

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAZALTİK AGREGALARIN TAŞ MASTİK ASFALT VE YOĞUN
GRADASYONLU ASFALT BETONU KARIŞIMLARINDAKİ
PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Havanur Ebru GÜRBÜZ

EKİM 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BAZALTİK AGREGALARIN TAŞ MASTİK ASFALT VE YOĞUN
GRADASYONLU ASFALT BETONU KARIŞIMLARINDAKİ
PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Havanur Ebru GÜRBÜZ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 22 / 10 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erol İSKENDER

Trabzon 2025

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Havanur Ebru GÜRBÜZ Tarafından Hazırlanan**

**BAZALTİK AGREGALARIN TAŞ MASTİK ASFALT VE YOĞUN
GRADASYONLU ASFALT BETONU KARIŞIMLARINDAKİ
PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 / 09 / 2025 gün ve 2121 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Atakan AKSOY

Üye : Prof. Dr. Erol İSKENDER

Üye : Doç. Dr. Mustafa ASLAN

Üye : Prof. Dr. Ufuk KIRBAŞ

Üye : Doç. Dr. Tuba KÜTÜK SERT

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

“Bazaltik Agregaların Taş Mastik Asfalt ve Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu Karışımlarındaki Performanslarının Değerlendirilmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Erol İSKENDER’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Atakan AKSOY’a, Sayın Doç. Dr. Öğr. Mustafa ASLAN’a, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Jeoloji Mühendisliği Bölümü’ndeki Sayın Prof. Dr. Mehmet ASLAN, Sayın Prof. Dr. İrfan TEMİZEL’e ve Gümüşhane Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü’ndeki Sayın Prof. Dr. Cem YÜCEL’e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem, babama ve ablama teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Havanur Ebru GÜRBÜZ

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bazaltik Agregaların Taş Mastik Asfalt ve Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu Karışımlarındaki Performanslarının Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol İSKENDER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/10/2025

Havanur Ebru GÜRBÜZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XXI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konunun Özgeçmişi	3
1.2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Farklı Tür Agregaların Kullanılabilirliği Konusunda Yapılan Çalışmalar	3
1.2.2. Dünyada Taş Mastik Asfalt Karışım Konusunda Yapılan Çalışmalar.....	10
1.2.3. Türkiye’de Taş Mastik Asfalt Karışım Konusunda Yapılan Çalışmalar	24
1.2.4. Agrega-Bitüm Adezyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar	33
1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol	47
1.4. Asfalt.....	48
1.4.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı	49
1.4.2. Asfaltın Reolojisi.....	52
1.4.3. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler	53
1.5. Agrega.....	60
1.5.1. Agregaların Sınıflandırılması	60
1.5.2. Agregaların Mekanik Özellikleri.....	65
1.5.3. Agregalara Uygulanan Deneyler	66
1.6. Üstyapı ve Kaplama Türleri.....	81
1.6.1. Bitümlü Karışım Kaplama.....	81
2. ADEZYON.....	113
2.1. Temel Adezyon Kuvvetleri.....	115
2.1.1. İyonlar Arasındaki Elektrostatik Etkileşimler	116

2.1.2. Van der Waals Kuvvetleri Aracılığıyla Elektrodinamik Etkileşimler.....	116
2.1.3. Elektron Çifti Paylaşma Aracılığıyla Etkileşimler.....	119
2.2. Adezyon Teorileri	119
2.2.1. Zayıf Sınır Tabakaları Teorisi	120
2.2.2. Mekanik Kilitlenme Teorisi	121
2.2.3. Elektrostatik Teori.....	122
2.2.4. Kimyasal Bağlanma Teorisi	122
2.2.5. Termodinamik Teori (Adsorpsiyon Teorisi/Serbest Yüzey Enerjisi)	123
2.2.6. Moleküler Oryantasyon Teorisi.....	124
2.3. Adezyon Kaybı	124
2.4. Adezyon Deney Yöntemleri	129
2.4.1. Farklı Malzemelerle Asfalt için Adezyon Kuvvetlerinin Belirlenmesi.....	130
2.4.2. Farklı Malzemelerle Asfaltın Suyun Soyulma Etkisine Karşı Direncinin Belirlenmesi	134
2.4.3. Adezyonun Temel Bir Değer Olarak Tanımlanması.....	165
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	180
3.1. Materyal	180
3.1.1. Bitüm	180
3.1.2. Mineral Agregası.....	180
3.1.3. Elyaf	184
3.2. Deneysel Çalışmalar	185
3.2.1. Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi.....	185
3.2.2. Agregası Özelliklerinin Belirlenmesi.....	187
3.2.3. Marshall Yöntemi ile AB ve TMA Aşınma Karışımlarının Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi	194
3.2.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi	197
4. BULGULAR VE İRDELEME.....	203
4.1. Bitüme Uygulanan Deney Sonuçları	203
4.2. Agregalara Uygulanan Deney Sonuçları	203
4.2.1. Mineralojik-Petrografik Analiz Sonuçları.....	203
4.2.3. Fiziksel-Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi için Yapılan Deneylerin Sonuçları	213
4.3. Sıcak Karışımlara Uygulanan Deney Sonuçları	217
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	267
6. KAYNAKLAR.....	276

7. EKLER	303
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

BAZALTİK AGREGALARIN TAŞ MASTİK ASFALT VE YOĞUN GRADASYONLU ASFALT BETONU KARIŞIMLARINDAKİ PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Havanur Ebru GÜRBÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Erol İSKENDER
2025, 302 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Bu çalışmada, Erzurum ve Ağrı bölgesinden dört taşocağından temin edilen agregalarının taş mastik asfalt kaplamalar ve yoğun gradasyonlu asfalt betonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Temin edilen agregaların örneklerinin minerojik-petrografik ve kimyasal analizleri yapılmış ayrıca fiziksel ve mekanik özellikleri deneylerle belirlenmiştir. Özellikleri belirlenen agregalar ve bitüm ile Marshall dizaynı yöntemi kullanılarak Karayolları Genel Müdürlüğü teknik şartnamesine uygun aşınma tabakası için yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt karışım tasarımları yapılmıştır. Her bir taş ocağı için yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt için ayrı ayrı optimum bitüm içeriği belirlenmiş ve belirlenen bitüm içeriklerinde asfalt karışım örnekleri hazırlanarak su hasarı, deformasyon, düşük sıcaklık çatlaması ve düşük sıcaklık dayanımı yönleriyle değerlendirilmiştir. Bu amaçla, modifiye Lottman (AASHTO T283), indirekt çekme mukavemeti, tekrarlı yük sünme deneyi ve yarı dairesel eğilme deneyleri yapılmıştır. Taşocakları arasında asfalt karışım performansı anlamında anlamlı farklılığın olduğu, seçilen taş ocakları için hem aynı agreganın kullanılması hem de farklı agregaların kullanılması durumunda taş mastik asfalt karışımların yoğun gradasyonlu asfalt karışımlara göre daha yüksek su hasarı, deformasyon ve çatlama direnci gösterdiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asfalt Betonu, TMA, Volkanik Kayaç, SCB, Su hasarı, Deformasyon, Düşük sıcaklık çatlaması

PhD. Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF BASALTIC AGGREGATES IN STONE MASTIC ASPHALT AND DENSE-GRADED ASPHALT CONCRETE MIXTURES Havanur Ebru GÜRBÜZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Erol İSKENDER
2025, 302 Pages, 1 Pages Appendix

In this study, the usability of aggregates supplied by four quarries in Erzurum and Ağrı regions in stone mastic asphalt pavements and densely graded asphalt concrete was investigated. Mineralogical, petrographic, and chemical analyses were conducted for the supplied aggregate samples, and their physical and mechanical properties were determined through experiments. Bitumen and aggregates with predetermined properties using the Marshall design method, dense-graded asphalt concrete and stone mastic asphalt mix designs were prepared for the wearing course in accordance with the General Directorate of Highways' technical specifications. Optimum bitumen content was determined separately for dense-graded asphalt concrete and stone mastic asphalt for each quarry and asphalt mixture samples with the specified bitumen contents were prepared and evaluated for water damage, deformation, low-temperature cracking, and low-temperature strength. For this purpose, modified Lottman (AASHTO T283), indirect tensile strength, cyclic load creep, and semi-circular bending tests were conducted. It was found that there was a significant difference in asphalt mix performance among the quarries, and stone mastic asphalt mixes showed higher water damage, deformation and cracking resistance than dense graded asphalt mixes, both when the same aggregate was used and when different aggregates were used for the selected quarries.

Key Words: Asphalt Concrete, SMA, Volcanic Rock, SCB, Water damage, Deformation, Low temperature cracking

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Bitümlü Bağlayıcıların Sınıflandırılması (Kaçaroğlu, 2019).....	49
Şekil 2. Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri (Masson & Lacasse, 2000).....	50
Şekil 3. Asfaltın Sıcaklık Hassasiyeti (Geçkil, 2008)	53
Şekil 4. Penetrasyon deneyinin şematik gösterimi (URL-4, 2025)	54
Şekil 5. Penetrasyon cihazı şematik gösterimi (Yüknü vd., 2021).....	54
Şekil 6. Yumuşma noktası deneyinin şematik gösterimi (URL-4, 2025).....	55
Şekil 7. Düktilite deneyi şematik gösterimi (URL-4, 2025).....	56
Şekil 8. Parlama noktası deney cihazı (Gürbüz, 2018).....	57
Şekil 9. İnce film halinde ısıtma deneyi cihazı (Gürbüz, 2018).....	58
Şekil 10. Süzme aparatı düzeneği şematik gösterimi (Yüknü vd., 2021).....	59
Şekil 11. Yol Agregası Grupları (Fordyce & O'Donnell, 1994).....	61
Şekil 12. Agregası gradasyon tipleri ve görsel dağılımları (Geçkil, 2008).....	62
Şekil 13. Agregası danelerinin biçimsel olarak sınıflandırılması	63
Şekil 14. Agregaların yüzey yapısı (Orhan, 2012)	64
Şekil 15. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında kullanılan hacimler (Yeşilçiçek, 2024)	65
Şekil 16. Elek analizi (İSFALT, 2001).....	67
Şekil 17. Los Angeles Cihazı (URL-4, 2025)	68
Şekil 18. Abraham konisi (Sultani, 2021)	72
Şekil 19. (a) Mikro-deval deney cihazı (URL-5, 2025) ve (b) çelik bilyeler (URL- 6, 2025).....	76
Şekil 20. Hızlandırılmış parlatma makinesi örneği (URL-7, 2025)	77
Şekil 21. Sürtünme direnci deney cihazı (URL-8, 2025)	77
Şekil 22. Asfalt bağlayıcı ile kaplanma derecesinin tahmini için referans (Gültekin vd., 2021).....	78
Şekil 23. Volkanik kayaların toplam alkali-silis içeriklerine (TAS) göre sınıflaması (Le Maitre vd., 2002).....	80
Şekil 24. Volkanik kayaların K ₂ O içeriklerine göre tanımlamaları (Le Maitre vd., 2002).....	80
Şekil 25. Asfalt karışımların sıcaklığa göre sınıflandırılması (Srikant vd., 2018)	82
Şekil 26. Agregası gradasyon eğrileri (Kabadayı, 2019).	82
Şekil 27. Asfalt betonun hacme göre tipik bileşenleri (URL-9, 2021).....	83

Şekil 28. Bitüm ölçeği, mastik ölçeği (bitüm + filler), harç ölçeği (mastik + ince agrega $d < 2$ mm olan), asfalt ölçeği (harç + agregalar $d > 2$ mm olan) ve makro ölçek dâhil olmak üzere asfalt karışımları için çok ölçekli model (Yu vd., 2015)	84
Şekil 29. TMA'nın bileşenleri (Ahmad, 2024).....	88
Şekil 30. Sıkıştırılmış bitümlü karışımın fiziksel modeli (Asphalt Institute, 2014).....	99
Şekil 31. Faz Diyagramı (Asphalt Institute, 2014).....	100
Şekil 32. (a) ITS deneyi yükleme durumu ve (b) kırılma düzlemi (Geçkil, 2008)	108
Şekil 33. SCB deneyi numune üretimi ve yükleme paterni (Abut ve Karaşahin, 2017).....	110
Şekil 34. SCB deneyinde elde edilen tipik bir yük-yer değiştirme eğrisi ve kırılma parametresi tanımları (Lu vd., 2021).....	111
Şekil 35. SCB numune geometri parametreleri ve çentik önünde FPZ bölgeleri (Eraslan, 2023)	111
Şekil 36. Yapıştırıcı ile alt katmanlar arasında ve yapıştırıcının kendi içinde mevcut olan adezyon ve kohezyon, sırasıyla (URL-13, 2024)	113
Şekil 37. Bitümün (bitüm-filler mastik) ve agregaların adezyonu ve kohezyonu, sırasıyla (Jakarni, 2012)	114
Şekil 38. Asfalt karışımlarında adezyonu etkileyen faktörler (Cihlářová vd., 2018).....	114
Şekil 39. (a) Dipollerin zıt yüklü uçları birbirini çeker (b) Dipollerin aynı yüklü uçları birbirini iter (URL-17, 2024)	117
Şekil 40. Dipol-Dipol etkileşimi (Baygus, 2024).....	117
Şekil 41. Dipol-İndüklenmiş Dipol Etkileşimi (URL-18, 2024).....	118
Şekil 42. London dağılım kuvveti (URL-18, 2024)	118
Şekil 43. Bağlanma yüzeyinin yakınında bulunan hava kabarcıklarının ve toz parçacıklarının temsili (Nageswaran, 2016).....	121
Şekil 44. Zayıf sınır tabaka teorisi (Pstrowska vd., 2022).....	121
Şekil 45. Mekanik kenetlenme teorisi (Pstrowska vd., 2022)	121
Şekil 46. Elektrostatik teori (Pstrowska vd., 2022).	122
Şekil 47. Kimyasal bağlanma teorisi (Pstrowska vd., 2022).....	123
Şekil 48. Termodinamik teorisi (Pstrowska vd., 2022)	123
Şekil 49. Bitüm (bitüm-filler mastik) ve agregalar arasındaki adezyon ve kohezyon (Caro vd., 2025)	125
Şekil 50. Asfalt karışımlarında oluşabilecek olası kırılma tipleri (Jakarni, 2012)	127
Şekil 51. Tekrarlı yüklemelerden dolayı gelişen gözenek basıncı	128
Şekil 52. Peel deneyindeki olası şemalar (Pstrowska vd., 2022)	130
Şekil 53. Pnömatik adezyon çekme deneyi cihazı (Pinto vd., 2009)	131
Şekil 54. BBS deney aparatının ana bileşenlerinin gösterimi (Twagirimana, 2014)	131

Şekil 55. BBS deneyinin çalışma prensibi (Twagirimana, 2014)	132
Şekil 56. Vialit deneyi ekipmanı (URL-19, 2025)	133
Şekil 57. İki bitüm numunesinin cam yüzeyine yapışmasının test edilmesinden sonra elde edilen sonuçlar (Pstrowska vd., 2022)	135
Şekil 58. Kaynar su deneyine tabi tutulan asfalt karışımı (a: yandan görünüş, b: üstten görünüş) (Pinto vd., 2009)	140
Şekil 59. Dönen şişe deney yöntemi (URL-20, 2025).....	146
Şekil 60. Film Soyulma Deney Cihazı (URL-21, 2025)	147
Şekil 61. İndirekt çekme dayanımı deney cihazı (URL-22, 2025).....	149
Şekil 62. Direkt çekme dayanımı deney prensibi (Grönniger vd., 2010).....	151
Şekil 63. Modifiye Lottman indirekt çekme dayanımı deneyi yapılışı (Hossain ve Roy, 2018)	153
Şekil 64. Texas donma-çözülme deneyi sırasında su kavanozunda tipik sıkıştırılmış numune (Hosaain ve Roy, 2018)	158
Şekil 65. Hamburg tekerlek izi deneyi (İskender vd., 2022).....	160
Şekil 66. Deney parametreleri ile hamburg eğrisi (Coleri vd., 2023)	160
Şekil 67. ECS deneyinin şematik şekli (Solaimanian vd., 2003)	161
Şekil 68. Doygunluk yaşlanma çekme rijitliği (SATS) deney cihazı (Caro vd., 2025).....	162
Şekil 69. Nem buharı duyarlılığı deneyi düzeneği (Department of Transportation Engineering Service Center, 2000)	163
Şekil 70. Hveem stabilometresi (URL-24, 2025)	163
Şekil 71. Georgia yüklü tekerlek deney cihazı ve çelik çerçeve (Hunter ve Ksaibati, 2002)	164
Şekil 72. Asfalt kaplama analizörü (Tran vd., 2010).....	164
Şekil 73. Duriez basınç deney setleri (URL-25, 2025).....	165
Şekil 74. DSA100'ün fotoğrafı ve deney düzeneğinin şeması (Grönniger vd., 2010).....	167
Şekil 75. Wilhelmy plaka tekniğinin şematik gösterimi (Hefer ve Little, 2005a)	169
Şekil 76. Wilhelmy plaka deneyinden ölçülen dinamik temas açısı (Derun ve Luo, 2019).....	169
Şekil 77. Durağan damla yönteminin şematik çizimi (Koc ve Bulut, 2014).....	170
Şekil 78. Asfalt yüzeyindeki durağan damla (Wei ve Zhang, 2012).....	171
Şekil 79. DVS cihazının şematik görünümü (Airey, 2024).....	173
Şekil 80. Ters gaz kromatografisi (Airey, 2024)	175
Şekil 81. Genel AFM uç sapması ölçümü (Hefer, 2004)	177

Şekil 82. Mikrokalerimetrenin çalışma prensibini gösteren şema (Miller vd., 2011).....	178
Şekil 83. İllere ait yer bulduru haritası	180
Şekil 84. 1 numaralı taş ocağına (TO1) ait yer bulduru haritası.....	181
Şekil 85. 1 numaralı taş ocağına (TO1) ait uydu görüntüsü ve çalışma alanı	181
Şekil 86. 1 numaralı taş ocağının (TO1) mevcut görüntüsü.....	181
Şekil 87. 2 numaralı taş ocağına ait (TO2) yer bulduru haritası.....	182
Şekil 88. 2 numaralı taş ocağına ait (TO2) uydu görüntüsü ve çalışma alanı	182
Şekil 89. 2 numaralı taş ocağının (TO2) mevcut görüntüsü.....	182
Şekil 90. 3 ve 4 numaralı taş ocaklarına (TO3 ve TO4) ait yer bulduru haritası	183
Şekil 91. 3 numaralı taş ocağına (TO3) ait uydu görüntüsü ve çalışma alanı	183
Şekil 92. 3 numaralı taş ocağının (TO3) mevcut görüntüsü.....	183
Şekil 93. 4 numaralı taş ocağına (TO4) ait uydu görüntüsü ve çalışma alanı	184
Şekil 94. 4 numaralı taş ocağının (TO4) mevcut görüntüsü.....	184
Şekil 95. Çalışmada kullanılan elyaf (Viatop Premium).....	184
Şekil 96. Penetrasyon Deneyi Cihazı	185
Şekil 97. Yumuşama noktası deneyi.....	185
Şekil 98. Düktilite deneyi	186
Şekil 99. Parlama noktası deneyi.....	186
Şekil 100. Çözünürlük deneyi	186
Şekil 101. Özgül ağırlık deneyi	187
Şekil 102. Ocaklara ait kayaç numunelerini kırma işlemleri.....	188
Şekil 103. Ocaklara ait kayaç numunelerinin eleme işlemleri	188
Şekil 104. Kayaç numunelerinden hazırlanan ince kesitler.....	189
Şekil 105. Kimyasal analiz için hazırlanan kayaç numuneleri.....	189
Şekil 106. Los Angeles deney aşamaları	190
Şekil 107. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney aşamaları.....	191
Şekil 108. Cilalanma deneyi.....	191
Şekil 109. Metilen mavisi deney aşamaları	192
Şekil 110. Yassılık indeksi deneyi.....	193
Şekil 111. Kaba agrega özgül ağırlık ve su emme deney aşamaları.....	193
Şekil 112. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi	193
Şekil 113. Mineral filler özgül ağırlık deneyi	194
Şekil 114. Marshall dizayn yöntemi ile sıcak karışımların optimum bitüm içeriğini belirleme aşamaları.....	196

Şekil 115. Beher metodu ile bitüm süzülme deneyi aşamaları.....	196
Şekil 116. Briketlerin suya doyurulması işlemi	197
Şekil 117. İndirekt çekme dayanımı deneyi aşamaları	199
Şekil 118. Su hasarı (modifiye Lottman) deneyi aşamaları.....	199
Şekil 119. Tekrarlı sünme deneyi aşamaları.....	200
Şekil 120. Numunelerin orta çapının belirlenmesi ve kesilmesi	201
Şekil 121. Kesilmiş numuneler.....	201
Şekil 122. Soğutucuda bekletilen numuneler	201
Şekil 123. SCB numunelerinin deneye tabi tutulması.....	202
Şekil 124. 1 numaralı taş ocağının bulunduğu bölgenin 1/100 000 ölçekli jeoloji haritası (Konak ve Sümengen, 2009b'den değiştirilerek alınmıştır).....	204
Şekil 125. 1 numaralı taş ocağına ait ince kesit görüntüleri.....	205
Şekil 126. 2 numaralı taş ocağının bulunduğu bölgenin 1/100 000 ölçekli jeoloji haritası (Sümengen, 2011).....	205
Şekil 127. 2 numaralı taş ocağına ait ince kesit görüntüleri.....	206
Şekil 128. 3 ve 4 numaralı taş ocağının bulunduğu bölgenin 1/100 000 ölçekli jeoloji haritası (Keskin ve Sümengen, 2013)	207
Şekil 129. 3 numaralı taş ocağına ait ince kesit görüntüleri.....	207
Şekil 130. 4 numaralı taş ocağına ait ince kesit görüntüleri.....	208
Şekil 131. İncelenen volkanik kayaçların SiO ₂ içeriklerinin karşılaştırılması	210
Şekil 132. İncelenen volkanik kayaçların K ₂ O içeriklerinin karşılaştırılması.....	210
Şekil 133. İncelenen volkanik kayaçların ana element oksit yüzdelерinin karşılaştırılması.....	211
Şekil 134. İncelenen volkanik kayaç örneklerinin (a) toplam alkali-silis (TAS) ve (b) SiO ₂ 'ye karşı K ₂ O sınıflama diyagramları (Le Maitre vd., 2002)	211
Şekil 135. AB karışımı için karışım gradasyonu grafiğı	217
Şekil 136. TMA karışımı için karışım gradasyonu grafiğı.....	218
Şekil 137. Süzülme deney sonuçlarına ait karşılaştırma grafiğı.....	224
Şekil 138. Koşullandırılmış numunelerin İÇM değerlerinin grafiğı	226
Şekil 139. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen koşullandırılmamış YG AB ve TMA örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiğı.....	228
Şekil 140. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen koşullandırılmış YG AB ve TMA örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiğı	229
Şekil 141. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen YG AB örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiğı	229
Şekil 142. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen TMA örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiğı.....	230

Şekil 143. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen yoğun gradasyonlu AB ve TMA örneklerine ait İÇMO (%) değerlerinin grafiği.....	230
Şekil 144. YG AB karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	235
Şekil 145. TMA karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	236
Şekil 146. YG AB ve TMA karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisinin kıyası	236
Şekil 147. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri	239
Şekil 148. TO2 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri	240
Şekil 149. TO3 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri	241
Şekil 150. TO4 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri	242
Şekil 151. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri	243
Şekil 152. TO2 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri	244
Şekil 153. TO3 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri	245
Şekil 154. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri	246
Şekil 155. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için sünme eğrileri	247
Şekil 156. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için kırılma işinin karşılaştırılması.....	248
Şekil 157. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımının sünme eğrisine ait eğim hesabı.....	249
Şekil 158. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için kırılma enerjisi değerlerinin karşılaştırılması	251
Şekil 159. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için eğim değerlerinin karşılaştırılması	251
Şekil 160. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için esneklik indeksi değerlerinin karşılaştırılması.....	252
Şekil 161. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için maksimum yük değerlerinin karşılaştırılması	252
Şekil 162. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için değerlerinin karşılaştırılması.....	253
Şekil 163. İÇM değerleri ile baziklik oranının dağılım grafiği	255
Şekil 164. İÇMO değerleri ile baziklik oranının dağılım grafiği	255
Şekil 165. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile baziklik oranının dağılım grafiği	255
Şekil 166. G_f değerleri ile baziklik oranının dağılım grafiği.....	256
Şekil 167. F_I değerleri ile baziklik oranının dağılım grafiği	256
Şekil 168. CRI değerleri ile baziklik oranının dağılım grafiği	256
Şekil 169. İÇM değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği.....	259

Şekil 170. İÇMO değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği.....	259
Şekil 171. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği	259
Şekil 172. G_f değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği	260
Şekil 173. FI değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği.....	260
Şekil 174. CRI değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği	260
Şekil 175. İÇM değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği.....	262
Şekil 176. İÇMO değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği.....	262
Şekil 177. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile silis doygunluğu dağılım grafiği	263
Şekil 178. G_f değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği.....	263
Şekil 179. FI değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği.....	263
Şekil 180. CRI değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği.....	264

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Asfaltın element analizi (Yüknü vd., 2021)	49
Tablo 2. SARA fraksiyonlarının özellikleri ve kimyasal bileşimi (Emtiaz vd., 2023).....	51
Tablo 3. Elek açıklıkları ve deney numunesi ağırlıkları (Behzad, 2023; Yüknü vd., 2021; Arslan, 2014).....	66
Tablo 4. Çubuklu Elekler (TS EN 933-3)	70
Tablo 5. Sıcaklıklara göre suyun yoğunluğu (Gültekin vd., 2021)	72
Tablo 6. Türkiye’de 2013-2023 yılları arasında yapılan AB yol uzunlukları (URL-12, 2025).....	85
Tablo 7. Avrupa’da ve Türkiye’de AB (EN 13108-1) kullanımı (%) (EAPA, 2013-2023)	85
Tablo 8. Kaba agrega özellikleri (KGM, 2023).....	86
Tablo 9. İnce agrega özellikleri (KGM, 2023)	86
Tablo 10. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri (KGM, 2023).....	87
Tablo 11. Mineral fillerin gradasyon limitleri (KGM, 2023).....	87
Tablo 12. Avrupa’da ve Türkiye’de Taş Mastik Asfalt (EN 13108-5) kullanımı (EAPA, 2013-2023).....	89
Tablo 13. Kaba Agrega Özellikleri (KGM, 2023)	91
Tablo 14. İnce Agrega Özellikleri (KGM, 2023)	92
Tablo 15. TMA aşınma gradasyonu ve tolerans sınırları (KGM, 2023)	92
Tablo 16. İlave mineral filler gradasyon limitleri (KGM, 2023)	92
Tablo 17. Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler (Yılmaz, 2016).....	96
Tablo 18. Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları (KGM, 2023).....	102
Tablo 19. Asfalt betonu dizayn kriterleri (KGM, 2023).....	103
Tablo 20. TMA dizayn kriterleri (KGM, 2023)	105
Tablo 21. Bitüm ile agreganın yapışmasını etkileyen malzeme özellikleri ve harici faktörler (Whitehoak, 1990; URL-15, 2024).....	115
Tablo 22. Adezyon mekanizmalarının teorisi (Pstrowska vd., 2022; Remišová, 2004; Cihlářová vd., 2018).....	120
Tablo 23. Temas açıları ve karşılık gelen ıslanma dereceleri (Lamperti, 2011)	124
Tablo 24. Su hassasiyetini etkileyen faktörler (Little ve Jones IV, 2003).....	126

Tablo 25. Adezif ve kohezif kırılmaya ilişkin nem hasarı mekanizmaları (Hossain ve Roy, 2018)	127
Tablo 26. Adezyon kaybını açıklayan teoriler ile soyulma mekanizmaları arasındaki önerilen ilişkiler	127
Tablo 27. Nem hasarını etkileyen faktörler (Taib vd., 2019).....	136
Tablo 28. Statik deney yönteminin koşulları (Hugener vd., 2012; Pstrowska vd., 2022; Paliukaitė vd., 2016).....	138
Tablo 29. Statik daldırma deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022)	139
Tablo 30. Kaynar su deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022; Airey ve Choi, 2011).....	140
Tablo 31. Kaynar su soyulma deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022, Choi, 2005).....	141
Tablo 32. Net adopsiyon deney yönteminin koşulları (Aiey ve Choi, 2011).....	142
Tablo 33. Modifiye net adopsiyon deney yönteminin koşulları (Aiey ve Choi, 2011).....	143
Tablo 34. Ultrasonik yönteminin koşulları (Airey ve Choi, 2011; Liu vd., 2014).....	144
Tablo 35. Ancona soyulma deney yönteminin koşulları (Choi, 2005; Airey ve Choi, 2011)	145
Tablo 36. Dönen şişe deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022)	146
Tablo 37. Film soyulma deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022).....	147
Tablo 38. İndirekt çekme dayanımı deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)	150
Tablo 39. Modifiye Lottman indirekt çekme dayanımı deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022).....	153
Tablo 40. Basınç dayanımı deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)	155
Tablo 41. Daldırma-basınç deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)	156
Tablo 42. Marshall daldırma deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022).....	157
Tablo 43. Teksas donma-çözülme kaide deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022).....	158
Tablo 44. Bitümün fiziksel özellikleri	203
Tablo 45. İncelen volkanik kayaların metal ve ana element oksit yüzdeleri	209
Tablo 46. Agregaların fiziksel özellikleri.....	213
Tablo 47. AB karışımı için agrega gradasyonu	217
Tablo 48. TMA karışımı için agrega gradasyonu.....	218
Tablo 49. TO1 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri.....	219
Tablo 50. TO2 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri.....	219
Tablo 51. TO3 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri.....	220

Tablo 52. TO3 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri.....	220
Tablo 53. TO1 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri	221
Tablo 54. TO2 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri	222
Tablo 55. TO3 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri	222
Tablo 56. TO4 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri	223
Tablo 57. Üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt örnekleri için belirlenen optimum bitüm oranları.....	224
Tablo 58. Süzülme deney sonuçları.....	224
Tablo 59. Koşullandırılmış numunelerin İÇM değerleri (kPa)	225
Tablo 60. Modifiye Lottman deney sonuçları	227
Tablo 61. Hesaplanan İÇM (kPa) ve İÇMO (%) değerleri.....	228
Tablo 62. YG AB karışımlarına ait tekrarlı sünme deney sonuçları	233
Tablo 63. TMA karışımlarına ait tekrarlı sünme deney sonuçları.....	234
Tablo 64. Sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2)	236
Tablo 65. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları	238
Tablo 66. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	239
Tablo 67. TO2 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları	239
Tablo 68. TO2 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	240
Tablo 69. TO3 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları	240
Tablo 70. TO3 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	241
Tablo 71. TO4 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları	241
Tablo 72. TO4 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	242
Tablo 73. YG AB karışımlarına ait maksimum kırılma yükü ortalamaları.....	242
Tablo 74. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları.....	242
Tablo 75. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	243
Tablo 76. TO2 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları.....	244
Tablo 77. TO2 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	244
Tablo 78. TO3 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları.....	245
Tablo 79. TO3 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	245

Tablo 80. TO4 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları.....	246
Tablo 81. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2).....	246
Tablo 82. TMA karışımlarına ait maksimum kırılma yükü ortalamaları	247
Tablo 83. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan toplam alanlar (br^2)	247
Tablo 84. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için sünme eğrilerine ait eğimler.....	249
Tablo 85. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için kırılma enerjisi değerleri	250
Tablo 86. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için esneklik indeksi (FI) değerleri.....	250
Tablo 87. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için çatlama direnci indeksi (CRI) değerleri	250

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	: Asfalt Betonu
AASHTO	: The American Association of State Highway and Transportation Officials
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CaO	: Kalsiyum Oksit
$CaCO_3$	: Kalsiyum Karbonat
cm	: santimetre
Cr_2O_3	: Krom (III) Oksit
dk	: Dakika
EAPA	: European Asphalt Pavement Association
Fe_2O_3	: Demir (III) Oksit
g	: gram
HMA	: Sıcak Karışım Asfalt
İÇM	: İndirekt Çekme Mukavemeti
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
K_2O	: Potasyum Oksit
kPa	: Kilopascal
KTŞ	: Karayolu Teknik Şartnamesi
m	: Metre
MgO	: Magnezyum Oksit
MnO	: Manganez Oksit
Mpa	: Megapascal
NiO	: Nikel Oksit
NAPA	: National Asphalt Pavement Association
NCHRP	: The National Cooperative Highway Research Program
Na_2O	: Sodyum Oksit
PMB	: Polimer Modifiye Asfalt
ppm	: parts per million (milyonda bir)
P_2O_5	: Fosfor Pentoksit

SARA	: Doygun, aromatik, reçine ve asfalten
SHRP	: The Strategic Highway Research Program
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
SMA	: Taş Mastik Asfalt
SO ₃	: Kükürt Trioksit
SrO	: Stronsiyum Oksit
TMA	: Taş Mastik Asfalt
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
TO	: Taş Ocağı
UEPG	: Aggregates Europe/ European Aggregates Association
WMA	: Ilık Karışım Asfalt
ZrO ₂	: Zirkonyum Oksit
ZnO	: Çinko Oksit

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Asfalt kaplamalar, artan trafik hacimleri ve yükleri, yol yapımında meydana gelen üretim hataları, yetersiz bakım ve iklim koşullarının etkisi altında bozulmaya uğrarlar (Yılmaz, 2016). Meydana gelen bu bozulmalar, yolun öngörülen hizmet süresini ve konfor düzeyini düşürür ayrıca mevcut yollarda planlanan zamandan daha önce bakım-onarım çalışması yapılmasını gerektirir (Demirkaya, 2016; Yılmaz, 2016). 2024 yılı KGM verilerine göre yolcu taşımacılığının %90,9'unun, yük taşımacılığının ise %91,3'ünün karayollarından sağlandığı ülkemizde karayollarının bakım-onarım masraflarının yapım maliyetlerini aşması ülkemiz açısından önemli bir kayba yol açmakta ve bunun önlenmesi için mevcut asfalt kaplama özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir (URL-1, 2025; Yılmaz 2016). Kaplama tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımların mühendislik özelliklerini iyileştirmenin iki temel yolu vardır. Bu temel yollardan biri karışıma katkı maddeleri eklemek, diğeri ise karışım gradasyonunu ve dolayısıyla asfalt çimentosu oranlarını değiştirmektir (Kök vd. 2012; Akpolat, 2014; Aslan, 2018). Taş mastik asfalt, bu kategoride karışım performansının iyileştirilmesi bakımından tipik bir örnektir.

Agregalar çok çeşitli kullanım alanlarına sahip olmakla birlikte özellikle inşaat sektöründe zorunlu olarak kullanılan bir malzemedir (Madencilik Türkiye, 2018). Dünya nüfusunun hızla artması ve bunun sonucu olarak da inşaat sektöründeki büyüme ve gelişme, yol yapımlarının hızlanması gibi nedenlerden ötürü agrega talebinde büyük artışlar olmuştur. Ülkemizde de benzer bir durum söz konusudur. Aggregates Europe (UEPG); 2023'te toplam üretim tonajlarına göre Rusya'nın 857 milyon ton (mt) ile en büyük ülke olduğunu, onu 546mt ile Almanya ve 355mt ile Fransa'nın takip ettiğini ve onları da 320mt ile Türkiye'nin izlediğini göstermiştir (URL-2, 2025).

Taş mastik asfalt karışımlar (TMA) tipik olarak %70-80 kaba agrega, %8-12 filler ve %6-7 asfalt bağlayıcıdan oluşur (NAPA, 2018). Bu karışımlarında kullanılan kaba agrega miktarı asfalt betonuna kıyasla daha fazla ve daha dayanıklıdır ve stabilite bu kaba agregaların birbirine temas ederek kenetlenmesi ile sağlanır (Aslan, 2018; Şanlıer, 2018). Ağır trafik yükleri altında ve sıcak iklim koşullarında oluşabilecek kalıcı deformasyonlara karşı, kaba agrega olarak granit, bazalt veya diğer yüksek kaliteli magmatik kayaların

kırılmasından elde edilen agregaların kullanıldığı taş mastik asfalt karışımlar yüksek dayanım göstermekte; aşınmaya karşı daha dirençli, durabilitesi daha fazla ve daha homojen ve geçirimsiz olma gibi özellikleri sebebiyle de öne çıkmaktadırlar (Oral vd., 2017; KGM, 2013; Şanlıer ve Pamuk, 2017). Ayrıca taş mastik asfaltlar, geleneksel asfalt kaplamalardan %20 ile %40 oranında daha uzun servis ömrüne sahiptir ve geleneksel asfaltlar için gerekli olan bakım onarımdan farklı olarak herhangi bir özel bakım veya onarıma ihtiyaç duymazlar (Sönmez ve Yıldırım, 2013). Ama KGM 2023 verilerine göre Türkiye’de bu yılda yapılan toplam 68.654 km karayolu ağının 29.879 km’si asfalt betonu olarak inşa edilmiş, TMA (EN 13108-5) ise EAPA’nın 2023 yılı verilerine göre sadece %5 oranında yapılmıştır (URL-1, 2025; URL-3, 2025). Karayolları Genel Müdürlüğü 2019-2023 Stratejik Planı’nda “Artan yük ve yolcu taşımacılığı talebini karşılayacak güvenli ve konforlu karayolları yapmak ve geliştirmek” amaçlanmaktadır (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2019). Dolayısıyla TMA’ların ülkemizde daha fazla çalışılması gerekmektedir. Bununla birlikte bazalt, granit gibi magmatik kayaçların istenen kalitede temin edilmesinin her zaman mümkün olmaması; bu tür agrega ocaklarının yetersizliği ve bu ocakların işletme zorlukları; taşıma mesafelerinin TMA karışımlarının maliyetlerini önemli derecede etkilemesi; taş ocaklarına artan talepler nedeniyle büyük ölçekli çevre sorunlarının ortaya çıkması gibi nedenlerden ötürü TMA karışımlarda kullanılacak agregaların araştırılması da önem arz etmektedir (Oral vd., 2017; İskender, 2013; Karakuş, 2011).

Asfalt betonunun (AB) önemli bir özelliği, bitüm ile agrega yüzeyi arasındaki fiziksel-kimyasal etkileşimin sonucu olan, unsurları trafik yükleri ve su akışı altında bir arada tutan bağlayıcı-agrega adezyonudur ve bu özellik, asfalt karışımının yapısal stabilitesini, servis performansını ve hasar gelişimini önemli ölçüde etkilemektedir (Brondani vd., 2022; Guo vd., 2020). Adezyon ise birçok faktörden etkilenebilir. Bağlayıcının yetersiz olması; çok düşük yüzey sıcaklığı; serilme sonrası sıcaklıktaki ani düşüş; serilme sonrası yağış; tozlu, nemli ve kötü kalitedeki agrega kullanımı; asfalt numunler arasında nemin var olması gibi faktörler sayılabilir (Gürer vd., 2019; Karadağ, 2019). Ancak adezyon mekanizmasının nem hasarı olayını iyi açıklayamaması, farklı ölçekler altındaki adezyon karakterizasyonlarının zayıf bir şekilde ilişkilendirilmesi ve adezyon özelliğinde baskın rol oynayan temel faktörlerin yeterince açık olmaması gibi bazı eksiklikler mevcuttur ve daha fazla araştırılması gerekmektedir (Guo vd., 2020).

1.2. Konunun Özgeçmişi

1.2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Farklı Tür Agregaların Kullanılabilirliği Konusunda Yapılan Çalışmalar

Karışımların performansında agregaların özellikleri (şekil, yassılık, parçalanmaya karşı direnç, cilalanmaya karşı direnç, iri agrega danelerindeki ezilmiş ve kırılmış yüzey yüzdesi ve gradasyon) hakkında çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Šernas vd., 2016; Valdés-Vidal vd., 2017). Dünyada agregalarla ilgili yapılan çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Agrega gradasyon değişimlerinin asfalt beton karışımlarının tekerlek izi özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış, bu amaçla gradasyon aralığı bant oluşturan üç varyasyona (üst limit, orta limit ve alt limit gradasyon bantları) ayrılmış ve üst gradasyon bandına sahip karışımların en yüksek stabiliteye, alt gradasyon bandının ise en düşük stabiliteye sahip olduğu ve ayrıca üst gradasyon bandına sahip asfalt karışımının en yüksek akış parametresine sahip olduğu bulunmuştur (Golalipour vd., 2012).

Agrega gradasyonu ve tipinin sıcak karışım asfaltın (HMA) tekerlek izi potansiyeli üzerindeki etkisini değerlendirmek, agrega özelliklerinin Marshall karışımının özellikleri üzerindeki etkisini anlamak ve karışım özellikleri ile sıcak karışım asfaltın tekerlek izi potansiyeli arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla bir çalışma yürütülmüş ve asfalt kaplama karışımlarının tekerlek izi direncinin karışım gradasyonu ve agrega türünden etkilendiği belirtilmiş, ayrıca daha kaba gradasyonun (3A) tüm agrega türleri için tekerlek izine karşı en yüksek dirence sahipken açık gradasyonlu karışımların (2C) en düşük dirence sahip olduğu vurgulanmıştır (Ahmed ve Attia, 2013).

Asfalt karışımların kalıcı deformasyonu üzerinde agrega mineralojisinin etkisinin araştırıldığı çalışmada kuvars içeriği ile tekerlek izi deneyiden kaynaklanan tekerlek izi derinliği arasında ilgili bir korelasyon tespit edilmiş, farklı malzemelerde yüksek yüzdelerde bulunan albitin herhangi bir belirli etki göstermediği belirtilmiştir (Anastasio vd., 2013).

Agrega gradasyonunun asfalt karışımların rijitliğine etkisini araştırılmış, karışımların hacimsel özelliklerini anlamak için kullanılan Bailey oranları kullanılmış ve asfalt gradasyonunun tam olarak anlaşılmasını sağlamak için iki oran daha tanıtılmıştır (Al-Mosawe vd., 2015).

