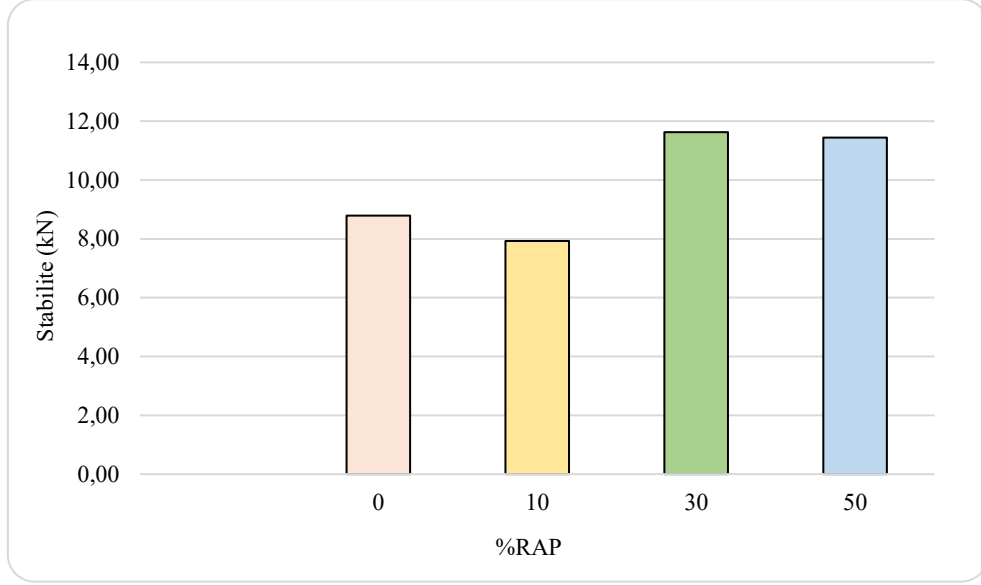
Şekil 3.41.Numunelere ait Hacim Özgöl Ağırlık sonuçları

- ✓ Hacim özgül ağırlık değeri kontrol numunesinde 2,319 g/cm³ olarak ölçülmüş olup, %10, %30 ve %50 RAP içeren karışımlar arasında bu değere en yakın sonucu 2,317 g/cm³ ile %30 RAP grubunun verdiği belirlenmiştir. Her RAP oranı grubu için hacim özgül ağırlık değerinin kontrol numunesinin hacim özgül ağırlık değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %10 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla hacim özgül ağırlık değerinin %1,5 oranında azaldığı,
 - %30 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %0,09 oranında azaldığı,
 - %50 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %1,7 oranında azaldığı görülmektedir.
- ✓ Bu durum, RAP miktarının hacim özgül ağırlık üzerinde anlamlı bir değişiklik ortaya çıkarmadığını, ayrıca %30 RAP içeren karışımın kontrol numunesine en yakın yapısal özellikleri göstermesi nedeniyle optimum tercih olarak değerlendirilmesini desteklemektedir.



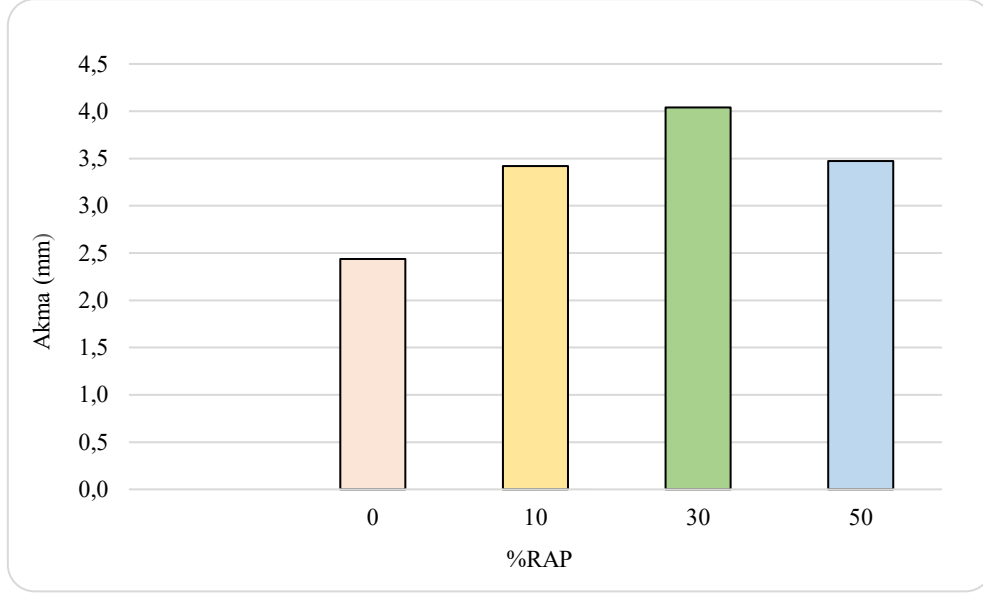
Şekil 3.42. Numunelere ait Su Absorpsiyonu sonuçları

- ✓ Su absorpsiyonu, asfalt karışımının boşluk yapısını ve suya karşı hassasiyetini değerlendirmede önemli bir fiziksel parametredir. Her RAP oranı grubu için su absorpsiyonu değerinin, kontrol numunesinin su absorpsiyonu değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %10 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla su absorpsiyonu değerinin %178,8 oranında arttığı,
 - %30 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %54,6 oranında arttığı,
 - %50 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %9,1 oranında arttığı görülmektedir.
- ✓ Grafik değerleri incelendiğinde kontrol numunesine en yakın değeri %50 RAP içeren grup vermiştir.
- ✓ %10 RAP içeren numune grubunda su absorpsiyon yüzdesi kontrol grubuna ve diğer gruplara oranla oldukça yüksektir ve bu sebeple tercih edilmesi mümkün değildir.



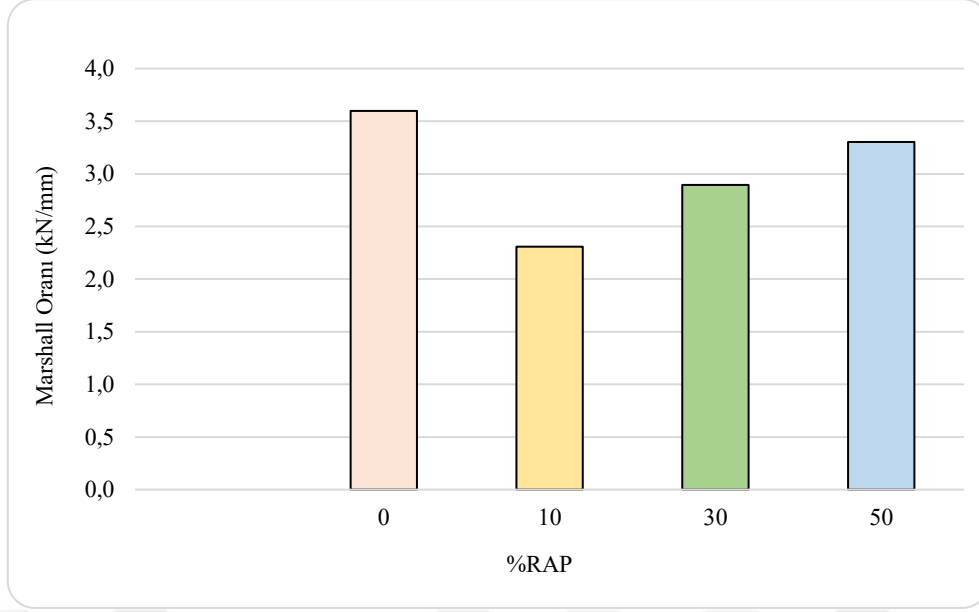
Şekil 3.43. Numunelere ait Stabilite sonuçları

- ✓ Stabilite değeri, asfalt karışımının yük taşıma kapasitesini ve deformasyona karşı direncini belirleyen temel bir mekanik parametre olup, 12 adet numuneye ait stabilite-akma ilişkisi EK-2’de eğri grafikleri şeklinde sunulmuştur. Her RAP oranı grubu için stabilite değerinin kontrol numunesinin stabilite değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %10 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla stabilite değerinin %9,9 oranında azaldığı,
 - %30 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %32,2 oranında arttığı,
 - %50 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %30,1 oranında arttığı görülmektedir.
- ✓ Grafikler incelendiğinde, en yüksek stabilite değeri 11,62 kN ile %30 RAP içeren grupta elde edilmiş; buna oldukça yakın bir performans sergileyen %50 RAP grubunda da yüksek stabilite değerleri gözlemlenmiştir.



Şekil 3.44. Numunelere ait Akma sonuçları

- ✓ Akma değeri, asfalt karışımının uygulanan yük altında ne ölçüde kalıcı deformasyona uğradığını gösteren önemli bir parametre olup, Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2023) göre 2–4 mm aralığında olması uygundur. Her RAP oranı grubu için akma değerinin kontrol numunesinin akma değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %10 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla akma değerinin %41,7 oranında arttığı,
 - %30 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %66,7 oranında arttığı,
 - %50 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %41,7 oranında arttığı görülmektedir.
- ✓ Yapılan değerlendirme sonucunda, %0, %10 ve %50 RAP içeren grupların, bu sınırlar içinde kaldığı, %30 RAP içeren grubun ise bu aralığın bir miktar üzerinde olmasına rağmen kabul edilebilir düzeyde bir deformasyon kapasitesi gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 3.45. Numunelere ait Marshall oranı sonuçları

- ✓ Marshall oranı, asfalt karışımının rijitliğini belirleyen ve stabilite değerinin akma değerine oranlanmasıyla elde edilen önemli bir parametredir. Her RAP oranı grubu için Marshall oranı değerinin kontrol numunesinin Marshall oranı değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %10 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla Marshall oranı değerinin %34,3 oranında azaldığı,
 - %30 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %20 oranında azaldığı,
 - %50 RAP içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %5,7 oranında azaldığı görülmektedir.
- ✓ Analiz sonuçlarına göre, kontrol numunesine en yakın Marshall oranı %50 RAP içeren grupta elde edilmiş olup, bu grubu 2,8 kN/mm ile %30 RAP içeren grup takip etmiştir. Öte yandan, en düşük oran ise 2,3 kN/mm ile %10 RAP içeren karışımda gözlemlenmiştir.

Genel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, optimum RAP oranı %50 olarak belirlenmiş olsa da deneysel çalışmalarda uygulanabilirlik ve performans kriterleri doğrultusunda %30 RAP oranının kullanılması daha uygun bulunmuş ve çalışmanın devamında bu oran tercih edilmiştir.

%50 yerine %30 RAP oranının seçilmesinin başlıca nedenleri şunlardır:

- i. Karışımın homojenliği açısından değerlendirildiğinde, yüksek oranda eski bağlayıcı ve RAP içeren karışımlarda homojenliğin azalabileceği ve bunun da mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği öngörülmektedir.
- ii. Ayrıca, RAP oranının artması karışımın rijitliğini artırmakta; bu da çatlama riskini yükselterek asfaltın uzun vadeli performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Bu nedenle hem kısa vadeli mekanik performans hem de uzun vadeli dayanıklılık dikkate alınarak %30 RAP oranının seçilmesi uygun görülmüştür.

3.5. RAP İçerikli Numuneler İçin Atık Yağ Uygulaması

3.5.1. Atık yağ ilaveli briket üretimi

Optimum RAP oranı %30 belirlendikten sonra, karışımlara %5 ve %10 oranında AMY, ayrıca %5 ve %10 oranında ABY eklenerek yeni reçete ve seviyelerde briketler oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni reçete EK-3 kısmında gösterilmiştir. Yeni reçete kapsamında 12 briket üretimi daha gerçekleştirilmiştir. Üretilen briketlerin seviyeleri aşağıda belirtilmiştir;

Seviye 5: %30 RAP içeriği + %5 AMY = 3 adet üretilmiştir.

Seviye 6: %30 RAP içeriği + %10 AMY = 3 adet üretilmiştir.

Seviye 7: %30 RAP içeriği + %5 ABY = 3 adet üretilmiştir.

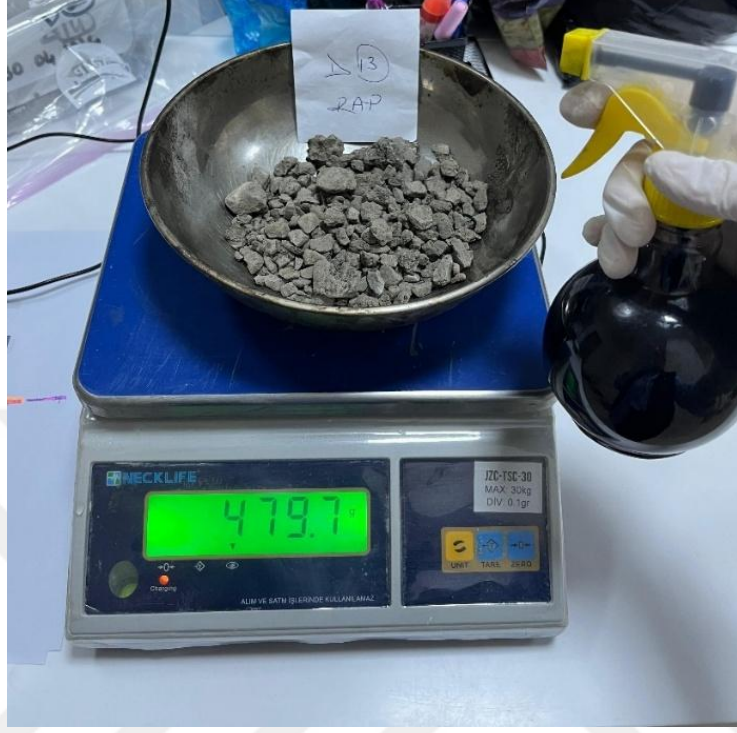
Seviye 8: %30 RAP içeriği + %10 ABY = 3 adet üretilmiştir.

Deneyisel çalışmanın bu bölümünde, optimum RAP oranı belirlerken yapılan uygulamaların büyük bir kısmı aynıdır. AMY ve ABY ilaveli briketlerin üretimi için;

- 12 adet numunenin reçeteye uygun şekilde tartımı ve paketlenmesi gerçekleştirilmiştir.
- Aynı şekilde paketlenmiş olan RAP malzemeye, spreyleme yöntemi ile, RAP içerisindeki yaşlanmış bitüm miktarının kütlece %5'i (0,8 gr) ve %10'u (1,6 gr) kadar AMY, daha sonra aynı oranlarda ABY püskürtülmüştür.
- Püskürtme işleminden sonra RAP numunesi AMY ve ABY ile iyice karıştırılmıştır.
- Karıştırılan atık yağ içerikli RAP numunesi, kürlenmesi için 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir.
- Kürlenme işlemi ardından numuneler, bir günün sonunda doğal agregalar ile karıştırılmıştır.

- Son aşamada ise, Seviye 1 - 4 numunelerindeki deney algoritması aynı şekilde ve aynı sırayla gerçekleştirilmiştir.

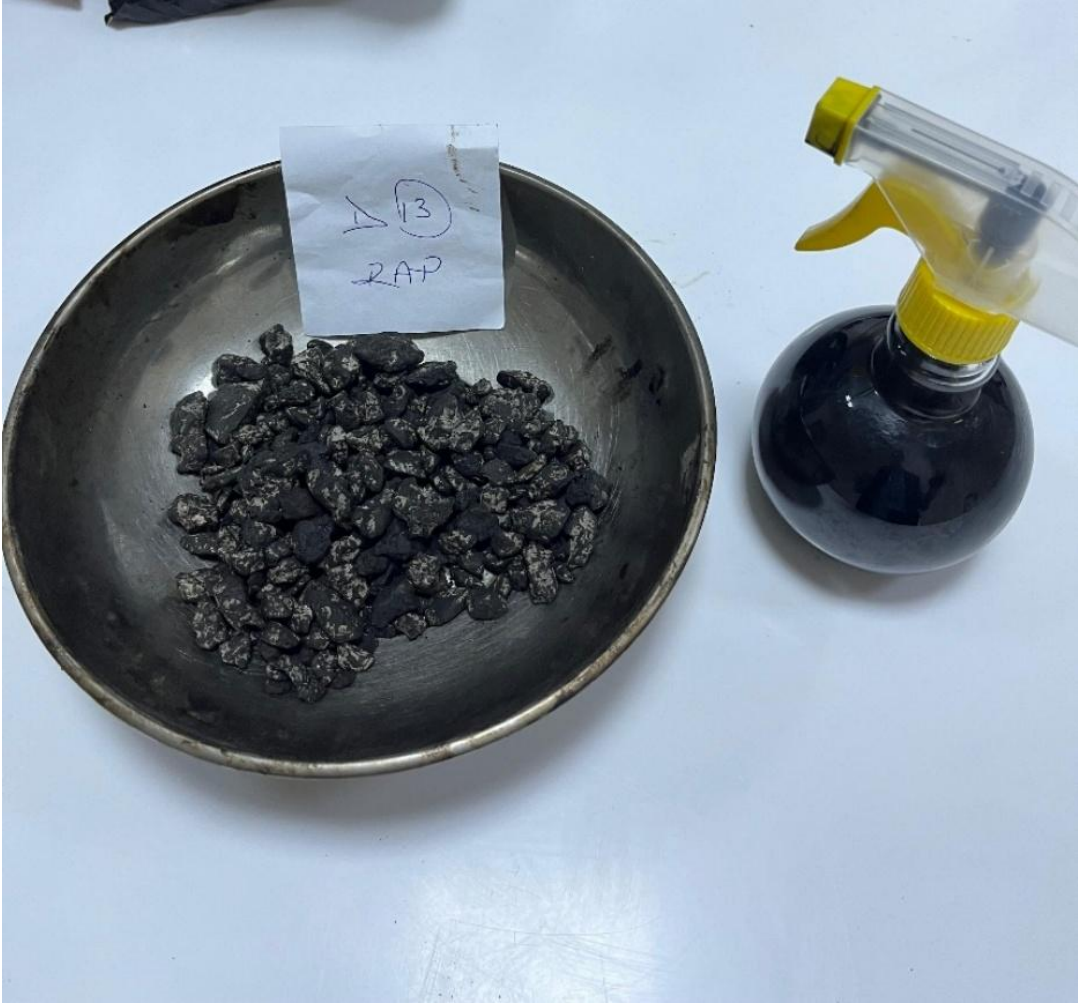
Şekil 3.46 ile Şekil 3.52 arasında atık yağ püskürtme ve kürlenme aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.46. RAP malzemeye AMY ilave öncesi



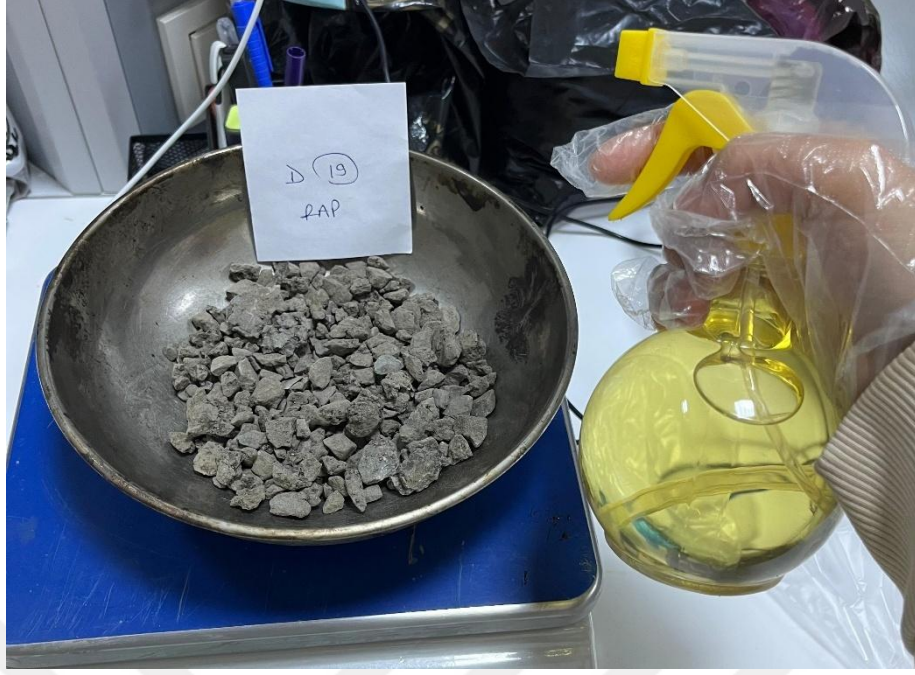
Şekil 3.47. RAP malzemeye AMY ilave sonrası