Asfalt karışımında gneys iri agrega ve çelik cürufuflı ince agreganın aynı anda kullanılmasının uygulanabilirliği araştırılmış ve gneys iri agrega ve modifiye WSFA'dan

(Ayrışmış Çelik Cüruf Agregası) oluşan asfalt karışım ile daha iyi çatlak direnci, nem direnci, hacim kararlılığı ve deformasyon direnci elde edildiği belirtilmiştir (Chen vd., 2015).

Farklı agrega türlerinin fiziksel özelliklerinin asfalt karışımların mekanik davranışı üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada, hem kaba hem de ince boyuttaki agregaların morfolojisinin ve yüzey dokusunun, değerlendirilen asfalt karışımların sertliği ve çatlama direnci üzerinde etkili olduğu ve bu etkinin parçalama işlemine ve agregaların kökenine bağlı olduğu gösterilmiştir (Valdés-Vidal vd., 2015).

Agrega gradasyonunun ve tipinin HMA'nın nem hasarı direnci ve rijitlik ve tekerlek izi ile gösterildiği gibi kaplama performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, bazalt agregasının kireçtaşı agregasından daha yüksek nem duyarlılığı direncine ve sertliğe sahip olduğunu göstermiştir. Daha iri gradasyon en yüksek kalıcı deformasyona sahipken, açık gradasyon 2C'nin en düşük nem hasarı direncini sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, yoğun gradasyon 4C'nin en düşük tekerlek izi ve en yüksek soyulma direncini sağladığı kaydedilmiştir (Abu El-Maaty Behiry, 2016).

İngiliz Sarkaç Numarası ve Ortalama Doku Derinliği açısından yol kaplamaları için asfalt aşınma tabakalarının sürtünme performansı üzerine geometrinin (ince agregalar - minimum/maksimum boyut 0,063/2 mm - içerik açısından), mineralojinin (bazalt veya metamorfik - minimum/maksimum boyut 8/16 mm) ve şeklin (yassılık ve şekil indeksi açısından) laboratuvar ölçeğindeki etkilerine odaklanılmış ve sonuç olarak karışımdaki ince parçacıkların miktarı ve kaba agregaların şeklinin sürtünme özelliklerini ve makro dokuyu etkilediği belirtilmiştir (Magnoni vd., 2016).

Agregaların geometrik özelliklerinin, sıkıştırma ve servis aşamasında asfalt karışımların reolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve sonuç olarak sıkıştırma ve servis aşamalarında karışımların reolojik özelliklerinin eleme çapına ve şekil indeksine daha duyarlı olduğu, ancak köşeliliğe daha az duyarlı olduğu ifade edilmiştir (Pei vd., 2016).

Granit ve kireçtaşı agregalarını içeren HMA karışımları araştırılmış ve kireçtaşına sahip HMA karışımlarının daha iyi mekanik davranış gösterdiği, sertlik ve mekanik direnç kazanımına, özellikle de kalıcı deformasyona katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Honório de Assis vd., 2017).

Asfaltlı temel karışımında bazalt, kireçtaşı ve andezit agrega kombinasyonlarının kullanım olasılığı araştırılmış ve kompozit agreganın kompozit asfalt karışımların hacimsel özelliklerini değiştireceği; agrega üzerine alkalin iri agregaların veya yüzeyi pürüzlü iri agregaların dâhil edilmesinin, asfaltlı temelin mekanik özelliklerini iyileştirebileceği; bazalt

ve kireçtaşı agregalarının bileşimi ile asfalt karışımının nem direnci özelliğini önemli ölçüde artırabileceği bildirilmiştir (Kong vd., 2017).

Agrega gradasyonunun HMA karışımlarının çatlama performansı üzerindeki etkileri iki aşamada (çatlama başlangıcı ve çatlama ilerleme aşamaları) araştırılmış, deneyler sonucunda çatlama başlangıç aşamasında gradasyonlara dayalı çatlama direnci indeksi (GCI) ile çatlama direnci arasında güçlü bir ilişki olduğu ayrıca artan GCI değeri ile çatlama direncinin arttığı gözlemlenmiştir (Tran ve Takahashi, 2017).

Asfalt karışımların durabilitesi, agregaların fiziksel özelliklerine bağlı olarak yaşlanma ve su hassasiyetinden kaynaklanan hasara karşı performansları aracılığıyla değerlendirilmiş; sonuç olarak partikül indeksi parametresi aracılığıyla analiz edilen ince fraksiyon agregaların köşeliliğinin ve yüzey dokusunun, test edilen asfalt karışımların nem hasarına ve yaşlanmasına karşı performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir (Valdés-Vidal vd., 2017).

Farklı mineral bileşimli ve orijinli kayalardan (granit, gabro, trakibazalt, kuvars kumtaşı ve postglasyal tortulardan gelen kayalar) elde edilen filler agregalarının seçilmiş özellikleri sunulmuş ve mineral filler agregalarının bitüm ile karıştırıldığında önemli farklılıklar gösterdiği belirtilmiş; gabro ve granit fillerleri kullanıldığında Delta halka ve bilye deney sonuçlarının en yüksek değerlere ulaştığı, boyut olarak en yüksek homojen olmama durumunun kuvars kumtaşı, gabro ve granit filler için belirlendiği bildirilmiştir (Wasilewska vd., 2017).

Agrega gradasyonunun teorisi ve tasarım yöntemi üzerine bir incelemenin sunulması ve bunun asfalt kaplama performansına olan etkisine göre değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Agregada gradasyonu, kaplama performanslarının hemen hemen hepsini önemli ölçüde etkilediği, maksimum yoğunluk eğrisi teorisi, parçacık karışma (interfering) teorisi ve fraktal teorisinin agrega gradasyonu için ana teoriler olduğu gibi sonuçlara değinilmiştir (Fang vd., 2018).

Agregaların morfolojik özellikleri değerlendirilmiş ve agrega özellikleri ile karışım özellikleri arasındaki ilişki incelenmiş, agreganın köşeliliği veya küreselliği ile asfalt-agrega adhezif özelliği arasında yakın doğrusal ilişkiler olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Cui vd., 2018).

Agrega türlerinin (riyolit, kireçtaşı ve bazalt) sıcak karışım asfalt performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve bazalt agregasının kademeli olarak uygulanan yüke, darbe kuvvetine, aşındırıcı kuvvetlere karşı mükemmel bir dirence sahip olduğu; riyolit ve

kireçtaşına göre mükemmel durabiliteye sahip olduğu; kireçtaşı agregasının hidrofobik ve riyolit agregasının ise hidrofillik olduğu ifade edilmiştir (Tessema ve Ponnurangam, 2019).

Farklı agregaların (ikisi akarsu tipi, birisi taş ocağından) fiziksel özelliklerinin asfalt karışımların yorulma davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiş, ince agregaların şekil ve dokuları ile karışımların yorulma davranışı arasında güçlü bir ilişki olduğundan söz edilmiştir (Valdés-Vidal vd., 2019).

Superpave HMA karışımlarının tasarımında Bailey agrega gradasyonu yönteminin kullanılma olasılığı araştırılmış ve bu karışımların tekerlek izi performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve Superpave gradasyonları kullanılarak üretilen asfalt karışımları için tekerlek izi performansı ile karşılaştırılmış, tekerlek izi performansının agrega gradasyonundan güçlü bir şekilde etkilendiği; daha ince karışımların daha yüksek akış sayısı verdiği bunun da daha az tekerlek izi duyarlılığı ve daha yüksek tekerlek izi dirençli kaplama anlamına geldiği ifade edilmiştir (Ghuzlan vd., 2020).

Asfalt karışımlarda kullanılan iri agrega türleri ile ortaya çıkan üstyapıların uzun süreli kayma direnci kapasitesi arasındaki ilişkinin bulunması amaçlanmış, bunun için numunelerin kaba agregalarının mineralojik analizi yapılarak “Ortalama Agrega Sertliği Parametresi” olarak adlandırılan yeni bir parametre tanımlanmış ve bu parametrenin uzun süreli kayma direnci ile iyi bir şekilde ilişkili olduğu bulunmuştur (Kane ve Edmondson, 2020).

Karışım gradasyonu ve tekerlek izi davranışı arasındaki ilişki incelenmiş ve karışımın 4.75 mm geçen oranının %20'den %35'e çıkarılmasının tekerlek izi derinliğini yavaş yavaş artırdığı, %41'i aşan geçen oranıyla, karışım önemli ölçüde azalmış tekerlek izi direnci sergilediği ve soyulma davranışı gözlemlendiği belirtilmiştir (Lv vd., 2020).

Agrega (granit, diyabaz, kireçtaşı) mukavemeti ve şeklinin asfalt karışımın performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiş, kırılma değeri, kayıp açısı değerleri, yuvarlaklık ve yassılık indeksi ile mukavemet ve şeklin asfalt karışımın iç iskelet yapısını önemli ölçüde etkilediğini gösteren temas özellikleriyle mükemmel bir ilişkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca dayanım parametreleri ile mekanik özellikler arasında zayıf bir doğrusal ilişki olduğu, çünkü diyabazın granitten üç kat daha güçlü olduğu, ancak daha düşük bir performansa sahip olduğu, bunun da agrega mukavemetinin asfalt karışımın performansı ve stabilitesi üzerinde minimum bir etkisi olduğu ifade edilmiştir (Hassan vd., 2021).

Agregaların kimyasal ve fiziksel özelliklerinin asfalt karışımının mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Asfalt karışımları hazırlamak için farklı taş ocaklarından farklı morfolojilere, bileşim oksitlerine ve mukavemetlere sahip üç farklı agrega türü (Granit 1, Granit 2 ve kireçtaşı) kullanılmıştır. Asfalt karışımının mikroyapısal özelliklerini elde etmek için DIP merkezli iPAS yazılımı (Görüntü İşleme Analiz Sistemi) ve mikroyapıların enine kesit görüntülerini yakalamak için, dijital kameralar kullanan bir yük-bağlaşım cihazı (CCD) dayalı iki boyutlu (2B) bir görüntü işleme yaklaşımı kullanılmıştır. Sonuçlar, sodyum oksit (Na_2O) + potasyum oksit (K_2O) + kalsiyum oksit (CaO) + silisyumun (SiO_2) yüksek sıcaklık ve basınçta granit numunelerinin elektriksel iletkenliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Marshall, tekerlek izi, üç nokta kırış eğme, iki periyotta çift çekme-basınç yorulma deneyleri, asfalt karışımlarının yapısal performansı ile mikroyapısal özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmak için yürütülmüştür (Busang ve Maina, 2022).

Bağlayıcı tipinin, agrega tipinin ve gradasyon karakteristiğinin (özellikle IC-çatlak bileşeni kısmının) asfalt karışımların kırılma özellikleri ve göreceli çatlama performansının daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Superpave yoğurmalı kompaktör kullanılarak sıkıştırılan karışım numuneleri kısa süreli etüvde yaşlandırma (153°C 'de 2 saat) ve uzun süreli etüvde yaşlandırma (85°C 'de 5 gün) dâhil olmak üzere laboratuvar şartlandırmasına tabi tutulmuş ve ardından döngüsel gözenek basıncı şartlandırma prosedürü uygulanmıştır. Sonuç olarak, polimer modifikasyonunun ve agrega tipinin kırılma özellikleri üzerindeki etkisinin doğrulandığı ve özellikle ince kısmın özelliklerinin karışım çatlama performansını belirlemede temel role sahip olduğu vurgulanmıştır (Yan vd., 2023).

Agrega tipi ve bitüm tipinin asfalt karışımlarının fiziko-mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Havaalanlarının aşınma tabakasında kullanılan asfalt karışımı BAA 16 (AC16) üzerinde laboratuvar çalışmaları yürütülmüş ve Marshall seti ve akma indeksi, su absorpsiyonu, rijitlik modülü, yorulma direnci, kalıcı deformasyona direnç, yakıt direnci gibi deneyler yapılmıştır. Asfalt karışımlarında kullanılan malzemelerin kalitesinin asfalt karışımının daha sonraki kullanımdaki davranışında önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir (Petcu ve Răcănel, 2024).

Türkiye’de agregalarla ilgili yapılan çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

İstanbul dolayındaki asfalt yapımına uygun agrega üretilen Gebze kireçtaşı, Çorlu bazalt, Cebeci kumtaşı ve Erdek granit ocaklarından numuneler alınmış ve numunelerin petrografik analizlerinin yanı sıra agrega deneyleri yapılmıştır. Özellikleri belirlenen farklı

agregalar ile asfalt dizaynları yapıldıktan sonra bitümle olan etkileşimleri ve bitüm miktarları tespit edilmiştir. Agregaların asfalt karışım özelliklerine etkileri, hazırlanan karışımlar üzerinde fiziksel deneyler yapılarak araştırılmıştır. Ayrıca fiziksel deney sonuçlarına göre bitüm içerikleri en uygun görülen asfalt karışımları üzerinde tekerlek izi deneyi yapılmış ve deney sonucuna göre en az oturma derinliği veren karışıma performans deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, kireçtaşı, kumtaşı, bazalt ve granitten üretilen agregalar ile hazırlanan asfalt karışımları gerekli olan tüm özellikleri sağladığı belirtilmiştir. Farklı agregaları bir arada kullanarak üretilen asfalt karışım özelliklerinin olumsuz olarak değişmediği kaydedilmiştir (Sönmez, 2010).

Kırılmış agrega numunelerinin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla, volkanik agrega numunelerinin bitümlü kaplama tabakalarında kullanılabilirliğini değerlendirmek için Afyonkarahisar-Seydiler bölgesindeki iki farklı agrega kaynağından alınan dört farklı agrega numunesi incelenmiştir. Bu numunelerin volkanik agrega (V_1), volkanik agrega (V_2), kireçtaşı 1 (L_1) ve kireçtaşı 2 (L_2) olduğu belirtilmiştir. Volkanik kayaçların jeokimyasal ve petrografik analizleri sonucu traki-andezit kompozisyona sahip olduğu ifade edilmiştir. Marshall stabilite değerine göre; V_1 numunesi, V_2 numunesinden çok daha fazla stabiliteye sahipken kireçtaşı numunelerinden L_1 numunesi, L_2 'den daha fazla stabiliteye sahip olduğu belirtilmiştir. Tüm karışımların stabilitesi karşılaştırıldığında ise $L_1 > V_1 > L_2 > V_2$ şeklinde olduğuna değinilmiştir. Ayrıca deney sonuçları, volkanik agregalardan yapılmış V_1 örneğinin yoğun trafiğe sahip aşınma tabakasında yeterli performans gösterdiğini ve V_2 örneğinin bitümlü bir karışım olarak yeterli deformasyon direnci göstermediğini; ancak iyi sürtünme özellikleri nedeniyle yüzey tabakalarında kullanılabileceği ifade edilmiştir (Akbulut vd., 2011).

Düzgün geometrik şekil alabilmesi için kesilen andezitin kesilmesi sırasında ortaya çıkan atıklarının asfalt betonunda agrega ve filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla farklı agrega (aynı granülometri eğrisine sahip kireçtaşı ve andezit) ve bitüm oranlarına sahip numuneler hazırlanmış ve bu numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanmıştır. Sonuç olarak andezit tozunun yaygın olarak bulunduğu bölgelerde ve bunun yanı sıra taşıma ve kurutma maliyetlerinin kireçtaşının maliyetini geçmediği kesimlerde, asfalt betonu karışımlarında filler malzemesi olarak kireçtaşı yerine andezitin kullanılabileceği belirtilmiştir (Uzun, 2011).

Türkiye'nin farklı bölgelerindeki (ağırlıklı olarak Marmara Bölgesi) granit ocaklarından numuneler alınmış ve numunelerin jeolojik, petrografik, mineralojik ve

kimyasal özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra bu kayalardan üretilen agregaların özelliklerinin belirlenebilmesi için standartlara uygun agrega deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca soyulma ve çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri suyun etkisinin ve trafik yüklerinden kaynaklanan soyulma özelliklerinin belirlenmesi için yapılmıştır. Agrega deney sonuçlarının incelenmesi ve bu sonuçların referans agregaların (İstanbul Bölgesinde asfalt üretiminde kullanılan bazalt, kireçtaşı ve kumtaşı agregaları) deney sonuçlarıyla karşılaştırılması neticesinde granitik kayaç agregalarının yassı tane yüzdelerinin laboratuvarda çeneli kırıcıda üretilmesi nedeniyle yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durum da agregaların Los Angeles katsayılarının artmasına neden olduğu kaydedilmiştir. Bunun dışındaki diğer özelliklerin sıcak asfalt karışımlarında agrega olarak kullanılabilirlikleri açısından uygun olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca suyun etkisiyle meydana gelen soyulmanın granitik kayaç agregalarının yüzey gerilmesine, bileşiminde bulunan kuvars, ortoklaz ve hornblend yüzdesine, mineral boyutuna (ortoklaz boyutu) ve kimyasal bileşimine bağlı iken, trafik yüklerinin etkisiyle meydana gelen çekme gerilmelerinin agregaların yüzey pürüzlülüğüne ve bileşimindeki kuvars, plajiyoklaz ve biyotit minerallerinin boyutuna bağlı olduğu kaydedilmiştir (Yılmaz, 2012).

Gabro ve bazaltların bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğinin araştırılması ve elde edilen verilerin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Samsun, Ordu ve Giresun illerinde bulunan bu kayalardan numuneler alınarak ilgili deneylere tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda sıcak karışım imalatlarında karşılaşılabilecek sorunlar ve bunların çözüm önerileri değerlendirilerek sonuca bağlanmıştır (Eker, 2019).

Sıcak karışım asfaltın mekanik özelliklerine değişik tipteki agrega ve bağlayıcının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, 3 tip agrega (kalker, bazalt ve dere malzemesi) ve iki tip bağlayıcı (B 50/70 ve B 160/220) kullanılmıştır. Her agrega grubu için farklı oranlarda bitümlü bağlayıcılar kullanılarak asfalt karışımları hazırlanmıştır. Marshall deneyleri sonucunda karışımların mekanik özellikleri değerlendirilmiş ve bunun yanı sıra karışımların stabilite, akma, yoğunluk ve boşluk değerleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Sonuç olarak Marshall tasarım parametre değerlerinin sınır şartları sağlaması nedeniyle agrega grubu kalker ve bitümlü bağlayıcısı B 160/220 olan karışımın daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir (Namlı ve Görgülü, 2021).

1.2.2. Dünyada Taş Mastik Asfalt Karışım Konusunda Yapılan Çalışmalar

Üç çeşit taş mastik asfalt karışımının (B-TMA adı verilen bazalt kaba ve ince agregaları; L-SMA adı verilen kireçtaşı kaba ve ince agregaları; BL-TMA adı verilen bazalt kaba agregaları ve kireçtaşı ince agregaları kullanılarak) performansları karşılaştırılmış ve B-SMA'nın en iyi tekerlek izi direncini gösterdiği, bunu BL-TMA'nın izlediği ve L-TMA'nın son sırada geldiği belirtilmiştir. Ancak çatlamaya karşı direnci ve nem hassasiyeti ile ilgili düşük sıcaklık performansı açısından sıralamanın ters olduğu bildirilmiştir. Agregat tipinin tekerlek izi direnci üzerinde önemli bir etkisinin olduğu belirtilirken TMA karışımlarında düşük sıcaklık çatlama duyarlılığı veya nem duyarlılığı açısından önemli bir farkın bulunmadığı kaydedilmiştir. Ayrıca, üç TMA karışımı için dinamik modülün ana eğrileri oluşturulmuş ve B-TMA'nın en yüksek dinamik modülü gösterirken, L-TMA'nın her frekansta en küçük dinamik modülü gösterdiği raporlanmıştır (Cao vd., 2013).

NCHRP-465 raporuna dayalı olarak basit performans deneyleri (yani dinamik modül, dinamik sünme ve statik sünme) kullanılmıştır. Karışıma katkı maddesi olarak eklenmesine kıyasla, agregat malzemelerinin kısmi bir ikamesi olarak kuru halde karışıma farklı yüzdelerde hidratlı kireç fillerin doğrudan eklenmesinin, TMA'nın performansı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla fillerin bir kısmı olarak iki farklı agregat gradasyonuna ve farklı sönmüş kireç içeriğine sahip TMA numuneleri hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, fillerin sönmüş kireç ile kısmi ikamesinin TMA'nın akış sayısı, akış süresi, tekerlek izi ve yorulma çatlaması faktörleri gibi direnç indekslerinde iyileşmeye neden olurken asfaltın kalıcı deformasyonlarını azalttığını göstermiştir (Shafiei ve Namin, 2014).

Esnek kaplamalarda asfalt ve taş mastik asfalt karışımların modifiye edilmesinin faydaları araştırılmış ve bu amaçla 60/70 penetrasyon dereceli asfalt çimentosu ve İran doğal bitümü (gilsonit) fiziksel ve performans deneylerine tabi tutulmuştur. Modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş bitüm üzerinde fiziksel ve geleneksel deneyler (penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve viskozite) yapılmıştır. Modifiye edilmemiş ve modifiye edilmiş TMA karışımları üzerinde Marshall stabilitesi, dolaylı çekme mukavemeti, nem hassasiyeti, esneklik modülü ve tekerlek izi direncini içeren performans deneyleri gerçekleştirilmiştir. %5, %10 ve %15 gilsonit içeren modifiye asfalt bağlayıcılar üzerinde yapılan deneylerin sonuçları, gilsonit kullanımının SMA karışımının performansını arttırdığı belirtilmiştir (Babagoli vd., 2015).

Farklı nominal maksimum agregâ boyutlarına sahip agregâ gradasyonunun taş mastik asfaltın sertliği, tekerlek izi ve yorulma performansı üzerindeki etkisi değeriendirilmiştir. Agregâ gradasyonunda 4.75, 9.5, 12 ve 19 mm nominal maksimum agregâ boyutuna ve PG 58-22 asfalt bağlayıcıya sahip dört TMA karışımı tasarlanmıştır. Dinamik modül, tekerlek izi cihazı ve dört nokta kırış yorulma deneyleri farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Tekerlek izi cihazı deney verileri kullanılarak bir regresyon modeli kullanılmış ve bu model, agregâ gradasyonunda agregâ boyutunun artmasıyla TMA'nın tekerlek izi direncinin arttığını ortaya koymuştur. Kırış yorulma deneyi ve asfalt bağlayıcı drenaj deneyi, agregâ gradasyonunda artan agregâ boyutunun sırasıyla yorulma ömrünü azalttığını ve bağlayıcı drenajını arttırdığını göstermiştir. TMA'nın dinamik modülü, tekerlek izi derinliği ve yorulma ömrü arasındaki bazı ilişkileri rapor edilmiştir. Yorulma eğrilerinden elde edilen yorulma katsayıları (K1 ve K2) arasında bir ilişki önerilmiştir. Sonuçların analizi sonucunda daha sert TMA'nın daha düşük yorulma ömrüne ve tekerlek izi değerielerine sahip olduğu bildirilmiştir. Agregâ gradasyonunda agregâ boyutunun artmasıyla tekerlek izi direnci ve karışım sertliğinin arttığını belirtilmiştir (Hafeez vd., 2015).

Taş mastik asfaltın ve sürekli gradasyonlu sıcak karışım asfaltın esneklik modülünü ve dinamik sünme davranışını üç sıcaklık seviyesinde çeşitli fiber içeriklerine karşı değeriendirmek için iki fiber türü kullanılmıştır. Genel olarak sürekli gradasyonlu karışımlar hem esneklik modülü hem de dinamik sünme deneylerinde daha iyi mekanik özellikler sergilemiştir. Fiberler sadece asfaltın akması (drain-down) üzerinde değil aynı zamanda numunelerin mekanik özellikleri üzerinde de büyük etki göstermiştir. Dinamik sünme ve esneklik modülü deneylerini kullanılarak mineral ve organik fiberlerin kontrol HMA ve TMA karışımlarının davranışları üzerindeki etkisinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle yoğun gradasyonlu karışımlara kontrol karışımları adı verilmiş ve taş mastik asfalt numunelerini temsil etmek için TMA kısaltması kullanılmıştır. Hem kontrol hem de TMA numunelerinde iki fiber tipi kullanılmış ve çalışmada dört numune grubu oluşturulmuştur. Karışım bileşiminin kalitesini sağlamak için agregâ ve asfalt deneyleri yapılmıştır. TMA'yı kontrol karışımlarıyla karşılaştırmak için, hazırlanan 84 numune üzerinde 5°C, 25°C ve 35°C'lik üç sıcaklık seviyesinde esneklik modülü ve dinamik sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Lavasani vd., 2015).

Yüksek kaliteli dolomit asfalt aşınma tabakası için agregâ olarak değeriendirilmiş ve dolomit agregaları ile tekerlek izlerine dayanıklı asfalt karışımı tasarlanmış ve deney sonuçlarının iyi bitüm-agregâ adezyon özellikleri gösterdiğini bildirilmiştir. EN 13108-1 ve

EN 13108-5 standardına göre, granit ve yüksek kaliteli dolomit agregaları kullanılarak asfalt betonu (AB) karışımları ve esas özelliklere göre yüksek kaliteli dolomit agregaları kullanılarak taş mastik asfalt karışımları tasarlanmıştır. Asfalt karışımlarının kalıcı deformasyona karşı direnci, aşınma tabakası için geleneksel asfalt karışımlarına (%2-4) kıyasla daha yüksek hava boşluğu içeriğine (%3-4) sahip daha kaba gradasyon karışımları tasarlanarak elde edilmiştir. Tasarlanan asfalt karışımları, yüksek kaliteli dolomit agregalı asfalt karışımları için umut verici sonuçlar gösteren ampirik ve performans dayalı deneyler kullanılarak test edilmiştir (Šernas vd., 2016).

Nanokilin, iki farklı kategorideki TMA karışımlarının (lifli ve polimerli) yüksek sıcaklık özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 60/70 penetrasyon sınıfı saf bitüm, kireçtaşı agregaları, selüloz lifleri ve Stiren Bütadien Stiren (SBS) polimerinin yanı sıra bitümün ağırlığına göre yüzde 1-4 aralığında farklı dozajlarda montmorillonit nanokil parçacıkları kullanılmıştır. Farklı asfalt malzemelerinin performans özellikleri, modifiye asfalt bağlayıcıların depolama stabilitesinin yanı sıra, farklı miktarlarda nanokil parçacıkları içeren TMA karışımlarının Marshall stabilitesi ve akma, sünme özellikleri ve tekerlek izi direnci açısından değerlendirilmiştir. Nanokil polimer asfalt bağlayıcıların daha iyi performans özelliklerinin yanı sıra daha yüksek depolama stabilitesine sahip olduğu ortaya konulmuştur. Polimer modifiyeli asfalt bağlayıcılı TMA karışımlarının daha iyi kalıcı deformasyon özelliklerine (daha yüksek tekerlek izi direnci) sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca %3 nanokil içeren TMA karışımının en yüksek tekerlek izi direncine sahip olduğu kaydedilmiştir (Ameri vd., 2017).

Katkı maddesi olarak Nano Al_2O_3 ele alınmış ve sıcak karışım asfaltın hasarlara karşı dayanımını arttırmak amacıyla taş mastik asfalt türü incelenmiştir. Kullanılan taş malzeme gradasyonun, maksimum nominal agrega boyutu 20 mm olan taş mastik asfalt için İran Yolları Asfalt Kaplama Yönetmeliği (Yayın 234) tarafından önerilen ortalama gradasyon olduğu belirtilmiştir. Tüketilen bitüm Tahran Pasargad Petrol İşleme Kompleksindeki bitüm 60-70 olduğu kaydedilmiştir. Taş mastik asfaltta agrega aralarındaki boşluğa bağlı olarak oluşan drenaj olayını önlemek amacıyla, sıcak karışım asfalt üretmek için ağırlıkça %0.3 oranında sıcak karışım asfalt miktarına sahip selüloz lifleri kullanılmıştır. Nano Al_2O_3 katkısının taş mastik asfaltın dinamik performansına etkisi dinamik sünme deneyi, tekerlek izi deneyi ve dolaylı çekme yorulma deneyleri ile araştırılmıştır. Farklı yüzdelerde Nano Al_2O_3 ilavesinin taş mastik asfaltın dinamik performansını önemli ölçüde artırabildiği kaydedilmiştir (Chelovian ve Shafabakhsh, 2017).

Farklı bitüm türlerinin (normal kaplama sınıfı bitüm 50/70 ve ayrıca polimer modifiye bitümün (PMB) 45/80-65) yanı sıra farklı doğal agrega (dört farklı ocaktan çıkarılan hem ince (kum 0/4) hem de kaba (4/8 ve 8/16) kaynaklarının (kayaçlar magmatik) iki malzeme arasındaki adezyon ve afinite ve taş mastik asfaltın özellikleri üzerindeki etkisi analiz edilmiş, sonuçların değişken olmasına ve genel bir sonuca varılamamasına rağmen, mineral agregaların şekli ve doğası ile bitüm türleri ve derecelerinden açıkça etkilendiği belirtilmiştir (Ciont vd., 2017).

Farklı yüzdelerde Nano Fe_2O_3 ilavesinin taş mastik asfaltın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Nano Fe_2O_3 'ün taş mastik asfaltın mekanik özelliklerini kabul edilebilir bir düzeye çıkarabildiği, böylece nano malzeme kullanımı nedeniyle karışımların sertlik modülünün arttığı ve karışımların yorulmaya karşı dayanımının da arttığı kaydedilmiştir. Ayrıca Nano Fe_2O_3 ilavesi ile sıcak karışım asfaltın tekerlek izi oluşumuna karşı mukavemeti de kabul edilebilir seviyeye çıkarılmıştır (Kordi ve Shafabakhsh, 2017).

Katkı maddesi olarak Nano SiO_2 ve TiO_2 incelenmiş ve bu nano malzemelerin TMA'nın mekanik davranışı üzerindeki etkisi tekerlek izi, dolaylı çekme yorulması ve dolaylı çekme sertliği modülü deneyleri ile araştırılmıştır. Bitüm 60–70, farklı Nano SiO_2 ve Nano TiO_2 içerikleriyle (bitümün ağırlığına göre sırasıyla %0, 0.3, 0.6, 0.9 ve 1.2) modifiye edilmiştir. Farklı yüzdelerde nano malzemelerin eklenmesinin taş mastik asfaltın mekanik davranışını önemli ölçüde iyileştirebildiği bildirilmiştir (Sadeghnejad ve Shafabakhsh, 2017).

İnce agrega köşeliliğinin (FAA) asfalt kaplamanın kayma direnci üzerindeki etkisi araştırılmış, amaca ulaşmak için, taş mastik asfaltta ve geleneksel asfalt betonunda (AB) ayrı ayrı, çeşitli FAA değerlerine sahip dört ince agrega kullanılmıştır. Deneyler sonucunda FAA'nın makro doku düzeyinde kayma direnci üzerinde önemli bir etkisi olduğu, ancak mikro doku düzeyinde yalnızca düşük bir etki gözlemlendiği ifade edilmiştir (Lin ve Tongjing, 2018).

Agrega özelliğinin performansa göre ne kadar kritik olduğunu belirlemek için farklı yüzdelerde düz ve uzun (F&E) agrega ile tasarlanan TMA karışımlarının performansı değerlendirilmiş ve agreganın düşük aşınma kaybı değerlerine sahip olması durumunda yüksek F&E agrega kullanılmasının performans üzerinde genellikle önemli bir olumsuz etkisi olmadığı belirtilmiştir (Watson ve Julian, 2018).

Atık malzeme içeren geleceğe yönelik asfalt bağlayıcılarla üretilen taş mastik asfalt karışımlarının mekanik, yüzey ve çevresel özellikleri değerlendirilmiştir. Bu bağlayıcılar, motor yağı, yüksek yoğunluklu polietilen, stiren-butadien-stiren ve kırıntı kauçuğu kullanılarak atık malzeme içeriğini en üst düzeye çıkarmak ve aynı zamanda ticari olarak modifiye edilmiş bir bitüm kadar iyi performans göstermek üzere tasarlanmıştır. Seçilen bağlayıcılarla üretilen TMA karışımlarının genel performansı değerlendirilmiştir. Bu karışımların su hassasiyetini, yorulma çatlamasını ve kalıcı deformasyon performansını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Atık malzemeli yeni asfalt karışımlarının yol kaplama işlerinde insan ve çevre güvenliğinden ödün vermeden performansı artırmak için kullanılabileceği belirtilmiştir (Fernandes vd., 2019).

Katkı maddelerinin TMA karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisini incelemek ve kaplamalar için ideal bir yüzey tabakası önermek için çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada katkı maddeleri olarak hindistan cevizi lifi, sisal (sisal bitkisinden elde edilen lif ve batı hint adalarına özgü bir agave bitkisi) ve muz lifleri gibi doğal lifler kullanılmıştır. Kullanılan malzemeleri karakterize etmek için bir ön araştırma yapılmıştır. TMA karışımlarını optimize etmek ve stabilize karışımların mühendislik özelliklerini incelemek için sırasıyla Marshall deneyi ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çeşitli stabilize karışımların hacimsel ve mekanik özelliklerine dayanılarak, lif tipine bakılmaksızın tüm lif karışımları için optimum lif içeriğinin, karışımın ağırlığına göre %0.3 lif olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak tüm stabilize karışımlarda hacimsel sonuçların şartname aralığı içinde olduğu belirtilmiştir. Kullanılan lifler arasında hindistan cevizi lifinin en iyisi olduğu, sisal ve muz lifi karışımlarının stabilizasyon açısından aynı özellikleri gösterdiği rapor edilmiştir. Katkı maddesi olarak çeşitli doğal lifler içeren TMA karışımının mühendislik davranışının kısa ve öz bir şekilde anlaşılmasını sağlamak ve bu malzemenin saha uygulamasındaki güven düzeyini artırmak amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir (Kumar ve Ravitheja, 2019).

TMA kaplama için mükemmel kayma direnci elde etmek amacıyla karışım tasarım parametrelerinin TMA kaplamanın kayma direnci üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Karışımlar ortogonal bir deneyle tasarlanmıştır. Maksimum boyutu geçen agregaların yüzdesi (PNMSA), maksimum boyuttan yalnızca bir küçük olan elek boyutunu geçen agregaların yüzdesi (PNMSA-1), kontrol elek boyutundan geçen agregaların yüzdesi (PCS), kontrol elek boyutundan (PCS-1) yalnızca bir küçük olan elek boyutunu geçen agrega yüzdesi ve asfalt içeriği (AC) olarak adlandırılan beş faktör ve her faktörün dört seviyesi

olduğu belirtilmiştir. 3 boyutlu ölçümle elde edilen kayma direnci indeksi (SI), kayma direncini değerlendirmek için kullanılmıştır. Üç parametrenin (PNMSA, PCS ve AC) kayma direncini iyileştirmek için anahtar parametreler olduğu kaydedilmiştir. Bunlar arasında kayma direnci üzerinde en büyük etkiye PNMSA'nın sahip olduğu, ikinci sırada AC'nin olduğu ve en küçük etkiye ise PCS'nin sahip olduğu bildirilmiştir. Ayrıca en iyi kayma direncine sahip tasarım parametreleri önerilmiştir (Liu vd., 2019).

Aynı polimerle modifiye edilmiş bağlayıcıyla ancak farklı maksimum agrega boyutuyla (MAS) (TMA11 ve TMA16) üretilen iki bitümlü taş mastik asfalt karışımının fonksiyonel performansı incelenmiştir. Akustik emilim, dinamik sertlik, yüzey dokusu ve lastik/kaplama gürültüsü değerlendirilmiştir. Bitümlü karışım tipi TMA16, doku spektrumunun hemen hemen her tarif edilen dalga boyunda daha yüksek doku seviyelerine sahip olduğu ve bu özelliğin TMA11 karışımına kıyasla daha yüksek ortalama lastik/kaplama ses seviyesine yol açabildiği belirtilmiştir. Her bir doku dalga boyunun lastik/kaplama gürültü spektrumunun farklı frekans bantları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda düşük gürültülü kaplama etiketleme metodolojisi (LNP etiketlemeLA2IC) sunulmuştur. TMA11 ve TMA16 karışımları 50 ve 80 km/saat olarak etiketlenmiştir. (Vázquez vd., 2019).

Geleneksel filler olarak kireçtaşı tozu (LP) yerine farklı kütle oranlarında (%0, %25, %50, %75 ve %100) kömür atık külü (CWA) ve pirinç kabuğu külü (RHA) içeren mastiklerin ve TMA karışımının performansı değerlendirilmiştir. Farklı filler ve konsantrasyonlara sahip asfalt mastiklerin tekerlek izi ve yorulma performansını araştırmak amacıyla Çoklu Gerilme Sünme Geri Dönme (MSCR) ve Doğrusal Genlik Tarama (LAS) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca karışımların mekanik performansını araştırmak amacıyla Marshall stabilitesi, esneklik modülü, dinamik sünme, neme duyarlılık, tekerlek izi, dolaylı çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. MSCR deney sonuçları, orijinal bağlayıcıya RHA ilavesinin bağlayıcının şekil değiştirmesinde azalmaya yol açtığını ve dolayısıyla orijinal bağlayıcının tekerlek izi mukavemetinin her iki gerilme seviyesinde de arttığını ortaya çıkarmıştır. CWA katkısının RHA'ya kıyasla olumsuz etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. LAS deneyinden elde edilen sonuçlara göre orijinal bağlayıcıya RHA ilavesi bağlayıcının yorulma ömrünü artırdığı kaydedilmiştir. Bunun tersine, CWA'nın mastiklerin yorulma davranışını iyileştirme konusunda yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca mastiklerin SBS ile modifikasyonu, modifiye asfalt bağlayıcıların yorulma davranışını iyileştirmiştir. Sonuçlar, RHA'nın geleneksel filler ile yer değiştirilmesinin asfalt karışımların Marshall

stabilitesini, esneklik modülünü, tekerlek izi özelliklerini, nem direncini ve çekme mukavemetini arttırdığını göstermiştir. Ters olarak, asfalt bağlayıcının CWA ile modifikasyonunun, karışımların nem direnci dışında belirtilen performans özelliklerinin azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. RHA ve CWA malzemelerinin çok olduğu İran'ın kuzey kesiminde bu malzemelerinin özellikle de kaplama mühendisliğinde RHA'nın yeniden kullanımının iki ana etkisi olduğunu sonucuna varılmıştır: birincisi çevre sorunlarını azaltması ve ikincisi, karışımların performans özelliklerini geliştirmesi (Ameli vd., 2020a).

Ilık karışım asfalt (WMA) katkı maddelerinin bağlayıcının reolojik özelliklerine ve karışımların performansına etkisi araştırılmıştır. Üç farklı gradasyonun (9.5 mm, 12.5 mm, 19 mm), çeşitli içeriklere sahip üç ılık katkı maddesinin (Sasobit, Rheofalt, Zycotherm) ılık TMA karışımlarının su hasarı direnci ve performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Orijinal ve ılık modifiye bitümlerin reolojik davranışları viskozite, dinamik kayma reometresi (DSR), Doğrusal Genlik Tarama (LAS), Çoklu Gerilme Sünme Geri Dönme (MSCR) deneyleri yapılarak incelenmiştir. Karışımların performans özellikleri dört nokta kırış yorulma (FPB), esneklik modülü, dolaylı çekme dayanımı (ITS), dinamik sünme ve tekerlek izi deneyleri ile araştırılmıştır. Modifiye edilmiş karışımların nem hassasiyeti; Esneklik Modülü Oranı, Kırılma Enerjisi Oranı, Çekme Dayanımı Oranı ve Texas kaynama deneyi gibi dört farklı yöntemle değerlendirilmiştir. LAS deney sonuçları, %1 Sasobit içeren bitümün düşük şekil değiştirme seviyelerinde en yüksek yorulma ömrüne sahipken, yüksek şekil değiştirme seviyelerinde Zycotherm ile modifiye edilmiş bağlayıcının en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğunu göstermiştir. MSCR deney sonuçları, %3 Sasobit içeren bağlayıcının en yüksek tekerlek izi direncine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Sonuçlar, ılık katkı maddelerinin eklenmesinin numunelerin nem direncini arttırdığını ortaya çıkarmıştır. Ilık modifiye karışımlar arasında Zycotherm ile modifiye edilmiş numunelerin su hassasiyetine karşı en yüksek dirence sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar, ılık katkı maddelerinin eklenmesinin karışımların performans özelliklerini arttırdığını göstermiştir. Ilık katkı maddeleri arasında %3 Sasobitin karışımların tekerlek izi ve yorulma davranışını iyileştirmede en yüksek etkiye sahip olduğu kaydedilmiştir (Ameli vd., 2020b).

Asfalt kaplamanın soğutulmasında kullanılan seramik atık agreganın (CA) fizibilitesi bir dizi deney yöntemi ve simülasyon tekniği yoluyla araştırılmıştır. %10, %20, %30, %40 ve %50 kaba seramik atık agregası (CATMA) içeren taş mastik asfalt ilk olarak Marshall yöntemi kullanılarak tasarlanmış ve daha sonra, beş farklı CATMA'nın yol performansı ve ısı yalıtım performansı, tekerlek izi deneyi, nem hassasiyeti deneyi, kırış eğme deneyi,

yorulma kırıışı deneyi ve iç mekân ısı yalıtım deneyi (indoor thermal insulation) dâhil olmak üzere kapsamlı laboratuvar deneyleriyle değerdendirilmiştir. Son olarak, CATMA'lar ile soğuyan asfalt kaplamanın geçici termal alanını ve tekerlek izi deformasyon tepkisini araştırmak için 2 boyutlu sonlu elemanlar (FE) modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, CATMA'ların %40'a varan CA içeriğiyle teknik gereksinimleri karşılamaya devam ederken tekerlek izi direnci, nem hassasiyeti ve çatlama önleme performansında bozulma yaşadığını göstermiştir. Öte yandan CATMA'ların asfalt katmanlarının alt kısmındaki kaplamanın sıcaklığını 11.5°C kadar soğutabildiği belirtilmiştir. Soğuyan asfalt kaplamanın kalıcı tekerlek izi deformasyonunun, CATMA içermeyen geleneksel asfalt kaplamaya göre %45.36 daha küçük olduğu kaydedilmiştir. Deney sonuçlarına ve sayısal simülasyon sonuçlarına dayanılarak taş mastik asfalttaki optimum seramik atık agrega içeriği %40 olarak önerilmiştir (Huang vd., 2020).