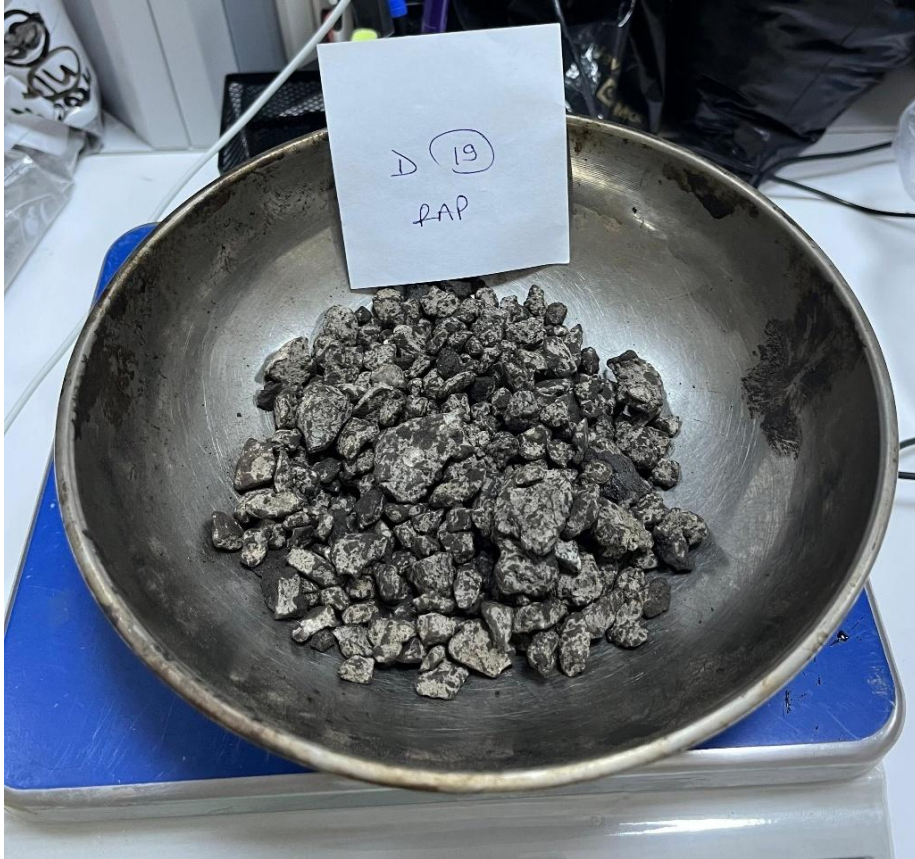
Şekil 3.48. RAP malzeme ile AMY karışımı



Şekil 3.49. AMY ile kütleme sonrası RAP malzemenin görüntüsü



Şekil 3.50. RAP malzemeye ABY ilave öncesi



Şekil 3.51. RAP malzemeye ABY ilave sonrası



Şekil 3.52. ABY ile kütleme sonrası RAP malzemenin görüntüsü

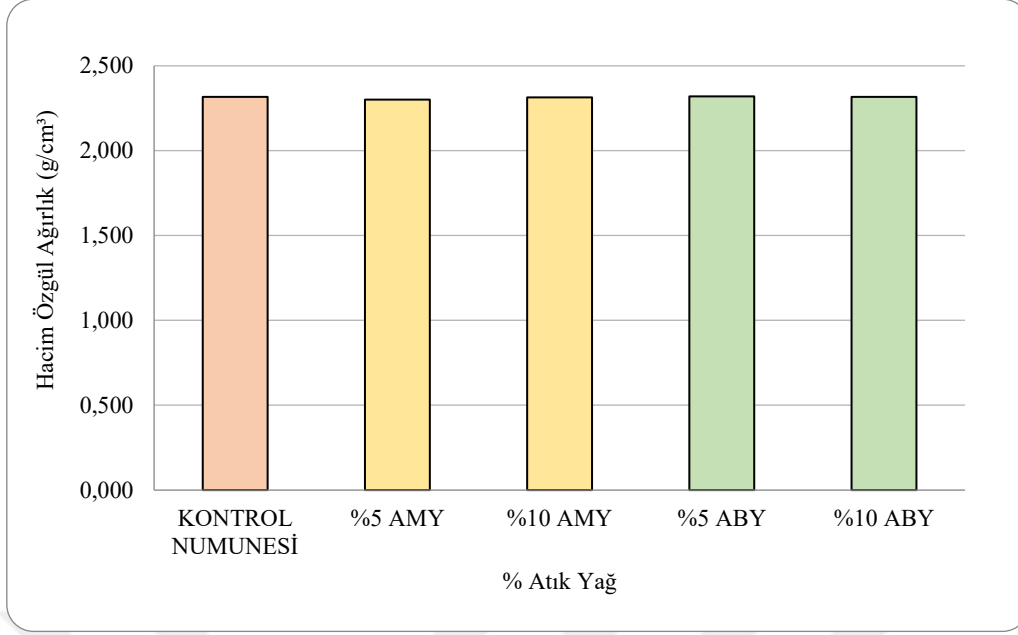
3.5.2. Optimum yağ oranının tespiti

Yapılan deneyler kapsamında elde edilmiş olan sonuçlar, optimum RAP oranı belirlemede olduğu gibi tablolastırılarak ayrı ayrı grafik haline getirilmiştir. 12 adet numune için elde edilen Hacim Özgöl Ağırlık, Su Absorpsiyonu, Stabilite, Akma ve Marshall Oranı değerleri Tablo 3.10'da gösterilmiştir.

Tablo 3.10. Deney sonuçları (13-24 numune arası)

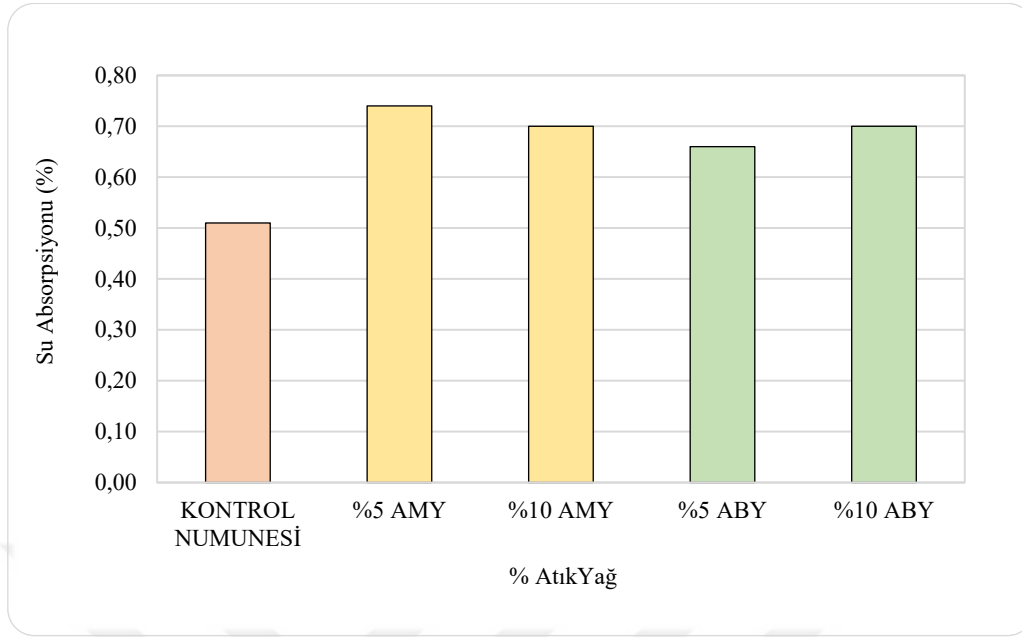
%30 RAP İçerikli Karışımlar	Hacim Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	Su Absorpsiyonu (%)	Stabilite (kN)	Akma (mm)	Marshall Oranı (kN/mm)
KONTROL	2,317	0,51	11,62	4,0	2,9
%5 AMY	2,301	0,74	12,29	3,1	3,9
%10 AMY	2,314	0,70	11,47	2,7	4,2
%5 ABY	2,320	0,66	12,72	2,4	5,2
%10 ABY	2,317	0,70	10,87	2,1	5,1

Elde edilen sonuçların daha detaylı yorumlanabilmesi ve birbirleri arasında bir karşılaştırma yapılabilmesi için her bir sonuç ayrı ayrı grafik haline getirilmiştir. Söz konusu grafikler Şekil 3.53 ile Şekil 3.57 arasında gösterilmiştir.



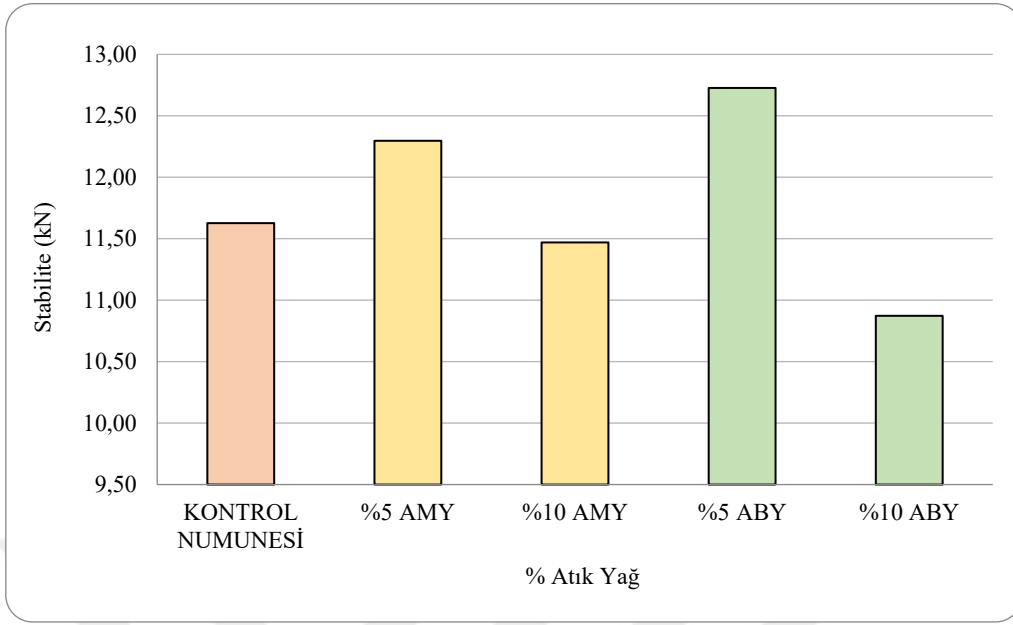
Şekil 3.53. Atık yağ bazlı numunelerin Hacim Özgöl Ağırlık sonuçları

- ✓ Kontrol numunesinin hacim özgül ağırlık değeri $2,317 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiş olup, atık yağ katkısı sonrası elde edilen sonuçlara göre, %10 ABY içeren karışımın bu değere yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca, %10 AMY ve %5 ABY içeren karışımlar da hacim özgül ağırlık açısından kontrol numunesine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Her atık yağ oranı grubu için hacim özgül ağırlık değerinin kontrol numunesinin hacim özgül ağırlık değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %5 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla hacim özgül ağırlık değerinin %0,7 oranında azaldığı,
 - %10 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %0,13 oranında azaldığı,
 - %5 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %0,13 oranında arttığı,
 - %10 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla değerin değişmediği görülmektedir.
- ✓ Bu durum, atık yağ tipi ve miktarının hacim özgül ağırlık üzerinde anlamlı bir değişiklik ortaya çıkarmadığını ortaya koymaktadır.



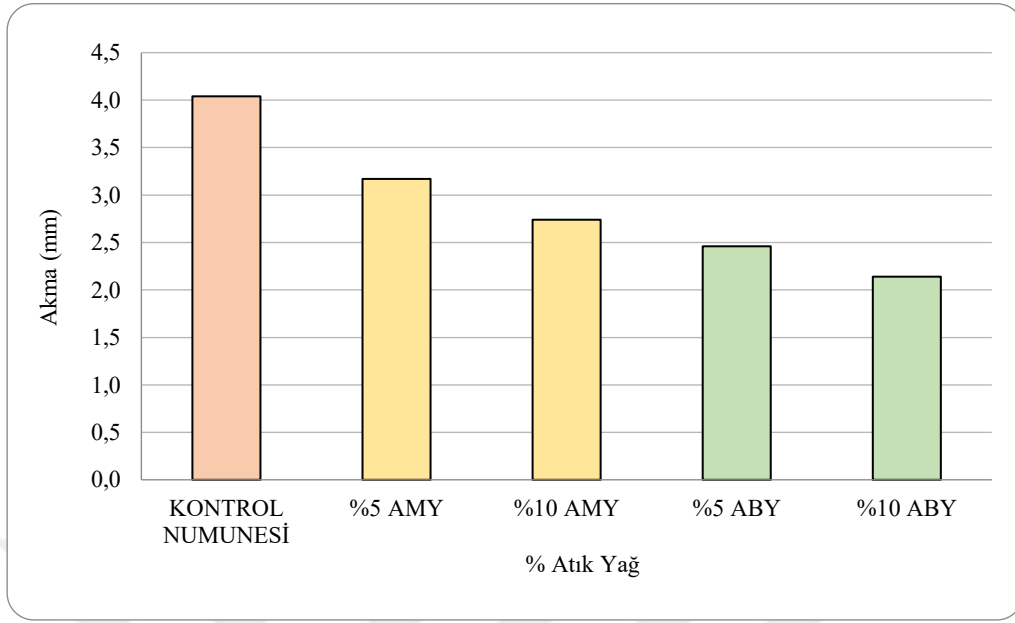
Şekil 3.54. Atık yağ bazlı numunelerin Su Absorpsiyonu sonuçları

- ✓ Her atık yağ oranı grubu için su absorpsiyonu değerinin kontrol numunesinin su absorpsiyonu değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %5 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla su absorpsiyonu değerinin %45,1 oranında arttığı,
 - %10 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %37,2 oranında arttığı,
 - %5 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %29,4 oranında arttığı,
 - %10 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %37,3 oranında arttığı görülmektedir.
- ✓ Su absorpsiyon değerlerine bakıldığında en düşük (en iyi) oranın %0,66 ile %5 ABY grubunda olduğu görülmüştür.



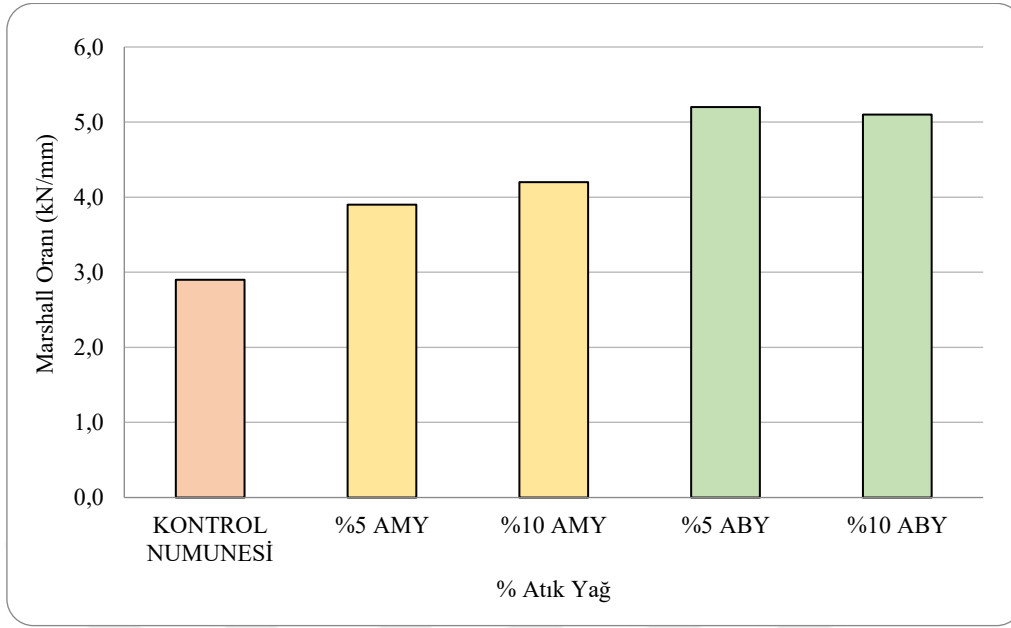
Şekil 3.55. Atık yağ bazlı numunelerin Stabilite sonuçları

- ✓ Stabilite değerleri analiz edildiğinde 12,7 kN ile en iyi stabiliteyi %5 ABY grubunun verdiği görülmektedir. 12 adet numuneye ait stabilite-akma grafikleri EK-4'te verilmiştir.
- ✓ %5 AMY grubunun stabilite değerine bakıldığında, 12,3 kN olduğu görülmektedir ve bu değer kontrol numunesine göre artış göstermiştir.
- ✓ Her atık yağ oranı grubu için stabilite değerinin kontrol numunesinin stabilite değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %5 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla stabilite değerinin %5,8 oranında arttığı,
 - %10 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %1,3 oranında azaldığı,
 - %5 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %9,5 oranında arttığı,
 - %10 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %6,5 oranında azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.56. Atık yağ bazlı numunelerin Akma sonuçları

- ✓ Akma değeri kontrol edildiğinde, bütün grupların 2-4 mm arası kabul edilebilir sınırlarda olduğu görülmektedir.
- ✓ Her atık yağ oranı grubu için akma değerinin kontrol numunesinin akma değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %5 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla akma değerinin %22,5 oranında azaldığı,
 - %10 AMY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %32,5 oranında azaldığı,
 - %5 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %40 oranında azaldığı,
 - %10 ABY içerikli numune grubunun, kontrol numunesine oranla %47,5 oranında azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.57. Atık yağ bazlı numunelerin Marshall Oranı sonuçları

- ✓ Marshall oranı değeri analiz edildiğinde en iyi değeri %5 ABY grubu vermiştir.
- ✓ %10 ABY grubu incelendiğinde ise, %5 ABY grubu ile arasında çok fazla fark olmadığı görülmektedir.
- ✓ Her atık yağ oranı grubu için Marshall oranı değerinin kontrol numunesinin Marshall oranı değerine göre artış ve azalış oranı incelendiğinde;
 - %5 AMY numune grubunun, kontrol numunesine oranla Marshall oranı değerinin %34,48 oranında arttığı,
 - %10 AMY numune grubunun, kontrol numunesine oranla %44,8 oranında arttığı,
 - %5 ABY numune grubunun, kontrol numunesine oranla %79,4 oranında arttığı,
 - %10 ABY numune grubunun, kontrol numunesine oranla %75,9 oranında arttığı görülmektedir.
- ✓ Kontrol numunesine oranla bütün grupların değerlerinde artış söz konusu olmuştur.