Taş mastik asfalt (TMA-13) karışımları düşey titreşim deney yöntemi (VVTM), Marshall yöntemi ve superpave yoğurmalı kompaktör yöntemi (SGC) olmak üzere üç yöntem kullanılarak tasarlanmıştır. Her üç yöntemle tasarlanan TMA-13'ün performansları ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. VVTM tasarımı TMA-13'te asfalt karışımının en uygun asfalt içeriğinin, Marshall tasarımı ve SGC tasarımı asfalt karışımlarına göre %5 daha düşük olduğu belirtilmiştir. Marshall ve SGC tasarımı asfalt karışımıyla karşılaştırıldığında, VVTM tasarımı TMA-13 daha yüksek yoğunluk (sırasıyla %2,4 ve %2,2 artış), mekanik özellikler (sırasıyla %32 ve %13 artış), yüksek sıcaklık tekerlek izi direnci (sırasıyla %30 ve %8 artış), düşük sıcaklık çatlama direnci (sırasıyla %20 ve %17 artış), su stabilitesi (sırasıyla %4 ve %3 artış) ve yorulma ömrü (sırasıyla en az %33 ve %9 artış) sergilediği kaydedilmiştir. VVTM yöntemiyle tasarlanan TMA-13 karışımı, geleneksel tasarım yöntemine göre daha iyi bir yol performansı ve durabilite sağlayarak TMA karışımlarının daha iyi tasarlanmasına olanak sağladığı bildirilmiştir (Jiang vd., 2020).

Filler olarak amorf karbon tozu içeren taş mastik asfaltın nem hassasiyeti ve tekerlek izi direnci araştırılmıştır. Kireçtaşı fillerin yerine %25, %50, %75 ve %100 oranında amorf karbon tozu kullanılmıştır. Karışımların performansı, kuru ve ıslak koşullarda dolaylı çekme mukavemeti ve esneklik modülü deneyleri, kaynar su, dinamik sünme ve tekerlek izi deneyleri kullanılarak değerdendirilmiştir. Kontrol karışımlarına kıyasla filler olarak %50 karbon tozu içeren modifiye karışımların nem hassasiyetinin daha az olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, %50'ye kadar amorf karbon kullanılmasının, TMA karışımlarının

esneklik modülünü ve tekerlek izi direncini, kırılma enerjisinde önemli bir olumsuz etki olmaksızın geliştirdiği belirtilmiştir (Korayem vd., 2020).

CB lifi ile modifiye edilmiş bitümün reolojik performansı ve bunun taş mastik asfaltta uygulanmasının uygunluğu araştırılmıştır. Viskozite, kompleks modül ve frekans, sıcaklık ve faz açısı ile ilişki gibi reolojik özellikler belirlenmiş ve CB fiberle modifiye edilmiş bitümün yorulma hasarı direnci kriterlerini değerlendirmek için Doğrusal Genlik Taraması (LAS) deneyi yapılmıştır. Taş mastik asfalt, CB elyafı ile modifiye edilmiş bitüm ile hazırlanmış ve TMA'nın Marshall Stabilitesi ve Akışı araştırılmış ve geleneksel işlenmemiş selüloz elyafı ile modifiye edilmiş bitümle hazırlanan kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Deneyden elde edilen sonuçların endüstri standartlarını karşıladığı ve taş mastik asfalt yapımında işlenmemiş selüloz elyaf yerine CB elyafı ile modifiye edilmiş bitümün kullanımını desteklediği belirtilmiştir (Rahman vd., 2020).

Taş mastik asfaltta bitüm kapsüllü sigara izmaritlerinin (CB) olası geri dönüşümü araştırılmıştır. Atık CB'ler işlenmiş ve PMB A10E sınıfı bitüm ile kapsüllenmiştir. Taş mastik asfalt örnekleri kaba agregaların %1, %2 ve %3 (ağırlıkça) oranında bitüm kapsüllü CB'ler ile yer değiştirilmesiyle hazırlanmıştır. TMA ile üretilen numunelerin Marshall stabilitesi, akışı, esneklik modülü ve hacimsel özellikleri araştırılmış ve sonuçlar, CB'ler olmadan hazırlanan kontrol TMA numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel prosedürler ve çalışmanın bazı önemli sonuçları ile birlikte sızıntı suyu analizinden elde edilen bazı sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır. Ortalama sonuçlar, bu çalışmada üretilen taş mastik asfalt numunelerinde kapsüllenmiş CB'lerin kullanımının stabilizeyi ve kalıcı deformasyona karşı direnci arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, işlenmemiş CB'lere kıyasla kapsüllenmiş CB'lerden ağır metallerin süzülmesi önemli ölçüde azalmıştır. Bu çalışmada bulunan umut verici sonuçlara dayanılarak, asfalt betonunda sigara izmaritlerinin endüstriyel ölçekte geri dönüştürülmesine yönelik daha fazla araştırma yapılması ve pratik uygulama prosedürlerinin geliştirilmesi tavsiye edilmiştir (Rahman ve Moajerani, 2020).

Yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE) TMA'nın mekanik özellikleri ve performansı üzerindeki etkililiğinin araştırılması amaçlanmıştır. Dolayısıyla mekanik özellikler için Marshall özellikleri, maksimum yoğunluk, kütle yoğunluğu/birim hacim ağırlığı ve stabilize ölçülmüştür. Tekerlek izi ve yorulma direnci performansının değerlendirilmesi amacıyla sırasıyla tekerlek izi ve dört nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. %4 HDPE içeren TMA karışımların en iyi yorulma direncine sahip olduğu, tekerlek izi performansının ise %8 HDPE içeriğinde olduğu belirtilmiştir. Maksimum yorulma ömrü ve minimum tekerlek izi

derinliği sırasıyla 157.090 devir ve 1.05 mm olarak kaydedilmiştir (Chegenizadeh vd., 2021a).

Etilen-Vinil Asetatın (EVA) TMA'nın yorulma ve tekerlek izi davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Islak teknikler uygulanarak EVA, C320 bağlayıcı ile harmanlanmış ve TMA karışımları hazırlanmıştır. EVA dozajı %2 ile %6 arasında çeşitlendirilmiştir. Karışımlar üzerinde dört nokta eğilme kırışi deneyi, tekerlek izi deneyi, Schellenberg deneyi, akış numarası deneyi ve dinamik modül deneyi yapılmıştır. Tekerlek izi direncinde belirgin iyileşmeler olduğu ve dört nokta eğme deneyinde kırılma döngüsünde EVA yüzdesindeki artışlarla iyileşmeler olduğu görülmüştür. EVA konsantrasyonunun artmasıyla akış sayısı artmış ve bitümün drenajı azalmıştır. Her bir EVA konsantrasyonuna ilişkin ana eğri çizilmiş ve karşılaştırılmıştır. EVA yüzdesinin artmasıyla karışımların faz açısının azaldığı kaydedilmiştir (Chegenizadeh vd., 2021b).

Kuru işlemle harmanlanmış, kauçukla modifiye edilmiş TMA 12.5'in fonksiyonel geçerliliğine katkıda bulunmak ve bitüm drenajını önlemek, geleneksel selüloz fiber TMA'ya alternatif olmak ve TMA karışımının genel dayanıklılığını arttırmak amaçlanmıştır. Analiz edilen karışımlar su hassasiyeti, kalıcı deformasyon, deforme olabilirlik, yorulma direnci ve yaşlanma açısından değerlendirilmiştir. Kauçukla modifiye edilmiş TMA'nın, yüksek sıcaklık koşulları altındaki ağır araçların hareketlerine dayanıklı bir yüzey tabakası oluşturma hedefine iyi uyduğu ve Angola'da veya diğer benzer gerçekliklerde asfaltlama teknolojisinde kullanıma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Chissama ve Picado-Santos, 2021).

%2, %4 ve %6 nano silika ile modifiye edilmiş %20, %30, %40 ve %50 RAP malzemeleri içeren farklı asfalt bağlayıcı bileşikler ve taş mastik asfalt karışımları hazırlanmıştır. Ayrıca, her bir karışımın reolojik davranışı, akış aktivasyon enerjisi (FAE) yöntemi dikkate alınarak dönel viskozite (RV), frekans taraması, Çoklu Gerilme Sünme Geri Dönme (MSCR), Doğrusal Genlik Taraması (LAS) ve Kiriş Eğme Reometresi (BBR) dâhil olmak üzere çeşitli deneyler kullanılarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yaşlandırılmış TMA karışımlarının yorulma performansı dört nokta kırış yorulması (4 PB) deneyi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, nano-silika ve RAP bağlayıcı ilavesiyle bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığının azaldığını göstermiştir. Aynı zamanda MSCR ve frekans tarama deney sonuçlarına göre RAP bağlayıcılı modifiye bağlayıcıların tekerlek izi direncinin orijinal bağlayıcıya göre daha üstün olduğu görülmüştür. Ayrıca asfalt bağlayıcının fonksiyonel gruplarının nanopartiküller ile etkileşime girdiği asfalt bağlayıcının yapısında

nano-silika ile bir ağ oluşması nedeniyle, RAP bağlayıcılı modifiye bağlayıcılar yorulma ömrü açısından modifiye edilmemiş benzerlerine göre daha iyi performans göstermiştir. Yaşlanmanın, RAP içeren TMA karışımlarının yorulma ömrü üzerinde daha az zararlı etkisi olmuştur. Ancak bağlayıcıların düşük sıcaklık performansı nano-silika ilavesiyle azaldığı belirtilmiştir (Kamboozia vd., 2021).

Nominal maksimum agrega boyutunun (NMAS) ve gradasyonun TMA'nın hacimsel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiş, laboratuvar çalışmasının gradasyonun üst sınırı kullanılarak üretilen TMA karışımlarının, Marshall Stabilitesi ve dolaylı çekme mukavemeti açısından en yüksek mekanik özellikleri gösterdiği ifade edilmiştir (Tayh ve Alghrery, 2021).

Geleneksel Sıradan Portland Çimentosu (OPC) filleri yerine endüstriyel atıklardan biri olan Şeker Kamışı Küspesi Külü (SBA) taş mastik asfaltta filler olarak kullanılmış ve mühendislik performansları ve maliyet etkinliği incelenmiştir. TMA karışımları %6.25 optimum bağlayıcı içeriği ile dökülmüş olup filler olarak karışımın ağırlığına göre %2.5 (ACS1), %5.0 (ACS2), %7.5 (ACS3) ve %10 (ACS4) SBA ile çeşitlendirilmiş ve sonuçlar geleneksel TMA karışımı (ACS0) ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların, SBA'nın dâhil edilmesinin, karışımın artan sertliğini (Marshall ve akış özellikleri açısından) belirten üstün performanslar gösterdiği belirtilmiştir. TMA karışımının nem direnci %7.5 SBA değişimine kadar iyileştirilmiştir. Ayrıca, boşaltma deneyi sonuçları, SBA'nın stabilizasyon maddesi olarak etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya çıkarmıştır. ACS 1 ve ACS2 karışımı, ACS0'a göre minimum tekerlek izi derinliğini göstermiştir. %5 SBA'lı karışım, test edilen tüm karışımlardan daha fazla sayıda tekrarlanan yüke direnç göstermiştir (Akarsh vd., 2022).

Taş mastik asfaltta Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplamanın (RAP) maksimum kullanımı dikkate alınmıştır. Yaşlanmış bağlayıcıyı yumuşatmak için gençleştirici olarak Atık Motor Yağı (WEO) kullanılmıştır. Karışımında ağırlıkça %4 oranında bağlayıcı kullanılmıştır. Hacimsel özelliklerin belirlenmesi için deneyler; Marshall stabilitesi, drenaj, Cantabro aşınma deneyi, Çekme Mukavemeti oranı (TSR) deneyi yapılmıştır. RAP'ın TMA karışımına dâhil edilmesinin, geleneksel TMA karışımına kıyasla stabilizeyi %0,49 artırdığı belirtilmiştir. Aynı zamanda %5 civarında nem duyarlılığında olumlu etki gösterdiği kaydedilmiştir. RAP karışımını içeren TMA'nın drenajı, %0.23 drenaj gösteren geleneksel TMA karışımıyla karşılaştırıldığında %0.17 değerini vermiştir. Dolayısıyla TMA karışımında RAP'ın %62'sinin kullanılmasının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır (Akshitha vd., 2022).

Manyetit'in taş mastik asfalt karışımlarında geleneksel agregaların kısmi ikamesi olarak kullanıldığı yeni bir araştırma dizisi rapor edilmiştir. Asfalt yüzeyinin kendi kendini iyileştirme özelliklerini desteklemek için manyetit'in daha iyi termal özelliklerinden yararlanılırken TMA'nın işlevsel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Granit ve kumtaşı bazlı TMA karışımları %50 manyetit kaba agrega ile modifiye edilmiş ve yaşlanmaya ve su hassasiyetine karşı mekanik, fonksiyonel ve uzun süreli performansları araştırılmıştır. Sertlik açısından manyetit ile granit ve manyetit ile kumtaşı karışımlarında sırasıyla %45 ve %32 oranında artış elde edilmiştir. Manyetit bazlı karışımların hem kuru hem de ıslak sürtünmesi ve makro dokusu, geleneksel karışımlarla karşılaştırılabilir olduğu ya da onlardan daha iyi olduğu bulunmuştur. Ayrıca, kontrol karışımlarıyla karşılaştırıldığında manyetit bazlı karışımların, üç nem şartlandırma döngüsünden sonra daha fazla sertliğini koruduğu belirtilmiştir. Uzun süreli yaşlandırmanın ardından sertlik artışı, modifiye edilmiş karışımlarda kontrol karışımlara göre çok az olarak daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Son olarak manyetit'in, iki asfalt tabakası arasındaki arayüzeyin daha iyi bağlanmasını teşvik eden termal iletkenliğin iyileştirilmesi üzerinde çalıştığı kaydedilmiştir (Al-Kheetan vd., 2022).

Katkı maddesi olarak Nano CaCO_3 'ün taş mastik asfalt karışımların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, 60-70 asfalt bağlayıcısı, TMA numuneleri oluşturmak için farklı oranlarda Nano CaCO_3 ile modifiye edilmiştir. Modifiye ve kontrol numunelerinin yorulma, tekerlek izi ve nem hasarı direncini değerlendirmek için dolaylı çekme yorulması, tekerlek izi ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, Nano CaCO_3 parçacıklarının eklenmesiyle TMA karışımlarının yorulma ömrünün arttığını ve nihai şekil değiştirmelerinin azaldığını ortaya çıkarmıştır. Nano CaCO_3 'ün, TMA karışımındaki yorulma çatlaklarının oluşumunu ve yayılmasını geciktirme konusunda iyi bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir. Tekerlek izi deneyinin sonuçları, Nano CaCO_3 ile modifiye edilmiş TMA karışımlarının kontrol karışımlarına göre daha düşük tekerlek izi derinliğine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca TMA karışımının tekerlek izi oluşumu performansının yüksek sıcaklıklarda ve gerilme seviyelerinde iyileştiği belirtilmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti deneyinin sonuçları, Nano CaCO_3 ilavesinin TMA karışımının nem hasarı direncini arttırdığını ve sürekli suya maruz bırakıldığında performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Neredeyse tüm durumlarda Nano CaCO_3 oranı %0.9 olan modifiye TMA karışımlarının en iyi davranışı sergilediği gözlemlenmiştir (Yarahmadi vd., 2022).

Harç teorisine (TMA'nın çok düzeyli boşluklar arası ağısı yapılardan oluşan dağınık bir sistem (kaba, ince ve mikro dağınık sistemler) olduğunu varsayar) dayanılarak, nominal maksimum parçacık boyutu 13.2 mm olan TMA karışımının (TMA-13 karışımı) performansına çeşitli dağınık sistemlerin bileşiminin etkileri araştırılmıştır. İri agrega gradasyonunun kaba agrega-asfalt harcının kesme dayanımı üzerindeki etkisi, tek eksenli bir penetrasyon deneyine dayanılarak incelenmiş ve kaba agreganın optimal gradasyon bileşimi önerilmiştir. Tutulmuş hava boşluğunun (V0) ve birincil kontrol elek geçiş oranının TMA-13 karışımının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. TMA-13 karışımının yoğun bir iskelet gradasyonu önerilmiş ve performansı doğrulanmıştır. Asfalt mastiğin performansında mineral filler/asfalt oranının ve ince agrega/asfalt harcı oranının öneminin, gradasyonu azaltan katsayıyı aştığını göstermiştir. Mineral filler/asfalt oranı, ince agrega/asfalt harcı oranı ve asfalt mastiğin gradasyon azaltıcı katsayısının önerilen değerlerinin sırasıyla 1.6, 70:30 ve 0.7 olduğu belirtilmiştir. İri agrega-asfalt harcının kesme dayanımı ile 4.75-9.5 mm agrega içeriği arasında parabolik bir korelasyonun mevcut olduğu kaydedilmiştir. TMA-13 karışımının performansının V0 ve birincil kontrol elek geçiş oranı ile pozitif korelasyon gösterdiği bildirilmiştir. 50:50–60:40 aralığında 9.5–16 mm ve 4.75–9.5 mm mineral malzeme içeren TMA-13 karışımının, ince agreganın gradasyon azaltıcı katsayısı 0.7, 4.75 mm elek geçiş yüzdesi %22–28 ve %0.075 mm elek geçiş yüzdesi %7–%11 ile iyi kesme ve ayırma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca TMA-13 karışımının performansı önerilen gradasyonla %10'dan fazla arttığı kaydedilmiştir (Xue vd., 2022).

Granit ve çelik cürufu (GSAM) içeren asfalt karışımları hazırlanmış ve daha sonra asfalt karışımının yol performansını belirlemek için kireçtaşı agregasıyla hazırlanan asfalt karışımıyla karşılaştırılmıştır. Marshall sıkıştırma kalıplama yöntemleriyle asfalt betonu (AC) ve taş mastik asfalt olmak üzere iki çeşit asfalt karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm asfalt karışımları; Marshall stabilitesi, dinamik modül, nem hasarı direnci, tekerlek izi direnci, kalıcı deformasyon direnci ve çatlak direnci laboratuvar deneyleriyle değerlendirilmiştir. AC-GSAM ve TMA-GSAM'nin yüksek sıcaklık stabilitesi ve düşük sıcaklık çatlak direnci gibi yol performansı parametrelerinin arttığı belirtilmiştir. Ayrıca asfalt karışımında agrega ikamesi olarak çelik cürufu ve granitin kullanılmasının teknik olarak uygun olduğu bildirilmiştir (Zhao vd., 2022).

Yeni inşa edilen Taş Mastik Asfalt yüzey tabakasının su geçirgenlik özellikleri, kaplama inşaatı sırasında sıkıştırma sıcaklığından kaynaklanan bağlantılı boşlukların

etkisine özel olarak odaklanılarak araştırılmıştır. Geçirgenlik katsayısının yerinde değerlendirmesi yapılmış ve ardından geçirgenlik katsayısı ile porozite arasındaki korelasyonun araştırılması için aynı yerlerden karot numunesi ekstraksiyonu yapılmıştır. Karot numunelerindeki boşluk alanlarının tanımlanması ve ayrılması için endüstriyel CT taraması kullanılmıştır. Karot içindeki boşlukların morfolojisini ve konumsal dağılımının analizi için üç boyutlu dijital yeniden yapılandırma teknikleri kullanılmıştır. TMA tabakası içindeki su sızma yollarının iç yüzünün anlaşılması sağlanarak boşlukların bağlantısı değerlendirilmiştir. Ek olarak, TMA tabakasındaki boşlukların konumsal olarak farklılaşmış dağılımının araştırılması için kaplama sıcaklık alanının sonlu eleman simülasyonu yapılmıştır. Bulgular, boşlukların yaklaşık %38.3'ünün, 4 cm kalınlığındaki TMA tabakasının üst yüzeyinin 1 cm altında yoğunlaştığını ortaya koymuştur (Cheng vd., 2023).

Ulusal Kooperatif Karayolu Araştırma Programı (NCHRP) 9-8'i temel alan TMA karışım tasarımı kriterleri, TMA'nın düşük sıcaklıktaki çatlamaya karşı en iyi performansa sahip olacak şekilde optimize edilmiştir. Bu nedenle optimizasyon işlemi, karışım tasarım faktörleri olarak sıkıştırma enerjisi (Ndesign) ve bağlayıcı içeriğinin birleşik etkisi dikkate alınarak tepki yüzeyi yöntemi (RSM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kırılma değerlendirmesi gerilme ve enerjiye göre yapılmıştır. Bu nedenle kırılma değerlendirme parametreleri olarak kritik gerilme yoğunluk faktörü (KIC) ve kritik kırılma enerjisi (Gf) kullanılmıştır. Deneylerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların analiz edilmesinin ardından, $N_{design} = 78$ 'e sahip %6.09 bağlayıcının, maksimum kırılma performansı doğrultusunda karışım tasarımının tüm NCHRP 9–8 kriterlerini karşılayan, 0.869 arzu edirliliğe sahip bir tasarıma yol açtığı bulunmuştur (Golsefid ve Sahaf, 2023).

Filler ilavelerinden (inclusions) dolayı mastiklerin fizikokimyasal ve reolojik performansı arasındaki sinerji ve etkileşim açısından filler-bitüm mikro ölçekli etkileşiminin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. İki sürdürülebilir mastiğin, dolomit tozunun (DP) ve kireç fırın tozunun (LKD) reolojik özellikleri, saf PEN 60/70 bağlayıcıyla birlikte, yükseltilmiş sıcaklık koşullarında sıcaklık taramasına dayalı olarak analiz edilmiştir. Dinamik kayma reometresi (DSR) kullanılarak kaplamanın işletilebilirlik sıcaklığında frekans tarama ve çoklu gerilme sünme geri dönme (MSCR) deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Parçacık şekli, dane boyutu, doku ve kimyasal bileşimler gibi parametrelerin etkisini analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X ışınları (EDX) kullanılarak fizikokimyasal deneyler yapılmıştır. DSR deney sonuçları, fillerlerin asfalt bağlayıcıya eklenmesinin, tekerlek izi ve yorulma açısından

bağlayıcının performansını nasıl önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde, daha yüksek filler ve bağlayıcı konsantrasyonlarında şekil değiştirme ve geri alınamayan esneklik parametreleri önemli ölçüde azalmıştır. Düşük rijit boşlukların (R.V), yüksek incelik modülünün (FM) ve yüksek özgül yüzey alanının (SSA) fiziksel filler özellikleri, farklı yükleme frekanslarında ve sıcaklık seviyelerinde DP mastiklerle karşılaştırıldığında LKD mastiklerinde daha fazla arayüzey sertliği ve elastikiyete yol açmıştır. SEM/EDX sonuçları ayrıca her bir filler bileşeninin elementsel kalsiyum ve karbon bileşiminin dane morfolojisi ile birlikte reolojik performansını güçlü bir şekilde etkilediğini göstermiştir (Mukhtar vd., 2023).

Farklı miktarlarda (%0.3, %0.5, %0.7, %0.9 ve %1.1) ahşap atığı lifleri içeren SMA 8 S karışımları analiz edilmiştir. %0.3 selüloz lifleri içeren referans karışımı da üretilmiştir. Ahşap atık liflerinin bağlayıcıyı absorbe etme yeteneği, bağlayıcı akma (drain down) deneyi ile belirlenmiş ve karışımın performansını değerlendirmek için birincil gösterge olarak parçacık kaybı deneyi kullanılmıştır. Ahşap atığı liflerinin TMA karışımlarının performansı üzerindeki etkisi, hava boşluğu içeriği, su hassasiyeti, sertlik, tekerlek izine karşı direnç ve yorulmaya karşı direnç açısından iki miktardaki ahşap atığı lifiyle kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Araştırmalar ahşap atık liflerinin %0.7'sinin optimum miktar olduğunu göstermiştir. Bunun hem bağlayıcı emilimini hem de %0.3 selüloz liflerine eşdeğer TMA 8 S karışım performansını sağladığı belirtilmiştir (Škultecke vd., 2023).

1.2.3. Türkiye’de Taş Mastik Asfalt Karışım Konusunda Yapılan Çalışmalar

Diatomit malzemenin TMA karışımındaki etkisi araştırılmış, karışıma %3 oranında diatomit, filler olarak eklenmiş ve fiber ilavesi yapılmadan TMA karışımının özellikleri belirlenmiş, normal TMA ile diatomit katkılı TMA karışımların performansları karşılaştırılmış ve diatomit oranının, optimum bitüm içeriğini etkilediği görülmüş, diatomit oranı arttıkça bitüm miktarının arttığı belirtilmiştir. Ayrıca her iki TMA karışımında tekerlek izinde oturma davranışının birbirinden çok farklı olmadığı ifade edilmiştir (Güngör vd., 2009).

Diyarbakır ilindeki bazalt işleme tesislerinden alınan ince ve kaba bazalt atıklarının elek analizi, kimyasal analiz, özgül ağırlık, su emme, Los Angeles aşınma kaybı değeri, Na₂SO₄ ile agreganın sağlamlığı, yassılık indeksive soyulma mukavemeti gibi bazı önemli malzeme özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra bu atık malzeme kullanılarak Türkiye

Karayolları Teknik Şartnamesine uygun bir SMA tasarlanmıştır. Tasarlanan SMA numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akış deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, bazalt atığının ve üretilen SMA'nın özelliklerinin belirtilen sınırlar içinde olduğunu ve bu atık malzemelerin SMA'da agrega ve mineral filler olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Karakuş, 2011).

Bazalt ve bazalt-kireçtaşı agrega kombinasyonlarının daha kaba ve daha ince SMA karışımları için tekerlek izi oluşumu Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) tekerlek izi deneyi ile araştırılmıştır. LCPC tekerlek izi deneyinin hassasiyeti, farklı maksimum agrega boyutları ve gradasyondaki değişikliklerle de değerlendirilmiştir. Karışım kaba agrega olarak bazalt, filler ve ince fraksiyonlar için ise bazalt ve kireçtaşı şeklinde dört farklı kayaç kombinasyonu tasarlanmıştır. Agreganın gradasyonuna ve mineralojik faktörlerine göre tekerlek izi direnci açısından maksimum agrega boyutunun azaltılmasının büyük önem taşıdığı belirtilmiştir. Bazaltlı SMA'da kireçtaşı agregasının filler ve ince fraksiyon olarak kullanılabileceği düşünülmüştür. SMA karışımının tekerlek izi direnci, kireçtaşı agregasının ince veya filler agrega olarak SMA karışım gradasyonuna dâhil edilmesiyle nispeten azalmıştır (SMA11 ve SMA12 için ortalama %0,24 ve SMA21 ve SMA22 için ortalama %0,41). Bu düşük seviyeli tekerlek izi farkı LCPC tekerlek izi deneyi ile kolaylıkla gözlemlenebilmiş ve LCPC deneyinin güvenilirliği açıkça ortaya konmuştur (İskender, 2013).

SBS polimer modifiyeli taş mastik asfalt kaplama performansını araştırılmıştır. Bu kapsamda Marshall deneyi (ASTM D1559) doğrulanmış ve deneysel aşamalarla optimum bitüm içerikleri hesaplanmıştır. Optimum bitüm içeriği kontrolü ve SBS SMA karışımları Marshall Katsayısı (MQ) yaklaşımı, tekrarlı sünme deneyi (RCT), dolaylı çekme dayanımı deneyi (ITST), Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC) tekerlek izi deneyleri ile değerlendirilmiştir. MQ sonuçlarının göre SBS modifiyeli numuneler geleneksel kontrol karışımlarına göre daha yüksek değerler verdiği belirtilmiştir. SMA için MQ yaklaşımının yapısal bütünlük ve taş taş temas dereceleri nedeniyle daha uyumlu sonuçlar verdiği kaydedilmiştir. SBS polimerinin etkinliği MQ yöntemiyle doğrulanmıştır. Modifiye edilmiş numuneler kontrol numunelerine göre daha yüksek dolaylı çekme mukavemeti vermiştir. RCT ve LCPC tekerlek izi deneyi sonuçları, SBS modifiyeli karışımların geleneksel karışımlara göre daha düşük tekerlek izi değerlerine sahip olduğu bildirilmiştir (Sengül vd., 2013).

Kalsit mineralinin SMA karışımlar içinde filler olarak kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla, %5 oranında kalsit minerali içeren SMA karışımı hazırlanmış ve asfalt karışımının performans özellikleri tespit edilmiştir. Kalsitin kalıcı deformasyon olarak nitelendirilen tekerlek izini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir (Sönmez ve Yıldırım, 2013).

TMA'da kullanılan agrega türünün kaplamanın fiziksel özelliklerine ve performansına etkisinin araştırılması amacıyla İstanbul ili ve çevresinde yer alan ocaklarından Çorlu ilçesinin güney batısındaki Karatepe taş ocağından temin edilen “bazalt”, İstanbul ili Cebeci yöresinden temin edilen “dolamitli kireçtaşı” ile Kocaeli ili Gölcük Halıdere mevkiinden temin edilen “kumtaşı” mineral agregalarından TMA karışımları üretilmiştir. Agrega ve bitüm deney sonuçları, agrega gradasyonları, Marshall karışım dizayn (hedef bileşim) değerleri (hava boşluğu, asfaltla dolu boşluk, mineral agregalar arası boşluk, akma, stabilite, optimum bitüm miktarı), işyeri karışım formülüne (İKF) göre üretilen karışımın fiziksel özelliklerinin kontrolü için KTS’ye göre yapılması gereken kalite kontrol deneyleri sonuçları, tekerlek izi oturma deneyleri (TİO) ve sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dolaylı çekme mukavemeti deneyi (İÇM) sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar; TMA karışımında kullanılmak üzere, Cebeci dolamitli kireçtaşı ile Gölcük - kumtaşının Karatepe - bazaltına alternatif kayaçlar olduğunu göstermiştir (Arslan, 2014).

Taş Mastik Asfalt karışımları 19 mm ve 12.5 mm nominal agrega boyutunda üretilmiş, her bir nominal agrega boyutu için de iki gradasyon seçilmiş, agrega fraksiyonları açısından bazalt agrega olarak iri-ince-filler malzemeleri seçilmiş ve bazalt filler malzemesi kalker filler ile değiştirilerek filler etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak bazalt filler yerine kullanılan kireçtaşı filler maddesi ile nem hasarının azaldığı ve ayrıca hem bazalt hem de kireçtaşı karışımları için, daha kaba ve daha ince dereceler için ayrı ayrı 19 mm'den 12.5 mm'ye geçişle nem hasarı oranının arttığı belirtilmiştir (İskender vd., 2016).

Grafitin, bitümün geleneksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin yanı sıra TMA karışımın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Dört farklı oranda (bitüm ağırlığınca) grafit ile bağlayıcılar modifiye edilmiş ve bu bağlayıcılar üzerinde yumuşama noktası, penetrasyon, dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi ve kırılganlık eğilme reometresi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca modifiye bağlayıcılarla hazırlanan TMA karışım numuneleri farklı zaman aralıklarında yaşlandırılmıştır. Karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma, indirek çekme rijitlik modülüne indirek çekme yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Grafit ilavesi, bitümün penetrasyon değerini düşürmüş, yumuşama noktası değerini artırmış ve viskozite değerlerini artırmıştır (Erkuş, 2017).

SBS ile modifiye edilmiş bitümle hazırlanmış TMA karışımına Pr Plast S katkısı eklenmiş ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Numuneler, %5 SBS modifiyeli bitüm, agrega ağırlığına göre %0.3 elyaf ve %0.1, %0.3, %0.5, %0.7 ve %1 Pr Plast S katkı maddesi eklenerek hazırlanmıştır. Bu numunelere Marshall stabilite ve akma, dolaylı çekme ve su hasarı deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre Pr Plast S katkı maddesi SBS ile modifiye edilmiş TMA karışımlarda özellikle sıcak ve yağışlı iklimlerde önemli derecede iyileşme sağlamıştır (Girdap, 2017).

Asfaltın mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan grafitin karışım deneylerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu nedenle bitümün ağırlığına göre üç farklı oranda grafit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımlara Marshall stabilitesi, dolaylı çekme sertlik modülü ve dolaylı çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Saf ve modifiye bitümden üretilen taş mastik asfalt karışımları farklı zaman aralıklarında fırında yaşlandırılmıştır. Sonuç olarak Marshall stabilite değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla numunelerin sertlik modülü ve yük tekrar sayısının artmasına rağmen, saf ve farklı grafit içerikli orijinal ve yaşlandırılmış numunelerin zamana bağlı deformasyon davranışında önemli bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir. Grafitlerin karışımların mekanik özelliklerine katkı sağladığı belirtilmiştir (Kök vd., 2017).

Standartlar ve şartname ölçütleri bakımından uygun magmatik kayaç temin edilemeyen bölgelerde, alternatif olabilecek kireçtaşı agregaları ile hazırlanan TMA karışımlarının kalıcı deformasyonlara karşı performansları araştırılmış, magmatik kökenli ve kireçtaşı kökenli kayaçlardan elde edilen agregalarla hazırlanan TMA karışımlarının performansları karşılaştırılmıştır ve kalker agregalı karışımlarda bazalt agregalı karışımlara göre daha düşük optimum bitüm yüzdeleri elde edilmiş, Fransız (LCPC) tekerlek izinde oturma deneyi sonucunda kalker agregalı karışımların tümünde 60°C’de 30 bin devir için tekerlek izinde oturma (TİO) yüzdelerinin mevcut şartname limitlerini rahatlıkla sağlamış olduğu ifade edilmiştir (Oral vd., 2017).

Kuzey Marmara (3. Boğaz Köprüsü dahil) Otoyolu Projesi, Odayeri-Paşaköy Kesimi İşİ” kapsamında Odayeri Kavşağı-Garipçe arasında (Proje Km: 62+000 – 87+000) yapılan Taş Mastik Asfalt (TMA) uygulaması incelenmiş ve iki farklı taş ocağından (Çiftalan ve Uskumruköy), 6 farklı TMA karışım dizaynı (katkısız bitümlü ve polimer modifiye bitümlü (SBS’li) ve granüler kauçuk bitüm ile karışımın direkt plentte modifiye edilmesi) hazırlanmış ve bu karışımlara performans deneyleri yapılmıştır ve ayrıca bütün karışımlar içerisinde TİO oluşumlarına karşı en iyi performansı Uskumruköy Taş Ocağı kullanılarak

elde edilen “modifiye bitüm” katkılı TMA karışımının (UTO+SBS) gösterdiği (%2.63) belirtilmiştir (Şanlıer ve Pamuk, 2017).

Elektrik ark fırını cüruflarının TMA kaplamalarda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve doğal agrega ile karşılaştırılmıştır. Elek analizi, özgül ağırlık ve su emme oranı, yassılık, Los Angeles, donma-çözülme ve kil topakları deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler değerlendirildiğinde, Elektrik ark fırını cürufunun KTŞ’deki doğal agrega limit değerlerini büyük ölçüde sağladığı belirtilmiştir (Altan, 2018).

Üç farklı agrega gradasyonu, farklı bitüm oranlarında (%6.5, %7, %7.5, %8, %8.5 ve %9) TMA karışımları üretilmiş ve bu karışımlara karbon lifi (5 mm uzunluğunda ve ağırlıkça %0.2 oranında) eklenerek iletken TMA numuneleri hazırlanmıştır. İki elektrot yöntemi ile elektriksel özdirenç, sabit elektrik gerilimi altında sıcaklık değişimleri, ultrases geçiş hızları, Marshall stabilite-akma değerleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. TMA karışımlarının iletkenlik özellikleri üzerinde gradasyon değişiminin etkili olduğu belirtilmiştir (Düzağaç, 2019).

%14 karbon siyahı katkılı numuneler hazırlanmış ve bu numunelere özdirenç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca üç farklı seri olarak hazırlanan TMA Marshall numuneleri üzerinde iki elektrot yöntemi ile özdirenç ölçümü ve 20 Volt DC gerilim altında ısınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. TMA karışımlarda elektriksel özelliklerin geliştirilmesinde karbon lifinin oldukça etkili olduğu belirtilmiştir (Gürer ve Elmacı, 2019).

TMA karışımlarda filler malzemesi olarak üleksitin kaplama performansına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, TMA karışıma %0 üleksit - %10 bazalt, %3 üleksit - %7 bazalt, %6 üleksit - %4 bazalt, %10 üleksit - %0 bazalt fillerler eklenmiştir. Optimum bitüm oranı ve diğer karışım bileşenleri sabit kalmıştır. Toplamda 24 adet briket hazırlanmış ve bu briketlere Marshall ve dolaylı çekme deneyleri yapılmıştır. Üleksitin TMA karışımlarda filler olarak kullanımı, kaplamanın stabilite ve esneklik modülü değerlerinde belirgin bir artış sağlamıştır (Kabadayı, 2019).

FRP (Fiber Reinforced Polymers) katkısının SBS ve Viatop Premium katkılarıyla birlikte TMA karışımların performansına etkileri araştırılmıştır. Asfalt bağlayıcı %5 SBS ile modifiye edilmiş ve ardından TMA karışıma %0.3 oranında Viatop Premium ve daha sonra %0.3, %0.5, %0.7 ve %0.9 oranlarında FRP katkısı eklenerek modifiye edilmiştir. Hazırlanan karışımların mekanik özellikleri Marshall Stabilite ve Akma, Su Hasarı, Statik Sünme, Tekrarlı Sünme, Dolaylı Çekme, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Bitüm Süzülme ve

Yorulma deneyleriyle tespit edilmiştir. FRP katkı maddesinin, SBS modifiyeli bitüm ve Viatop Premium katkısıyla hazırlanmış TMA karışımının tekerlek izi ve yaşlanma direncini, esneklik ve adezyon özelliğini, yük yayma kabiliyetini ve yorulma ömrünü artırmış bunların yanı sıra yüksek sıcaklık hassasiyetini düşürmüş ve düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azaltmıştır (Saedi, 2019).

50/70 penetasyon dereceli bitüm içerisine bor mineralleri $-25\mu\text{m}$, $-45\mu\text{m}$ ve $-75\mu\text{m}$ boyutlarında farklı oranlarda ilave edilmiştir. Elde edilen modifiye bitümlere penetasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi ve elastik geri dönme deneyi yapılmıştır. Uygun bitümler kullanılarak TMA aşınma tabakası tasarım kriterlerine göre Marshall ve süzülme deneyleri yapılmış ve üleksit mineral katkısı ile hazırlanan TMA aşınma tabakasının KTŞ'ye göre uygunluğu kontrol edilmiştir (Şinoforoğlu, 2019).

Pomza, ignimbirit (Ahlat taşı) ve perlitin taş mastik asfaltta agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve bu amaçla 4 farklı tip TMA hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda kaba ve ince agrega olarak bazalt kullanılmış fakat filler olarak Bazalt-TMA'da (BAZ-TMA) bazalt, Pomza-TMA'da (POM-TMA) pomza, Ahlat taşı-TMA'da (AT-TMA) Ahlat taşı ve Perlit-TMA'da (PER-TMA) perlit kullanılmıştır. Deney sonuçları; pomza, Ahlat taşı ve perlitin TMA karışımlarında kaba veya ince agrega olarak kullanılamayacağını ancak filler olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Aslan ve Bakis, 2020).

%5, %4, %3, %2 ve %1 SBS oranlarında sabit %2 ve %3 bentonit nanokil ilavesinin etkileri su hasarı, tekerlek izi ve çatlama direnci açısından irdelenmiş ve SBS oranının azaltılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, 50/70 penetasyon dereceli bitüm, bazalt agregaları (Karayolları Teknik Şartnamesi TMA Tip-1 A tasarımına uygun gradasyonlu), katkı maddesi (stiren-bütadiyen-stiren (SBS) elastomerik polimeri ve nanokil (NC)) ve süzülme önleyici (selülozik elyaf) kullanılarak taş mastik asfalt karışımları hazırlanmıştır. %2 nanokil-%3 SBS oranının daha yüksek su hasarı ve deformasyon direnci gösterdiği sonucuna varılmıştır (Ayyıldız vd., 2021).

Drenajın önlenmesinde selülozik elyaf katkılarına alternatif olarak bazalt lifi SMA karışımlarının performansına etkisi araştırılmıştır. Hammaddeler Tip-I dereceli kalker agregası ve B50/70 asfalt çimentosu olarak seçilmiştir. Toplamda 109 numune, superpave tasarım yöntemine göre yoğurtmalı sıkıştırıcı ile hazırlanmıştır. Bu örneklerin 60'ı agreganın kuru ağırlığına göre %0,1'den %0,8'e oranlarında bazalt lifi katkılı örnekler olduğu belirtilmiştir. 25°C'de %0,6 bazalt lifi ilavesi numunelerin esneklik modülünü ve çekme mukavemetini ciddi şekilde artırmıştır. Ayrıca %0,4 bazalt lifi karışımı numuneler 40°C'de

yapılan statik tek eksenli sünme deneyi sonuçlarına göre kalıcı deformasyona karşı en büyük direnci göstermiştir. Bitüm drenajı ve su hasarı deney sonuçlarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu belirtilmiştir (Cetin vd., 2021).

Bazalt agregası yerine atık deniz kabuğu agregalarının TMA karışımlarda kullanılabilirliği incelenmiştir. Deniz kabuğu agregası boyutları 0.425 mm, 0.180 mm ve 0.075 mm şeklinde değiştirilerek farklı seçenekler oluşturulmuş ve doğal bazalt yerine aynı gradasyonla orantılı olarak %5 oranında eklenmiştir. TMA karışımlar Marshall töntemine göre tasarlanmıştır. Modifiye Lottman, dolaylı çekme mukavemeti, Marshall stabilite, Hamburg tekerlek izi ve tekrarlı yük sünme deneyleri karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deniz kabuğu agregasının kullanımı ile TMA karışımların stabilitesi, düşük sıcaklıkta çatlama direnci, su hasarı direnci ve deformasyon direnci artmıştır (Çevrim, 2021).