Bütün deney sonuçları değerlendirildiğinde, genel olarak %5 ABY katkısının mühendislik verileri açısından tatmin edici değerler ortaya çıkardığı görülmüştür. Atık yağ tipleri kendi aralarında değerlendirildiğinde ise; AMY gruplarında optimal değerler %10 AMY ilavesinde, ABY gruplarında ise %5 ABY ilavesinde gözlemlenmiştir.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, farklı oranlarda (%0, %10, %30 ve %50) RAP malzeme ve iki seviyede (%5 ve %10) AMY ve ABY kullanımı ile elde edilen karışımların, Marshall özellikleri irdelenmiştir. Deneylerde, yaşlanmış olan bitümün atık yağlar katkısıyla işlevselliğini yeniden kazandırılmasına odaklanılmıştır. Laboratuvarda üretilmiş olan 24 adet briket için sırasıyla; hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı değerleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, deneyler öncesinde yapılan kapsamlı literatür araştırmasının sunduğu perspektif ile yorumlandığında, ortaya çıkan sonuçlar şu şekildedir:

- ✓ Optimum RAP oranı belirlemek için yapılan deneyler sonucunda;
 - i. Kontrol numunesinin hacim özgül ağırlık değeri $2,319 \text{ g/cm}^3$ iken, %30 RAP oranına sahip grup $2,317 \text{ g/cm}^3$ ile çok yakın bir sonuç vermiştir. Diğer seviyeler irdelendiğinde, RAP miktarının hacim özgül ağırlık üzerinde anlamlı bir değişiklik ortaya çıkarmadığı gözlenmiştir.
 - ii. Kontrol numunesinin su absorpsiyonu değeri %0,33 çıkarken, %50 RAP oranına sahip grubun su absorpsiyonu değeri %0,36 çıkarak en az artışı gösteren grup olmuştur. Gruplar arası değerlendirme yapıldığında, en uygun değer %50 RAP grubunda çıktığı tespit edilmiştir.
 - iii. Kontrol numunesinin stabilite değeri 8,8 kN çıkarken, %30 RAP oranına sahip grubun değeri 11,6 kN çıkarak en iyi stabilite artışı gösteren grup olmuştur.
 - iv. Kontrol numunesinin akma değeri 2,4 mm çıkarken, %10 RAP içerikli numune grubunun 3,4 mm, %30 RAP içerikli numune grubunun 4,0 mm, %50 RAP içerikli numune grubunun 3,4 mm çıkmıştır ve Karayolları Teknik Şartnamesi (2023) kapsamında bütün değerlerin uygun aralıkta olduğu sonucuna varılmıştır.
 - v. Kontrol numunesinin Marshall oranı değeri 3,5 kN/mm çıkarken, %50 RAP oranına sahip grubun değeri 3,3 kN/mm ile çok yakın bir sonuç vermiştir. Gruplar arası değerlendirme yapıldığında en uygun değer %50 RAP grubunda çıktığı tespit edilmiştir.
- ✓ Karışımındaki RAP oranının artışı, rijitlik (sertlik) değerini arttıracığından, çatlama ihtimali daha çok artabilmekte ve karışımın uzun dönemdeki verimliliğini negatif yönde etkileyebilmektedir. Bu yüzden, %50 RAP kullanımı yerine, %30 RAP kullanımı daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarının ve ardından

oluşturulan grafiklerin optimizasyonu sonucunda, %30 RAP oranına sahip numune grubu seçilerek çalışmanın ikinci kısmına geçilmiştir.

- ✓ Seçilen %30 RAP içeriği, atık yağ ilaveli briket uygulaması kapsamında kontrol numunesi olarak belirlenmiştir.
- ✓ Optimum atık yağ oranının belirlenmesi için yapılan deneyler sonucunda;
 - i. Kontrol numunesinin hacim özgül ağırlık değeri $2,317 \text{ g/cm}^3$ çıkarken, %10 ABY oranına sahip grubun değeri de $2,317 \text{ g/cm}^3$ çıkmıştır. Diğer seviyeler irdelendiğinde atık yağ tipi ve miktarının hacim özgül ağırlık üzerinde anlamlı bir değişiklik ortaya çıkarmadığı tespit edilmiştir.
 - ii. Kontrol numunesinin su absorpsiyonu değeri %0,51 çıkarken, diğer gruplara oranla en az artış gösteren, %0,66 değeri ile %5 ABY içerikli grup olmuştur.
 - iii. Kontrol numunesinin stabilite değeri 11,6 kN çıkarken, %5 ABY içerikli numune grubunun stabilite değeri 12,7 kN çıkarak en iyi artışı göstermiştir.
 - iv. Kontrol numunesinin akma değeri 4,0 mm çıkarken, diğer bütün gruplarda bu değerin azaldığı ve Karayolları Teknik Şartnamesi (2023) kapsamında uygun aralıkta kaldığı tespit edilmiştir.
 - v. Kontrol numunesinin Marshall oranı değeri 2,9 kN/mm çıkarken, diğer gruplara oranla en fazla artış gösteren, 5,2 kN/mm değeri ile %5 ABY içerikli grup olmuştur.
- ✓ Genel itibariyle %5 ABY içerikli grubun mühendislik özellikleri açısından en tatmin edici değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, AMY ve ABY grupları ayrı ayrı olacak şekilde incelendiğinde; AMY grubunda %10 oranı, %5 oranına kıyasla daha tatmin edici sonuçlar verirken, ABY grubunda %5 oranı, %10 oranına kıyasla daha tatmin edici sonuçlar vermiştir.

Elde edilen bulgulara göre;

- i. Bu çalışmada %5 ve %10 oranında kullanılmasına karar verilen atık yağ katkılarının daha hassas dozaj aralığında kullanılmasıyla, daha etkin ve uygun optimum katkı miktarı belirlenebilir.
- ii. Atık yağ içerikli katkıların, gerçek karayolu koşullarındaki performansını inceleyebilmek, uzun vadedeki yaşlanma, deformasyon ve yorulma durumunu gözlemleyebilmek için sahada uygulama yapılabilir.

- iii. Bitüm gençleştirici olarak kullanılan atık yağların sağlayacağı maliyet avantajını görebilmek amacıyla, detaylı bir fizibilite çalışması yapılabilir.
- iv. Bu tez çalışmasında yapılmış olan deneylere ek olarak; Tekerlek İzi, Dinamik Kesme Reometresi (DSR), Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) gibi daha geniş ve kapsamlı deneyler gelişmiş cihazlarla yapıldığında hem asfalt karışımlarının hem de bitümün karakterizasyonları ayrıntılı bir şekilde analiz edilebilir.
- v. Çevresel etki analizleri kapsamında, atık yağların kullanımının potansiyel toksik etkileri ve çevresel riskleri değerlendirilebilir.
- vi. Sürdürülebilir yol yapım teknolojilerine katkı sağlayabilme amacıyla, geri kazanılmış asfalt malzemelerinin karbon ayak izine olan yansıması irdelenebilir.



KAYNAKLAR

- Abd Ali, N. S., Joni, H. H., & Al-Rubaei, R. H. (2024a). Effect of asphalt modified with waste engine oil on the durability properties of hot asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Open Engineering*, 14(1), 20220529. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0529>.
- Abd Ali, N. S., Joni, H. H., & Al-Rubaei, R. H. (2024b). Evaluation of reclaimed asphalt mixtures rejuvenated with waste engine oil to resist rutting deformation. *Open Engineering*, 14(1), 20220555. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0555>.
- ADTPF - Alaska Department of Transportation and Public Facilities. (2024). *Alaska test methods manual*. (September 1, 2024).
- Aghazadeh Dokandari, P., Öner, J., Topal, A., & Şengöz, B. (2014). Organik ılık karışım asfalt katkı maddesinin bitümlü karışımların yaşlanma özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(9), 332–337. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.02411>
- AI - The Asphalt Institute. (1986). *MS-20 Asphalt hot-mix recycling*. Asphalt Institute; (2nd ed., Manual Series No. 20).
- AI - The Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. Asphalt Institute; Report No.: ISBN = 978-1-934154-70-0.
- Airey, G. D. (2003). State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165–176. <https://doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- Albayati, A. H., Al-Kheetan, M. J., Mohammed, A. M., Al-ani, A. F., & Moudhafar, M. M. (2024). Performance Assessment of Eco-Friendly Asphalt Binders Using Natural Asphalt and Waste Engine Oil. *Infrastructures*, 9(12), 224. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9120224>.
- Ali, B., Li, P., Khan, D., Hasan, M. R. M., & Khan, W. A. (2024). Investigation into the effect of waste engine oil and vegetable oil recycling agents on the performance of laboratory-aged bitumen. *Budownictwo i Architektura*, 23(1), 033–054. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.5500>
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Satar, M. K. I. M., Kamarudin, S. N. N., Mahmud, M. Z. H., Ismail, C. R., Hassan, S. A., & Mashros, N. (2021). A review on the usage of waste engine oil with aged asphalt as a rejuvenating agent. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2374–2380. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.330>
- Arapoğlu, A. S. (2015). *Bozulmuş asfalt kaplamaların geri dönüşüm maliyet analizi ve optimum geri kazanım mesafesinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi].
- Arıkan Öztürk, E. & Çubuk, M. K. (2004). Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2), 175–184.

- Arshad, A. K., Kamaluddin, N. A., Hashim, W., & Roslan, S. R. A. (2015). Physical and rheological properties of aged bitumen rejuvenated with waste engine oil. *Applied Mechanics and Materials*, 802, 363–368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.802.363>
- ASTM International. (2019). *ASTM C136 / C136M – Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- Azahar, W. N. A. W., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Bujang, M., & Ngadi, N. (2016). Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 126, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.032>
- Chen, M., Leng, B., Wu, S., & Sang, Y. (2014). Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 66, 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033>
- Dow, A. W. (1903). Asphalt Experiments at Washington. *Engineering News Record*, 47(18), 18–25.
- FHWA - Federal Highway Administration. (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*.
- Gökalp, İ., Özinal, Y., & Uz, V. E. (2018). Atık bitkisel yemeklik yağların saf bitüm özelliklerine etkisinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(4), 570–578. <https://doi.org/10.21923/jesd.433393>.
- Gökalp, İ., Yıldız, A. U., Eren, M. B., & Uz, V. E. (2019). Atık motor yağı modifiyeli bitümün mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3), 184–193. <https://doi.org/10.31796/ogummf.571513>
- Gündoğdu, S. (2023). *Geri kazanılmış asfalt kaplamadan elde edilen agregaların çimento esaslı harçların davranışı üzerindeki etkileri* [Yüksek Lisans Tezi].
- Güngör, A. G., Orhan, F., Kaşak, S., Çalışkol, A., & Yönter, G. (n.d.). *Kazınmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanımı KGM Uygulamaları*.
- Ji, J., Yao, H., Suo, Z., You, Z., Li, H., Xu, S., & Sun, L. (2017). Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001769](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769).
- Karacasu, M., Bilgiç, Ş. (2009). Atık lastik katkısının sıcak asfalt özelliklerine etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, XXII(2), 26480.
- Keskin, M., Karacasu, M. (2018). Atık bor içeren asfalt betonlarının performanslarının değerlendirilmesi değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 185–192.

- KGM – Karayolları Genel Müdürlüğü. (2021). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı*. Ankara, Türkiye. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- KGM – Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). *Karayolları Teknik Şartnamesi*, Ankara, Türkiye. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- Kuloğlu, N., Yılmaz, M., & Kök, B. V. (2008). Farklı penetrasyon derecelerine sahip asfalt çimentolarının kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve işlenebilirliklerinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(1).
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1–2), 42–82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
- Majidifard, H., Tabatabaee, N., & Buttlar, W. (2019). Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(4), 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.11.002>.
- Mazlum, M. S. (2014). *Ekonomik ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların kazınarak bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi].
- Mehmood, R., Jakarni, F. M., Muniandy, R., Hassim, S., Daud, N. N. N., & Ansari, A. H. (2024). Waste engine oil as a sustainable approach for asphalt rejuvenation and modification: A review. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40737>.
- Mostafa, A. E. A., Ouf, M. S., & Elkerdany, M. M. (2019). Development of sustainable asphalt pavement mixture using polymers and waste engine oil. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 10(10). <http://www.ijser.org>
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Rossi, C. O. (2019). Bitumen and bitumen modification: a review on latest advances. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9040742>
- Qurashi, I. A., Swamy, A. K. (2018). Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 182). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.237>
- Salta, İ. (2010). *Bitümlü Karışımların Geri Dönüşüm Yöntemlerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi].
- Singh, H., Singh. Y. (2019). Applications of recycled and waste materials in infrastructure projects. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 21 LNCE, 569–585. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02707-0_65
- Singh-Ackbarali, D., Maharaj, R., Mohamed, N., & Ramjattan-Harry, V. (2017). Potential of used frying oil in paving material: solution to environmental pollution problem.

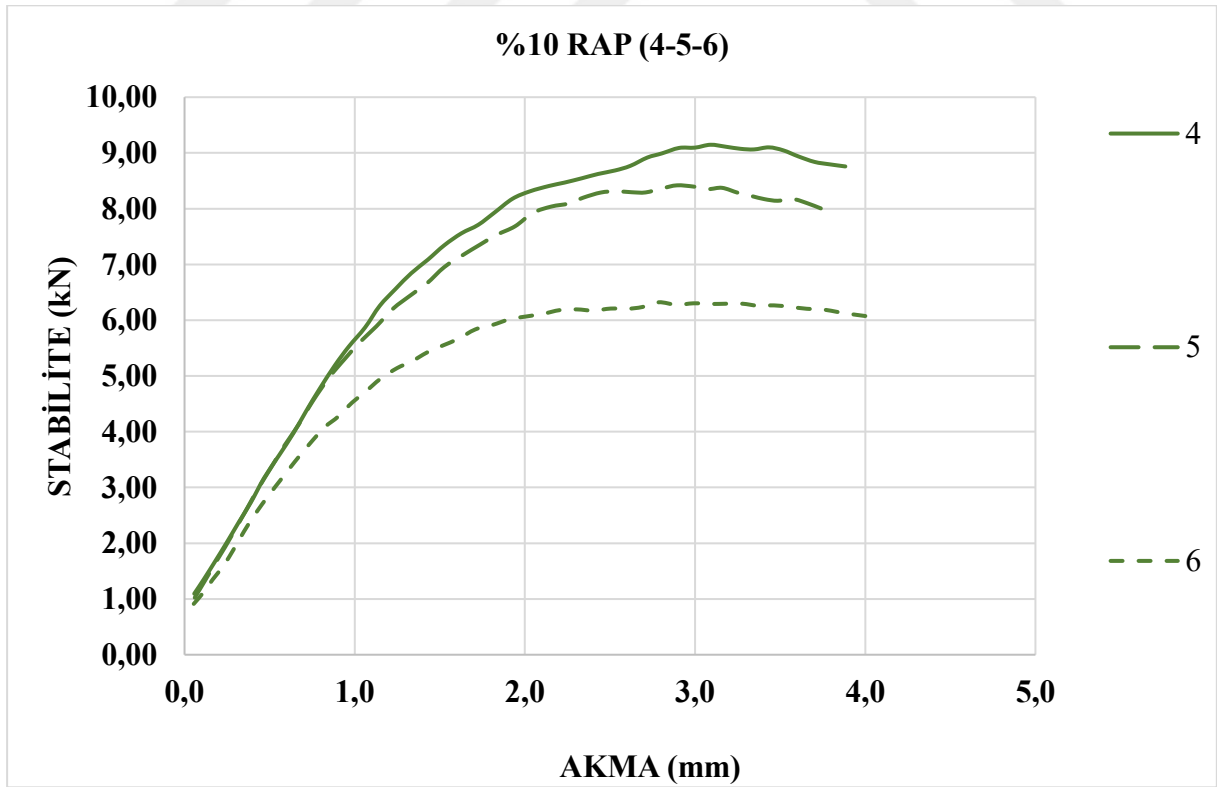
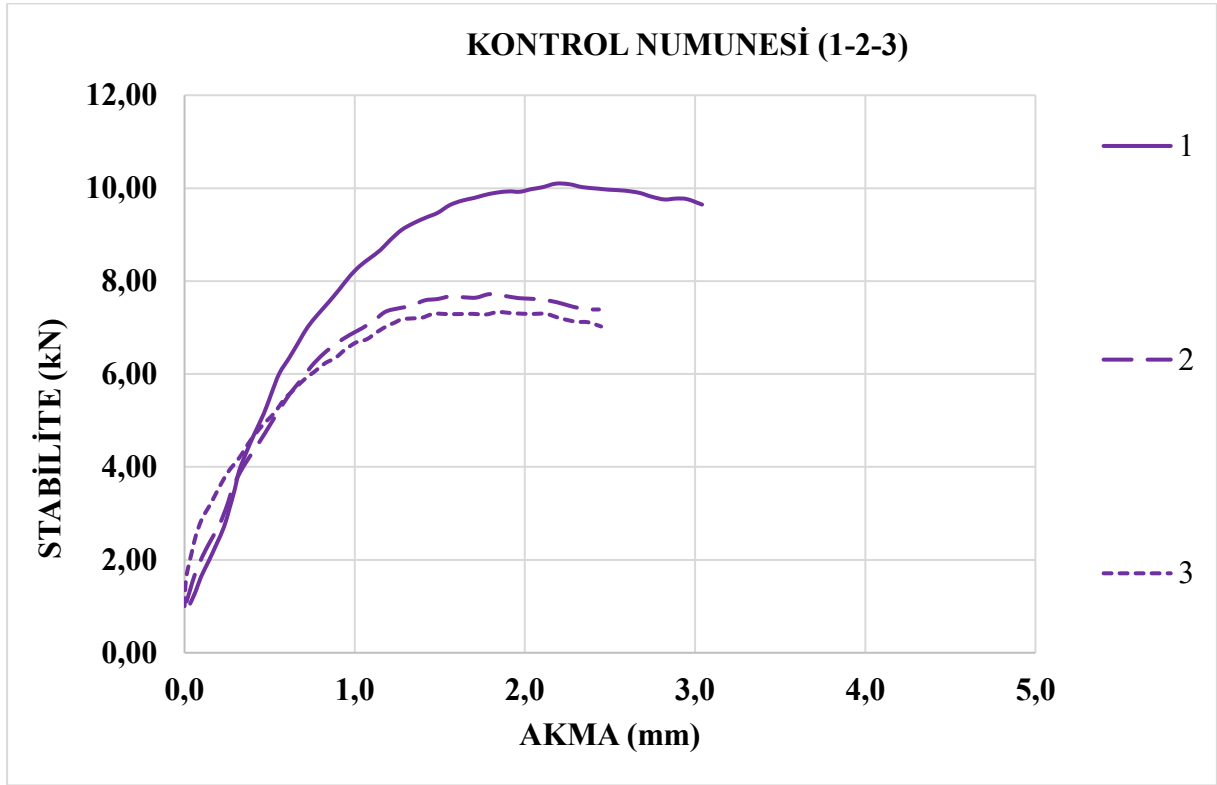
- Environmental Science and Pollution Research*, 24(13), 12220–12226.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-8793-z>
- Sun, Y., Cannone Falchetto, A., Zhang, F., Wang, D., & Chen, W. (2024). Molecular dynamics simulation and the regeneration and diffusion effects of waste engine oil in aged asphalt binder. *Materials*, 17(10), 2212.
<https://doi.org/10.3390/ma17102212>.
- Tadele, B., & Quezon, E. T. (2021). Evaluation of waste engine oil rejuvenation for highly short term aged asphalt binder. *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(2), 225-234. <https://doi.org/10.1080/14488353.2021.1896124>.
- T.C Kalkınma Bakanlığı. (2018). *On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023) Çevre ve Doğal Kaynakların Sürdürülebilir Yönetimi Çalışma Grubu Raporu*.
- TS EN 1426. (2024). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - İğne batma derinliği tayini*.
- TS EN 15326. (2009). *Bitümlerin Yoğunluk ve Özgül Ağırlığının Ölçülmesi - Kapiler Tıpalı Piknometre Yöntemi*.
- Tunay, C. (2008). *Dekoratif kaplama sistemlerinde asfalt kullanımı ve alternatif yöntemler ile teknik - ekonomik yönden karşılaştırılması* [Yüksek Lisans Tezi].
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (n.d.). *Asfalt Üretimi Sektörel Uygulama Kılavuzu (Taslak)*.
- Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2019). *On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023) 100. Yıl Türkiye Planı*.
- Ünlü, F. (2019). *İstanbul'da kazınmış asfalt kaplamaların binder tabakasında yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi].
- Wu, S., Muhunthan, B. (2018). Evaluation of the effects of waste engine oil on the rheological properties of asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002189](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002189)
- Xinxin, C., Xuejuan, C., Boming, T., Yuanyuan, W., & Xiaolong, L. (2018). Investigation on possibility of waste vegetable oil rejuvenating aged asphalt. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/app8050765>.
- Yavuz, S. (2018). *Bitümlü sıcak karışımlarda asfalt plant atıklarının değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi].
- Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., & Guistozi, F. (2021). Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: a comprehensive review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol.278). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123304>