Direkt kuru karışıma cam ve polipropilen tipi elyaflar ilave edilerek karışım modifikasyonunun kullanılabilirliği incelenmiştir. Toplam 169 numune Superpave tasarım yöntemine göre hazırlanmıştır. Kuru agrega ağırlığının %0.1'i ile %0.8'i arasında elyaf bu numunelerin 120 tanesine ilave edilmiştir. %0.6 ile %0.8 arasında değişen elyaf katkılı karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri (süzünme direnci, esneklik modülü ve su hassasiyetini içeren) iyileşmiştir. Ancak tatmin edici sünme değerlerinin elde edilemediği belirtilmiştir (Evirgen vd., 2021).

Piroliz yöntemi ile geri kazanılan atık polipropilen (PP) taş mastik asfalta eklenmiş ve elde edilen karışımı Marshall özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla üç farklı bitüm (%5 PP ile modifiye edilmiş bitüm, %4.5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ve saf 50/70 bitüm) ile taş mastik asfalt karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan elde edilen 18 adet brikete Marshall deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda optimum bitüm oranına göre (sırasıyla %6.3, %6.6 ve %6.2) değerlendirilmiş ve Marshall Stabilite değerlerine yakın değerler elde edildiği belirtilmiştir. Ama hava boşluğu ve akma değerlerinde farklılıklar olduğu görülmüştür (Sultani, 2021).

TMA kaplamalarında katkı maddesi olarak vermikülitin eklenmesinin dolaylı çekme dayanımına etkisi ve soyulmaya karşı direnci araştırılmıştır. Marshall yöntemine uygun olarak tasarım parametreleri belirlenmiştir. Vermikülit ve selülozik fiber içeren koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelere dolaylı çekme deneyi uygulanmış ve vermikülit içeren koşullandırılmamış numunelerin selülozik fiber içeren koşullandırılmamış numunelere kıyasla dolaylı çekme dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tekerlek izi direncinin vermikülit içeren numunelerde daha yüksek olabileceği sonucuna varılmıştır (Şahin, 2021).

Taş Mastik Asfalt karışımına atık mermer tozu mineral filler olarak eklenmiş ve Marshall tasarım yöntemine göre hazırlanan karışımların performansları karşılaştırılmıştır. Kalker ve atık halde ortaya çıkan mermer tozu alternatif filler olarak kullanılmıştır. Kaba-ince agrega ve kontrol filler olarak bazalt malzemesi kullanılmıştır. Marshall stabilite deneyi belli oranlarda bitüm kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bitüm yüzdesi için 3 numune (toplamda 45 numune) hazırlanmıştır. Daha sonra optimum bitüm yüzdesi belirlenmiş ve numuneler (bazalt, kalker ve mermer tozunun filler olarak kullanıldığı) şartnameye göre değerlendirilmiştir. Mermer tozunun TMA'da filler olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (İzol ve Sarıışık, 2022).

Tekstil atığı selüloz fiber olarak kullanımı araştırılmıştır. Farklı oranlarda selüloz fiber ve tekstil atığı ilave edilerek numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde Marshall deneyi, Schellenberg bitüm süzülme deneyi ve Kum yama deneyi gerçekleştirilmiştir. Selüloz fiberle karşılaştırıldığında tekstil atığı Marshall stabilitesine katkı sağlamış ve daha az süzülerek yüksek performans göstermiştir. Tekstil atıklarının elyaf yerine kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Öner ve Özdaş, 2022).

TMA karışımlarda farklı boyutlarda sadece bazalt elyaf ve kısmen bazalt kısmen selüloz elyafın katkı maddesi olarak kullanılabilişliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda, bitüm, agrega ve karışım tasarımının sabit olduğu varsayılarak ve elyafların boyutu ve oranı değiştirilerek Schellenberger deneyi yapılmıştır. Bu deneyle süzülme performansı ortaya çıkarılmış ve optimum elyaf içerikleri saptanmıştır. Ayrıca tekerlek izi performanslarındaki değişimler de incelenmiştir. Şahit numuneler hariç diğer numunelerin Schellberger deney sonuçları Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen %0.3 değerinin altında kalmıştır. Tekerlek izi deney sonuçları; maksimum deformasyonun %0.2 oranında 12 mm'lik bazalt elyaf ilavesinde, minimum deformasyonun ise %0.3 oranında 12 mm'lik bazalt elyaf ve %0.2 oranında 12 mm'lik selüloz elyaf ilavesinde olduğunu göstermiştir (Rakesh, 2022).

Agrega cinsi, agrega gradasyonu, maksimum agrega boyutu, karışım türü ve yaygın kullanılan asfalt katkı maddelerine bağlı olarak asfalt karışımların termal iletkenlikleri incelenmiştir. Yoğun ve kesikli gradasyonlu karışımlar, 19 mm ve 12,5 mm maksimum boyutlu agregalarla (bazalt ve kireçtaşı) farklı gradasyonlarda hazırlanmıştır. Kauçuk (R), selülozik elyaf (SE), stiren bütadiyen stiren (SBS), stiren isopren stiren (SIS), elvaloy (E), stiren etilen butilen stiren (SEBS), poliolefin elastomer (PE) ve nanokil (NC) modifiyer

türleri kullanılarak asfalt karışımlar üretilmiştir. Agregada gradasyonunun karışımların termal iletkenliğini önemli ölçüde etkilediği, yoğun gradasyonlu karışımların taş mastik asfaltlara kıyasla daha yüksek termal iletkenliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Katkı maddelerinin tamamının termal iletkenliği azalttığı kaydedilmiştir (Şirin vd., 2022).

Kauçuk katkılı modifiye bitüm kullanılarak mastik asfaltın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla penetrasyon deneyi, parlama noktası deneyi, yumuşama noktası deneyi, elastik geri tepme deneyi, bitüm özgül ağırlık deneyi, haddeleme ince film fırın deneyi, basınçlı yaşlandırma kabı deneyi, kiriş bükme deneyi ve dinamik kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarının Karayolları Teknik Şartnamesi sınır değer aralıklarında olduğu ve kauçuğun mastik asfaltta kullanılabileceği belirtilmiştir (Aluç ve Ahıskalı, 2023).

Atık deniz kabuğu agregalarının taş mastik asfalt karışımlarında bazalt agregası yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deniz kabuğu agregalarının maksimum boyutu 0.425 mm, 0.80 mm ve 0.075 mm olarak seçilmiştir. Deniz kabuğu agregası oranı %5 olarak uygulanmıştır. Ayrıca kuru agregada, nemli agregada ve bulamaç yöntemleri ile bazalt agregasına deniz kabuğu fillerinin eklenme yöntemlerinin etkileri araştırılmıştır. Deniz kabuğu agregalarının kullanımının SMA karışımlarının kararlılığını, düşük sıcaklıkta çatlama direncini, su hasarı direncini ve deformasyon direncini artırdığı bulunmuştur. Deniz kabuğu agregada boyutunun küçülmesiyle karışımın mekanik özelliklerindeki iyileşmenin arttığı ve en iyi özelliklerin filler boyutunda deniz kabuğu kullanımı ile elde edildiği belirtilmiştir. Filler ekleme yöntemleri açısından değerlendirildiğinde nemli agregada yönteminin, bulamaç yöntemi ve kuru agregada yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir (Cevrim ve İskender, 2023).

Sabit gradasyonlu, elyafli ve elyafsız TMA karışımları için farklı agregada ve bitüm kullanılmasının süzülme yüzdesine etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda, magmatik ve sedimanter kökenli agregalar ve Tüpraş'ın farklı rafinerlerinden temin edilen bitümlü bağlayıcılar kullanılarak 18 farklı TMA karışımı hazırlanmış ve bu karışımlara farklı miktarlarda selülozik polimer esaslı elyaf katkısı ilave edilerek bitüm süzülme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda bitüm özgül ağırlığı ve yumuşama noktasındaki artışın süzülme yüzdesini azalttığı belirtilmiştir. TMA karışımların ince agregalarının sedimanter kayalar sınıfından kullanılmasının süzülme ve elyaf yüzdesini azalttığı kaydedilmiştir (Kasil ve Çodur, 2023).

Ankara-Niğde Otoyolu Projesi'nde uygulanan aşınma TMA kaplamaları incelenmiş ve bu kaplamalar için kullanılan agregalar Karakuyu (KTO), Bor (BTO) ve Bektik 2 (BTO-2) isimli ocaklardan temin edilmiştir. Agregalara elek analizi, Los Angeles aşınma, metilen mavisi, yassılık indeksi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca Marshall tasarım yöntemi kullanılmış ve optimum bitüm oranları belirlenmiştir. Marshall neticesinde kullanılacak modifiye bitüm, filler, fiber, SBS polimer ve soyulma önleyici asfalt katkısı farklı oranlarda kullanılarak karışım tasarımları tamamlanmıştır (Toprakçı, 2023).

1.2.4. Agregat-Bitüm Adezyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar

Yeni geliştirilen DSR nem hasarı deneyi altında sergilenen asfalt ve asfalt-agrega bağ davranışını açıklamaya yönelik daha temel kavramlara odaklanılmıştır. Geleneksel model (asfalt yapısının geleneksel modeli kolloid ve yüzey kimyası teorisine dayanmaktadır), asfalt yapısının birçok fiziksel olayını açıklayabilse de sterik/uzamsal/geometrik sertleşme gibi asfalt davranışlarının tamamını açıklayamamaktadır. Bu nedenle materyalin içyüzünün anlaşılması için daha genel fakat temel kavramlara ihtiyaç duyulabilmektedir. Olası kavramlardan biri olarak, çok moleküllü kimyada kendini toplama/düzenlenme kavramı önerilmiş ve DSR nem hasarı deneyinin olguları ve sonuçları bu kavramla açıklanmıştır (Cho vd., 2010).

Daha önce yapılan bir çalışmada, nem şartlandırma öncesi ve sonrası bağ mukavemetini ölçmek için Bitüm Bağ Dayanımı (BBS) adı verilen bir deney geliştirilmiştir. Bitüm sertliğinin ($|G^*|$) bağ mukavemeti deneyi sonuçları üzerindeki etkisine ilişkin endişeler gündeme gelmiştir. Bu çalışmada bu endişeler ele alınmış ve BBS ölçümlerinde bağlayıcının sertliğini hesaba katacak bir yöntem önerilmiştir. Deneysel programının, bitüm-agrega arayüzündeki farklı koşulları hesaba açıklayacak farklı bitümleri, agregaları ve modifikasyonları içerdiği belirtilmiştir. Dinamik Kayma Reometresindeki (DSR) deneyler, sekiz bitümün izo-sertlik deney sıcaklığını belirlemek için üç sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu izo-sertlik sıcaklığı daha sonra BBS deneyini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, bitüm-agrega sistemlerinin bağ dayanımının büyük ölçüde bitümün sertliğine bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca polimerlerin bitümün agregaya yapışmasını ve bitüm içindeki kohezyonu geliştirebildiğini de göstermiştir. Mukavemet sonuçlarının bitümün sertliğinden önemli ölçüde etkilendiği ve bu nedenle BBS deneyi sırasında sıcaklığın kontrol edilmesi gerektiği bulunmuştur. Tek bir sıcaklıkta ve farklı sertlik koşullarında deney

yapılırken bağ mukavemetinin düzeltilmesi için tek bir doğrusal model önerilmiştir (Bahia vd., 2012).

Asfaltın agregaya yapışmasını ölçmek için ultrasonik bir teknik geliştirilmiştir. İki agregaya ile birlikte sekiz farklı asfalt test edilmiştir. Adezyon kuvvetlerinin oldukça tekrarlanabilir değerleri elde edilmiştir (çoğu asfalt için ortalamanın %10'u dâhilinde %95 güven sınırları). Her bir agregaya üzerindeki çeşitli asfaltlar için ölçülen adezyon kuvvetlerinde önemli bir fark gözlenmemiş, ancak her bir asfalt için iki agregaya arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar (Student's t-testine dayalı olarak > %95 güven) gözlemlenmiştir. Bu gözlem, asfaltların agregalarla ölçülen bağlanma ısılarındaki eğilimlerle genel olarak uyum içinde olduğunu; bu, belirli bir asfalt için agregaya ile önemli bir değişiklik gösterdiğini, ancak belirli bir agregaya için asfalt ile çok fazla değişiklik göstermediğini ortaya çıkarmıştır. Ölçülen yapışma kuvvetleri (deney numunesinin görünen düzlemsel alanına dayalı olarak) 107 Nm-2 mertebesinde olduğu belirtilmiştir (Ramanathan vd., 2012).

Asfalt-agregaya adezyonunun faktörleri incelenmiştir. Asfalt ve mineral agregalar arasındaki yapışma işinin ifadesine dayanılarak, asfalt-agregaya adezyonu üzerindeki etki yasalarıyla ilgili çeşitli faktörler analiz edilmiştir. Hazırlama sıcaklığı, agregaya türleri ve asfalt kalitesi arasındaki uyumluluğun adezyon işi hesaplanmıştır. Hazırlama sıcaklığının adezyon işiyle ters ilişkili olduğu bulunmuştur. Dört çeşit asfalt arasında stiren-etilen/bütülen-stirenle modifiye edilmiş olanın, mineral agregalarla en iyi adezyon özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Üç çeşit agregaya arasından kireçtaşının asfalta en iyi yapışma özelliğine sahip olduğu kaydedilmiştir (Zheng ve Zheng, 2012).

Asfalt karışımının yol performansını geliştirmek amacıyla asfalt karışımının en önemli bileşeni olan asfalt mastiğin kohezyonu ve adezyonu incelenmiştir. Asfaltın serbest yüzey enerjisi durağan damla yöntemi kullanılarak test edilmiş ve fillerin serbest yüzey enerjisi kolon kılcal kuvvetler yoluyla sıvının çekilmesi yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Asfalt ve filler arasındaki kohezyon ve adezyon işi, serbest yüzey enerji parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, saf asfaltın modifiye asfaltdan daha yüksek serbest yüzey enerjisine sahip olduğunu göstermiştir. Modifiye asfaltın polarite gücü saf asfaltdan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Farklı fillerlerin Lewis asit-alkali kuvvetlerinin arasında büyük bir fark olduğu, van der Waals kuvvetlerinin ise hemen hemen aynı olduğu kaydedilmiştir. Kireçtaşı fillerinin en büyük serbest yüzey enerjisine ve bileşenlere sahip olduğu, granit fillerinin en küçük moleküller arası kuvvetlere sahip olduğu ve andezit fillerinin en küçük

Lewis asit-alkali kuvvetine sahip olduğu bildirilmiştir. Kompleks modül G* ile adezyon işi arasında iyi bir korelasyonun mevcut olduğu ifade edilmiştir (Tan ve Guo, 2013).

Suyun çeşitli asfalt sistemleri üzerindeki etkileri soyulma deneyleri kullanılarak ölçülmüştür. Alüminyum destek üzerindeki bitüm bağlayıcı agrega sabit kolundan (fixed arm) soyulmuş ve kırılma enerjisi belirlenmiştir. Kuru koşullarda, kopma bitüm içinde yapışkandı/kohezifti ancak suya batırıldıktan sonra çoğunlukla bitüm ile agrega arasında arayüzey haline gelmiştir. Suyun bitümün  tür agregaya (kireçtaşı, mermer ve granit) yapışması üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Asidik agregalar (granit), ıslak koşullar altında bazik agregalara (kireçtaşı ve mermer) göre daha fazla adezyon kaybı göstermiştir. Agregaların porozitesinin önemli olduğu gösterilse de kimyasal bileşimlerinden daha az önemli olduğu belirtilmiştir. Islak koşullarda ara yüzey adezyonunun, bitüm içerisine silan, amin veya kauçuksu bir polimerin karıştırılmasıyla geliştirilebilir olduğu ifade edilmiştir (Cui vd., 2014).

Sıcak karışım asfalt kaplamalarda asfalt bağlayıcı ile su ile üretilen agrega parçacıkları arasındaki bağ kaybı analiz edilmiştir. Üç asfalt penetrasyon sınıfı kullanılmıştır: B35/50, B50/70 ve B160/220. Beklenen farklı soyulma performansları nedeniyle dört farklı agrega türü seçilmiştir: hornfels, feldspatik şist, gabro ve dolomitik kalsit. Adezyon kaybını araştırmak için iki laboratuvar deney yöntemi karışılaştırılmıştır: döner şişe yöntemi (Rolling bottle method) ve kaynar su deneyi (Boiling water method). Sonuçlar, daha yüksek bir asfalt-agrega bağının, daha düşük bir asfalt penetrasyon derecesi ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Asfalt-agrega bağlarında önemli bir iyileşme elde etmek için asfalt penetrasyon dereceleri arasındaki farkın fark edilebilir olması gerektiği ifade edilmiştir (Pasandn ve Prez, 2014).

Asfalt ve agrega arasındaki adezyonu yüzey enerjisi teorisine dayanarak nicelik olarak analiz etmek amacıyla, 2 tür asfaltın (A-70# ve B-70#) serbest yüzey enerjisini ölçmek için Wilhelmy plaka yöntemi ve 5 çeşit agreganın (kireçtaşı, bazalt, granit, kuvars kumtaşı, çakıl) serbest yüzey enerjisini test etmek için buhar adsorpsiyon yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra asfalt-agrega kombinasyonunun sulu ve susuz adezif bağ enerjileri ve yüzey enerjisi karışılaştırma indeksi hesaplanmıştır. Farklı asfalt-agrega kombinasyonlarının adezyon özellikleri yüzey enerjisi karışılaştırma indeksi ile değerlendirilmiştir. Uygunluk/karışılaştırma indeksi geliştirilmiş kaynar su deneyiyle doğrulanmış ve ikisi arasındaki ilişki kurulmuştur. Sonuçlar, yüzey enerjisi karışılaştırma indeksi, geliştirilmiş kaynar su yönteminin asfalt kalıntı oranı indeksi ile tutarlı olduğunu ve beş agreganın azalan yapışma sırasının: bazalt, kireçtaşı, granit, kuvars kumtaşı ve kırılmış çakıl şeklinde

olduğunu göstermiştir. Yüzey enerjisi değerlendirme sisteminin güvenilirliği doğrulanmış ve yüzey enerjisi yönteminin asfalt ve agrega yapışma özelliklerinin niceliksel analizi için bir deney yöntemi olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Yüzey enerjisi uygunluk/karşılaştırma indeksleri ve asfalt kalıntı oranı indekslerinin analizi yoluyla, iki indeksin doğrusal pozitif bir korelasyona sahip olduğu bulunmuştur. Adezyon seviyesi 4 olan asfalt kalıntı oranı eşik olarak alınarak, yüzey enerjisinin uygunluk/karşılaştırma indeksinin aralığı sırasıyla iki asfalt türü için türetilmiştir (Luo vd., 2017).

Asfaltın kireçtaşı agregalı ve granit agregalı ara yüzey adezyon özellikleri karşılaştırılmıştır. Kireçtaşı ve granit agregasının ana kimyasal bileşimleri, X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak analiz edilmiştir. Orijinal asfaltın, kireçtaşı-asfalt harcının ve granit-agrega (asfalt muhtemelen) harcının reolojik performansını incelemek için dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi yapılmıştır. Adezyon fonksiyonunu analiz etmek amacıyla agrega ile asfalt arasında kimyasal bir kayma olup olmadığını tespit etmek için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) uygulanmıştır. Sonuçlar, kireçtaşı agregalı asfaltın ara yüzey adezyon mukavemetinin, granit agregalı asfalttan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kireçtaşının ana kimyasal bileşeninin CaCO_3 ve granitin ana kimyasal bileşeni SiO_2 olduğu belirtilmiştir. Orijinal asfaltın sırasıyla saf CaCO_3 ve SiO_2 tozları ile karıştırılmasıyla kireçtaşı-asfalt harç örnekleri ve granit-asfalt harç örnekleri hazırlanmıştır. Kireçtaşı-asfalt harcının faz açısı orijinal asfalttan daha düşük iken, granit-asfalt harcının faz açısı orijinal asfalttan biraz farklı olduğu kaydedilmiştir. Karbon, oksijen ve kükürtün asfaltın ana elementleri olduğu ve özellikle sülfoksit grubunun asfaltın adezyon özelliği üzerinde etkisi olduğu bildirilmiştir. Kireçtaşı agregasının asfalt ile yapışma fonksiyonu, Ca^{2+} 'nın en dıştaki yörünge/orbital elektronlarının asfalttaki aktif fonksiyonel gruba göçüne bağlı olabileceği ve bunun da yeni bir kimyasal bağın oluşmasına neden olacağı belirtilmiştir (Yin vd., 2017).

Agrega-bağlayıcı yapışkanlığının dört farklı asfalt karışımın (fonolit+katkısız bağlayıcı, granit+katkısız bağlayıcı, fonolit+ katkısız bağlayıcı+soyulma önleyici, granit+ katkısız bağlayıcı+soyulma önleyici) nem hasarı ve yorulma ömrü üzerindeki etkileri araştırılmış ve granitik agrega, fonolitik agrega ile karşılaştırıldığında daha iyi nem direnci ve yorulma özelliklerine sahip karışımların üretildiğinden bahsedilmiştir (Júnior vd., 2019).

Geçirimli asfalt kaplama için özel olarak kullanılan yüksek viskoziteli modifiye asfalt (T-HVA), termoplastik elastomer (TPE) ve SBS parçacıkları kullanılarak matris asfaltın kompozit modifikasyonu ile hazırlanmıştır. Yüksek viskoziteli modifiye asfaltın (T-HVA) performansı geleneksel deneylerle karakterize edilmiş ve 70# asfalt, SBS modifiye asfalt ve

yüksek viskoziteli mühendislik asfaltının performansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, modifiye asfaltın tüm göstergelerinin matris asfalttan daha iyi olduğunu ve yüksek viskoziteli mühendislik asfaltı ve SBS modifiyeli asfalttan çok daha yüksek olan T-HVA'nın dinamik viskozitesinin bir milyon Pa.s'nin üzerinde olduğunu göstermiştir. Segregasyon deneyi, T-HVA asfaltın uyumluluğunun ve stabilitesinin diğerlerinden daha iyi olduğunu göstermiştir. Kohezyon deneyi, modifiye asfaltın kohezyonunun farklı sıcaklıklarda matris asfalttan açıkça daha iyi olduğunu ve sıcaklık ne kadar yüksek olursa kohezyonun o kadar iyi olduğunu ve T-HVA'nın yaşlanmadan önce ve sonra kohezyonunun nispeten stabil olduğunu ortaya koymuştur. Ultraviyole spektrofotometri ile ölçülen soyulma oranının sonucunda; T-HVA'nın soyulma hızının en küçük olduğu, yani adezyonun en iyi olduğu ve dinamik viskozite ile tutarlı olduğu, yani dinamik viskozite ne kadar büyük olursa, adezyonun daha iyi olduğu belirtilmiştir. Performans Derecesi (PG) derecelendirme deneyinin sonuçları, T-HVA'nın iyi yüksek ve düşük sıcaklık performansına sahip olduğunu göstermiştir (Tan vd., 2019).

Asfalt karışımlarındaki asfalt-agrega sistemlerinin adezyon kalitesinin ve nem duyarlılığının belirlenmesinde kayaç mineralojisi kritik öneme sahiptir. Bu sistemlerin kalitesini ve durabilitesini etkileyen agregaların kimyasal özelliklerini tanımlanması amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için geniş bir mineralojik ve kimyasal spektruma sahip üç litoloji (yani kuvarsit, granodiyorit ve serpantinit) seçilmiştir. Bu litolojilerle üretilen asfalt agrega numuneleri, kuru durumda ve 1, 3 ve 7 gün suya batırıldıktan sonra yeni bir pull-off deneyi kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar, mafik bileşimli kayaçların (örneğin serpantinit), felsik kayaçlardan (örneğin kuvarsit ve granodiyorit) nem hasarına karşı daha iyi dirence sahip olduğunu ve bazı spesifik agrega oksitlerin bu sistemlerde nem bozulmasını desteklediğini veya önlediğini (kayaçlardaki Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO oksitlerin nem hasarını engellerken SiO_2 'nin bu olayı desteklediğini) göstermiştir (Cala vd., 2019).

Agrega kimyasının, karışım sıcaklığının ve asfalt-agrega ara yüzeyinin kalitesi üzerindeki yüzey dokusunun etkisinin saptanması amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için farklı asfalt-agrega kombinasyonları, agregaların bu özelliklerinin bu doğrultuda değiştirildiği bir pull-off adezyon kaybı deneyiyle test edilmiştir. Agregalardaki SiO_2 içeriğinin nem hasarını arttırdığı, Fe_2O_3 ve CaO içeriklerinin ise bunu engelliyor gibi görüldüğü bulunmuştur. Asfalt-agreganın ilk bağlanma performansı sırasında düşük karıştırma sıcaklıkları da düşük adeziv performansı ile ilişkilendirilmiştir. Son olarak, agrega yüzey dokusunun asfalt-agrega arayüzünün kuru kalitesi üzerinde bir etkisi olduğu ancak

nem koşulları altındaki performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (Cala vd., 2020).

Farklı litolojiye sahip agregaların (granit, kireçtaşı ve tüf) doku özellikleri agregaların görüntü ölçüm sistemi (AIMS) ile elde edilmiş, agregaların mineral kompozisyonları ise X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak belirlenmiştir. Suyu daldırma yöntemiyle birleştirilmiş pull-off deneyine dayanılarak, agregaların mineral özelliklerinin, suya daldırmanın ve bunun asfalt ile agregaların arasındaki arayüzey davranışı üzerindeki etkileşim süresinin etkileri nicel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, ara yüzey davranışlarını analiz etmek için farklı mineral bileşimlerine ve su film kalınlığına sahip moleküler dinamik modeller kullanılmıştır. Sonuçlar, asit-baz analiz yönteminin agregaların ve asfalt ara yüzey özelliklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesinde hizmet etmeyebileceğini göstermiştir. Ayrıca çekme mukavemeti (TS) ve ST'nin duyarlılık analizinin, kontrol deneyi için etkili bir araç olduğu ve elde edilen aralığın, büyük doku farklılıklarına sahip gerçek agregaların paralel testi için benimsenebilecek %95 güven düzeyi ile sekiz ST değeri aralığında 0,1 MPa TS'lik değişim/sapma olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar ayrıca granit arayüzey mukavemetinin daldırma süresindeki artıştan oldukça etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca moleküler dinamik model hesaplama sonuçları, $\{1\ 0\ 0\}$ yüzeye sahip albitin elektrostatik adsorpsiyon kapasitesinin, $\{0\ 0\ 1\}$ kesitine göre çok daha güçlü olduğunu göstermiştir. Wmwa (su filmi dikkate alınarak adezyon çalışması) indeksi, yapışma yeteneğinin zayıflamasını etkili bir şekilde karakterize edebilir ve albit modelinin elektrostatik adsorpsiyonu, suya daldırmadan büyük ölçüde etkilenmiştir (Feng vd., 2020).

Agregaların ve asfaltın yüzey mikromorfolojisi (SMM) parametreleri ve yüzey enerjileri sırasıyla eşodaklı mikroskopisi ve atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) kullanılarak incelenmiştir. Agregaların ve asfalt arasındaki makroskopik adezyon mukavemeti pull-off deneyleri aracılığıyla test edilmiş ve malzemelerin SMM'leri ve yüzey enerjilerinin makroskopik adezyon mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Son olarak agregaların ve asfalt arasındaki çok ölçekli adezyon mekanizmaları araştırılmıştır. Sonuçlar, agregaların ve asfalt bağlayıcı arasındaki adezyonun esas olarak asfalt yüzey enerjisinin hâkim olduğu kimyasal etkileşime atfedildiğini göstermiştir. Fiziksel etkileşimin asfalt ve agreganın SMM'leriyle ilgili olduğu belirtilmiştir. Agregaların SMM'sinin pürüzlülüğü adezyonun iyileştirilmesi açısından faydalı iken asfalt SMM'nin pürüzlülüğünün olumsuz olduğu ifade edilmiştir. Asfaltın dört fraksiyonu arasında asfaltenler ve reçineler, asfaltın yüzey enerjisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuş, reçine içeriğinin artmasıyla artmış ve asfalten

içeriğinin artmasıyla da tersine azalmıştır. Agregada yüzey enerjisi esas olarak SiO₂ ve CaO içeriğinden etkilenmiş ve SiO₂ içeriğinin artmasıyla azalmış, CaO içeriğinin artmasıyla ise artmıştır (Ji vd., 2020).

Mineral yüzeylerin anizotropik özelliklerini dikkate alarak, moleküler dinamik (MD) simülasyonuna dayalı olarak asfalt ve agregalar arasındaki bağlanma ve ayrılma/adezyon kaybı (debonding) davranışları üzerindeki nemin etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. MD simülasyonları için benimsenen tam atomistik modeller, 12 bileşenli asfalt modeli ve iki tür temsili mineral (α -kuvars ve kalsit) kullanılarak oluşturulmuştur. Anizotropik ıslanabilirlik, anizotropik mineral yüzeylere yayılan bir su nano damlacığının dinamik süreçleri simüle edilerek incelenmiştir. Asfalt karışımlarının neme duyarlılığını değerlendirmek için, nemli durumda asfalt ve agregalar arasındaki kalıntı adezyonu dikkate alan iyileştirilmiş bir enerji oranı (ER) oluşturulmuştur. (1) anizotropik mineral yüzeylerinin asfalt karışımlarının bağlanma özellikleri ve nem hassasiyetleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu; (2) hidroksillenmiş α -kuvars yüzeyleri üzerindeki konsantre hidroksil gruplarının yüzey hidrofiliğini önemli ölçüde arttırdığı ve su hasarına karşı direnci azalttığı; (3) incelenen mineral yüzeyler arasında taze yarılmış (freshly-cleaved) kalsit yüzeylerinin nem duyarlılığına en fazla katkıda bulunurken, hidroksillenmemiş α -kuvars yüzeylerinin en az katkıda bulunduğu belirlenmiştir (Luo vd., 2020).

Agregada yüzeyinde asfaltın yayılması sürecinde temas açısının değişim yasasına dayanarak, mikroskobik açıdan yapışmanın nicel bir değerlendirmesini elde etmek için, asfalt ve agreganın adezif özelliklerini nicel olarak karakterize edebilen bir değerlendirme indeksi sunulmuştur. Temas açısının görüntü bilgisi, farklı sıcaklıklarda ıslatma teorisi ve durağan damla yöntemine dayalı olarak toplanmıştır. Temas açısının uyum denkleminde teknik parametreler çıkarılmış ve adezif performansının nicel analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuç, (1) asfaltın agregada yüzeyine yayılması sürecinde temas açısı ve zaman arasındaki ilişkiye ilişkin denklemin güç fonksiyonu $y = A x^a$ 'ya uygun olduğunu, güç fonksiyonundaki A sabit terimi, başlangıç temas açısının boyutunu temsil ettiğini ve temas açısının başlangıç durumu, asfaltı temsil eden aynı sıcaklıktaki asfaltın viskozite durumu ile ilgili olduğunu göstermiştir. Log-log grafiğinde A sabit terimi ile asfalt viskozitesi η arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirtilmiştir; ve (2) güç fonksiyonunun indeksi a, asfaltın agregada yüzeyindeki yayılma hızını temsil eder ve asfalt ile agregada arasındaki ıslanma ve adezif özelliklerini yansıtır; ve (3) bu araştırmada test edilen diyabaz yüzeyindeki üç kademeli matris asfaltın difüzyon hızı daha yüksek sıcaklık duyarlılığına sahip olduğu ve asfalt ile diyabaz arasındaki

ıslanma ve adezif özelliklerin kireçtaşınınkinden daha iyi olduğu ifade edilmiştir (Yan-zhu vd., 2020).

Çeşitli dozajlarda değişen modifiyerlerle temsili beş modifiye asfalt bağlayıcının adezyon ve kendi kendini iyileştirme özelliklerinin birleşik etkilerini değerlendirmek için numune iyileştirme ayarını içeren modifiye edilmiş bir bağlayıcı bağ mukavemeti (BBS) deney prosedürü kullanılmıştır. Sonuçlar, doğrusal stiren-bütadienstiren (SBS), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), lastik kırıntısı ve terminal/uç karışımı (TB) lastik kırıntısı ile modifiye edilmiş bağlayıcıların, kendi kendini iyileştirme özellikleri dikkate almaksızın, bağlayıcı-agrega sisteminin bağlanma mukavemeti üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, HDPE ve lastik kırıntısıyla modifiye edilmiş bağlayıcıların birkaç kırılma/kopma-iyileşme döngüsünden sonra pull-off çekme mukavemetinin (POTS) geri kazanılması, optimum dozajlarda benzer olan katkısız bağlayıcı ve SBS/TB lastik kırıntısıyla modifiye edilmiş bağlayıcılarınkilerden önemli ölçüde daha yüksek oranlar sergilemiştir. Ayrıca, test edilen bağlayıcıların ölçülen bağlanma mukavemeti/yapışma gücü geri kazanım kapasitesi, karışımlarının dört noktalı kiriş (4PB) yorulma deneyleri ile belirlenen yorulma performansı ile çok iyi bir korelasyona sahip olduğu belirtilmiştir. Bu, önerilen yöntemin, modifiye bağlayıcıların kaplama performansının daha iyi anlaşılmasını sağlayabileceğini göstermiştir. Ek olarak, kimyasal tepki açısından bağlayıcıların uzun süreli adezif davranışını iyileştirmeye yönelik modifiyerlerin mekanizmasını incelemek için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) deneyi yapılmıştır. Modifiye bağlayıcıların FTIR spektrumunun metilen artı metil hidrojenen karbona (MMHC) indeksinin, bunların kendi kendini iyileştirmesi ve uzun zincirli moleküllerinin agrega seçici adsorpsiyonu/yüzeyde tutunma üzerinde bir kontrole sahip olduğu bulunmuştur ve bağlanma mukavemeti geri kazanım oranlarıyla iyi bir uyum göstermiştir (Zhou vd., 2020).

Yaşlanma ve nemin asfalt-agrega ara yüzeylerinin adezyon özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Moleküler dinamik (MD) simülasyonları ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) deneylerinden elde edilen adezyon çalışmaları karşılaştırılmıştır. Asfaltın suya daldırılmadan önceki ve sonraki adezif kuvvetleri, AFM deneylerinin pik kuvvet hafif vuruşu nicel nanomekanik (PFT-QNM) moduyla elde edilmiştir. Sonuçlar, arı yapılarının ortalama boyutunun yaşlanmadan sonra büyüdüğünü göstermiştir. Para-fazın adezif kuvvetlerinin en yüksek seviyede olduğu belirtilmiştir. MD simülasyonları ile AFM deneylerinden elde edilen adezyon özellikleri arasında güçlü bir korelasyon bulunmuştur. Asfaltın indeksindeki artışın adezyonu artırabilirken, oksidatif yaşlanma nedeniyle

moleküler yapıdaki değişiklikler adezyonu zayıflatabileceği ifade edilmiştir. Bunlardaki değişikliklerin dengesi tüm adezyon özelliklerini belirlemiştir. Suyu daldırıldıktan sonra yaşlandırılmış asfaltın adezyon özellikleri nem hasarına karşı daha duyarlı hale gelmiştir (Cui vd., 2021).

Agrega kaynağı ve şekli, asfalt türü ve yaşlanması ve nem durumu gibi farklı faktörlerin agrega-asfalt sisteminin arayüzey adezyonu üzerindeki etkilerinin ve katkılarının araştırılması amaçlanmıştır. Değişkeni kontrol etmek için kendi geliştirdiği küresel agregalar kullanılmış ve çeşitli koşullar altında gerçekleştirilmesi için ölçülebilir bir kaynama deneyi önerilmiştir. Mineral agregaların özellikleri ve şekli ile asfalt bağlayıcıların serbest yüzey enerjileri karakterize edilmiş ve ayrıca arayüzey adezyonuyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca agrega içerisindeki nemin adezyon üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Çoklu regresyon analizi ile bu faktörlerin adezyona katkıları tartışılmıştır. Sonuçlar, ölçülebilir kaynama deneyinin agrega-asfalt adezyonunun nicel olarak değerlendirebildiğini göstermiştir. Sadece agrega kaynağı değil, aynı zamanda şeklinin de arayüzey adezyonu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Agreganın ne kadar kübik olursa bağlanma oranının değeri de o kadar yüksek olduğu ifade edilmiştir. Modifiye asfalt, yüksek yüzey enerjisinden dolayı mineral agrega ile daha iyi yapışma göstermiştir. Kısa süreli yaşlanma asfaltın adezyonunun artmasına olanak sağlarken, uzun süreli yaşlanma tam tersi bir etki yaratmıştır. Nem durumuna bakılmaksızın, agrega kaynağının ara yüzey yapışması üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve bunu asfalt yaşlanması, agrega şekli ve asfalt tipinin takip ettiği görülmüştür (Li vd., 2021).

Beş farklı adezyon artırıcı/destekleyici çeşitli ölçekte incelenmiştir. Bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkiler, bunların su ve agregalarla etkileşimleri ve seçilen bir asfalt betonu türünün makroskobik özellikleri hem özel hem de standartlaştırılmış deneysel deney yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma, katkı maddelerinin performansının tek bir deneyin sonuçlarına göre değerlendirilemeyeceğini ortaya çıkarmıştır. Bitümlü bağlayıcıların agregalara yapışması, asfalt betonlarının kırılma-mekanik özellikleri ve mekanik özelliklerdeki bozulmaya karşı hassasiyetleri arasında bir korelasyon bulunmuştur. Sonuçlar, silan bazlı yapışma artırıcının, asfalt beton kaplamalarda soyulmaya karşı direncin artırılması konusunda en büyük umudu vaat ettiğini göstermiştir (Valentin vd., 2021).

Arayüzey çekme mukavemeti, basınç mukavemeti, elastik modül ve arayüzey geri kazanım/dönme enerjisi moleküler dinamik simülasyon kullanılarak ölçülmüş ve nicel

olarak belirlenmiştir. Asfalt karışımlarının serbest hacmi yaşlanmaya karşı hassasiyet gösterirken yaşlanma derecesinin artmasıyla arayüzey çekme mukavemeti azalmıştır. Genel olarak asfalt bağlayıcı-agrega arayüzünün mekanik özelliklerinin önemli ölçüde agregaya tipine bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, çalışma sonuçları, ara yüzey geri kazanım/dönme enerjisinin, asfalt karışımları içindeki ara yüzey adeziv kuvvetini karakterize etmek için önemli bir karakteristik özellik olduğunu göstermiştir. Genel olarak, asfalt-bağlayıcı ve agregaya ara yüzeyinin mekanik özelliklerinin incelenmesinin asfalt karışımlarının adeziv özelliklerinin ölçülmesine ve performansının geliştirilmesine katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2021).

Güney Brezilya'da yoğun asfalt karışımlarının üretiminde kullanılan 12 ocaktan elde edilen agregaların morfolojik, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin yanı sıra agregaların ilgili bitümlü bağlayıcılarla etkileşimini değerlendirmek için bir çalışma yürütülmüştür. Kayaç numuneleri, Petrografi, X-ışını Floresansı (XRF), AIMS 2 sistemi kullanılarak Dijital Görüntü İşleme (DIP), geleneksel agregaya karakterizasyon deneyleri ve bitümlü bağlayıcıya yapışma dâhil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak değerlendirilmiş ve sınıflandırılmıştır. Silisyum içeriği yüksek ve daha az pürüzlü, mineral boyutu daha büyük ve AIMS değeri daha düşük olan asidik kayaçlarının görsel yapışma deneyinde daha kötü performans gösterdiği gözlenmiştir. Fe/Si ve Ca/K oranları da bitümlü bağlayıcıya yapışmayı değerlendirirken agregaya davranışını öngörmek için iyi göstergeler olarak belirlenmiştir. Petrografi, XRF, AIMS2 ve bitümlü bağlayıcıya yapışma sonuçlarına dayanan karşılaştırmalı analizler, görsel yapışmayı kötüden mükemmele kadar sınıflandırmak için kullanılabilecek bir ölçek sıralamasının geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Böylece, tasarımcı tarafından doğru malzeme seçimine imkân veren adezyon derecesindeki değişiklikler değerlendirildiğinde, malzeme davranışının iyi bir göstergesi olarak sunulmuştur (Brondani vd., 2022).

Agrega kimyasına dayalı olarak asfalt agregaya sistemlerinde nem hasarının tahmini bir modeli sunulmuştur. Çalışmada yedi silisli agregaya, iki kalkerli agregaya ve bir asfalt bağlayıcı kaynağı yer almıştır. Agregaya çekirdeği, 20 µm kalınlığında bir asfalt film ve bir metalik sivri uçtan (stub) oluşan numuneler, çok sayıda su şartlandırma işleminden sonra bir pull-off adezyon kaybı (debonding) deney düzeneği aracılığıyla test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, yani kırılma/kopma sırasındaki maksimum yük, F_{max} , kırılma işi, W_f ve agregaya yüzeyindeki adeziv kopma alanı, %A, silisli agregalar için SiO_2 içeriğinin nem duyarlılığını arttırdığını, Fe_2O_3 ve CaO 'da ise bunun tersi görüldüğünü, kalkerli agregalarda SiO_2 içeriği arttıkça nem

duyarlılığının da arttığını göstermiştir. Bu sonuçlar, ilk kez, agrega kimyasına dayalı silisli agregalar için deneysel bir nem hasarı tahmin modeli önermek için kullanılmıştır (Cala ve Caro, 2022).

Farklı asfalt ve agrega tipleri arasındaki bağ mukavemetinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak, bu asfalt ve agrega tiplerinin bağ mukavemeti üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. İkinci olarak, kireç agrega bazlı malzemenin ve beş tip asfaltın kuru ve daldırma durumlarındaki bağ mukavemeti ölçülmüş ve suyun bağ mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üçüncü olarak, asfalt, bir asfalt bileşen ayırma deneyi ile aromatik, doymuş, koloidal ve asfaltın çıkarılmış ve her bir asfalt bileşeni ile agrega arasındaki bağ mukavemeti test edilmiştir. Son olarak, adeziv kırılma olan numuneler için, yapıştırıcının kendi kendini iyileştirme yeteneğini değerlendirmek için bağ mukavemeti tekrar test edilmiştir. Sonuçlar, adezyonun asfalt ve agrega tiplerinin yanı sıra suya daldırmadan da etkilendiğini gösterdiği belirtilmiştir. Asfalt ve agrega arasındaki adezyonun öncelikle reçine bazlı olduğu, bunu aromatiklerin takip ettiği kaydedilmiştir. Adezyon kırılmasından sonra, adezyonun belirli bir ölçüde iyileştiği (yani kendi kendini iyileştirdiği), ancak iyileşme oranının deney sıklığındaki artışla azaldığı ve üçüncü deneyden sonra adezyonun sabit kalma eğilimi olduğu ifade edilmiştir (Gan vd., 2022).

Bitüm/agrega sistemindeki etkileşim mekanizmalarını tanımlayan beş ana teorinin literatür taraması yapılmıştır: zayıf sınır katmanları teorisi, mekanik teori, elektrostatik teori, kimyasal bağlanma teorisi ve termodinamik teori (adsorpsiyon teorisi). Bitüm/agrega sistemindeki adezyon değerlendirme yöntemleri üç ana gruba ayrılabilir: bitümün farklı malzemelerle adezyon kuvvetlerinin belirlenmesi, bitümün farklı malzemelerle suyun eksfoliyasyonu edici etkisine karşı direncinin belirlenmesi ve temel bir değer olarak yapışmanın belirlenmesi (temas açısı ölçümleri, arayüzey kırılma enerjisi, adsorpsiyon kapasitesi ve diğerleri). Bitüm/agrega sistemindeki yapıştırıcı etkileşiminin kalitesinin iki aşamada değerlendirilmesi önerilmiştir. Bitümün suyun eksfoliyasyonu edici etkisine karşı direncinin farklı malzemelerle belirlenmesinde yöntemin ikinci grubundan bu iki aşama için adezyon belirleme yöntemlerinin kullanılması önerilmiştir. İlk aşamada bitüm/agrega sistemindeki adezyon, kullanılan bitüm bağlayıcı ve mineral malzemenin deney malzemesi olarak kabul edildiği hızlandırılmış bir teknikte belirlenmiştir. İlk aşamadan sonra sıkıştırılmış karışımlar üzerinde yapılan ikinci deneylerde (indirekt çekme dayanımı deneyi, Modifiye Lottman dolaylı çekme deneyi, daldırma-basınç deneyi ve Hamburg tekerlek izi testi) olumlu sonuçlar alınmıştır (Pstrowska vd., 2022).

Mineral ve asfalt türleri arasındaki arayüzey etkileşim mekanizmasını moleküler ölçekte analiz edilmesi amacıyla, üç asfalt bağlayıcının (AS-1, AS-2, AS-3) beş minerale (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3) arayüzey davranışını incelemek için moleküler dinamik (MD) simülasyonlar yapılmıştır. Asfalt bağlayıcının yoğunluk, camsı geçiş sıcaklığı, kohezif enerji yoğunluğu ve çözünürlük parametresi gibi termodinamik özellikleri, MD simülasyonlarının rasyonelliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Ortalama kare yer değiştirme (MSD), difüzyon katsayısı ve bağıl konsantrasyon dağılımı, asfalt SARA (doğgun, aromatik, reçine ve asfalten) bileşenlerinin mineral yüzeyindeki difüzyon düzenliliğini analiz etmek için kullanılmış ve asfalt ile farklı mineraller arasındaki bağlanma (bonding) mukavemeti ise yapışma işi hesaplanarak değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları Van der Waals enerjisi ve Coulomb elektrostatik enerjisinin asfalt-mineral adezyonunda kritik rol oynadığını göstermiştir. Asfaltın beş mineralin yüzeyindeki yayılımı $\text{CaO} > \text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$ olarak sıralanmıştır. Minerallerin alkali mukavemetinin artmasıyla güçlendiği, daha sonra asfalt-mineralin yapışma işinin arttığı belirtilmiştir. Asfalt bağlayıcıların ve minerallerin arayüzey yapışma mukavemetinin, asfalten ve reçine bileşenlerinin oranıyla doğrudan ilişkili olduğu ve asfaltın moleküler kütesinin, asfalt-mineral yapışma mukavemetini etkileyeceği, bu aynı zamanda SARA bileşenlerinin mineral yüzeyindeki bağıl konsantrasyonun dağılımıyla da yansıtılabildiği kaydedilmiştir (Sun vd., 2022).

Adezif bağ kuvvetinin doğrudan ölçümü için basit, pratik ve güvenilir yüklü laboratuvar deneyi geliştirilerek asfalt bağlayıcı ile agrega arasındaki adezif mukavemeti hesaplamak için kullanılması gereken bir laboratuvar adezyon deneyinin oluşturulması amaçlanmıştır. Ayrıca çeşitli bitüm bağlayıcı kalınlıkları, türleri, deney koşulları (deformasyon hızı ve sıcaklıklar) ve koşullandırma teknikleri (nemli ve kuru) için adezif mukavemeti ve çökme (collapse) özelliklerini hesaplamak için olduğu ifade edilmiştir. Laboratuvar faaliyeti, biri numune hazırlama ve diğeri deney olmak üzere iki yarıya ayrılmıştır. Bununla birlikte, deney cihazına uyum sağlamak amacıyla, uygun kalıpların prototipi geliştirilmiş ve değerlendirme için bir cihaz (yani test koşullarının yanı sıra ekipman) ilk pozisyonda yapılması gerektiği belirtilmiştir; deney sonuçlarının tutarlılığını ve tekrarlanabilirliğini değerlendirmek için veri analizi yapılmıştır. Sonuçlar, deneyin sonucuna ($10\ \mu\text{m}$ ($0,001\ \text{cm}$) ile $100\ \mu\text{m}$ ($0,01\ \text{cm}$) arasında farklı bağlayıcı kalınlıklarına sahip 720 numune, farklı distorsiyon/bozulma/burulma hızlarında (3, 6, 30, 60, 120 ve 240 mm/dak) deneye tabi tutulana kadar 10 ve 20°C'de kuru şartlandırılmış ve 20°C'de 24 saat ıslak

şartlandırılmıştır) ve deney sıcaklıklarına (10 ve 20°C) dayalı olarak farklı değişkenlerin etkisini hesaplamak için karşılaştırılmıştır. Uygun deney koşullarını önermek ve laboratuvar adezyon deneyinin güvenilirliğini ve etkinliğini değerlendirmek için dört çeşit asfalt çimentosu ve iki çeşit kayaç kullanılmıştır (Al-Haddad, 2023).

Farklı çevre koşullarının asfalt bağlayıcı ile mineral agregası arasındaki adezyon üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla deney numuneleri olarak 70 (0,1 mm) penetrasyona sahip orijinal asfalt bağlayıcı ve yaşlandırma öncesi ve sonrası SBS modifiyeli asfalt kullanılmıştır. Yaşlandırmanın, deney sıcaklığının ve bağıl nemin asfalt bağlayıcı ile mineral agregası arasındaki adezyon üzerindeki etkisi, yüzey enerjisi teorisi kullanılarak nicel olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, yaşlanmanın reçine içeriğini azalttığını, asfaltın içeriğini arttırdığını ve bunun da asfalt bağlayıcının adezyon performansının bozulmasına neden olduğunu göstermiştir. SBS modifiyeli asfaltın yaşlanma karşıtı performansı, adezyon açısından orijinal asfalt bağlayıcıdan daha iyi olduğu belirtilmiştir. Asfalt bağlayıcı ile mineral agregası arasındaki adezyon işi, asfalt bağlayıcının deney sıcaklığı 0°C'den 80°C'ye yükseldiğinde artmıştır. Orijinal asfalt bağlayıcı ile malzeme agregası arasındaki adezyon işi, SBS ile modifiye edilmiş asfalttan çok daha fazla artmıştır. Asfalt bağlayıcı bağıl nem değişimine duyarlı olmadığı ancak mineral agregasının yüzey enerji parametrelerinin toplam miktarı bağıl nemin artmasıyla doğrusal olarak azaldığı ifade edilmiştir. Asfalt bağlayıcı ile granit agregası arasındaki adezyon işinin, harici gaz halindeki su moleküllerinden etkilenme olasılığının daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. Gerçek hidrodinamik basıncı simüle etmek için pull-off deneyi ultrasonik dalga eklenerek geliştirilmiştir. Ultrasonik deneylerin sonuçları, suyun asfalt bağlayıcı ile malzeme agregası arasındaki ara yüzeye yayılarak adezyon bozulmasını hızlandırdığını göstermiştir. Adezyon işi ile ultrasonik çekme kuvveti arasında güçlü bir doğrusal korelasyonun mevcut olduğu kaydedilmiştir (Guo vd., 2023).

Çeşitli faktörlerin (deney koşulları, malzeme özellikleri) asfalt bağlayıcı-agregası sistemlerinin arayüzey adeziv özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması ve bağ mukavemeti ile arayüzey etkileşimi arasındaki korelasyonun analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, arayüzey adezyon kırılması için deney koşullarını belirlemek amacıyla çeşitli sıcaklıklar, yükleme frekansları ve asfalt film kalınlığı altında geliştirilmiş çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çeşitli asfalt bağlayıcı-agregaların arayüzey bağ mukavemeti ve bunlara karşılık gelen etkileşim değerleri, belirlenen deney koşullarına göre test edilmiş ve aralarındaki korelasyon analiz edilmiştir. Sonuçlar, asfalt bağlayıcı ile agregası arasındaki bağ kuvvetinin sıcaklıkla negatif, yükleme hızıyla pozitif korelasyon içinde/ilişkili olduğunu ve

optimum film kalınlığının bulunduğunu göstermiştir. Seçilen mineraller ve agregalar arasında kalsit ve kireçtaşı sırasıyla asfalt bağlayıcıyla en iyi bağlanma özelliklerini sunmuştur. Asfaltenler ve reçineler asfalt bağlayıcı-agreganın bağ mukavemetini arttırırken, doymuş ve aromatikler asfalt bağlayıcı-agreganın bağ mukavemetini zayıflatmıştır. Asfalt bağlayıcının kısa süreli yaşlanması bağlayıcı ve agreganın bağlanması açısından faydalı olurken, asfalt bağlayıcının uzun süreli yaşlanması zararlı olmuştur. Malzeme özellikleri faktörleri arasında SARA bileşiminin, arayüzey bağ mukavemeti üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. C değeri (tercih edilen etkileşim parametresi) ile asfalt bağlayıcı-agrega arayüzünün bağlanma mukavemeti arasında önemli bir korelasyon bulunmuştur (Huang vd., 2023).

Kırıntı kauçuğun/lastik kırıntısının (CR) bozunma davranışı ve nemin etkilerini dikkate alınarak kırıntı kauçuğuyla modifiye edilmiş asfalt (CRMA) agregalarının arayüzey özelliklerinin araştırılması için moleküler dinamik (MD) simülasyon yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonra farklı CR bozulma derecelerine sahip arayüz modelleri oluşturulmuştur. CRMA ve agregalar arasındaki arayüzey adezyon özellikleri, etkileşim enerjisi ve yapışma işi ile tartışılmıştır; CRMA'nın agregaya yüzeyindeki topaklaşma özellikleri radyal dağılım fonksiyonu (RDF) ile değerlendirilmiş; CRMA'nın agregaya yüzeyleri üzerindeki difüzyon davranışları, ortalama kare yer değiştirmeler (MSD) kullanılarak araştırılmış; simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini daha da doğrulamak için asfalt adezyon mukavemeti deneyi yapılmıştır. Sonuçlar, CR'nin asfalta dahil edilmesinin, asfalt karışımlarının adezyon ve nem hasarı direncini önemli ölçüde artırabildiğini, CR bozunmasının ise bu özellikleri biraz azaltabileceğini göstermiştir. Asfalt adezyon mukavemeti deneyinin sonuçları, simülasyonun belirli bir rasyonelliğe sahip olduğunu gösteren yapışma çalışmasıyla benzer eğilimler sergilemiştir. RDF eğrileri, suyun girişinin polar bileşenler ve agregalar arasındaki mesafeyi arttırdığını, CR moleküllerinin ise tatmin edici aglomerasyon/yığılma özellikleri sergilediğini göstermiştir. Ayrıca CR ilavesi asfaltın agregaya yüzeyindeki hareketliliğini zayıflatmıştır. Bu esas olarak CR'nin zayıf hareketliliğine ve asfaltı oluşturan bileşenlerin hareketliliği üzerindeki sınırlamaya atfedilmiştir. Ancak CR'nin bozulmasıyla bu sorunların azalacağı belirtilmiştir (Jiao vd., 2023).

Simülasyon tasarımının önemli bir parçası olan farklı bileşimlere sahip tipik asfalt bağlayıcıları ve asfalt-agrega arayüz modellerini, bunların gerçek numunelerle farklılıklarını ve baziklik ve kaliteye dayalı fizibilitesi tartışılmıştır. Moleküler model üzerine yapılan çalışmalar, sınıflandırılmalarına göre gözden geçirilip tartışılmıştır. Asfalt-agrega

arayüzünün incelenmesinde moleküler dinamik simülasyon yönteminin kullanılmasının avantajlarını ve dezavantajlarını özetlenmiştir. Sonuçlar, moleküler dinamiğin arayüzün incelenmesinde geniş bir uygulama olasılığına sahip olduğunu göstermiştir (Xu vd., 2023).

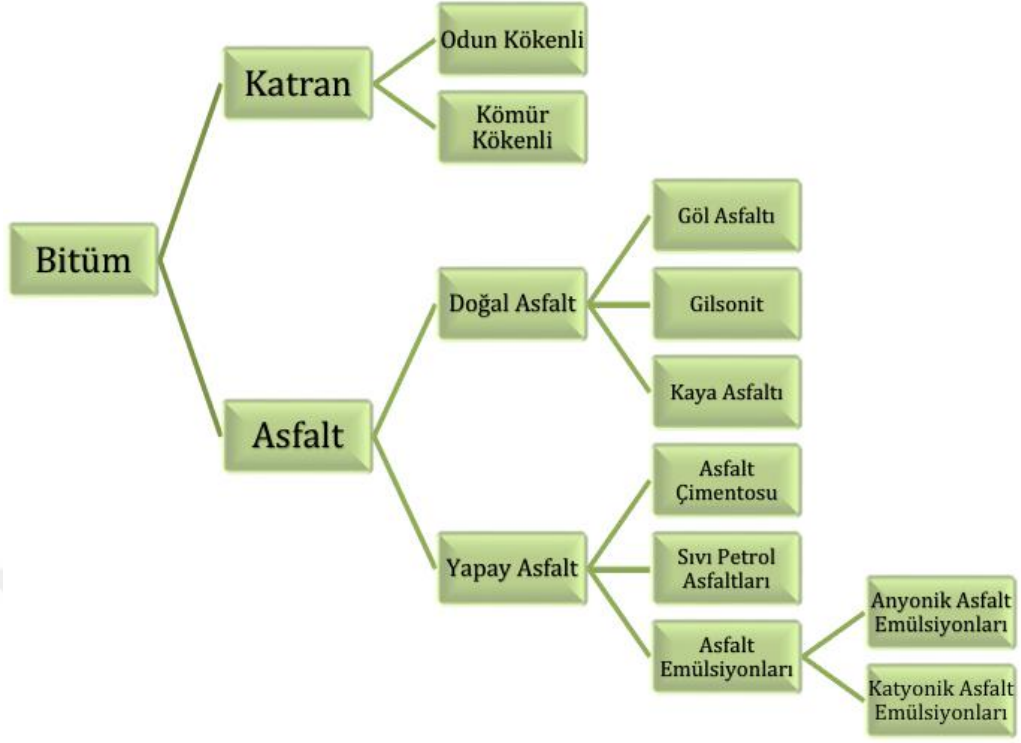
1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Konunun literatürü değerlendirildiğinde; konu üzerinde yapılan çalışmaların genelde belirli bir kaynaktan elde edilen agregaların taş mastik asfalt karışımlarda kullanılabilirliğinin araştırılması, herhangi bir filler malzemenin katkı olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi veya polimer vb. katkılarla modifiye bitümlerin üretilerek TMA karışımlarda kullanılması üzerine yoğunlaşmıştır. Genel anlamda TMA karışımların yüksek performansından söz edilmektedir. Ancak TMA karışımlarda kullanılabilen agregaların da yüksek fiziksel ve mekanik özellikler gerektirdiği ifade edilmekte ve teknik şartname gereksinimlerinde de belirtilmektedir. Bununla birlikte, TMA karışımlarda kullanılabilecek kaliteli agrega kaynaklarının azlığı dikkat çekmektedir. Kaliteli agrega kaynakları genelde Karadeniz Bölgesinde ve özellikle Doğu Karadeniz Bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Kaliteli bazalt agregaları yoğun gradasyonlu geleneksel asfalt betonunda da (YG-AB) kullanılmakta ve iyi sonuçlar alınabilmektedir. Doğal agrega kaynaklarının iyi yönetilmesi, sürdürülebilirlik açısından kaynakların daha bilinçli kullanılabilmesi için agregaların farklı asfalt karışımlardaki performanslarının belirlenmesi önemli bir konu olarak görülmektedir. Literatürde bu tür çalışmaların eksikliği görülebilmektedir. Bu doğrultuda, bu çalışmada Erzurum ve çevresinden seçilen dört bazalt taş ocağından elde edilen agregaların TMA ve yoğun gradasyonlu asfalt betonunda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Erzurum ve çevresindeki mevcut bütün taş ocakları araştırılmış, TMA ve YG-AB’nda kullanılabilecek kriterleri sağlayan dört taş ocağından temin edilen agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanı sıra mineralojik ve petrografik değerlendirmeler yapılmıştır. Her bir agrega ile TMA ve YG-AB tasarımı yapılmış ve üretilen özdeş briketler ile asfalt karışımların su hasarı, tekerlek izi, düşük sıcaklık çatlaması ve düşük sıcaklık dayanımı özellikleri değerlendirilmiştir. Bu amaçla Modifiye Lottman, tekrarlı yük sünme, yarım dairesel eğilme ve indirekt çekme mukavemeti deneyleri yapılmıştır. YG-AB ve TMA karışımlar agregaların mineralojik ve jeolojik özellikleri göz önüne alınarak kıyaslanmıştır. TMA karışım koşullarını sağlayan agregaların AB karışımlarında kullanılması durumunda TMA karışımındaki kazanımların

sağlanıp sağlanamayacağı araştırılmıştır. Çalışmada, agregalar birbirleri ile kıyaslanırken makroskobik (el örneği) ve mikroskobik (ince kesit) özelliklerinin yanı sıra kimyasal özellikleri de kullanılmıştır. Agregaların elde edildiği kayaçların dokusu, mineralojisi, alterasyonu, minerallerdeki alterasyon ve bağlayıcı özellikleri gibi kriterler mikroskobik inceleme ile belirlenmiştir. Ayrıca kimyasal analiz ile kayaçların ana oksit ve iz elementleri belirlenmiş, elde edilen sonuçlar ile asfalt karışımların mekanik özellikleri ilişkilendirilmiştir.

1.4. Asfalt

Bitüm; esas olarak yüksek moleküllü hidrokarbon ve türevlerini içeren, katı, yarı katı ve sıvı halde bulunabilen, doğal halde bulunan ya da ham petrolün damıtılmasından elde edilen, yapıştırıcı özelliğe sahip karbon disülfürde tamamen çözünebilen siyah veya koyu renkli bağlayıcı maddedir (Bozdemir, 2023; Gürbüz, 2018). Bitüm, katran ve asfalt olmak üzere iki gruba ayrılır. Katran, odun veya kömürün kapalı bir kutu içinde damıtılması ile elde edilir ve sıvıdan yarı katıya kadar değişir fakat yol inşaatında kullanılabilmesi için tekrar bir damıtma işlemine tabi tutulmalıdır (Bozdemir, 2023; Yeşilçiçek, 2024). Asfalt ise rengi koyu kahve ile siyah arasında değişen, doğal olarak bulunan veya ham petrolün rafinerilerde işlenmesiyle elde edilen, katı, yarı katı veya sıvı halde bulunabilen; kuvvetli bağlayıcı özelliklere sahip olan hidrokarbonlardan oluşan bağlayıcı malzeme olarak tanımlanmaktadır (Bostancıoğlu, 2012; Behzad, 2023; Geçkil, 2008). Asfalt, doğal asfalt (göl asfaltı, gilsonit ve kaya asfaltı) ve yapay asfalt (ham petrolün damıtılmasıyla elde edilir) olarak iki gruba ayrılır (Gürbüz, 2018; Sağlık, 2007). “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri asfalt kaplamalarda birbirlerinin yerine kullanılırlar (Geçkil, 2008; Bostancıoğlu, 2012; Yılmaz, 2016). Bitümün sınıflandırılması Şekil 1’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Bitümlü Bağlayıcıların Sınıflandırılması (Kaçaroglu, 2019)

1.4.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı

Asfalt; baskın olarak hidrokarbon moleküller (karbon-hidrojen, %95-99) ile az miktarda hidrokarbon yapıya benzer heteosiklik türler (azot, kükürt) ve oksijen, nitrojen, sülfür atomları içeren fonksiyonel grupların kimyasal karışımı olmasının yanı sıra oksitler, inorganik tuzlar ya da porfirin yapıları şeklinde ortaya çıkan demir, nikel, kalsiyum, magnezyum ve vanadyum gibi metalleri de içerir (Geçkil, 2008; Yılmaz, 2016; Uncu, 2017; Gürbüz, 2018; Yeşilçiçek, 2024). Bu bileşenlerin dağılımları Tablo 1’de gösterilmektedir. Asfaltın kimyasal bileşimi genellikle benzerdir ancak, ham petrole uygulanan damıtma ve harmanlama sırasında kullanılan işlemlere bağlı olarak bazı değişiklikler gösterebilir (Asphalt Institute & Eurobitume, 2015).

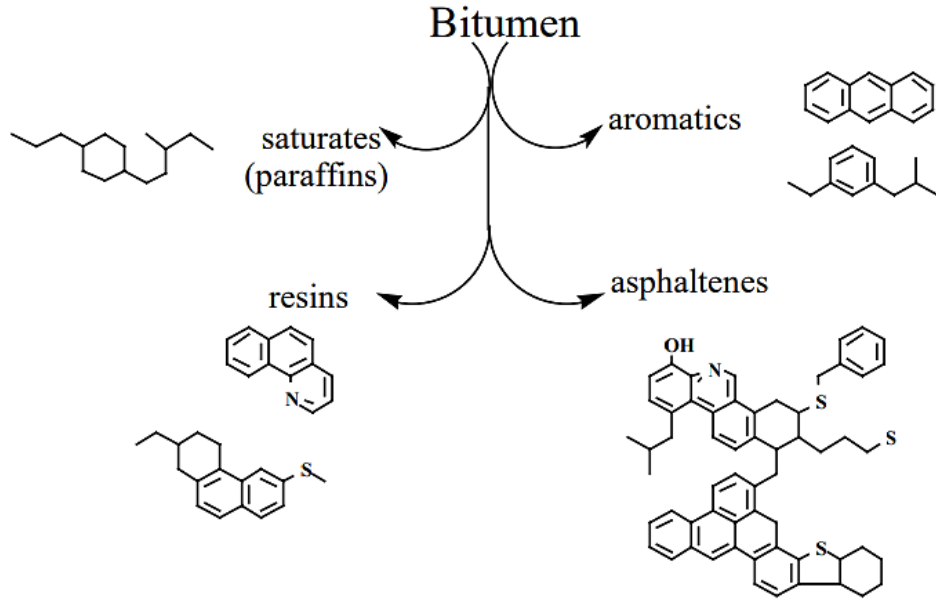
Tablo 1. Asfaltın element analizi (Yüknü vd., 2021)

ELEMENT	ELEMENT MİKTARI	ORTALAMA
Karbon, % Ağırlık	80.2 - 84.3	82.8
Hidrojen % Ağırlık	9.8 - 10.8	10.2
Nitrojen, % Ağırlık	0.2 - 1.2	0.7

Tablo 1'in devamı

Sülfür, % Ağırlık	0.9 - 6.6	3.8
Oksijen, % Ağırlık	0.4 - 1.0	0.7
Nikel, ppm	10 -139	83
Vanadyum, ppm	7 - 1590	254
Demir, ppm	5 - 147	67
Manganez, ppm	0.1 - 3.7	1.1
Kalsiyum, ppm	1 - 335	118
Magnezyum, ppm	1 - 134	26
Sodyum, ppm	6 - 159	63

Asfalt, n-heptanda çözünme durumuna göre asfaltenler (çözünmeyen kısım) ve maltenler (çözünen kısım) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Maltenler ise reçineler, doyunlar ve aromatikler şeklinde alt gruplara ayrılırlar. Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri (Masson & Lacasse, 2000)

Asfaltenler (A): Esasen karbon ve hidrojenle oluşan, bir miktar oksijen, sülfür ve nitrojen içeren siyah ya da kahverengi, amorf, oldukça yüksek molekül ağırlığına (800-3500 g/mol) sahip, polar (elektriksel yüklere sahip) karmaşık aromatik katılar olup asfaltın %5-%25'ini oluştururlar (Paliukaitė vd., 2014; Yılmaz, 2016; Yüknü vd., 2021, Bozdemir, 2023). Asfalten miktarının asfaltın reolojik özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır

(Whiteoak, 1990). Asfaltın asfalten içeriği arttığında daha katı, daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip yani daha yüksek viskoziteli bir asfalt elde edilir (İSFALT, 2001; Yüknü, 2021).

Reçineler (R): Polar aromatikler olarak da adlandırılan reçineler; asfaltenler ile benzer kimyasal özellikler gösterirler, yani büyük oranda hidrojen ve karbonun yanı sıra az miktarda oksijen, sülfür ve nitrojenden oluşurlar. Oda sıcaklığında yarı katı veya katıdırlar, ısıtıldıklarında akışkan ve soğukta gevrektiler (Paliukaitė vd., 2014). Ayrıca elektriksel olarak oldukça yüklü (polar) olmaları nedeniyle asfaltlara yüksek adezyon özelliği kazandırır (Çubuk, 2007; Geçkil, 2008). Reçineler, asfaltenleri ayıran ya da yayılmalarını sağlayan katkılardır ve reçinelerin asfaltenlere oranı, asfaltın jelatin (GEL-Gelatinous) veya çözelti (SOL-Solution) tipi olma özelliğini kontrol eder.

Aromatikler (A): asfaltın %40 ile %60'ını oluşturan, asfalt içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı naftenik aromatik bileşiklerden oluşan, asfaltenlerin yayılımı için gereken ortamı teşkil eden koyu kahverengi renkli viskoz sıvılardır (Yılmaz, 2016; Geçkil, 2008). Ayrıca doymamış halka sistemlerin hâkim olduğu polar olmayan karbon zincirlerinden oluşur ve diğer yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlara göre yüksek çözünme yeteneğine sahiptirler (Whiteoak, 1990; Uncu, 2017; Aksoy, 2002).

Doygunlar (S): Doygun hidrokarbonlar olarak da adlandırılan doyunlar; alkil-naftenler ve bazı alkil-aromatikler ile birlikte düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardır (Yüknü vd., 2021; Uncu, 2017; Whiteoak, 1990). Asfaltın %5 ile %20'sini oluşturan, hem parafinli hem de parafinsiz bileşenlerden oluşan, ortalama molekül ağırlığı aromatlara benzeyen renksiz polar olmayan viskoz yağlardır (Yılmaz, 2016; Whiteoak, 1990; İSFALT, 2001).

SARA fraksiyonlarının çeşitli özellikleri ve eleman analizleri Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 2. SARA fraksiyonlarının özellikleri ve kimyasal bileşimi (Emtiaz vd., 2023)

Fraksiyonlar Özellikler	Doygunlar	Aromatikler	Reçineler	Asfaltenler
Asfaltın Ağırlık %'si	5-20	40-65	± 20	5-25
Polarite	Polar Değil	Polar Değil	Oldukça Polar	Oldukça Polar
Renk	-	Sarıdan Kırmızıya	Koyu Kahverengi	Siyah

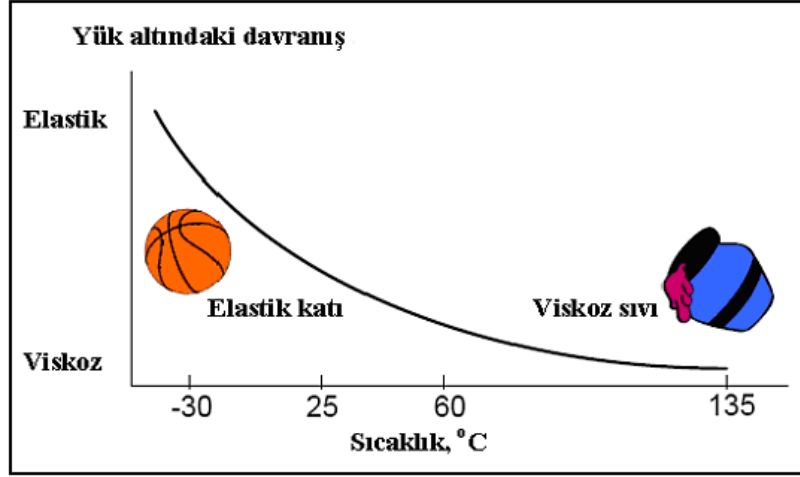
Tablo 2'nin devamı

Davranış	Viskoz Yağ	Viskoz Sıvı	Katı/Yarı Katı	Katı
Ort. Molekül Ağırlığı (g/mol)	600	800	1100	800-3500
Çözücü	n-Heptan	Toluen ve Toluen/Metanol 50/50	Trikloretilen	n-Heptanda Çözünmez
Çözünürlük Parametresi/Çarpanı (MPa ^{0.5})	15 - 17	17 - 18.5	18.5 - 20	17.6 - 21.7
20°C'deki Yoğunluk (g/cm ³)	0.9	1	1.07	1.15
Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	-70	-20	-	-
H/C	1.9	1.5	1.4	1.1
C (%)	78-84	80-86	67-88	78-88
H (%)	12-14	9-13	9-12	7-9
O (%)	<0.1	0.2	0.3-2	0.3-5
N (%)	<0.1	0.4	0.2-1	0.6-4
S (%)	<0.1	0-4	0.4-5	0.3-11

1.4.2. Asfaltın Reolojisi

Bir maddenin akma ve deformasyon özelliklerinin basınç (uygulanmış yük) ve zaman içerisinde incelenmesi *reoloji* olarak tanımlanmaktadır. Asfaltın reolojisi ise belirli bir sıcaklıkta asfaltın yük altındaki davranışı, üzerine uygulanan yük ve yükleme süresi dikkate alınarak hem kimyasal bileşenlerinin hem de kimyasal bileşenlerindeki baskın hidrokarbon yapıların saptanmasının yanı sıra bileşimindeki, yapısındaki ya da her ikisinde birden olan değişikliklerin etkisinin incelenmesidir (Yeşilçiçek, 2024; Yılmaz, 2016; Aksoy, 2002). Asfalt, viskoelastik davranış gösteren termoplastik bir malzemedir bu yüzden trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı farklı davranışlar sergiler. Bu tür malzemeler; yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) ya da düşük sıcaklıklarda elastik, orta yükleme hızlarında ya da orta sıcaklıklarda viskoelastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) ya da yüksek sıcaklıklarda viskoz davranış sergilerler (Şekil 3). Asfalt kaplamaların davranışı da asfaltın reolojisi ile doğrudan ilişkilidir. Sıcak iklim koşullarında veya yavaş hareket eden ya da park halindeki ağır taşıtların sebep olduğu sürekli ve değişmeyen yükler altındaki asfalt viskoz davranış sergiler. Bu noktada kaplamadaki yükü taşıyan sadece agrega olmasından ötürü kaplamalarda tekerlek izi meydana gelir.

Soğuk iklim koşullarında ya da hızlı hareket eden araç trafiğinin neden olduğu kısa süreli yükler altında asfalt elastik davranış sergilese de aşırı yükleme durumunda kırılğan hale gelebilir ve çatlayabilir. Bu sebeple, soğuk havalarda asfalt kaplamalarda düşük sıcaklık çatlakları meydana gelir. Genel iklim koşullarında (sıcaklık genellikle aşırı sıcak ve aşırı soğuk arasında) asfalt hem viskoz sıvı hem de elastik katı özelliklerini sergiler.



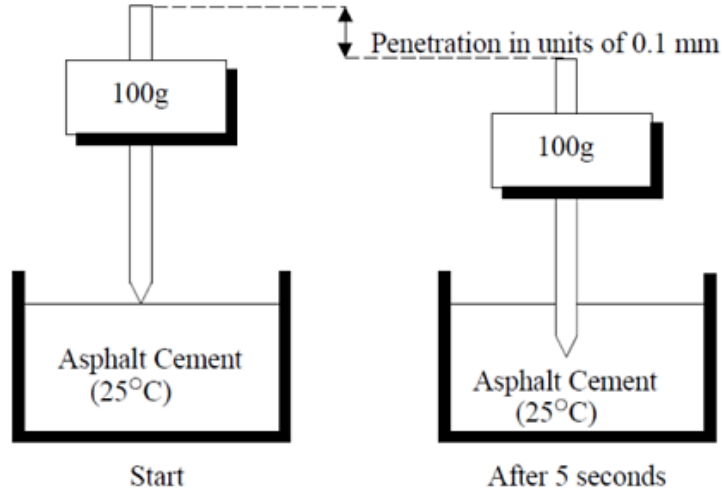
Şekil 3. Asfaltın Sıcaklık Hassasiyeti (Geçkil, 2008)

1.4.3. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler

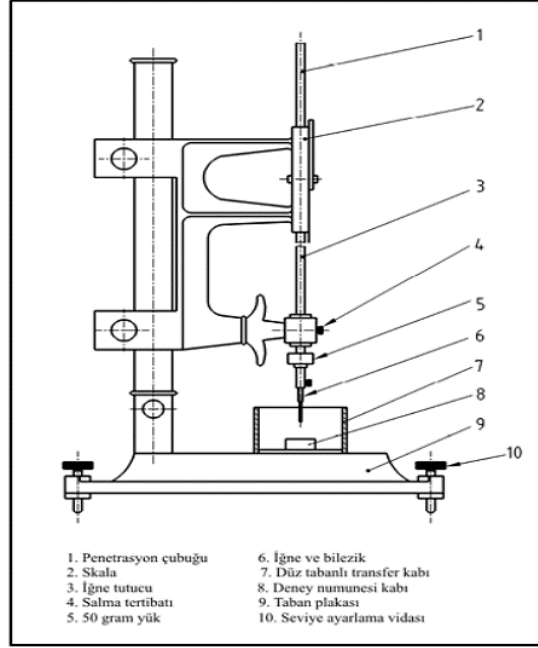
Asfalt bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla çeşitli deneyler yapılmaktadır. Asfalt bağlayıcılara uygulanan deneyler aşağıda verilmektedir.

1. Penetrasyon Deneyi (TS EN 1426)

Asfalt bağlayıcının kıvamını ya da sertliğini belirlemek amacıyla penetrasyon deneyi yapılmaktadır. Deney; 25°C sıcaklıkta, 5 sn süre içinde standart bir iğnenin 100 g ağırlık altında asfalt bağlayıcı numunesine batırılması ile gerçekleştirilir (Şekil 4). Penetrasyon birimi 0.1 mm şeklindedir. Penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır yani penetrasyon değeri arttıkça asfalt bağlayıcı numunesinin kıvamı azalır (yumuşar). Penetrasyon deney aleti Şekil 5'te gösterilmektedir.



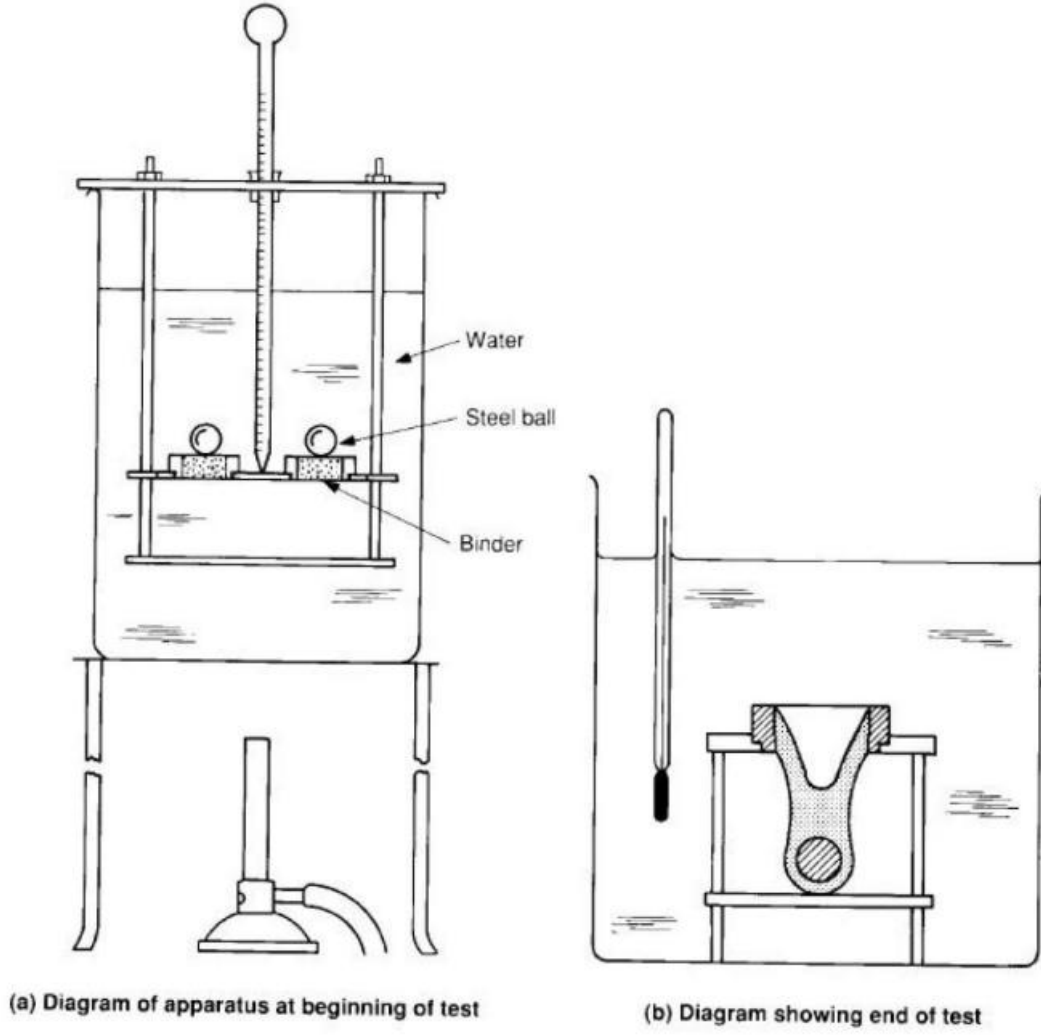
Şekil 4. Penetrasyon deneyinin şematik gösterimi (URL-4, 2025)



Şekil 5. Penetrasyon cihazı şematik gösterimi (Yükünü vd., 2021)

2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS EN 1427)

Asfalt bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığını başka bir deyişle hangi sıcaklıkta akmaya başladığını belirlemek için halka-bilye yöntemi kullanılarak yapılan deneydir. Standart halkalar içerisine doldurulan asfalt bağlayıcı numunesi üzerine standart ağırlıktaki (3.5 g) bilyeler yerleştiririlir. Su banyosu içerisine yerleştirilen numuneler dakikada 5°C ısıtılır. Yumuşama noktası değeri, bilyelerin halkaları tutan kalıbın tabanına değdiği andaki sıcaklık değeridir. Şekil 6'da yumuşama noktası deneyinin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 6. Yumuşma noktası deneyinin şematik gösterimi (URL-4, 2025)

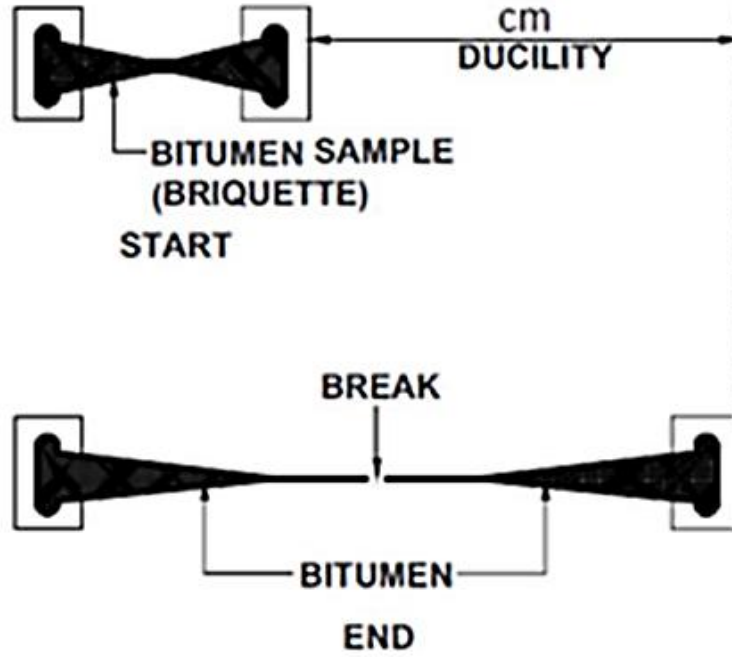
Asfalt bağlayıcının kıvamlılığının değişimi olarak tanımlanan Penetrasyon İndeksi (PI), penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerine bağlı olarak Denklem 1 kullanılarak hesaplanır (Bostancıoğlu, 2012; Yılmaz, 2016; Gürbüz, 2018).

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \log(\text{Pen}25) - 20 \cdot YN}{50 \cdot \log(\text{Pen}25) - YN - 120} \quad (1)$$

Pen25, asfalt bağlayıcının 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini (dmm) ve YN, asfalt bağlayıcının yumuşama noktası sıcaklık değerini (°C) ifade etmektedir. PI değerlerindeki azalma, sıcaklık duyarlılığındaki artışı ifade etmektedir (Erkuş vd., 2021).