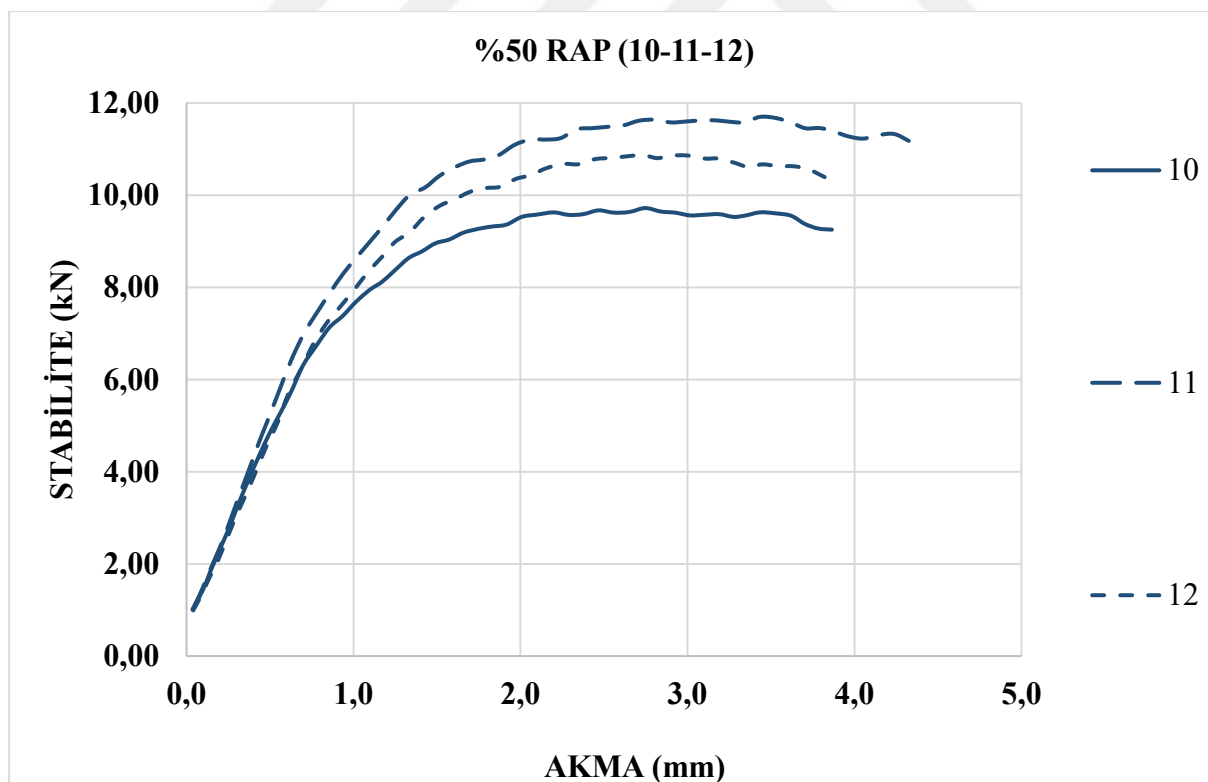
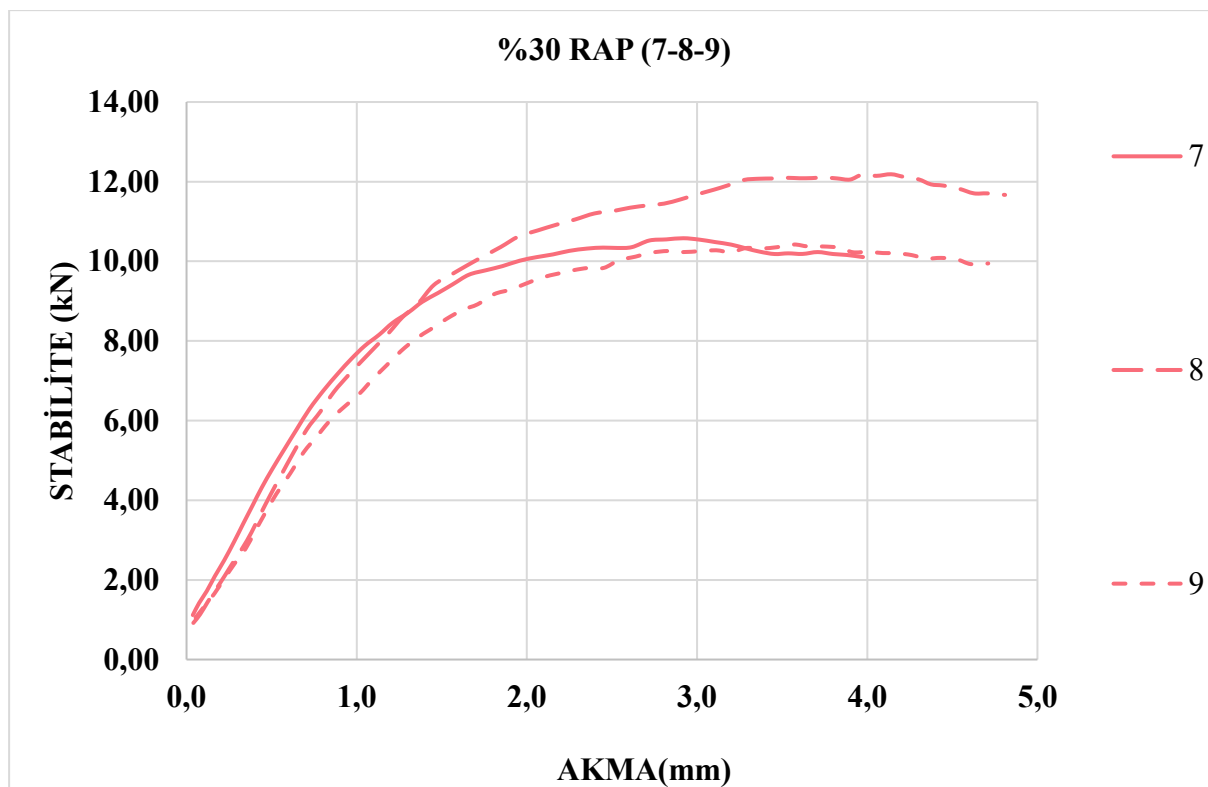
EKLER



[illegible]

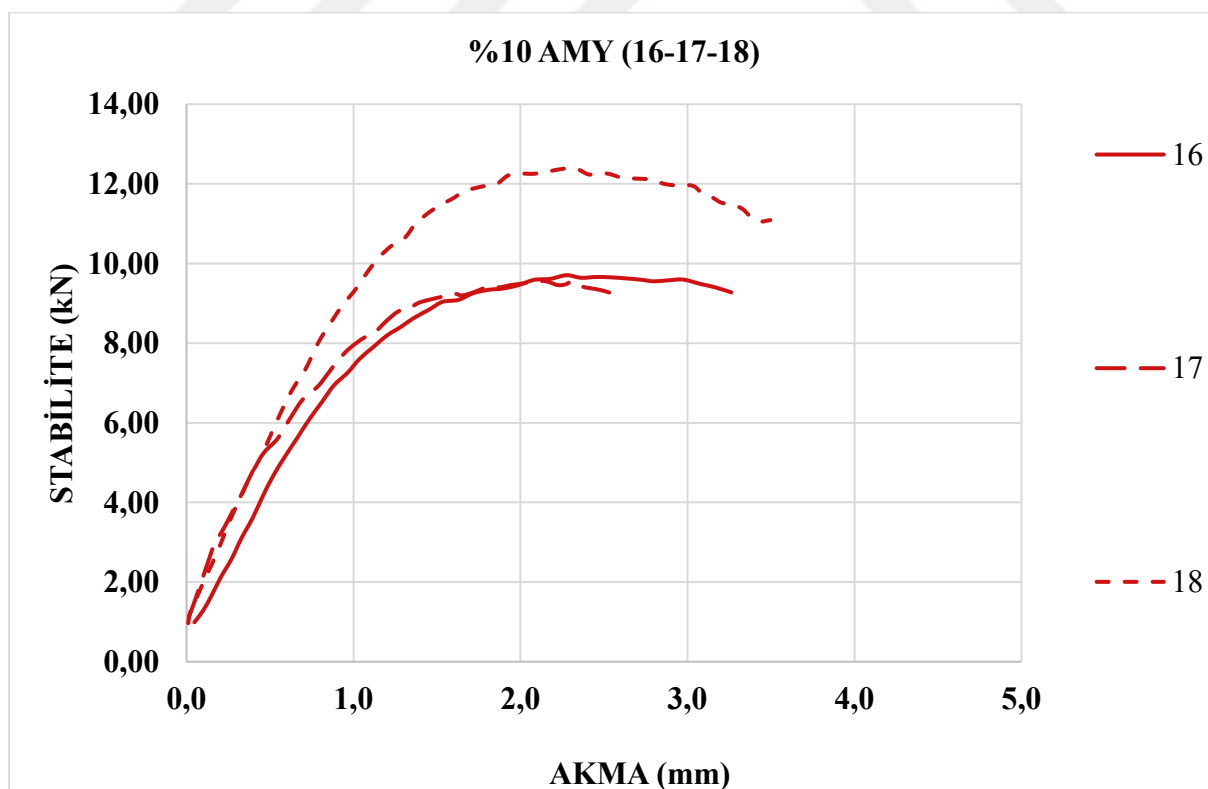
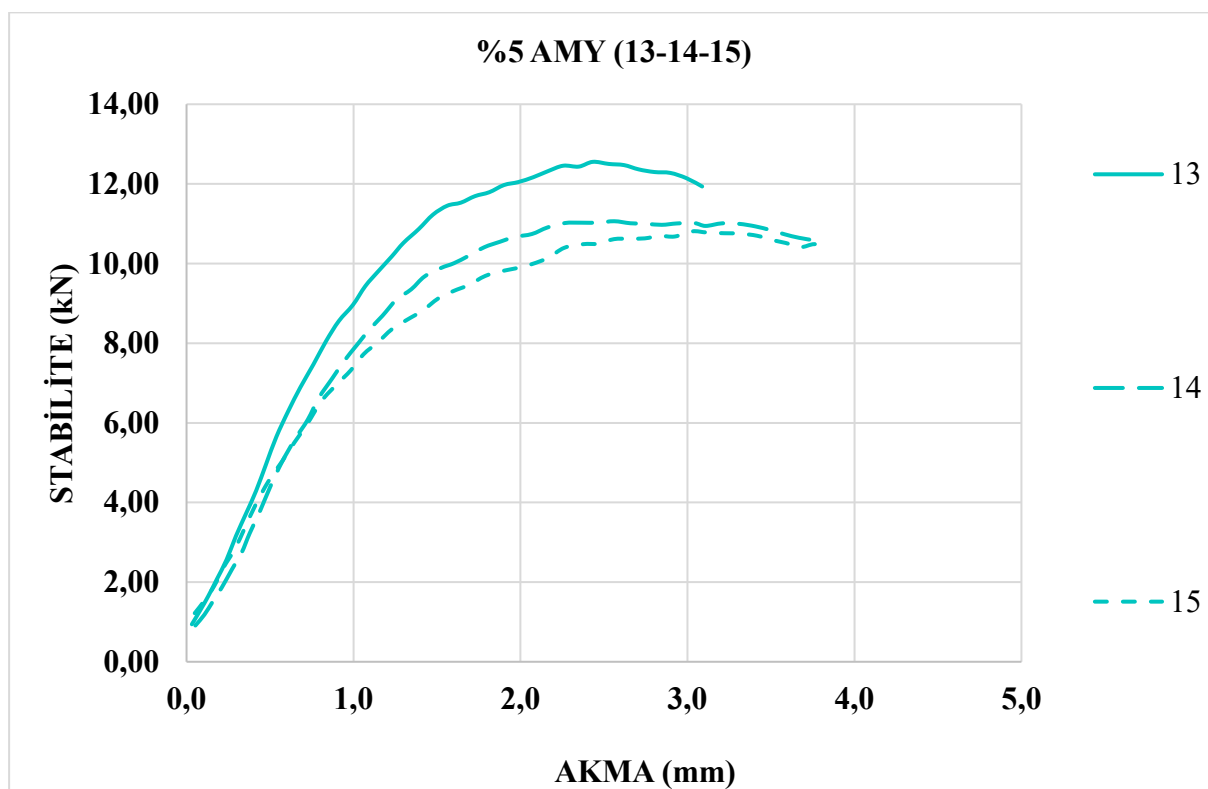
EK-2