3. Düktilite Deneyi

Asfalt bağlayıcıdan yapılmış standart bir briketin belirli sıcaklık ve hızda kopmadan çekilebildiği uzunluğun cm cinsinden ifadesi düktilitedir (Yılmaz, 2016). Asfaltın bağlanma yeteneği düktilitesine bağlı olduğundan düktilite değeri yüksek olan asfaltların bağlayıcılık özellikleri de yüksek olur (Bostancıoğlu, 2012). Asfalt bağlayıcı numunesi, 25°C sıcaklıktaki su ile doldurulmuş olan düktilite deney cihazına yerleştirilir ve 5 cm/dk hız ile yatay olarak çekilir (Şekil 7). Briket kopuncaya kadar bu işleme devam edilir ve briket koptuğu anda cihazın kenarındaki cetvelden uzama miktarı cm cinsinden okunur. Aynı anda test edilebilen üç numunenin düktilite sonuçlarının ortalaması, test edilen asfaltın düktilitesi olarak kabul edilir (Yılmaz, 2016; Gürbüz, 2018; Bozdemir, 2023; Yeşilçiçek, 2024).



Şekil 7. Düktilite deneyi şematik gösterimi (URL-4, 2025)

4. Parlama Noktası Deneyi (TS EN ISO 2592)

Bir maddenin alev temasında geçici olarak parladığı ancak yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık, parlama noktası olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz, 2016). Asfalt bağlayıcıların çalışma esnasında herhangi bir tutuşma ve yanma riskini engellemek için her asfalt bağlayıcı numunesinin parlama ve yanma noktası tespit edilmelidir (Yeşilçiçek, 2024; Bozdemir, 2023). Parlama noktası çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenir. Parlama noktası,

asfalt bağlayıcılar ve SC sıvı petrol asfaltlarda Cleveland açık kabı ile belirlenirken MC ve RC sıvı petrol asfaltlarında ise Tagliabue kapalı kabı (15-74°C aralığı için) kullanılarak belirlenir (Çubuk, 2007; Arslan, 2014). Açık kap deneyi, asfalt bağlayıcının açık bir kapta ısıtılması sırasında yüzeyin biraz üzerine bir kıvılcım uygulanır ve yüzeyin herhangi bir noktasında alevin görüldüğü sıcaklık, test edilen asfalt bağlayıcı numunesinin parlama noktası olarak alınır (Yılmaz, 2016). Şekil 8’de parlama noktası deney cihazı görülmektedir.



Şekil 8. Parlama noktası deney cihazı (Gürbüz, 2018)

5. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi, TFOT (TS EN 12607-2)

İnce bir film tabakası halindeki asfalt bağlayıcı üzerinde hava ve sıcaklığın etkilerini ölçerek sıcak karışım tesisindeki işlemler sırasında meydana gelen sertleşmenin belirlenmesi için kullanılmaktadır (Yüknü vd., 2021). Deneyde; 140 mm çapında düz silindir bir kaba 50 ml asfalt bağlayıcı konulur ve 3.2 mm kalınlığında bir film tabakasının oluşması sağlandıktan sonra numune, 5-6 devir/dk hızda dönen platforma yerleştirilerek 5 saat boyunca 163°C sıcaklıktaki etüvde bekletilir (Ahmedzade vd., 2007; Yılmaz, 2016; Gürbüz, 2018; Bozdemir, 2023). Etüvden çıkarılan asfalt bağlayıcı numuneleri tartılarak yaşlandırma

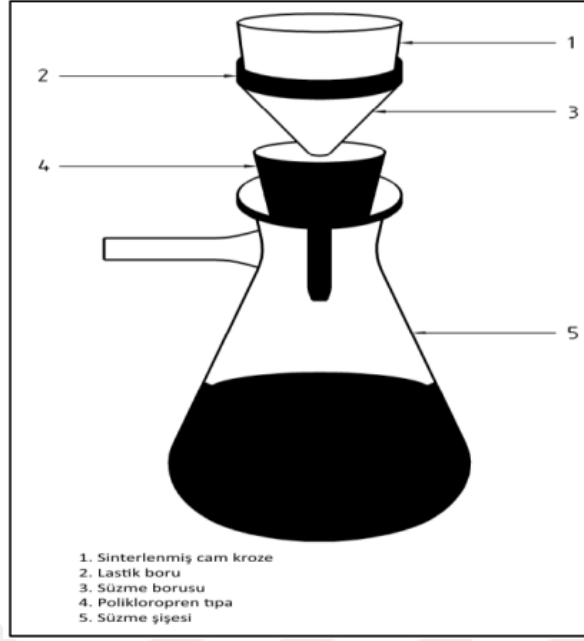
öncesi ve sonrasındaki ağırlık kaybı 0.01 g hassasiyetle tespit edilir (Yılmaz, 2016). İnce film halinde ısıtma deneyi cihazı Şekil 9’da gösterilmektedir (Gürbüz, 2018).



Şekil 9. İnce film halinde ısıtma deneyi cihazı (Gürbüz, 2018)

6. Çözünürlük Tayini Deneyi (TS EN 12592)

Deney, az miktarda mineral madde içeren ya da içermeyen asfalt bağlayıcı ve asfalt karışımdan elde edilen asfalt bağlayıcının belirli çözücüler (trikloretilen, karbondi sülfid, toluen, karbon tetra klorit vb.) içinde çözünürlük derecesinin belirlenmesi için yapılır (Yüknü vd., 2021; Bozdemir, 2023). Bağlayıcı, belirli bir miktar çözücü içerisinde çözüldükten sonra karışım süzgeç kâğıdı ile süzülür ve kâğıt üzerinde kalan kısım tartılarak çözücüde ne kadar asfalt bağlayıcının çözüldüğü yüzde şeklinde hesaplanır (Şekil 10). Asfalt bağlayıcıların trikloretilende ez az %99 çözülmesi gerekmektedir (Çubuk, 2007; Yılmaz, 2016).



Şekil 10. Süzme aparatı düzeneği şematik gösterimi (Yüknü vd., 2021)

7. Özgül Ağırlık Deneyi (TS EN 15326+A1)

25°C’de hacmi bilinen asfalt bağlayıcı numunesinin ağırlığının aynı sıcaklık ve hacimde bulunan suyun ağırlığına oranı ile elde edilen değer asfalt bağlayıcının özgül ağırlığı olarak ifade edilir. Özgül ağırlık hidrometre ve piknometre yöntemleri kullanılarak belirlenir. Piknometre deneyinde ilk olarak piknometre tartılır ve tartım sonucu kaydedilir (A). Ardından 25°C’de su ile doldurulan piknometrenin sıkıca kapağı kapatılır ve tekrar tartılır (B) (Gürbüz, 2018). Daha sonra piknometre yaklaşık yarısına kadar asfalt bağlayıcı numunesi (eğer yeterli akıcılığa sahip değilse ısıtılarak yeterli akıcılığa getirilir) ile doldurulur. Piknometre içindeki asfalt bağlayıcı numunesi ile oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra kapağı ile birlikte tartılır (C) (Aslan, 2019). Piknometre içindeki asfalt bağlayıcı numunesinin üzeri damıtılmış su ile doldurulduktan sonra kapağı sıkıca kapatılarak sıcaklığı 25±0.5°C’deki su banyona tamamen batırılır ve 30 dakika sonra piknometrenin dışı kurularak tartılır (D) (Yılmaz, 2016; Gürbüz, 2018). Özgül ağırlık hesabı Denklem 2’de verilmektedir (İSFALT, 2001).

$$\text{Özgül Ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (2)$$

A, boş piknometre ağırlığını (g); B, saf su ile dolu piknometre ağırlığını (g); C, yarısına kadar asfalt bağlayıcı dolu piknometre ağırlığını (g); D, asfalt bağlayıcı, saf su ve piknometre ağırlığını ifade etmektedir.

8. Fraass Kırılma Noktası Deneyi (TS EN 12593)

Deney, asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki (sıfırın altında) kırılma noktasının ölçülmesine olanak sağlar (Yüknü vd., 2021). Fraass kırılma noktası, belirli uniform kalınlıktaki asfalt bağlayıcı filminin belirtilen yük koşulları altında kırıldığı sıcaklık (Celsius cinsinden) olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz, 2016). 0.40 ± 0.01 g asfalt bağlayıcı numunesi 41 ± 0.05 mm uzunluğunda, 20 ± 0.2 mm genişliğinde ve 0.15 ± 0.02 mm kalınlığında tavllanmış yay çeliğinden yapılmış plakalar üzerine uygulanır ve plaka sabit bir hızda soğutulur (Yeşilçiçek, 2024; Yılmaz, 2016; Yüknü vd., 2021). Bağlayıcı tabakasında çatlama oluşuncaya kadar belirli aralıklarla esnetilir. İlk çatlamanın oluştuğu andaki sıcaklık, Fraas kırılma noktası olarak kaydedilir.

1.5. Agregat

Agregat, belirli gradasyona ve kaliteye sahip kayaç parçaları, çakıl, kırmataş, kum vb. gibi mineral malzeme veya bunların karışımıdır (KGM, 2023). Yol yapımında kullanılan iki ana malzemeden biri olan ve üstyapının ağırlıkça (%90-95) ve hacimce (%80-85) önemli bir kısmını oluşturan agregat, taşıyıcı bir sistem oluşturarak yola etkiyen trafik yüklerinden oluşan tekrarlı statik ve dinamik yüklerin karşılanmasında önemli rol oynamaktadır (İSFALT, 2001; Bostancıoğlu, 2012; Körkaya, 2023; Geçkil, 2008; Yeşilçiçek, 2024). Bu sebeple üstyapıda kullanılacak olan agregatların özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

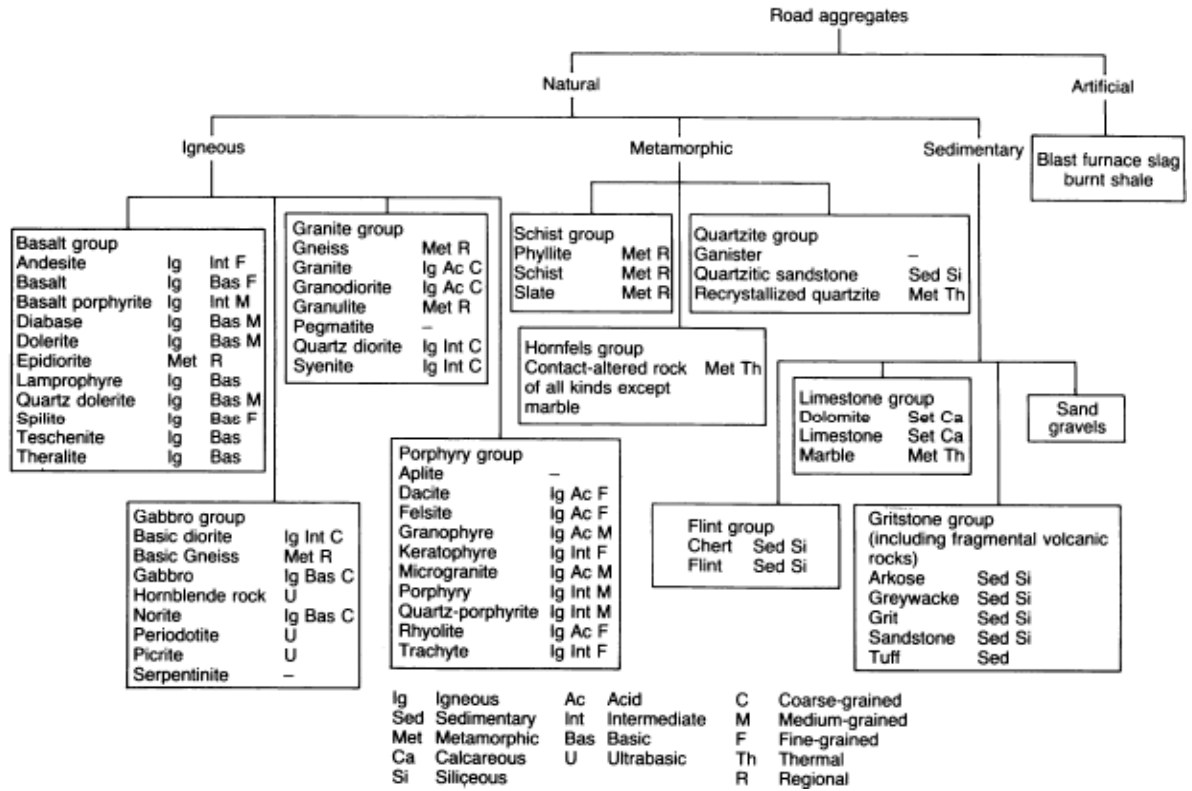
1.5.1. Agregatların Sınıflandırılması

Agregatlar; mineralojik, boyut, gradasyon, biçim ve yüzey yapısı, porozite, yüzey alanı ve boşluk ve özgül ağırlık şeklinde fiziksel olarak sınıflandırılabilirler.

1. Mineralojik Sınıflandırma

Agregalar, elde edilme şekillerine göre dere malzemesi, kırmataş ve yapay agrega olarak sınıflandırılabilir. Dere malzemesi (kum-çakıl karışımı), sahip olduğu olumsuz özellikler (bünyesindeki su içeriği vb.) nedeniyle kaplama yapımında kullanılabilmesi için konkasörde kırma çakıl ve kırma kum şeklinde kırılır. Yapay agregalar ise farklı yapıdaki malzemelerin yüksek sıcaklık altında fiziksel ve kimyasal değişime uğraması sonucu oluşurlar ve cüruf, klinker ve çimento bu gruba girmektedir (Yükü vd., 2021; İSFALT, 2001).

Kırmataş mineral agregalar; doğal kayaçların (magmatik, sedimanter ve metamorfik) kırılması ile elde edilen, yol yapımına kullanılacak en ideal agregalardır. Magmatik kayaçlara bazalt, andezit, granit ve gabro; sedimanter kayaçlara kireçtaşı, kumtaşı; metamorfik kayaçlara ise mermer, şist, kuvarsit gibi kayaçlar örnek verilebilir. Yol agrega grupları Şekil 11’de verilmektedir.



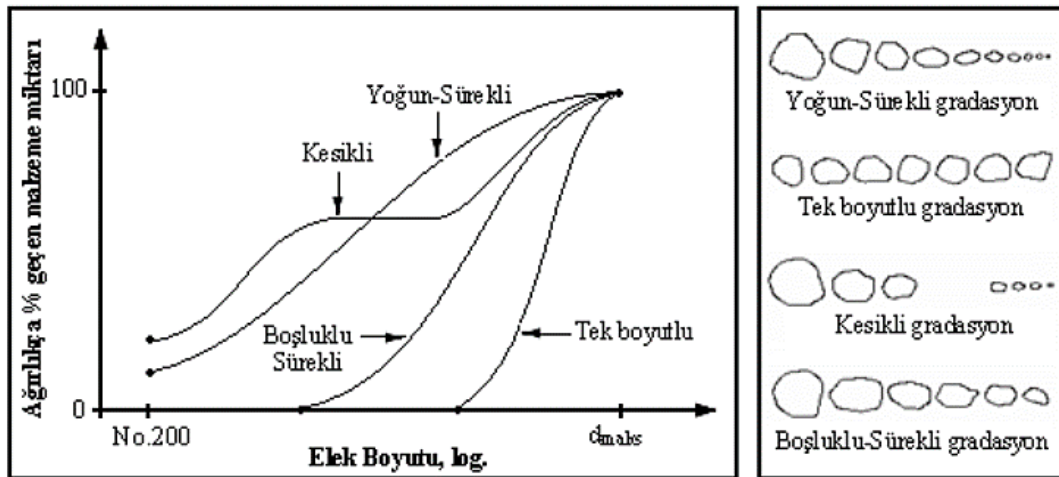
Şekil 11. Yol Agrega Grupları (Fordyce & O'Donnell, 1994)

2. Boyut Sınıflandırması

Agregalar boyutlarına göre kaba, ince ve filler olarak üç gruba ayrılmaktadırlar. *Kaba agrega*, 4.75 mm'lik (No.4) elek üzerinde kalan kısımdır. *İnce agrega*, 4.75 mm'lik (No. 4) elekten geçip 0.075 mm'lik (No. 200) elek üzerinde kalan kısımdır. Mineral filler ise tamamı 0.425 mm (No. 40) elekten geçip ağırlıkça en az %70'i 0.075 mm (No.200) elekten geçen kısımdır (KGM, 2023).

3. Gradasyon Sınıflandırması

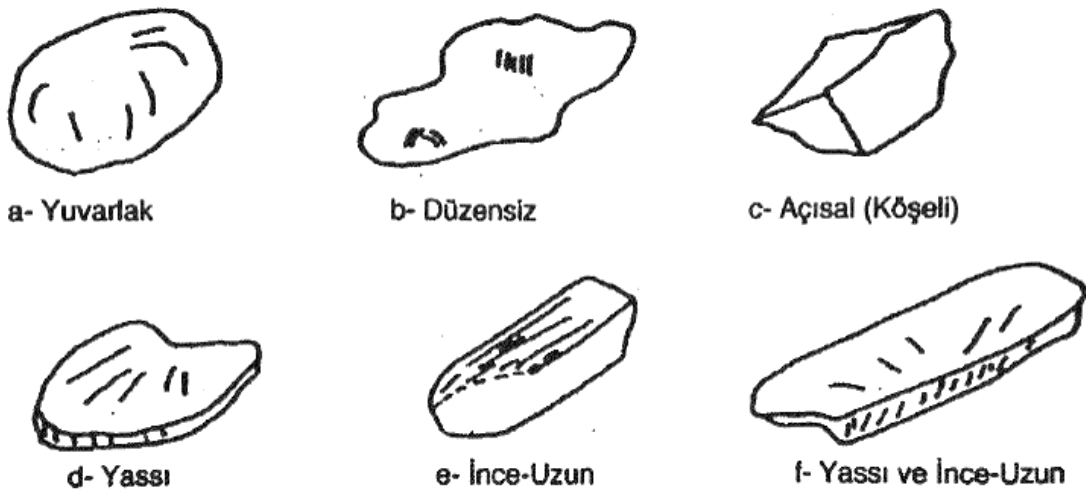
Belirli bir elek serisinden elenen agreganın tamamının (%100'ünün) geçtiği en küçük elek çapına o agreganın *maksimum dane boyutu* denir (Gültekin vd., 2021). Asfalt kaplama karışımının nasıl kullanılacağı sadece uygun maksimum agrega boyutunu değil, aynı zamanda istenen gradasyonu (maksimumdan daha küçük boyutların dağılımı) da belirler (MAPA, 2014). *Gradasyon*, agrega karışımını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder ve belirli bir karışım için maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının belirli limitler dâhilinde olması şartnameler ile öngörülür (Görgülü, 2018). Maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, segregasyon artar, boşluk miktarı ve agrega danelerinin toplam yüzeyi azalır, yoğunluk ve stabilite artar ve bağlayıcı ihtiyacı azalır (Yılmaz, 2016). Gradasyon yönünden agregalar; yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli, kesikli ve tek boyutlu gradasyon olarak dört gruba ayrılmaktadır. Şekil 12'de agrega gradasyon tipleri ve görsel dağılımları verilmektedir.



Şekil 12. Agregalar gradasyon tipleri ve görsel dağılımları (Geçkil, 2008)

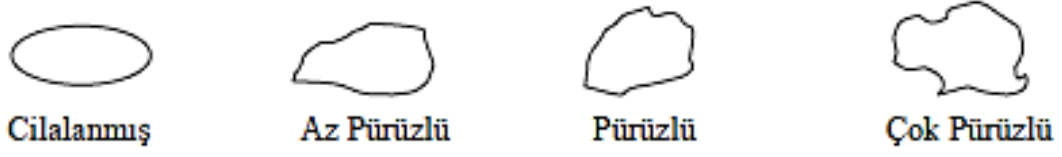
4. Biçim ve Yüzey Yapısı Sınıflandırması

Agrega danelerinin şekilleri, yol kaplamalarında kullanılan karışımların sıkışma direnci, işlenebilirliği, yoğunluğu, stabilitesi, içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemeti özelliklerine etki eder (Görgülü, 2018). Yuvarlak biçimli agregaların açısız (köşeli) biçimli agregalara nazaran işlenebilirlik özelliği daha yüksek iken deformasyona karşı gösterdiği direnç yönünden köşeli agregalar daha üstündür (Geçkil, 2008). Şekil 13'te agregaların biçim yapısı verilmektedir.



Şekil 13. Agregaların biçimsel olarak sınıflandırılması

Agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğünü veya cilalılık durumunu ifade eden ve agreganın bağlayıcı ile kurduğu bağ üzerinde önemli etkisi olan ayrıca bitümlü karışımlarda stabiliteyi ve yük taşıma kapasitesini etkileyen bir parametredir (Görgülü, 2018; Gültekin vd., 2021). Agregaların yüzey pürüzlülüğünün artması karışımın işlenebilirliğini azaltmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma direnci ve asfalt ile adezyon kuvveti artırmaktadır (Yılmaz, 2016). Fakat karışımın boşluk hacmi, sıkışmaya karşı direnci ve gradasyon gibi olumsuz özellikleri de artmaktadır. Şekil 14'te agregaların yüzey yapısı verilmektedir.



Şekil 14. Agregaların yüzey yapısı (Orhan, 2012)

5. Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk Oranı Sınıflandırması

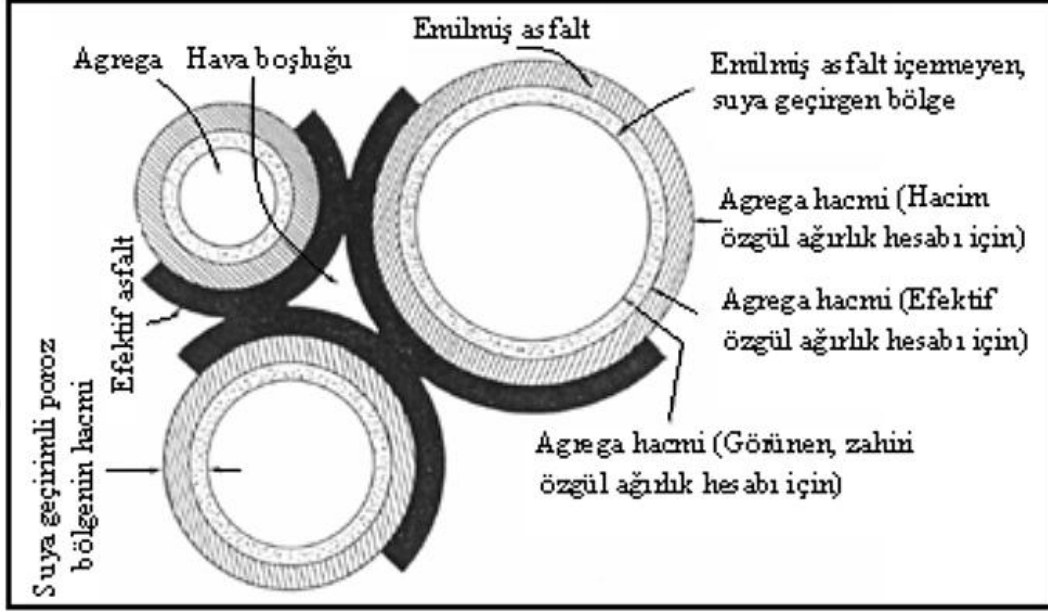
Agrega danelerinin porozitesi, su emme yeteneğine sahip oldukları boşluk miktarını ifade eder (Aslan, 2018). Agregadaki gözeneklerin boyutu, sayısı ve süreklilikleri, agregaların dayanımını, aşınmaya karşı direncini, yüzey dokusunu, özgül ağırlığını, bağlayıcı ile adezyonunu ve donma-çözölmeye karşı direncini etkiler (Geçkil, 2008). Agregada danelerinin porozitesi belli bir seviyede olmalıdır ve yeterli poroziteye sahip agregada daneleri asfaltın emilmesine imkan sağladığından agregada ile asfalt bağlayıcı film tabakası arasında kuvvetli adezyon oluşturarak stabiliteyi artırır ve suyun etkisi ile film tabakasındaki soyulmanın azalmasına neden olur.

Agrega danelerinin sahip olduğu yüzey alanlarının toplamı ve daneler arasındaki boşlukların toplamı, bağlayıcı ya da bağlayıcısız karışımların bütün özelliklerine direkt etki eden önemli faktörlerdir. Toplam boşluk hacmi ile toplam yüzey alanı; dane çapı, gradasyon ve dane biçimi gibi özelliklere bağlıdır.

6. Özgül Ağırlık Sınıflandırması

Bir maddenin birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranı; *özgül ağırlık* olarak tanımlanmaktadır. Agreganın özgül ağırlığı, sıcak asfalt karışımlarda kullanılacak olan asfalt bağlayıcı oranını belirlemeye yardımcı olur. Sıkıştırılmış kaplamada hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru veren özgül ağırlık, asfalt karışım hesaplarında kullanılan agregada için seçilecek özgül ağırlık olmalıdır (Bostancıoğlu, 2012). Agregada üç tür hacim içeriği nedeniyle zahiri (görünür) özgül ağırlık, hacim özgül ağırlığı (kuru özgül ağırlık) ve efektif özgül ağırlık olmak üzere üç farklı özgül ağırlığa sahiptir (Yılmaz, 2016). Şekil 15'te agreganın özgül ağırlık hesaplarında dikkate alınan agregada hacim tanımlamaları gösterilmektedir. Ayrıca hacim özgül ağırlığına göre; 2.000 kg/m³ ile 3.000 kg/m³ arasında olan agregalar *normal agregada*, 2.000 kg/m³'den küçük

olan agregalar *hafif agrega* ve 3.000 kg/m^3 'den büyük olan agregalar ise *ağır agrega* olarak tanımlanmaktadır (Gültekin vd., 2021).



Şekil 15. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında kullanılan hacimler (Yeşilçiçek, 2024)

1.5.2. Agregaların Mekanik Özellikleri

Agregaların stabilitesi, durabilitesi ve adezyonu kaplamaların performansına etkileyen parametrelerdir. Agregaların stabilitesi, trafik yükleri ya da zeminin hacim değiştirmesi sebebiyle oluşan deformasyonlara karşı agregaların gösterdiği dirençtir (Deniz, 2002). Agreganın stabilitesi; CBR, kayma mukavemeti ya da esneklik modülü ile ölçülerek belirlenmektedir. Agregaların durabilitesi, agregaların çevre ve trafiğin etkisiyle aşınma, kırılma ve parçalanmaya karşı gösterdiği dirençtir (Bozdemir, 2023). Agreganın durabilitesi; Los Angeles aşınma, dona karşı dayanım ve darbe deneyleri ile belirlenebilmektedir. Asfalt bağlayıcı ile kaplı agrega danelerinin suyun etkisi ile soyulmaması için agrega daneleri ve asfalt bağlayıcı arasındaki adezyonun yüksek olması gerekmektedir. Agreganın daneleri ve asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon ne kadar kuvvetli ise kaplamanın stabilitesi ve durabilitesi de o denli yüksek olur.

1.5.3. Agregalara Uygulanan Deneyler

a. Fiziksel ve Mekanik Deneyler

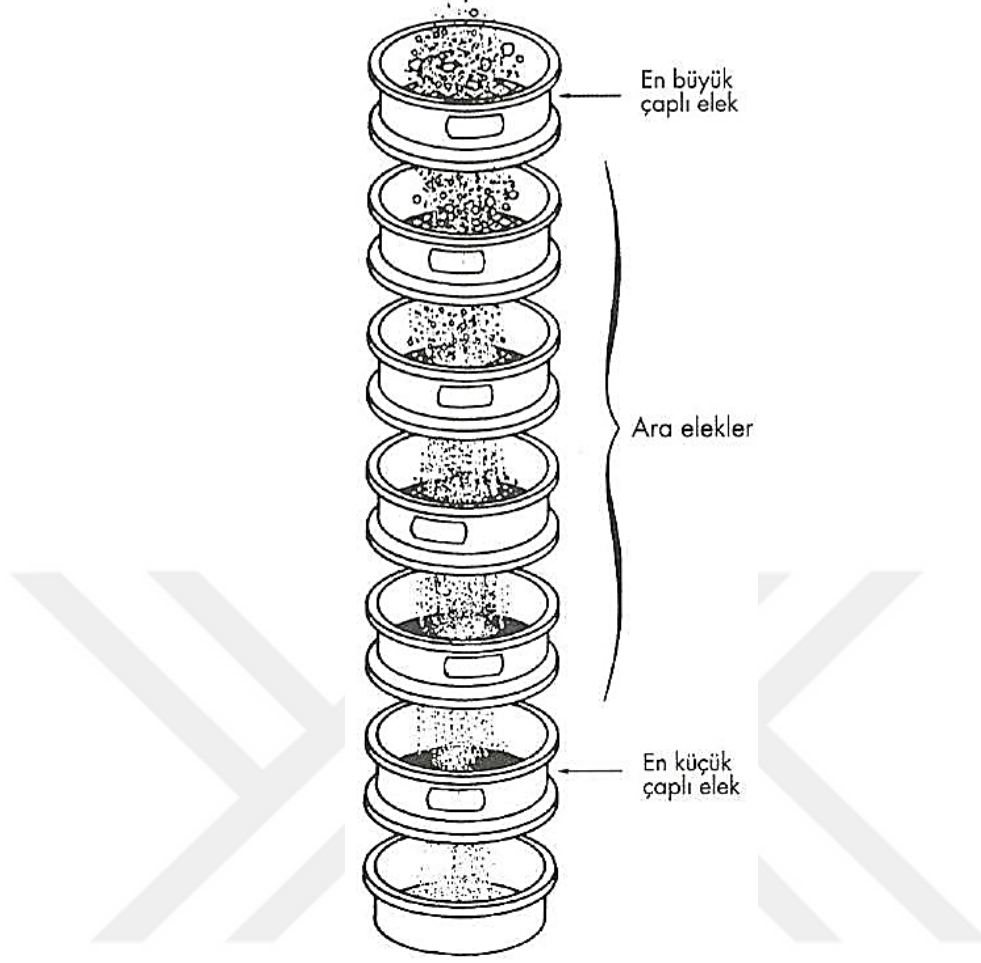
Agregalara uygulanan fiziksel ve mekanik deneyler aşağıda verilmektedir.

1. Elek Analizi (ASTM C-136, ASTM C-117, TS EN 933-1)

Deney, yol inşaatında kullanılacak agreganın dane boyutu dağılımının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir (Oruç, 1997). Deney sonucu bulunan gradasyon; sınıflandırmada, gradasyonun şartnameye uygunluğunun kontrolünde ve agrega karışım oranlarının hesabında kullanılır (Orhan, 2012). Elek analizindeki numune miktarı, kullanılacak olan agreganın maksimum dane boyutuna göre belirlenmektedir (Tablo 3). Kuru halde ağırlığı bilinen agrega numunesi, standartta belirtildiği gibi en büyük açıklığa sahip elek en üstte olacak şekilde büyükten küçüğe sıralanan elekler üzerine boşaltılır ve elekler sarma işlemine tabi tutulur (Şekil 16). Sarsma işleminden sonra her elek üzerinde kalan malzeme %0.1 duyarlılıkta terazi ile tartılarak kaydedilir. Daha sonra, her bir elek üzerinde kalan malzeme ağırlığı, deneyde kullanılan toplam malzeme ağırlığına oranının bir yüzdesi olarak Denklem 3 kullanılarak hesaplanır. Her bir elek üzerinde kalan malzeme yüzdelere göre agrega karışımının granülometri eğrisi çizilir.

Tablo 3. Elek açıklıkları ve deney numunesi ağırlıkları (Behzad, 2023; Yüknü vd., 2021; Arslan, 2014)

Elek Açıklığı		Deney Numunesi Ağırlığı
mm	inç	Minimum (kg)
37.5	1 1/2	15
25.0	1	10
19.1	3/4	5
12.7	1/2	2
9.52	3/8	1
4.75	No. 4	0.5
2.00	No.10	
0.42	No. 40	
0.177	No. 80	
0.075	No. 200	



Şekil 16. Elek analizi (İSFALT, 2001)

$$\%Kalan = \frac{A}{B} \times 100 \quad (3)$$

A, kullanılan elek üzerinde kalan numunenin ağırlığı ve B, toplam numune ağırlığını ifade etmektedir.

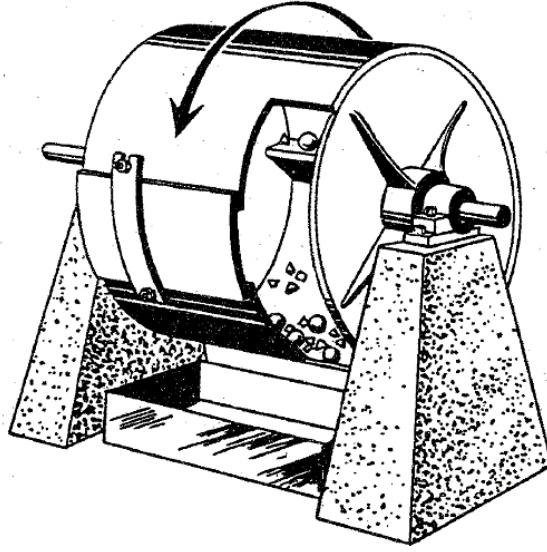
2. Parçalanma Direnci-Los Angeles Deneyi (TS EN 1097-2, AASHTO T 96)

Deney, iri agregaların parçalanma direncini saptamak amacıyla gerçekleştirilir. Deneyde Los Angeles deney cihazı kullanılmaktadır (Şekil 17). Cihaz, iki tarafı kapalı, eksenini etrafında döneabilen, içi boş çelik silindirden oluşmakta ve silindir içinde belirli ağırlıkta (her birinin ağırlığı 400-445 g, TS EN 1097-2) ve sayıda (11 adet) çelik bilyeler bulunmaktadır (Gezer, 2009; Gültekin vd., 2021). 14 mm elekten geçen ve 10 mm eleğin üstünde kalan agregalara yapılmaktadır. Agreg aap aralığına uygun 5000 ± 5 g numune

(12,5 mm -14 mm arasından kalan agrega miktarı toplam ağırlığın %35'i yani 1750 g, 10 mm - 12,5 mm arasında kalan agrega miktarı ise toplam ağırlığın %65'i yani 3250 g olacak şekilde) tartıldıktan sonra yıkanır ve yıkanan numuneler 110°C'de 24 saat boyunca etüvde kurumaya bırakılır (Behzad, 2023; Gültekin vd., 2021). Numuneler kuruduktan sonra bilyelerle birlikte tamburun içine yerleştirilir ve dakikada 31-33 devir olacak şekilde 500 devir yaptırılır. Daha sonra numune çıkarılır ve 1.60 mm elekten elenerek elek üstünde kalan numune yıkanır. Yıkanan numune 110±5°C sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur ve 1 g hassasiyetle tartılır. Denklem 4 kullanılarak Los Angeles Katsayısı (numunenin aşınma ve darbe etkileri nedeniyle kaybı yüzdesi) hesaplanır (Gültekin vd., 2021).

$$\% LA = \frac{5000-m}{50} \quad (4)$$

LA, Los Angeles katsayısını (%) ve m, numunenin son ağırlığını (g) ifade etmektedir.



Şekil 17. Los Angeles Cihazı (URL-4, 2025)

3. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (TS EN 1367-2)

Deney, agregaların hava etkileri ile donarak ufalanmaya karşı dayanımlarının laboratuvarında kısa sürede belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir. Yeterli miktarda iki deney numunesi elde etmek için her biri 10 mm - 14 mm dane büyüklüğü aralığında en az 500 g hazırlanır. Her bir deney numunesi 110±5°C'lik etüvde 24±1 saat süreyle kurutulur ve

desikatörde hava sıcaklığına soğutulur. Daha sonra deney numuneleri 10 mm ve 14 mm eleklerle elenir, elek altı ve üstü atılarak her biri yaklaşık 500 g olan iki numune elde edilinceye kadar eleme işlemine devam edilir (TS EN 1367-2). Numuneler tozlarından arıncaya kadar damıtık suyla yıkanır, süzülür ve etüvde kurutulur. Her deney numunesinden 420 ± 0.1 g - 430 ± 0.1 g aralığında iki deney numunesi hazırlanır, tartılır ve kaydedilir (M_1). Numuneler tel sepete aktarılır. Hazırlanan $MgSO_4$ çözeltisinin içerisine sepetle beraber numuneler yerleştirilir. Numunelerin üstü en az 2 cm çözelti ile kaplanır (Köfteci, 2017). Numune çıkarıldıktan sonra suyu süzülür, $110 \pm 5^\circ C$ 'lik etüvde 24 saat kurutulur ve laboratuvar sıcaklığına kadar soğutulur. Bu döngü 5 kez tekrarlanıp soğutma işlemi yapıldıktan sonra yıkama suyunda magnezyum sülfat kalmayıncaya kadar numuneler musluk suyunda yıkanır (Seren, 2015). Her bir deney numunesi $110 \pm 5^\circ C$ 'lik etüvde 24 saat kurutulur ve 10 mm'lik elek ile elenir. Elek üzerinde kalan malzeme tartılır (M_2). Her bir deney numunesinin $MgSO_4$ değeri (MS), kütlece yüzde olarak Denklem 5 kullanılarak hesaplanır (TS EN 1367-2).

$$MS = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \quad (5)$$

M_1 , deney numunesinin ilk kütlesi (± 0.1 g doğrulukla) ve M_2 , 10 mm'lik elekte kalan agreganın nihai kütlesini (± 0.1 g doğrulukla) ifade etmektedir.

4. Yassılık İndeksi Deneyi (BS 812, TS EN 933-3)

Yassı daneler yük altında çabuk kırılır ve karışımın mukavemeti düşer. Bu nedenle, agregalardaki yassı danelerin oranının belirlenmesi gerekir ve deney bu amaçla gerçekleştirilir. Kalınlığı, nominal boyutunu 0.6'sından daha küçük olan agrega daneleri yassı agrega olarak tanımlanmaktadır (Kaya, 2011). Deney numunesi $110 \pm 5^\circ C$ 'deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulduktan sonra soğutulur ve tartılır. Deney, iki aşamalı eleme işlemi içermektedir. İlk olarak deney elekleri kullanılarak, numune Tablo 4'te verilen çeşitli dane büyüklüğü aralıklarına (d_i/D_i) ayrılır (TS EN 933-3). Ardından, dane büyüklüğü aralıklarının (d_i/D_i) her biri, genişliği $D_i/2$ olan paralel aralıklara sahip olan çubuklu elekler kullanılarak elenir. Dane büyüklüğü aralıklarının (d_i/D_i) kütleleri toplamı hesaplanır ve M_1 (g) olarak kaydedilir. Ayrıca aralık genişliği $D_i/2$ olan uygun çubuklu elekten geçen ve dane büyüklüğü aralıklarının (d_i/D_i) her birinde yer alan danelerin

kütlelerinin toplamı hesaplandıktan sonra M_2 (g) olarak kaydedilir (TS EN 933-3). Toplam yassılık indeksi (FI), Denklem 6 kullanılarak hesaplanır.

$$FI = \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \times 100 \quad (6)$$

Tablo 4. Çubuklu Elekler (TS EN 933-3)

Dane Büyüklüğü Aralığı (d _i /D _i) mm	Çubuklu Elekte Aralık Genişliği mm
80/100	50±0.5
63/80	40±0.5
50/63	31.5±0.5
40/50	25±0.4
31.5/40	20±0.4
25/31.5	16±0.4
20/25	12.5±0.4
16/20	10±0.2
12.5/16	8±0.2
10/12.5	6.3±0.2
8/10	5±0.2
6.3/8	4±0.15
5/6.3	3.15±0.15
4/5	2.5±0.15

5. Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyon) Deneyi

Agregalarda, bağül yoğunluk (özüöl ağırlık) ve su emme (absorbsiyon) oranının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerdir. Özüöl ağırlık deneyi kaba ve ince agregalar için ayrı ayrı yapılmaktadır. Aşağıda tel sepet yöntemi hakkında bilgi verilmektedir.

Kaba Agreganın Özüöl Ağırlığının Belirlenmesi (TS EN 1097-6): Hazırlanan deney numunesi tel sepete yerleştirilir ve tel sepet, 22±3°C sıcaklıkta su içeren (su seviyesi, tel sepetin üst kısmından en az 50 mm yukarıda olacak şekilde) tanka daldırılır (Gültekin vd., 2021). Sepet daha sonra, tankın tabanından yaklaşık 25 mm yukarıya kaldırılarak 25 defa (saniye bir kere olmak şartıyla) bu yükseklikten deney numunesinden hapsolmuş havayı

uzaklaştırmak için düşürülür. Agregası ve sepet, $22\pm3^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki 24 ± 0.5 saat süreyle suya tamamen daldırılmış olarak bekletilir. Sepet ve agregası, $22\pm3^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda tartılır (M_2) ve tartımın yapıldığı andaki suyun sıcaklığı kaydedilir. Agregası ve sepet sudan çıkarılır ve birkaç dakika beklendikten sonra agregası kuru bir bez üzerine boşaltılır. Boş sepet tekrar suya daldırıldıktan sonra 25 defa sallanır ve tartılır (M_3). Agregası danelerinin yüzeyi kurutulduktan sonra daneler tartılır (M_1). Daneler bir tepsiye yerleştirilir ve sabit kütleye ulaşınca kadar $110\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulur ve tartılır (M_4). Dane yoğunlukları (megagram/ m^3 cinsinden) Denklem 7, 8 ve 9 kullanılarak hesaplanır (Gültekin vd., 2021).

Görünür dane yoğunluğu (zahiri özgül ağırlık, G_{kz}):

$$G_{kz} = d_{su} \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (7)$$

Etüvde kurutulmuş esasta dane yoğunluğu (hacim özgül ağırlık, G_{kh}):

$$G_{kh} = d_{su} \times \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (8)$$

Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta dane yoğunluğu (G_{kdy}):

$$G_{kdy} = d_{su} \times \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (9)$$

Su emme oranı (WA_{24}), 24 saatlik daldırmadan sonra kuru kütlenin yüzdesi olarak Denklem 10 kullanılarak hesaplanır.

$$WA_{24} = 100 \times \frac{(M_1 - M_4)}{M_4} \quad (10)$$

M_1 , doygün ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g); M_2 , doygün agregası numunesini içeren sepetin sudaki görünür kütlesi (g); M_3 , boş sepetin sudaki görünür kütlesi (g); M_4 , etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi (g); d_{su} , M_2 belirlendiğinde kaydedilen sıcaklıktaki su yoğunluğunu (megagram/ m^3) (Tablo 5'te verilmektedir) ifade etmektedir.

Tablo 5. Sıcaklıklara göre suyun yoğunluğu (Gültekin vd., 2021)

Sıcaklık	Yoğunluk (Mg/m ³)
19	0.9984
20	0.9982
21	0.9980
22	0.9978
23	0.9975
24	0.9973
25	0.9970

İnce Agreganın Özgül Ağırlığının Belirlenmesi (TS EN 1097-6): Karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde 4.75 mm (No.4) ve 0.075 mm (No.200) elekler arasında kalan agregalardan yaklaşık olarak 1 kg numune tartılarak hazırlanır (Behzad, 2023). Hazırlanan numune 0.075 mm elekten yıkanarak tepsiye alınır ve üzeri su ile kaplandıktan sonra 24 saat bekletilir. Su, ince malzemede kayıp pımayacak şekilde süzülür. Süzme işleminden sonra kalan numuneyi doygun-yüzey-kuru duruma getirmek amacıyla numuneye sıcak hava etki ettirilerek devamlı karıştırmak suretiyle kurutulur (Aslan, 2019; Arslan, 2014). Bu işlem malzeme karıştırılırken serbest dökülebilir hale gelene kadar devam edilir. Numunenin serbest dökülebilir halde olup olmadığını kontrol etmek için Abraham konisi kullanılır (Şekil 18).



Şekil 18. Abraham konisi (Sultani, 2021)

İlk olarak piknometrenin boş ağırlığı (**A**) ve su ile dolu ağırlığı (**B**) tartılır. Daha sonra doymun-yüzey-kuru hale getirilen numuneden 500 ± 10 g alınarak piknometreye yerleştirilir ve tartılır (**C**). Piknometre, agreganın üzerini örtecek kadar saf su ile doldurulur ve pinometredeki hava kabarcıklarını gidermek için çalkalanır. Daha sonra piknometreye işaret çizgisine kadar su ilave edilir ve piknometre, 25°C sıcaklığına ayarlanan su banyosuna yerleştirilir. Sıcaklık 25°C olduğunda piknometre su banyosundan çıkarılır ve kurutulduktan sonra tartılır (**D**). Ardından numune piknometreden çıkarılarak $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur. Etüvden çıkarılan numune oda sıcaklığına kadar soğutulur ve ardından tartılır (**E**). Denklem 11, 12 ve 13 kullanılarak ince agreganın hacim özgül ağırlığı, zahiri özgül ağırlığı ve su emme oranı hesaplanmaktadır (Gültekin vd., 2021).

Zahiri özgül ağırlık:

$$\frac{E}{B+E-D} \quad (11)$$

Hacim özgül ağırlık:

$$\frac{E}{B+C-A-D} \quad (12)$$

Absorbsiyon, %:

$$\frac{(C-A-E)}{E} \quad (13)$$

A, piknometre ağırlığı (g); B, su dolu piknometre ağırlığı (g); C, piknometre ve doymun-kuru-yüzey numune ağırlığı (g); D, işaret çizgisine kadar su ve numune dolu piknometre ağırlığı (g); E, kuru numune ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Mineral Filler Zahiri Özgül Ağırlığının Hesabı (TS EN 1097-7): Deney numunesi kısmı, kurutulmadan önce en az 50 g kütleye sahip olması gerekmektedir. Deney kısmı, $110\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sabit kütleye ulaşınca kadar kurutulur ve en az 90 dakika süreyle desikatörde soğumaya bırakılır (Gültekin vd., 2021). Deney kısmında topaklanma olup olmadığı kontrol edilerek topaklanmanın olması durumunda bir spatula ile ufalanır ve ufalanan topaklar karıştırılır (Kasil, 2024). Mineral filler, 0.075 mm elekten kuru olarak

elenir ve elekten geçen tüm daneler deneye dâhil edilir. Deney, üç ayrı deney numunesi kullanılarak aşağıdaki işlemler her biri için gerçekleştirilir.

Temiz ve kuru piknometre ve tıpa ağırlığı ölçüldükten (**A**) sonra su ile doldurulan piknometre ağırlığı da ölçülür (**B**). Deney numunesinden alınan filler (10 ± 1 g) piknometreye doldurulur ve tekrar tartılır (**C**). Deney numunesinin tamamen batması için yeterli miktarda saf su ilave edilir. Piknometreye tıpa takıldıktan sonra vakumlu desikatöre yerleştirilir ve vakum pompasıyla 5 dakika boyunca 3 kPa basınçta piknometrenin havası alınır. Daha sonra piknometre, 30 dakika boyunca 3 kPa basınçtaki desikatörde tutulur. Desikatördeki hava basıncı ayarlandıktan sonra piknometre alınır ve sıvı ile doldurulur. Piknometre tıpasız olarak (üst kısmı, banyo su seviyesinin 2 mm ile 3 mm üzerinde olacak şekilde) su banyosuna ($25 \pm 3^\circ\text{C}$) yerleştirilir. 60 dakika sonra, tıpa bir miktar suyun dışına taşması sağlanacak şekilde piknometreye yerleştirilir. Kapilerin üstü kurutulur ve piknometre su banyosundan çıkarılır. Piknometrenin dış kısmı kurutulur. Ardından deney numunesi ve sıvı ile dolu olan piknometre tartılır (**D**). Mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı (dane yoğunluğu) Denklem 14 kullanılarak hesaplanır (Gültekin vd., 2021).

$$G_f = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} \quad (14)$$

G_f , mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı (Mg/m^3); A, piknometre ağırlığı, (g); B, piknometre ve su ağırlığı (g); C, piknometre ve kuru numune ağırlığı (g); D, piknometre, numune ve su ağırlığının (g) ifade etmektedir.

6. Metilen Mavisi Deneyi (TS EN 933-9)

Deney, 0-2 mm aralığındaki dane çapına sahip agregaların kirlilik oranının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir. 45°C sıcaklıkta kurutulduktan sonra soğutulan numune, 2 mm açıklıklı elekten elenerek elek altında kalan malzemeden 200 g tartılır ve kaydedilir (M_1). Behere 500 ± 5 ml saf su konulduktan sonra hazırlanan numune de karıştırılarak eklenir ve 600 ± 60 devir/dakika hızda 5 dakika karıştırılır (Gültekin vd., 2021). Süre sonunda 5 ml boya çözeltisi behere eklenir ve beherdeki malzeme 400 ± 40 devir/dakika hızda 1 dakika süre ile karıştırılır. Karıştırmanın ardından cam çubuk kullanılarak karışım içerisinden bir damla sıvı alınarak süzgeç kâğıdına leke bırakılır. Bu işlem sonunda hale (damlanın etrafında açık mavi tonda yayılma) belirmezse karışıma 5 ml daha çözelti eklenir

ve 1 dk süreyle karıştırmaya devam edilir. Daha sonra tekrar leke deneyi yapılır. Bu işleme hale görülünceye kadar devam edilir. Halenin görüldüğü aşamada boya ilavesi yapılmaz ve karıştırmaya devam edilir ve 1 dakika aralıklarla leke deneyi gerçekleştirilir. İlk 4 dakikada hale kaybolursa 5 ml daha çözelti eklenir ve tekrar deneme yapılır. Beşinci dakikada hale kaybolursa sadece 2 ml çözelti eklenir. Her iki durumda da hale, 5 dakika süreyle varlığını koruyana kadar karıştırma işlemine ve leke deneylerine devam edilir. Deney boyunca kullanılan boya miktarı (ml cinsinden) kaydedilir (V_1). Metilen mavisi değeri (MB) Denklem 15 kullanılarak hesaplanır (Gültekin vd., 2021).

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 100 \quad (15)$$

M_1 , deney numunesinin ağırlığını (g) ve V_1 , enjekte edilen boya çözeltisinin toplam hacmini (ml) ifade etmektedir.

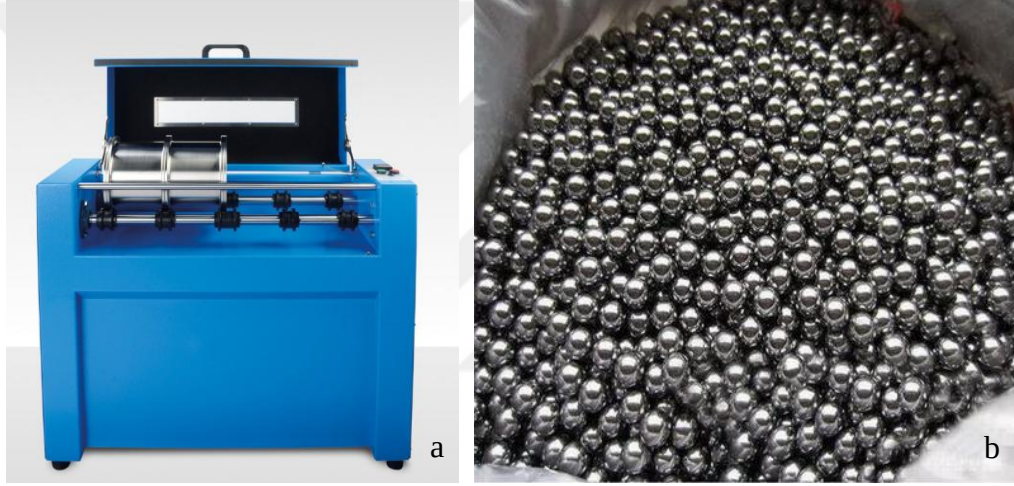
7. Mikro-Deval Aşınma Direnci Deneyi (TS EN 1097-1)

Deney, su varlığında agregaların aşınma direncini ve durabilitesinin ölçümünde kullanılmaktadır (Cooley, Jr. vd., 2002). 14 mm göz açıklıklı elekten geçip 10 mm göz açıklıklı elekte tutulan numuneler kullanılır. Numuneler, 10 mm-11.2 mm (ya da 12.5 mm) ve 11.2 mm (ya da 12.5 mm) ile 14 mm aralıklarında fraksiyonlar elde edilebilmesi için ilgili eleklerden elenir ve her bir fraksiyon yıkandıktan sonra $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur (Kasil, 2024). Ayrıca agrega danelerinin, %60 - %70'i 12.5 mm açıklıklı elekten ya da %30 - %40'ı 11.2 mm açıklıklı elekten geçmelidir. Her bir fraksiyon için 500 ± 2 g iki adet deney numunesi hazırlanır. Her bir numune ayrı bir tambura yerleştirilir ve her bir tambura çelik bilye ($5000 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$) ile su ($2.5 \text{ L} \pm 0.05 \text{ L}$) eklenir. Kapağı kapatıldıktan sonra her bir tambur iki adet mil üzerine yerleştirilir ve 100 devir/dk ± 5 devir/ dk hızda 12000 ± 10 devir tamamlanana kadar döndürülür. Deney sonrasında, herhangi bir agrega kaybına yol açmadan çelik bilyeler ve agrega bir kapta toplanır. Daha sonra tamburun içi ve kapağı yıkanarak yıkanan malzeme de toplanır. Bütün malzeme ve yıkama suları, 8 mm açıklıklı koruyucu elek ile korunan 1.6 mm açıklıklı elek üzerine döküldükten sonra temiz suyla yıkanır. Herhangi bir kayba neden olmadan 8 mm açıklıklı koruyucu elekte tutulan danler elle veya mıknatıs kullanılarak çelik bilyelerden ayrılır. Bir tepsie, 8 mm açıklıklı koruyucu elekte tutulan daneler döküldükten sonra 1.6

mm açıklıklı elekte tutulan daneler de dökülür. Tepsisi, içerisindeki malzemeye birlikte $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulur ve 1.6 mm mm açıklıklı elekte tutulan kütle miktarı (m) en yakın grama yuvalatılarak kaydedilir. Mikro-deval değeri Denklem 16 kullanılarak hesaplanır (Kasil, 2024).

$$M_{DE} = \frac{500-m}{5} \quad (16)$$

M_{DE} , mikro-deval değerini (%) ve m, 1.6 mm açıklıklı elek üzerinde kalan kütle miktarını (g) ifade etmektedir. Mikro-deval deney cihazı Şekil 19'da gösterilmektedir.



Şekil 19. (a) Mikro-deval deney cihazı (URL-5, 2025) ve (b) çelik bilyeler (URL-6, 2025)

8. Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8)

Deney, yol kaplamalarında kullanılacak olan çeşitli agregaların trafik altında sürtünme ile aşınarak ne dereceye kadar cilalanacaklarını laboratuvarında kısa zamanda belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Deney ile iri agreganın cilalanma katsayısı (PSV, polished stone value) belirlenir. PSV, yol yüzeyindeki koşullara benzer koşullar altında araç tekerleklerinin oluşturduğu cilalanma durumunda iri agreganın direncinin ölçüsüdür (Gültekin vd., 2021). Deney, 10 mm elekten geçen ve 7.2 mm elek üzerinde kalan agregalara yapılır ve iki aşamada gerçekleştirilir:

1. Numuneler hızlandırılmış cilalanma makinesinde cilalanmaya maruz bırakılır (Şekil 20).

2. Her numunenin cilalanma durumu sürtünmeye deneyi ile ölçüldükten sonra sürtünme tespitlerinden PSV hesaplanır (Şekil 21).



Şekil 20. Hızlandırılmış parlatma makinesi örneği (URL-7, 2025)



Şekil 21. Sürtünme direnci deney cihazı (URL-8, 2025)

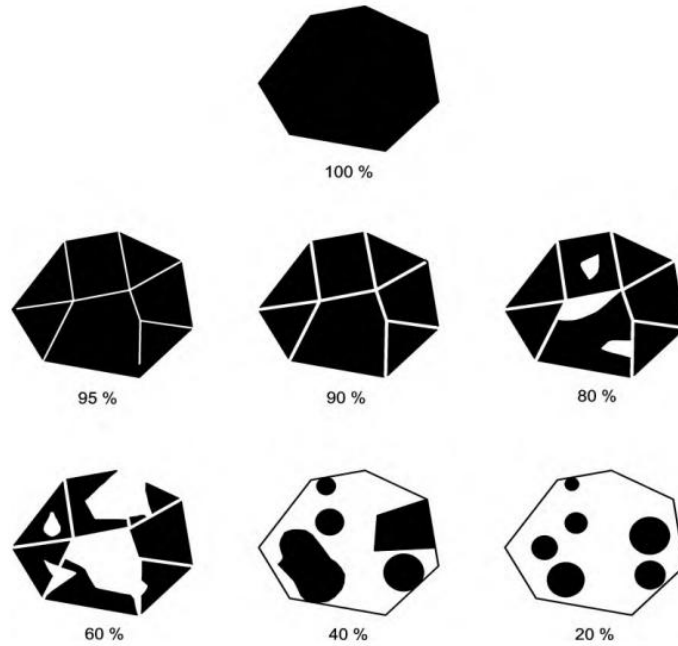
9. Soyulma Mulavemeti Deneyi (KTŞ, Kısım 403 EK-A)

Asfalt bağlayıcının trafiğin ve suyun birlikte etkisiyle agreg daneleri üzerinden ayrılması *soyulma* olarak ifade edilmektedir. Bu deney ile agreg ve asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon ve bu adezyonun soyulmaya olan etkisi araştırılır. Boyutu 9.5-6.3 mm arasında olan kırılmış agreg numunesinden 600 g alınır ve 6.3 mm elekten yıkılarak elenir. Daha sonra $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Kurutulan malzemeden 150 adet agreg seçilerek bir kaba alınır. Agreg numunesini ihtiva eden kapla birlikte ayrı bir kapta yeterli miktarda bulunan asfalt bağlayıcı ve karıştırma

işleminin yapılacağı boş kap TS EN 12697-35'e göre aşağıdaki sıcaklıklara uygun olarak ısıtılır (KGM, 2023).

- B50/70 için $150 \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- B70/100 için $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- B100/150 için $140 \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- B160/220 için $135 \pm 5^{\circ}\text{C}$

Isıtılan karıştırma kabının için agrega numunesinin konulmasının ardından agreganın ağırlıkça %5'ine eşit miktarda ısıtılan asfalt bağlayıcı eklenir ve agreglar asfalt bağlayıcı ile tamamen kaplanıncaya kadar karıştırılır. Yeterli çaptaki düz tabanlı iki petri kabına karıştırılan numune eşit miktarda konulur ve kaplı agrega numuneleri birbirinden tamamen ayrı olacak şekilde cam bagetle düzeltilir. Petri kapları laboratuvar sıcaklığında 1 saat $\pm$ 5 dk bekletildikten sonra saf su ile dolu bir tepsi içerisine batacak ve petri kaplarının üzerinde en az 3 cm su olacak şekilde yerleştirilir. 60°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca bekletilir ve süre sonunda dışarı çıkarılır. Daha suyu suyu değiştirilir ve yandsn gelen ışık altında gözle incelenir. Bütün agrega danelerinin kahverengimsi, saydam kısımlar soyulmamış kabul edilerek soyulmamış yüzeylerinin agregaların bütün yüzeyine oranı; 5'in katları olacak şekilde %5 yakınsamayla 2 değer aralığı olarak belirlenir ve bu değerler soyulmaya karşı dayanıklılık olarak ifade edilir (Şekil 22).



Şekil 22. Asfalt bağlayıcı ile kaplanma derecesinin tahmini için referans (Gültekin vd., 2021)

b. Kimyasal, Mineralojik-Petrografik Analiz

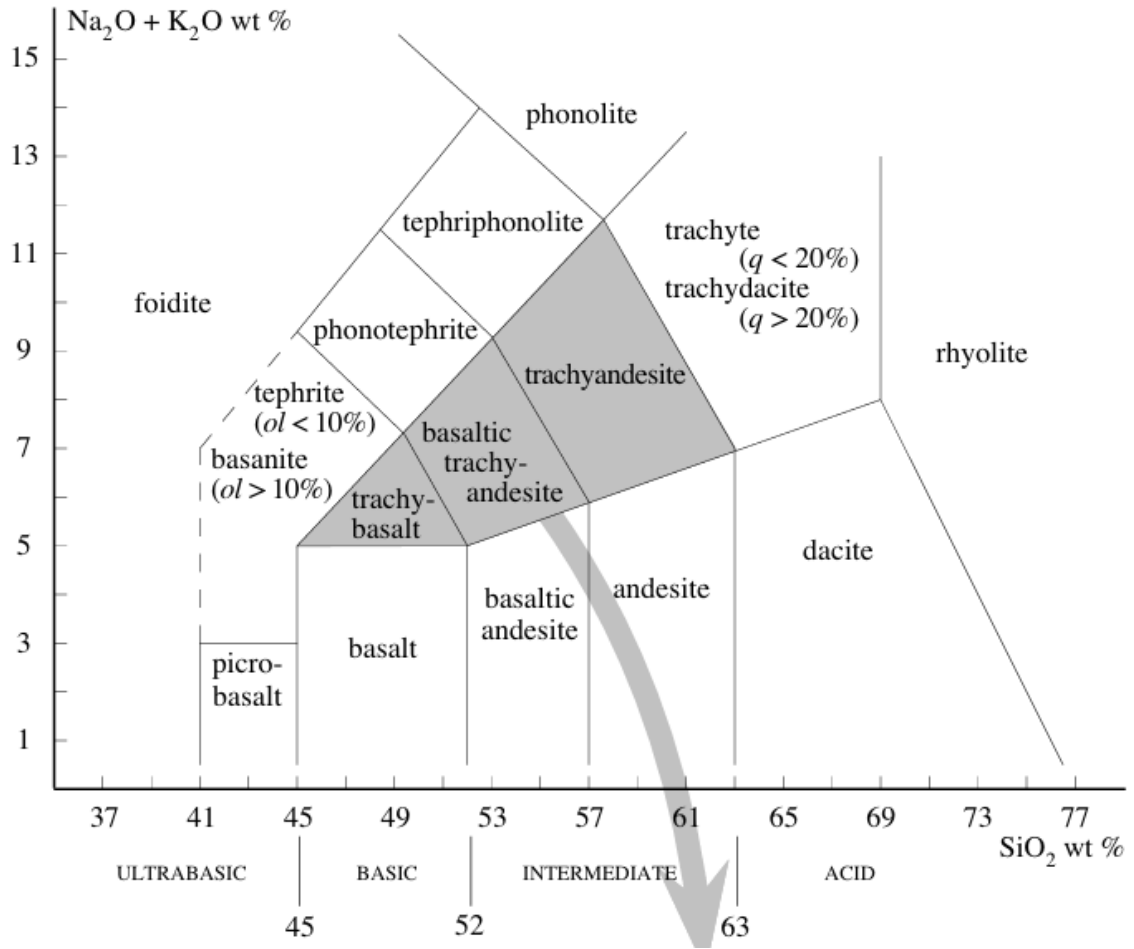
Magmatik kayaçların adlandırılmaları ve sınıflandırılmaları mineralojik ve kimyasal bileşimlerine dayanılarak yapılmaktadır.

1. Mineralojik-Petrografik Analiz

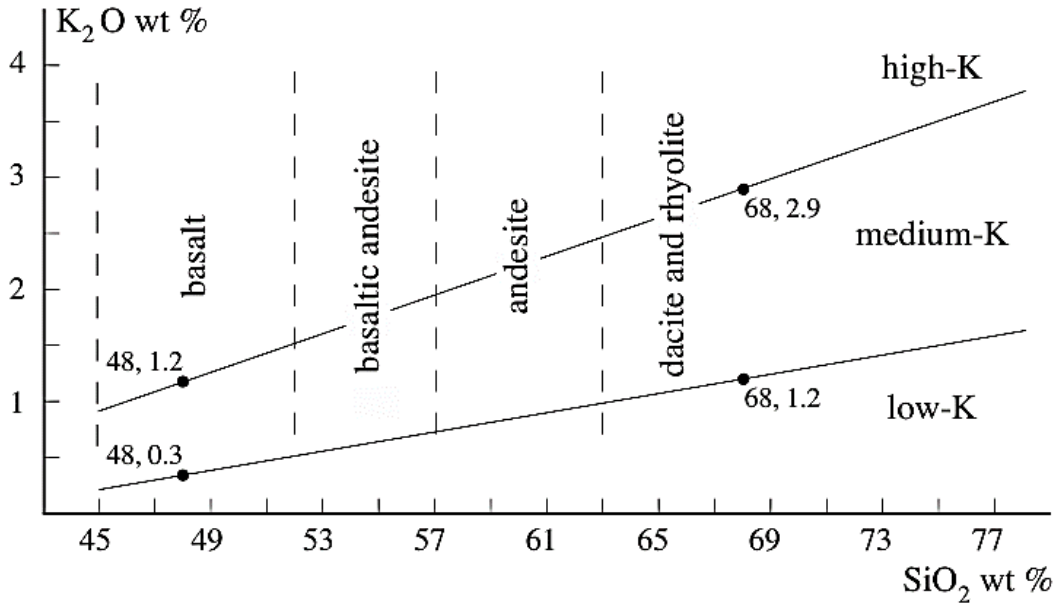
Kayaç numunelerinin mineralojik bileşiminin doğru saptanması kayacın tanımlanması açısından önem arz etmektedir. Kayaçları oluşturan mineraller genellikle makroskopik olarak tanımlanamayacak kadar küçük olması nedeniyle mineralojik bileşim, kayaç numunelerinden hazırlanan ince kesitlerin polarizan mikroskop altında (alttan aydınlatmalı mikroskop) incelenmesi ile belirlenmektedir (Erkan, 2011). İnce kesit yapılması için ilk olarak taş kesme makinesi ile kesilen kayacın bir yüzeyi önce kalın sonra ince aşındırma tozu ile aşındırılarak çok düzgün bir duruma getirilir. Kayaç temizlenir ve kurutulur. Bu işlemlerden sonra aşındırılmış yüzey, daha önce iyice kaynatılmış olan kanadabazamı ile oyutları 28x48x1.5 mm olan cam (lam) üzerine yapıştırılır. Daha sonra üstte kalan kaba yüzey de aynı şekilde aşındırılarak yapıştırılmış kayaç kesiti mümkün olduğu kadar inceltir. Kesit kalınlığı yaklaşık 0.03 mm oluncaya kadar aşındırmaya devam edilir.

2. Kimyasal Analiz

Magmatik kayaçlarda özellikle volkanik kayaçlarda tanımlama için kimyasal bileşimleri de kullanılarak yapılmaktadır. Kayaçların kimyasal bileşimine katılan elementler genel olarak kayacın %98-99'unu oluşturan ana elementler ve kayaçlarda çok daha az bulunan eser elementler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Erkan, 2013). Ana elementler, standart kimyasal analizlerde % oksit olarak belirlenmektedir. Magmatik kayaçlar, kimyasal bileşimlerindeki toplam alkali-silis içeriklerine göre sınıflandırılmaktadır. Ayrıca kayaçların MgO, toplam demir ve Al₂O₃ içerikleri de sınıflandırmada kullanılmaktadır. Toplam alkali ve silis miktarı dikkate alınarak yapılan sınıflandırma (TAS sınıflaması-Le Bas vd., 1986) Şekil 23'te verilmektedir. Ayrıca bileşimleri bazalttan riyolite kadar değişen kayaçların K₂O içeriklerine göre tanımlamaları için Şekil 24'te verilen diyagram (La Maitre, 1989) kullanılmaktadır.



Şekil 23. Volkanik kayaların toplam alkali-silis içeriklerine (TAS) göre sınıflaması (Le Maitre vd., 2002)



Şekil 24. Volkanik kayaların K₂O içeriklerine göre tanımlamaları (Le Maitre vd., 2002)

1.6. Üstyapı ve Kaplama Türleri

Karayolu üstyapısı, yolun trafik yüklerini taşıyan, bu yükleri azaltarak altyapıya aktaran, trafik akışı için düzgün yuvarlanma yüzeyi oluşturan ve yol gövdesini dış etkilere karşı koruyan tabakalı yapıya denir (Kaşak, 2007; İnce, 2024). Üstyapı, tabakalarının yapımında kullanılan malzemelerin mühendislik özelliklerine ve yapım tekniğine göre rijit, yarı rijit ve esnek üstyapı olmak üzere üç gruba ayrılır.

Rijit Üstyapı: Trafikten gelen yüklerin büyük kısmının portland çimentosundan yapılmış tek tabakalı beton plaka tarafından taşındığı, kalan kısmının ise altyapıya aktarıldığı üstyapı tipidir.

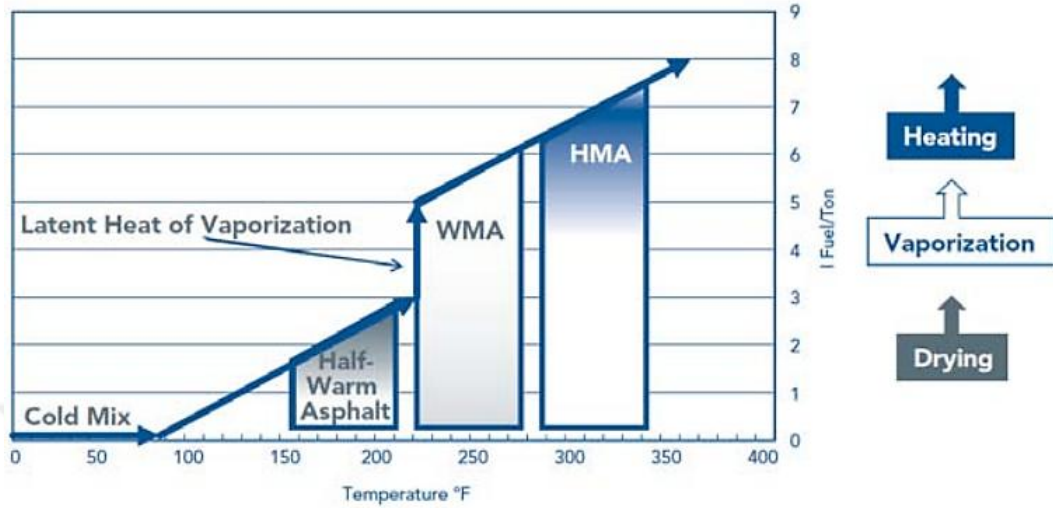
Yarı Rijit Üstyapı: Bitümlü kaplamanın altında, bir ya da birden fazla portland çimento bağlayıcılı tabaka içeren ve yükleri geniş bir yüzeye yayarak tabana aktaran üstyapı tipidir.

Esnek Üstyapı: Trafik yüklerinin büyük bölümünün üstyapıyı oluşturan asfalt bağlayıcılı veya bağlayıcısız tabakalar tarafından taşındığı, kalan kısmının tabana aktarıldığı üstyapı tipidir. Esnek üstyapı; alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur. Kaplama tabakası ise iki ya da üç tabakadan oluşabilir. Aşınma tabakası en üstte, binder tabakası ise onun altında yer alır. Bunun yanı sıra binder tabakası altında bitümlü temel tabakası yapılabilir. Ayrıca bitümlü kaplama tabakası, kullanım amacı ve beklenen mühendislik özellikleri açısından sathi (yüzeysel) ve karışım tipi (bitümlü karışım) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

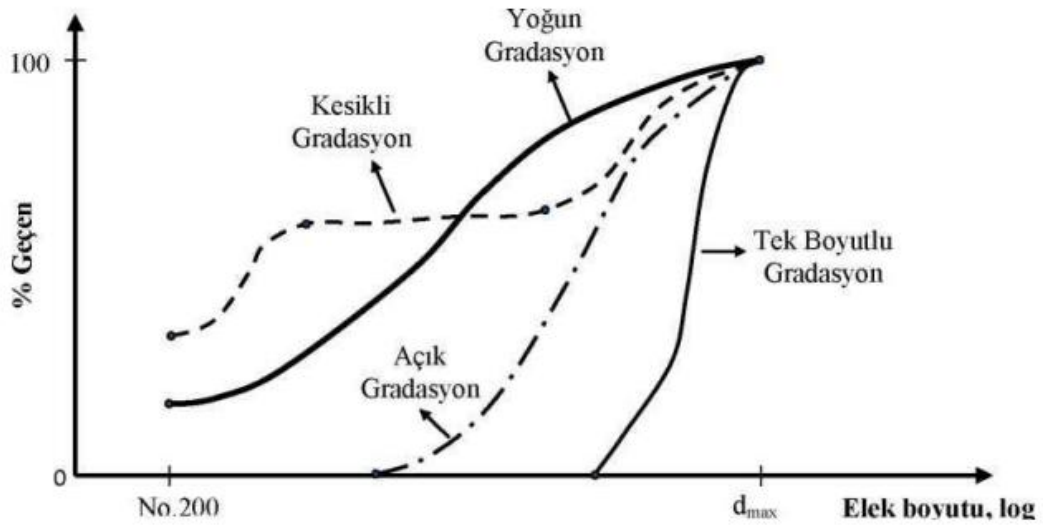
1.6.1. Bitümlü Karışım Kaplama

Bitümlü karışım kaplamalar; genellikle orta ve yüksek yoğunluklu, normal ve ağır taşıt trafiği fazla olan yollarda kullanılan, yük taşıma kapasiteleri yüksek kaplama tipidir (Gültekin vd., 2021). Kaplama tabakası; temel tabakalarına iletilen basınç gerilmelerini azaltmak, yüzey sularının temel tabakasına geçmesini önlemek, trafiğin aşındırma etkisine karşı koymak, yolu kalıcı deformasyonlara karşı korumak ve düzgün ve emiyetli gibi sürüş sağlamak gibi işlevlere sahiptir (Sağlık ve Güngör, 2008). Şekil 25'te gösterildiği gibi bitümlü karışımlar; üretim sıcaklıklarına göre soğuk (0-30°C), yarı-ılık (65-100°C), ılık (110-140°C) ve sıcak (140-180°C) olarak gruplandırılabilir (Temel, 2016). Ayrıca Şekil 26'da gösterildiği gibi agrega gradasyonuna göre açık gradasyonlu, kesikli gradasyonlu ve yoğun gradasyonlu olarak sınıflandırılmasının yanı sıra üretim yeri ve şekline

göre de yerinde karışım ve plentte karışım olarak gruplandırılabilir (Gültekin vd., 2021).



Şekil 25. Asfalt karışımların sıcaklığa göre sınıflandırılması (Srikant vd., 2018)



Şekil 26. Agrega gradasyon eğrileri (Kabadayı, 2019).

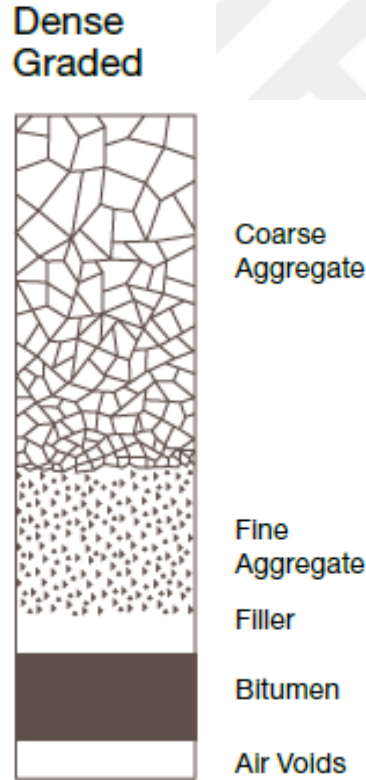
1. Bitümlü Sıcak Karışımlar

İşlenebilir ve homojen kaplama malzemesi elde etmek amacıyla agregaların nemini almak ve bitümlü bağlayıcının viskozitesini düşürmek için karıştırma işleminden önce yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmasına dayanan karışım tipidir ve proje süresi içinde geçecek toplam standart dingil sayısı 3×10^6 'dan fazla olan yollarda kullanılmaktadır (Gültekin vd.,

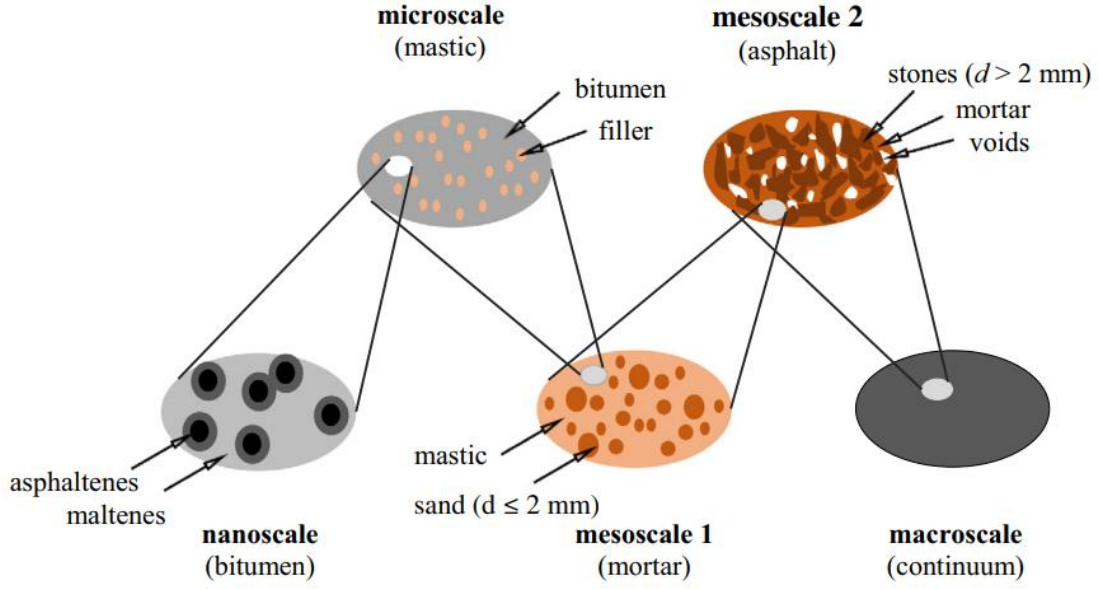
2021; Sağlık ve Güngör, 2008). Bitümlü sıcak karışım tabakalarının en yaygın türleri; asfalt betonu (AB), taş mastik asfalt (TMA) ve poroz asfalt (PA) şeklindedir.

a. Asfalt Betonu/Bitümlü Sıcak Karışım (AB/BSK)

Yüksek kaliteli ve iyi derecelendirilmiş, yoğun gradasyonlu (boşluk oranı %2-5 arasında) agrega karışımı ile asfalt bağlayıcı karıştırılmadan önce uygun bir plant tesisinde ayrı olarak ısıtılarak uygun sıcaklıklarda (140°C-180°C arası) üretilen karışımın sıcak olarak serilip sıkıştırılması ile uygulanır. Asfalt betonun hacme göre tipik bileşenleri Şekil 27’de gösterilmektedir. Ayrıca asfalt betonu, Şekil 28’de gösterildiği gibi, nanometre ölçeğinden makro ölçeğe kadar değişen uzunluklarda bileşenlerden oluşan bir kompozit olarak sıklıkla kabul edilir. Aşınma ve binder tabakaları olarak kullanılır.



Şekil 27. Asfalt betonun hacme göre tipik bileşenleri (URL-9, 2021)



Şekil 28. Bitüm ölçeği, mastik ölçeği (bitüm + filler), harç ölçeği (mastik + ince agrega $d < 2$ mm olan), asfalt ölçeği (harç + agregalar $d > 2$ mm olan) ve makro ölçek dâhil olmak üzere asfalt karışımları için çok ölçekli model (Yu vd., 2015)

Günümüzde piyasadaki en yaygın yol kaplaması olan sıcak asfalt karışımının çeşitleri ilk olarak 1800'lerin ortalarında geliştirilmiştir (Jennings & Wirtjes, 2019). Asfalt kaplama kullanımı ilk olarak 1830'larda patikalarda başlamış ve ardından 1850'lerde gerçek asfalt yollara doğru ilerlemiştir (URL-10, 2025). ABD'de 1870'lerin başında ortaya çıkan asfalt yollar, ağır yükleri (uçakların yüksek dingil yükleri) taşıyacak güçlü ve sert kaplama ihtiyacını karşılamak amacıyla geliştirilmiştir (Salta, 2010).

Türkiye'de ilk asfalt uygulamalarına penetrasyon makadam adıyla Fransızlardan alınan destek ile Osmanlı Dönemi'nde başlanmıştır. Bitümlü sıak karışım üretimine ise 1956 yılında ilk asfalt plenti (özel sektör) kurularak başlanmıştır ve 1960 yılında KGM'de asfalt plenti ile asfalt çalışmalarına ağırlık vermiştir (URL-11, 2025). Daha sonraki yıllarda asfalt kaplamalı yolların arttırılmasına devam edilmiş ve bu süreçte BSK kullanımının yanı sıra polimer modifiye bitüm kullanımına başlanmıştır. KGM'ye göre 2013-2023 yılları arasında yapılan AB yol uzunlukları Tablo 6'da bunun yanı sıra Avrupa'da ve Türkiye'de 2013-2023 yılları arasındaki AB kullanım miktarları Tablo 7'de verilmektedir.

Tablo 6. Türkiye’de 2013-2023 yılları arasında yapılan AB yol uzunlukları (URL-12, 2025)

Yıl	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
AB (km)	16.997	18.077	19.254	20.801	22.950	24.082	25.740	27.230	28.306	29.178	29.879

Tablo 7. Avrupa’da ve Türkiye’de AB (EN 13108-1) kullanımı (%) (EAPA, 2013-2023)

Yıl Ülke	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Avusturya	23.6	28.4	29.7	33.2	80.0	85.0	90.0	90.0	85.0	84.0	38.0
Belçika	33.1	32.0	35.3	37.8	37.4	72.3	73.6	72.6	72.4	72.5	70.2
Hırvatistan	51.4	56.0	54.0	58.8	94.8	91.2	94.2	93.8	94.0	93.0	91.5
Çekya	51.9	50.6	50.5	48.6	46.7	87.7	83.3	86.7	85.0	81.8	86.0
Danimarka	30.7	32.0	35.0	36.0	34.0	67.0	70.3	67.0	64.3	59.5	57.8
Estonya	58.8	58.6	58.3	60.7	63.4	96.4	96.7	91.5	93.0	92.3	86.9
Fransa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Almanya	19.0	19.0	19.0	20.0	20.0	64.5	59.4	58.1	-	-	-
Macaristan	64.6	62.0	57.2	60.7	61.0	85.0	89.0	92.0	96.2	96.5	91.0
İtalya	41.0	-	42.5	-	-	-	-	-	90.0	-	-
Litvanya	-	-	39.0	40.0	-	-	-	-	-	-	86.2
Lüksemburg	25.0	17.0	20.0	-	44.0	-	-	-	-	-	-
Hollanda	16.0	16.0	20.0	18.0	19.0	-	-	-	-	-	-
Portekiz	-	-	-	-	-	-	92.1	94.0	94.0	91.0	86.0
Romanya	12.4	12.5	-	-	-	-	62.3	72.8	-	87.0	-
Slovakya	58.6	57.0	49.9	67.5	80.0	95.5	92.0	91.0	91.8	90.5	92.0
Slovenya	50.6	54.0	52.0	48.7	50.5	89.0	87.0	87.0	88.0	92.5	89.0
İspanya	47.7	52.0	45.8	62.4	60.6	85.4	81.2	82.6	84.5	86.0	86.9
İsviçre	14.0	19.0	-	26.6	-	-	-	-	-	-	-
Türkiye	95.0	31.5	38.3	-	33.0	95.5	97.7	-	95.3	92.4	95.0

Bitümlü sıcak karışımların üstün karışım performansı, daha düşük ilk maliyeti, sürüş konforu, stabilite, durabilite, suya karşı dayanım, geri dönüştürülebilirlik ve bakım kolaylığı gibi avantajlarına karşın yüksek üretim sıcaklığı, yüksek emisyon ve yüksek enerji tüketimi gibi dezavantajlara sahiptir (Milad vd., 2022; Kök vd., 2012).

Asfalt betonu imalatında kullanılacak kaba agregası ve ince agregası özellikleri sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9’da verilmektedir.