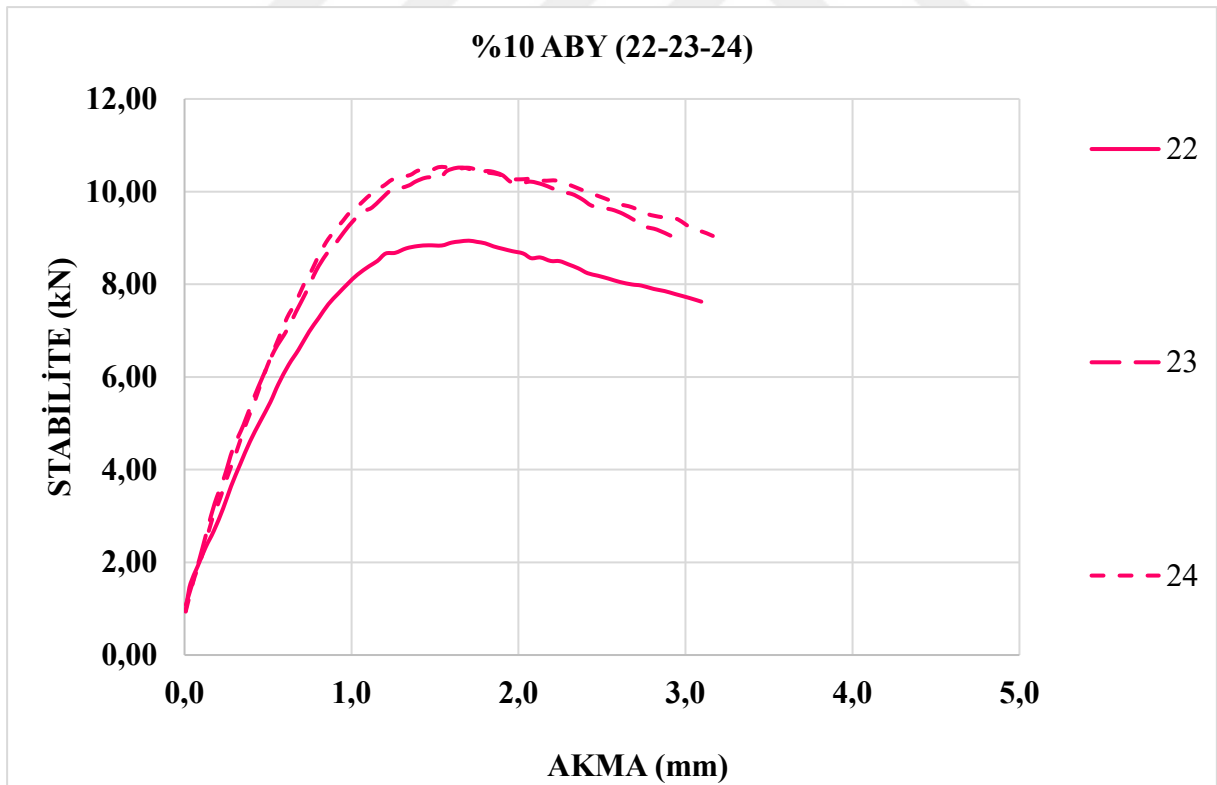
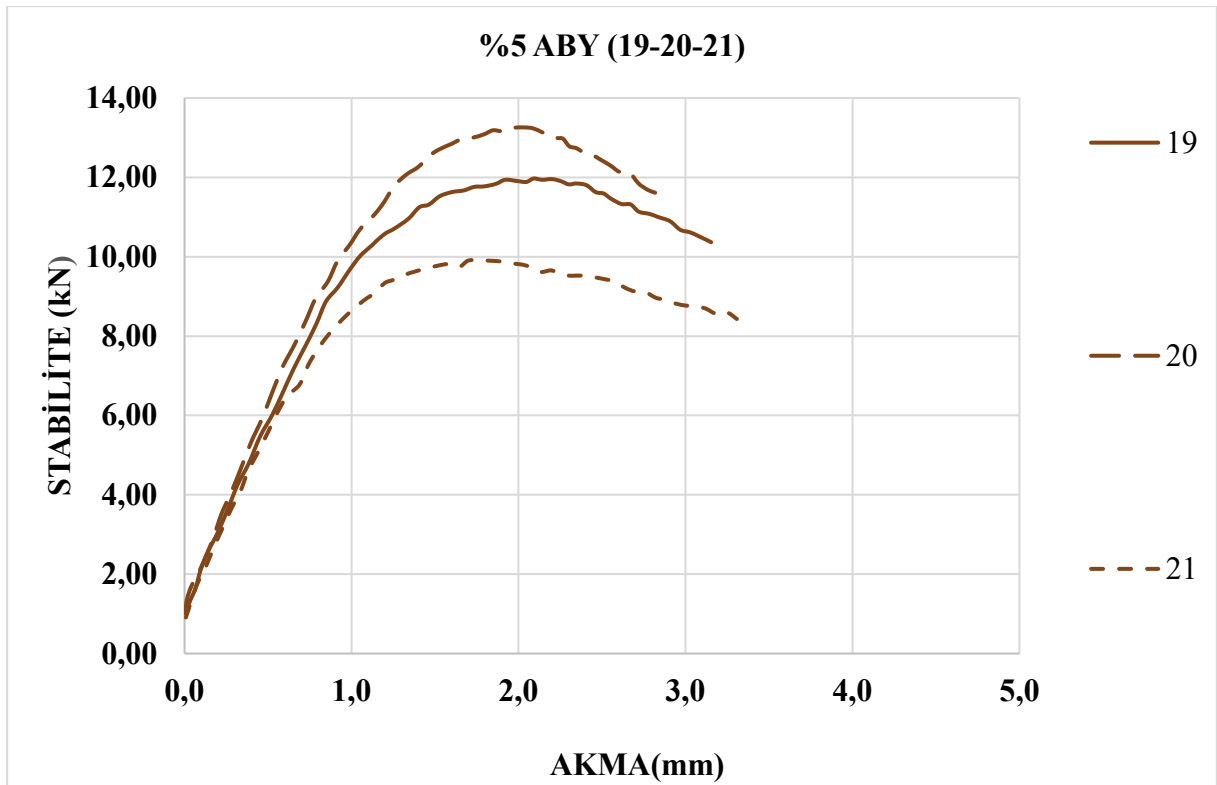




RAP										AGREGA										RAPTEKİ		ISITILACAKLAR		WEO or BIO (%)	
3/4"- 1/2"	1/2"-3/8"	3/8"-No.4	1/2"-3/8"	3/8"-No.4	No.4-No.10	No.10-No.40	No.40-No.80	No.80-No.200	No.200	SAF	BITÜM	BITÜM	BITÜM												
19-12.5 mm arası	12.5-9.5 mm arası	9.5-4.75 mm arası	12.5-9.5 mm arası	9.5-4.75 mm arası	4.75-2.0 mm arası	2.0-0.425 mm arası	0.425-0.180 mm arası	0.180-0.075 mm arası	0.075 mm altı	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1	51,5	136,4	214,5	44,0	22,0	64,9	37,7	14,5	14,5	14,5												
48,2	77,2	204,6	32,1																						

EK-4





ÖZGEÇMİŞ

Dilara ÇELİK, 2016 yılında girdiği Yalova Üniversitesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümünden 2022 yılında mezun oldu. 2023 yılında, Yalova Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ulaştırma ve Lojistik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. 07.07.2025 tarihinden bu yana OTOYOL YATIRIM VE İŞLETME A.Ş.'de Sistem Destek Uzmanı olarak çalışıyor.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Çelik, D. & Abut, Y. (2025, May). Asfalt geri kazanımında yaşlanmış bitümün rejenerasyonu: atık yağ bazlı gençleştiricilerin etkinliği ve uygulanabilirliği. In *20th International European Conference on Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences* (2025 World Square Root Year) (pp. 271-277). İstanbul, Türkiye. ISBN: 979-8-89695-083-7.

DİĞER YAYIN VE ESERLER

Avcı Karataş, Ç., **Çelik, D.**, (2024). Usability of Construction and Demolition Waste in Roller-Compacted Concrete Roads 8. *Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Çok Disiplinli Yaklaşımlar Kongresi*.