Tablo 8. Kaba agrega özellikleri (KGM, 2023)

Deneyler		Şartname Limitleri ^c		Standart
		Binder	Aşınma	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp		≤ 30 (LA ₃₀)	≤ 27 (LA ₂₇)	TS EN 1097-2 ^a AASHTO T 96
Aşınma Direnci (Micro-Deval) ^b , % Kayıp		≤ 25 (M _{DE25})	≤ 20 (M _{DE20})	TS EN 1097-1
Hava Tesirelerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %		18 (MS ₁₈)	16 (MS ₁₆)	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi, %		≤ 30	≤ 25	BS 812
		≤ 20 (FI ₂₀)	≤ 15 (FI ₁₅)	TS EN 933-3 ^a
Cilalanma Değeri, %	T _{8.2} < 10 Milyon ^e	≥ 35 (PSV ₃₅)	≥ 45 (PSV ₄₅)	TS EN 1097-8
	T _{8.2} ≥ 10 Milyon		≥ 50 (PSV ₅₀)	
Kırılmışlık, ağırlıkça, % (Tüm yüzeyi kırılmış-tüm yüzeyi yuvarlak)		$\geq 95 - \leq 0$ (C _{95/0})	$\geq 95 - \leq 0$ (C _{95/0})	TS EN 933-5
Soyulma Mukavemeti (Bitüm Kaplı yüzey), % (24 sa 60°C suda bekletmeden sonra)		$\geq 60^d$	$\geq 60^d$	Kısım 403 EK-A
Su Emme, %		$\geq 2,5$ (WA _{242,5})	$\geq 2,0$ (WA _{242,0})	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufanabilir Tane Oranı, %		$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	ASTM C 142 AASHTO T 112
^a Referans metot.				
^b İdare tarafından gerek duyulduğunda yapılacaktır.				
^c Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043'deki sınıfını gösterir.				
^d Modifiye bitümlü bağlayıcı kullanıldığı durumlarda soyulma mukavemeti değeri ≥ 80 olacaktır.				
^e 20 yıllık toplam 8.2 ton standart dingil yükü tekerrür sayısı (T _{8.2}) 10 milyondan düşük Devlet ve İl yollarında cilalanma değeri minimum 45 olan agregalar kullanılabilir.				

Tablo 9. İnce agrega özellikleri (KGM, 2023)

Deneyler	Şartname Limitleri		Standart
	Binder	Aşınma	
Plastisite İndeksi %	NP	NP	TS EN 17892-12 AASHTO T 89 AASHTO T 90
Organik Madde, (% 3 NaOH ile)	Negatif	Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %	$\leq 2,5$ (WA _{242,5})	$\leq 2,0$ (WA _{242,0})	TS EN 1097-6

Tablo 9'un devamı

Metilen Mavisi ^a , g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 2,0 (MB _{2,0}) (Diğer Kayaçlar)	≤ 2,0 (MB _{2,0}) (Diğer Kayaçlar)	TS EN 933-9
		≤ 3,5 (MB _{3,5}) (Magmatik Kayaç)	≤ 3,5 (MB _{3,5}) (Magmatik Kayaç)	
^a Şantiye konkasöründe üretilmiş agrega veya öğütülmüş agregada aranılacak değerdir.				

AB aşınma gradasyonu ve tolerans sınırları Tablo 10'da verilmektedir. Mineral filler gradasyon sınırları ise Tablo 11'de verilmektedir.

Tablo 10. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri (KGM, 2023)

Elek Boyutu		Geçen %		
İnç. No	mm	TİP-1	TİP-2	TİP-3 Çok İnce Aşınma
¾"	19	100		
½"	12,5	88-100	100	100
3/8"	9,5	72-90	80-100	90-100
¼"	6,0	-	-	25-33
No.4	4,75	42-52	55-72	23-31
No.10	2,00	25-35	36-53	20-27
No.40	0,425	10-20	16-28	12-18
No.80	0,180	7-14	8-16	-
No.200	0,075	3-8	4-8	7-11

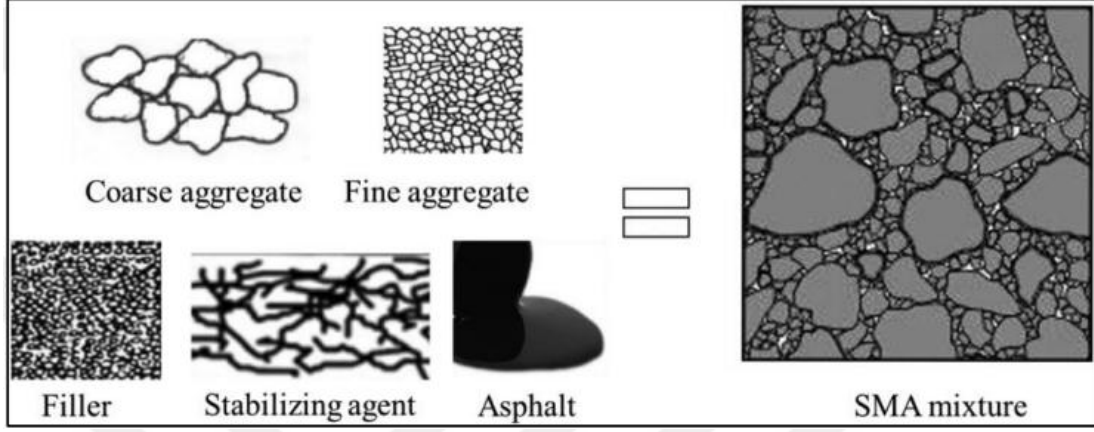
Tablo 11. Mineral fillerin gradasyon limitleri (KGM, 2023)

Elek Boyutu		Geçen %
İnç, No	mm	
No.40	0.425	100
No.80	0.180	85-100
No.200	0.075	70-100

b. Taş Mastik Asfalt (TMA)

Kesikli gradasyona sahip olan ve kaba agregadan oluşmuş bir iskelet ile boşlukları mastik (ince agrega-filler-bitüm) harcının doldurmasıyla elde edilen sıcak karışımdır (Toprakçı, 2023; Şanlıer, 2018). TMA karışımlar %70-80 oranında kaba agrega, %20-30 oranında ince agrega ve %6-7 oranında da yüksek bitüm içermektedirler (Altan, 2018).

Ayrıca bitüm oranının yüksek olması sebebiyle bitüm ve bitüm+filler malzemenin karışımından süzülmesini engellemek için fiber (elyaf) kullanılmaktadır. TMA'nın bileşenleri Şekil 29'da gösterilmektedir.



Şekil 29. TMA'nın bileşenleri (Ahmad, 2024)

TMA, 1960'lı yılların sonlarında Almanya'da çivili lastiklerin yol üstyapısında oluşturduğu kalıcı deformasyonları engellemek için geliştirilmeye başlanmıştır. Fransa, Hollanda, İsveç ve İsviçre'de Almanya'nın ardından kullanmaya başlamıştır. Almanya'da sanayinin gelişmesiyle ağır taşıt trafiği ve dingil yükleri artmış ve bu nedenle yollarda kalıcı deformasyonların (tekerlek izi) olduğu görülmüştür. Sonuç olarak TMA, 1984 yılında teknik şartnamelere eklenmiştir. Günümüzde Almanya ve ABD'nin dışında Fransa, İsveç, Norveç, Danimarka, Hollanda, Belçika, İsviçre, Japonya, Macaristan, İngiltere ve Portekiz gibi ülkelerde kullanılmaktadır (Kaşak, 2007).

KGM, 1997 yılında Türkiye için geçerli ilk TMA şartnamesi yayımlamış ve 2002 yılında Yollar Fenni Şartnamesi'ne yaptığı bir ek ile aşınma tabakasıyla ilgili şartnameyi revize etmiştir (Şanlıer, 2018). O yıllarda çeşitli nedenlerden (maliyet yüksekliği, modifiye bitüm imalatı ve teminatında zorluklar gibi) ötürü yaygın olarak uygulanamamıştır. Ankara-Platlı-Sivrihisar Yolu (1999) ve Bala Ayrımı-Kulu Ayrımı Devlet Yolu (1999) kesimlerinde Türkiye'deki ilk TMA deneme kesimleri gerçekleştirilmiştir. Tarsus-Adana-Gaziantep otoyolu, Pozantı – Tarsus otoyolu, Tarsus – Mersin otoyolu, İzmir Çevre otoyolu, Gebze – İzmit otoyolu, Haydarpaşa – Gebze ekspres yolu, Antalya – Alanya devlet yolu, Adana – Tarsus – Mersin devlet yolu deneme kesimi dışında yapılan uygulamalardır. Ayrıca İSFALT A.Ş., 2003 yılında TMA üretimi çalışmalarına başlamış ve ilk olarak Küçükçekmece Çoban Çeşme Kavşağı ve Bakırköy'de Ataköy kavşağı, daha sonra 2007 yılında metrobüs hattı

Avcılar – Cevizlibağ kesimi, 2008 yılında metrobüs hattı Cevizlibağ – Zincirlikuyu arası ile Vatan Caddesi ve Millet Caddesi ve 2009 yılında ise metrobüs hattı Zincirlikuyu – Söğütlu çeşme arasını yapmıştır (Şanlıer, 2018; Köroğlu, 2023).

Avrupa’da ve Türkiye’de 2013-2023 yılları arasındaki TMA kullanım miktarları Tablo 12’de verilmektedir.

Tablo 12. Avrupa’da ve Türkiye’de Taş Mastik Asfalt (EN 13108-5) kullanımı (EAPA, 2013-2023)

Yıl Ülke	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Avusturya	1.3	1.5	4.9	6.0	18.0	11.5	9.0	9.0	14.0	15.0	60.0
Belçika	13.8	13.3	17.1	14.2	13.9	25.4	23.8	23.3	25.1	25.1	27.1
Hırvatistan	1.7	4.0	4.3	3.2	4.2	8.8	4.9	5.7	5.7	6.5	7.8
Çekya	6.5	5.2	5.1	6.2	6.5	10.6	14.8	11.5	13.0	11.5	12.0
Danimarka	10.6	15.0	16.0	13.0	16.0	32.6	29.3	32.6	35.1	39.9	41.5
Estonya	8.4	7.1	10.4	2.3	2.7	3.1	3.0	8.1	6.0	7.1	12.0
Fransa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Almanya	10.0	10.0	11.0	9.0	9.0	29.0	28.1	25.8	-	-	-
Macaristan	3.2	3.7	6.5	5.5	6.4	13.0	9.0	6.0	3.7	3.4	8.0
İtalya	1.5	-	1.0*	-	-	-	-	-	1.0	-	-
Litvanya	-	-	6.0	5.0	-	-	-	-	-	-	10.8
Lüksemburg	22.5	15.5	17.0	-	12.0	-	-	-	-	-	-
Hollanda	-	10.0	11.0	10.0	10.0	-	-	-	-	-	-
Portekiz	-	-	-	-	-	-	6.3	5.0	5.0	4.0	5.0
Romanya	2.8	5.0	-	-	-	-	37.0	27.2	-	13.0	-
Slovakya	2.4	3.0	8.1	4.5	20.0	2.7	7.0	8.0	7.5	8.0	7.4
Slovenya	2.1	3.5	5.5	6.0	4.0	10.0	11.5	12.0	11.0	7.0	10.0
İspanya	0.3	0.3	1.2	1.2	1.6	1.7	4.7	2.8	3.2	2.4	3.1
İsviçre	-	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0*
Türkiye	5.0	2.5	2.4	4.0	2.0	4.5	2.3	-	4.7	7.6	5.0

TMA’nın yüzey performansı, durabilitesi, çevresel etkileri ve kullanım ömrü-maliyeti göz önüne alındığında ve diğer bitümlü sıcak karışımlar ile kıyaslandığında çok daha üstün özellikler sergileyebilmektedir (Aslan, 2018). Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Şanlıer, 2018; Hainin vd., 2012; Aslan, 2018; Kaşak, 2007):

- Yüksek stabilite ve tekerlek izi oluşumu şeklindeki plastik deformasyonlara karşı yüksek dayanım sağlar.
- Kesikli bir granülometriye sahip olmaları nedeniyle kayma dirençleri yüksektir
- Fren mesafesini kısaltarak sürüş güvenliğini artırır.

- Kaplama tabakası üzerinde, yağışlı havalarda su nedeniyle oluşan film tabakası oluşumunu azaltır.
- Makro dokusu yüksek bir kaplama oluşturduğundan ışık yansıtma olayı meydana gelmez. Aynı şekilde makro dokusu yüksek olduğundan akışta ve eğimde savrulmaya karşı dirençlidir.
- Aşınma tabakalarında kullanılan agregaların soyulma direncinin fazla olması sebebiyle trafik, hava, su ve sıcaklık değişikliklerinin etkilerine karşı daha dayanıklıdır.
- Yüksek durabilite sağlarlar, yüzey bozulmalarına karşı yüksek direnç ve uzun servis ömrü sağlar,
- Uzun hizmet ömrü nedeni ile daha düşük bakım ihtiyacı gerektirdiğinden, uzun vadede yol trafiğe az kapatılır ve trafik sıkışıklığı engellenir; böylece yüksek seviyede hava kirliliği de önlenmiş olur.
- Yoğun dereceli asfalttan daha düşük gürültü özellikleri sunan pürüzlü bir yüzey dokusuna sahiptir.
- Daha yüksek bitüm içeriği, daha kalın bir bitüm filmi ve daha düşük hava boşlukları içeriğinin bir sonucu olarak yorulma direncini artırır.
- Daha yüksek bağlayıcı içeriği aynı zamanda esnekliğe ve alttaki çatlaklı kaplamalardan yansıma çatlamasına karşı dirence de katkıda bulunur.

TMA karışım olumsuz özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Yüksek oranda asfalt bağlayıcı, filler ve stabilize edici katkı maddesi gereksinin sebebiyle maleyitei daha yüksektir.
- Ekstra filler ilavesine ihtiyaç duyulduğundan daha uzun karıştırma süresi gerekir bu yüzden plent verimliliği daha düşüktür.
- TMA yapımı sonrası bağlayıcının yüzeyde birikmemesi için 40-60°C sıcaklığa kadar soğumadan yol trafiğe açılmamakta bu sebeple yolun trafiğe daha uzun süre kapanır.
- TMA karışımlar diğer asfalt karışımlara kıyasla daha sert ve işlenilebilirliği düşüktür.
- Yüzeyde biriken kalın bağlayıcı film trafikte yok oluncaya kadar başlangıç kayma direnci düşük olabilir.

- Mastik içindeki fiber (elyaf) ve yüksek yoğunluklu bağlayıcı (genellikle modifiye bağlayıcılarda) nedeniyle karışım sıcaklığı (170-190°C) yüksektir.

TMA karışımlarda kullanılan malzemelerin (agrega, bağlayıcı ve katkı maddesi) özellikleri ve bileşimleri karışımların performanslarını etkilemektedir. TMA karışımlarda (aşınma) kullanılan kaba agrega; yüksek kaliteli magmatik kayaçların (bazalt, granit gibi) kırılmasından elde edilmelidir. Çakıldan üretilemsi durumunda, agreganın tüm yüzleri kırılmış olmalıdır. İnce agrega ise kaba agreganın elde edildiği ocaktan temin edilmelidir. Kaba agrega ve ince agreganın istenilen özellikleri sırasıyla Tablo 13 ve Tablo 14’te verilmektedir. Mineral filler, gradasyon ayarlaması için gerek görüldüğünde eklenmeli ve taş tozu ya da sönmüş kireçten oluşmalıdır. TMA üretiminde TS EN 12591 standardına uygun 40/60 ya da 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm veya modifiye bitüm kullanılmalıdır. Karışımındaki bitümün drenajını engellemek için aşınmada karışım ağırlığının %0.3-1.0’i, binderde karışım ağırlığının %0.2-0.8’i oranında ya da imalatçı tarafından önerilen oranda karışıma eklenir (KGM, 2023).

Tablo 13. Kaba Agreganın Özellikleri (KGM, 2023)

Deneyler	Şartname Limitleri ^c	Standart
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 25 (LA ₂₅)	TS EN 1097-2 ^a AASHTO T 96
Aşınma Direnci (Micro-Deval) ^b , % Kayıp	≤ 20 (M _{DE20})	TS EN 1097-1
Hava Tesirelerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %	≤ 14 (MS ₁₄)	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi, %	≤ 25	BS 812
	≤ 15 (FI ₁₅)	TS EN 933-3 ^a
Cilalanma Değeri, %	≥ 50 (PSV ₅₀)	TS EN 1097-8
Kırılmışlık, ağırlıkça, % (Tüm yüzeyi kırılmış-tüm yüzeyi yuvarlak)	$\geq 100 - \leq 0$ (C _{100/0})	TS EN 933-5
Soyulma Mukavemeti (Bitüm Kaplı yüzey), % (24 sa 60°C suda bekletmeden sonra)	$\geq 60^d$	Kısım 403 EK-A
Su Emme, %	$\geq 2,0$ (WA _{242,0})	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufanabilir Tane Oranı, %	Bulunmayacak	ASTM C 142 AASHTO T 112
^a Referans metot. ^b İdare tarafından gerek duyulduğunda yapılacaktır. ^c Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043’deki sınıfını gösterir. ^d Modifiye bitümlü bağlayıcı kullanıldığı durumlarda soyulma mukavemeti değeri ≥ 80 olacaktır.		

Tablo 14. İnce Agrega Özellikleri (KGM, 2023)

Deneyler		Şartname Limitleri	Standart
Plastisite İndeksi		NP	TS EN 17892-12 AASHTO T 89 AASHTO T 90
Organik Madde, %		Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %		$\leq 2,0$ (WA ₂₄ 2,0)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi ^a , g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına	$\leq 2,0$ (MB _{2,0}) (Diğer Kayaçlar) $\leq 3,5$ (MB _{3,5}) (Magmatik Kayaç)	TS EN 933-9
^a Şantiye konkasöründe üretilmiş agrega veya öğütülmüş agregada aranılacak değerdir.			

TMA aşınma gradasyonu ve tolerans sınırları Tablo 15’te verilmektedir. İlave mineral filler gradasyon sınırları ise Tablo 16’da verilmektedir.

Tablo 15. TMA aşınma gradasyonu ve tolerans sınırları (KGM, 2023)

Elek Boyutu		TMA TİP-1		TMA TİP-2	Tolerans Limitleri
		A	B		
İnç, No	mm	Geçen %	Geçen %	Geçen %	%
¾’’	19.0	100	100		
½’’	12.5	90-100	90-100	100	± 4
3/8’’	9.5	50-75	50-67	90-100	± 4
No.4	4.75	25-40	25-35	25-45	± 3
No.10	2.00	20-30	20-30	20-30	± 3
No.40	0.425	12-22	12-22	12-22	± 3
No.80	0.180	9-17	9-17	9-17	± 3
No.200	0.075	8-12	8-12	8-12	± 2

Tablo 16. İlave mineral filler gradasyon limitleri (KGM, 2023)

Elek Boyutu		Geçen %
İnç, No	mm	
No.40	0.425	100
No.80	0.180	85-100
No.200	0.075	70-100

TMA karışımların potansiyel kullanım alanları; yüksek tekerlek basıncına maruz kalan yollar (otobüs durakları, kavşaklar, kamyon terminalleri, otobüs durakları), havaalanı pistleri, köprü döşemeleri, yüksek hızlı trafiğe maruz yollar ve yarış pistleri şeklindedir.

2. Bitümlü Sıcak Karışımların Özellikleri

Bitümlü sıcak karışımların servis ömürleri süresince istenilen performansı sağlayabilmesi amacıyla tasarımı yapılırken stabilite, rijitlik, durabilite, esneklik, geçirimsizlik, işlenebilirlik, yorulmaya ve kaymaya karşı direnç özelliklerinin dikkate alınması gerekir.

Stabilite (kalıcı deformasyona karşı direnç): Kaplamaların trafik yükleri altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Yüksek stabilite rijitliği arttırdığı için kaplamalar yük altında esnek davranış gösteremeyerek çatlar. Düşük stabilite ise kaplamalarda ondülasyon, çökme ve tekerlek izi gibi bozulmalara sebep olur. Bu yüzden stabilitenin belirli bir optimum değerde olması gerekmektedir. Kaplamanın stabilitesi, sıcak karışımın kohzyonuna ve içsel sürtünme direncine bağlıdır; ayrıca stabiliteye etki eden faktörler, kayma mukavemeti, ısı ve eylemsizlik direncidir. Bitümlü sıcak karışımların kayma mukavemeti (τ) Denklem 17 kullanılarak hesaplanır (Yılmaz, 2016).

$$T = c + \sigma \tan \phi \quad (17)$$

ϕ , agrega daneleri arasında bulunan içsel sürtünme açısını, c , kohezyonu (agrega ile asfalt arasındaki adezyon kuvveti) ve σ ise normal gerilmeyi ifade etmektedir.

Rijitlik: Bitümlü sıcak karışımlar, viskoelastik ve termoplastik özelliğe sahip olduğu için mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi maksadıyla *rijitlik modülü* (R_m) kullanılmaktadır ve Denklem 18 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon ilişkisinin ifadesidir. Bu nedenle rijitlik, genellikle yükleme süresi azaldıkça (ya da yükleme hızı arttıkça), ısı azaldıkça, asfaltın viskozitesi arttıkça ve karışımın yoğunluğu arttıkça artar (Bostancıoğlu, 2012; Yılmaz, 2016).

$$R_{m(t,T)} = \sigma / \varepsilon \quad (18)$$

σ , gerilme (kg/cm^2); ε , şekil değiştirme (deformasyon); T , sıcaklık ve t , yükleme süresi veya hızıdır.

Durabilite (Dayanıklılık): Bitümlü karışımların yapım şartlarının, trafik, çevre ve iklim koşullarının ayrı ayrı ya da hepsinin birden etkisi sonucu ortaya çıkan karışımdaki bitüm özelliklerinin değişmesi (oksidasyona uğraması, yaşlanması v.s.), agreganın kırılıp parçalanması, bitümün agrega yüzeyinden soyulması gibi faktörlere karşı koyabilme yeteneğidir (Gültekin vd., 2021). Durabilite; genellikle yüksek bitüm içeriği, yoğun (iyi) derecelenmiş agrega gradasyonu, iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar, sert asfalt (düşük penetrasyonlu) ve kalın film tabakası ve yüksek soyulma direnci sayesinde artış gösterir.

Esneklik: Bitümlü karışım kaplamanın; temel, alttemel ve tabandan geçici oturma ve hareketlere karşı çatlamaya neden olmadan uyum gösterebilme yeteneğidir. Bitüm yüzdesi ve agrega gradasyonu, esnekliği etkileyen faktörlerdir. Kaplamanın esnekliği arttığında stabilitesi azalırken düşük esnekliğe sahip karışımlarda aşırı çatlamalar, yüksek esnekliğe sahip karışımlarda yorulma çatlakları oluşabilmektedir.

Geçirimsizlik: Kaplamanın içine hava ve su geçişine karşı gösterdiği dirençtir ve karışımdaki hava boşluğu yüzdesi ile belirlenir. Geçirimsizlik arttıkça; su ve havanın etkisiyle bağlayıcının yaşlanması hızlanmakta, donma-çözülme tekerrürü sonucu agrega parçalanması artmakta ve soyulma mukavemeti azalmaktadır. Geçirimsizlik genel olarak, bitüm miktarı arttıkça, sıkıştırma arttıkça, agrega gradasyonunun ve karışım yoğunluğu arttıkça artar (Yılmaz, 2016).

İşlenebilirlik: Bitümlü karışımın hazırlanması, serilmesi ve sıkıştırılması sırasındaki kolaylık olarak ifade edilebilmektedir. Ayrıca karışımdaki agrega danelerinin yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir (Akpolat, 2014). Genel olarak işlenebilirlik;

- Kırmataş agrega kullanıldıkça,
- Agrega kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğü arttıkça,
- Kaba agrega miktarı ve maksimum dane boyu arttıkça,
- Asfalt katılaştıkça ya da viskozluğu arttıkça,
- Karışımın ısısı düştükçe ve
- Ara boyutlu malzeme ve mineral filler miktarı aşırı arttıkça azalmaktadır (Geçkil, 2008).

Yorulma Mukavemeti: Bitümlü kaplamanın, trafik yükleri altında tekrarlanan eğilmelere karşı direncidir ve karışımdaki boşluk yüzdesi ve bitümlü bağlayıcın viskozitesi yorulmaya karşı direnç üzerinde etkilidir (Gültekin vd., 2021). Yorulma mukavemeti;

- Bitüm miktarı arttıkça,
- Kaplama kalınlığı arttıkça,

- Rijitlik arttıkça,
- Gradasyon ve yoğunluk arttıkça,
- Bitüm penetrasyonu arttıkça ve
- Eğilme gerilmesi azaldıkça artmaktadır (Yılmaz, 2016).

Kayma Direnci: Bitümlü kaplamanın üzerinden geçen araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurplarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaması için tekerlek ile kaplama arasında olması gereken sürtünme kuvvetini ifade etmektedir (Geçkil, 2008; Kultayev, 2014). Genel olarak kayma direnci;

- Düşük bitüm miktarı,
- Açık ve kaba gradasyonlu karışım,
- Kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega ve
- Cilalanma direnci yüksek agrega ile artmaktadır (Yılmaz, 2016).

Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler Tablo 17’de verilmektedir.

Tablo 17. Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler (Yılmaz, 2016)

Karışım Özelliği	Bağlayıcı				Agrega				Yoğunluk (Sıkışma)		Isı		Yükleme Hızı		Kaplama Kalınlığı	
	Miktar		Katılık		Yoğunluk		Agrega Tipi		Çok	Az	Çok	Az	Yüksek	Düşük	Çok	Az
	Fazla	Az	Katı	Yumuşak	Çok Yoğun	Az Yoğun	Köşeli Pürüzlü Poroz	Yuvarlak Cilalı Az Poroz								
Stabilite	Opt. (1)		x		x		x		x			x	x		x	
Rijitlik	(2)		x		x		x		x			x	x		x	
Durabilite	x		x		x		x		x			(4)	x		x	
Yorulma Mukavemeti	x			x	x		x		x		(6)		x		x	
Esneklik	x			x		x		x		x	x		-	-		x
Geçirgenlik	x		x		x			(5)	x			(7)	-	-	x	
Kayma Direnci		x	x			x	x		x			x	-	-	-	-
İşlenebilirlik		(3)		x		x			-	-	x		-	-		x

NOTLAR:

1. Asfalt yüzdesi optimum civarında ancak optimumdan daha az ise yüksek stabilite, aksi takdirde düşük stabilite elde edilir.
2. Asfalt katı ve ısı düşük ise fazla asfalt yüzdesinde, aksi halde az asfalt yüzdesinde oluşur.
3. Genel olarak az asfalt yüzdesinde olur.
4. Isının dayanıklılık üzerindeki etkisi; ısı çok yüksek ise soyulma, ısı çok düşük ise büzülme çatlakları artar.
5. Genel olarak geçirimsizlik yoğunluk ile artar.
6. Isının yorulma mukavemeti üzerinde direkt etkisi yoktur.
7. Düşük ısıda karışımın boşluk oranı, tasarım boşluk oranı civarındadır.

3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dizaynı

Bitümlü sıcak karışım dizaynı, nihai inşaatla istenilen kalite ve özelliklerin elde edilmesi amacıyla malzeme seçimi ve oranlanması konusudur. Karışımların dizayn süreci, bağlayıcı türü ve miktarı ile agrega türü ve dane dağılımının belirlenmesi ve şartname özelliklerini sağlayan bitüm-agrega karışımının üretimini içermektedir (Çetin, 2008). Karışım dizaynları; Marshall, Hveem veya Suparpave dizayn yöntemlerinden biri kullanılarak yapılmaktadır.

a. Marshall Dizayn Yöntemi

Bitümlü karışımlar için yaygın olarak kullanılan basit bir yöntem olup çevre ve iklim koşullarına dayanıklı trafik altında kalıcı deformasyon göstermeyecek yeterli dayanım ve esnekliğe sahip, tekerlek yükleri altında oluşabilecek çok az miktardaki sıkışmayı bitüm kusması, akma ve stabilite problemi olmadan sağlayabilecek bu yüzden içerisinde nem oluşmasına izin vermeyecek ya da geçirimsizliği düşürmeyecek oranda yeterli hava boşluğuna sahip ideal kaplama karışımı için gerekli olan optimum bitüm miktarını belirlemede kullanılmaktadır (Gültekin vd., 2021). Tasarımla segregasyona uğramadan uygun serim ve sıkıştırma imkânı sağlayabilecek işlenebilirliğe sahip agrega gradasyonu ve ekonomik bir karışım elde etmek de hedeflenmektedir. Marshall dizayn yönteminin aşamaları aşağıda kısaca verilmektedir (Kaşak, 2007).

1. Agrega gruplarının gradasyonu ve kullanım oranları tespit edilir
2. Karışım gradasyonunun şartname limitlerine uygunluğu kontrol edilir.
3. Agrega özgül ağırlıkları hesaplanır.
4. Marshall briketleri; düşük bitüm yüzdesinden yüksek bitüm yüzdesine doğru artan yüzdelerde ve uygun karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarında hazırlanır.
5. Hazırlanan briketler üzerinde yoğunluk, stabilite, akma, boşluk, VFA (asfaltla dolu boşluk), VMA (agregalar arası boşluk) hesapları yapılır ve bitüm yüzdesi değişimine bağlı olarak grafikleri çizilir.
6. Optimum bitüm oranı hesaplanır ve optimum bitüm %'si değerinde yoğunluk, stabilite, akma, boşluk, VFA, VMA değerlerinin şartnameye uygunluğuna bakılır.

Bu aşamalara ek olarak TMA karışımları için dizayn sırasında bitüm süzülme deneyi yapılarak mineral agregadan bitüm ve bitüm harcının ne miktarda süzüleceği belirlenir.

b. Karışım Dizaynında Temel Kavramlar ve Hesaplar

Karışım dizaynında kullanılan temel kavramlar ve hesaplamalar aşağıda verilmektedir.

1. Bitümlü Karışımların Hacimsel Özellikleri

Hacimsel özelliklerin analizi; agreg a karışımının özgül ağırlığı (G_{sa} , G_{sb} , G_{eff}), bitümlü karışımın özgül ağırlığı (yoğunluğu) (D_p , D_t), hava boşluğu (V_h), agregalar arası boşluk (VMA) ve asfaltla dolu boşluk (V_{FA}) parametrelerinin belirlenmesi ile yapılmaktadır.

Agrega Karışımının Özgül Ağırlığı (G_{sa} , G_{sb} , G_{eff}): Bitümlü karışım gradasyonuna uygun olarak hazırlanan kaba ve ince agreganın ayrı ayrı hacim ve zahiri özgül ağırlıkları ile su absorpsiyon değerleri ve mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı deneylerle bulunur. Denklem 19, 20 ve 21 kullanılarak bu değerler hesaplanmaktadır (Gültekin vd., 2021).

$$G_{sa} = \frac{K+I+F}{\frac{K}{G_{ka}} + \frac{I}{G_{ia}} + \frac{F}{G_{fa}}} \quad (19)$$

$$G_{sb} = \frac{K+I+F}{\frac{K}{G_{kb}} + \frac{I}{G_{ib}} + \frac{F}{G_{fa}}} \quad (20)$$

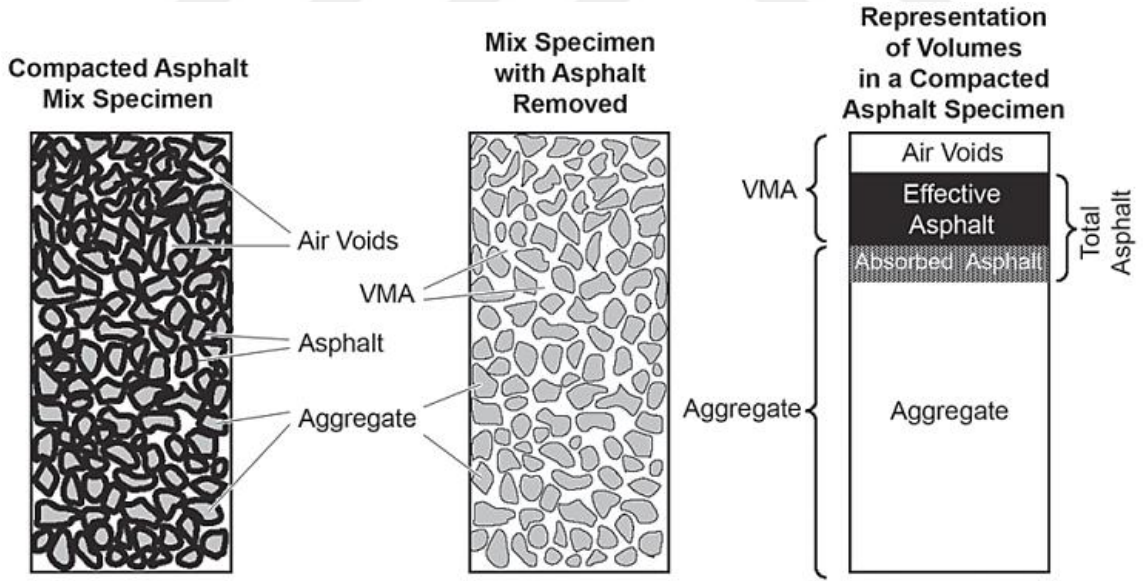
$$G_{eff} = \frac{G_{sa} + G_{sb}}{2} \quad (21)$$

G_{sa} , agreg a karışımının zahiri özgül ağırlığını; G_{sb} , agreg a karışımının hacim özgül ağırlığını, G_{eff} , agreg a karışımının hesapla bulunan efektif özgül ağırlığını; K , I , F ; Gradasyona göre kaba ve ince agreg a ile mineral fillerin ağırlıkça yüzdelerini; G_{ka} , G_{ia} ; kaba ve ince agreganın hacim özgül ağırlıklarını ve G_{kb} , G_{ib} , G_{fa} ; kaba ve ince agreg a ile mineral fillerin zahiri özgül ağırlıklarını ifade etmektedir.

Bitümlü Karışımın Özgül Ağırlığı (Yoğunluğu, D_p , D_t): Basit ifadeyle birim hacimdeki karışım ağırlığı olarak tanımlanmaktadır. Dizayn aşamasındaki prosedürlere göre belirlenmiş olan sıkıştırılmış karışımda pratik özgül ağırlık (yoğunluk) ve gevşek karışımda teorik maksimum özgül ağırlık değerleri, karışım dizaynı yapılırken sıkıştırılmış laboratuvar numunelerinin hava boşluğu yüzdesini hesaplamak için gerekmektedir.

Hava Boşluğu (V_h): Bitümlü karışım kaplamanın dayanıklılığı hava boşluğu içeriğinin bir fonksiyonudur. Karışımdaki hava boşlukları bitümle kaplanmış agrega daneleri arasındaki küçük hava cepleridir (Kasil, 2024). Hava boşluğu azaldıkça kaplamanın geçirgenliği azalırken hava boşluğu çok az olduğunda kaplamanın tekerlek izinde oturma ve ötelenme tarzı kalıcı deformasyon yapma yatkınlığı artar (Gültekin vd., 2021). Ayrıca kaplamada ilaveten bitüm kusmaları da yaşanabilir.

Agregalar Arası Boşluk (VMA): Bitümlü karışımlardan beklenen performansın elde edilebilmesi için agrega yüzeylerinin tamamının uygun kalınlıkta bitüm filmi ile kaplanmış olmasının yanı sıra agrega yüzeylerini saran yeterli kalınlıkta efektif bitüm hacmine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla sıkıştırılmış karışım içerisinde hem ideal efektif bitüm hacmini hem de gerekli hava boşluk hacmini sağlayabilmek amacıyla agregalar arası boşluk; toplam hacmin yüzdesi şeklinde tanımlanmakta ve bitüm içeriği; pratik yoğunluk agrega karışımının hacim özgül ağırlığı ile hesaplanmaktadır (Gültekin vd., 2021). Sıkıştırılmış bitümlü karışımın fiziksel modeli Şekil 30’da verilmektedir.



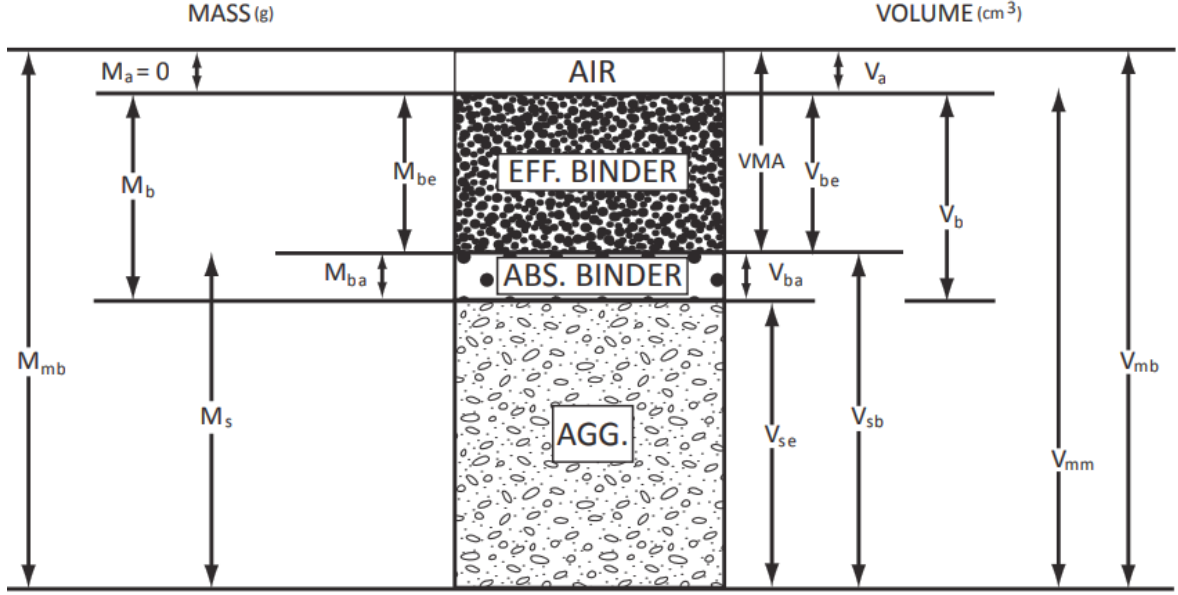
Note: For simplification, the volume of absorbed asphalt is not shown.

Şekil 30. Sıkıştırılmış bitümlü karışımın fiziksel modeli (Asphalt Institute, 2014)

Asfaltla Dolu Boşluk (V_{FA}): Agregalar arası boşluk hacmi içerisindeki efektif bitümle dolu olan hacmin yüzde cinsinden VMA’ya orandır (Gültekin vd., 2021). V_{FA} , karışımdaki agregaların çevresinde yeterli bir bitüm kalınlığının sağlanabilmesi için kullanılmaktadır.

Karışım, çok düşük olduğunda zayıf dayanıklılıkta; çok yüksek olduğunda düşük stabilitede olmaktadır (Kasil, 2024).

Bitümlü karışım tasarımında kullanılmakta olan V_h , VMA ve V_{FA} parametreleri Şekil 31'deki sıkıştırılmış karışımın ağırlık ve hacim esasına dayandırılarak kurulan matematiksel model yardımıyla hesaplanmaktadır (Gültekin vd., 2021).



Şekil 31. Faz Diyagramı (Asphalt Institute, 2014)

VMA, Denklem 22 kullanılarak hesaplanmaktadır (Gültekin vd., 2021).

$$VMA (\%) = \frac{V_{\text{toplaml}} - V_{\text{agrega}}}{V_{\text{toplaml}}} \times 100 = 100 - \frac{D_p \times A_y}{G_{sb}} \quad (22)$$

Burada;

V_{toplaml} : Sıkıştırılmış bitümlü karışımın toplam hacmini,

V_{agrega} : Bitümlü karışımdaki agreganın hacim özgül ağırlığına esas olan hacmini,

G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığını,

D_p : Sıkıştırılmış bitümlü karışımın hacim özgül ağırlığını (pratik yoğunluk) ve

A_y : Bitümlü karışımdaki agreganın ağırlıkça yüzdesini ifade etmektedir. D_p , Denklem 23 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$D_p = \frac{W_{\text{agrega}}}{W_{\text{agrega}} + W_{\text{bitüm}}} \times 100 \quad (23)$$

Burada; W_{agrega} , bitümlü karışımdaki agrega ağırlığını ve $W_{bitüm}$, bitümlü karışımdaki bitüm ağırlığını ifade etmektedir. $W_{bitüm}$, Denklem 24 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$W_{bitüm} = \frac{w_a}{100} \times W_{agrega} \quad (24)$$

w_a , bitümlü karışım içerisindeki bitüm ağırlığının agrega ağırlığına yüzde oranını ifade etmektedir. A_y ise Denklem 25 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$A_y = \frac{W_{agrega}}{W_{agrega} + W_{bitüm}} \times 100 \quad (25)$$

V_h , Denklem 26 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$V_h (\%) = \frac{V_{hava}}{V_{toplam}} \times 100 = 100 - \frac{100 \times D_p}{D_t} \quad (26)$$

Burada;

V_{hava} : Sıkıştırılmış bitümlü karışımdaki hava hacmini ve

D_t : Bitümlü karışımın teorik maksimum özgül ağırlığını ifade etmektedir. D_t ise Deklem 27 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$D_t = \frac{W_{agrega} + W_{bitüm}}{V_{agrega} + V_{be}} \quad (27)$$

V_{be} , agreganın absorbe edemediği efektif bitümün hacmini ifade etmektedir. V_{FA} , Denklem 28 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$V_{FA} (\%) = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (28)$$

Agreganın bitüm absorpsiyonu (P_b), Denklem 29 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_b (\%) = \frac{W_{ba}}{W_{agrega}} \times 100 = G_b \times \frac{G_{eff} - G_{sb}}{G_{eff} \times G_{sb}} \times 100 \quad (29)$$

Burada;

G_b : Bitümün özgül ağırlığını,

G_{eff} : Agreganın efektif özgül ağırlığını ve

W_{ba} : Absorbe bitümün ağırlığını ifade etmektedir. W_{ba} ise Denklem 30 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$W_{ba} = (V_{agrega} - V_{se}) \times G_b = \left(\frac{W_{agrega}}{G_{sb}} - \frac{W_{agrega}}{G_{eff}} \right) \times G_b \quad (30)$$

V_{se} , bitümlü karışımdaki agreganın efektif özgül ağırlığına esas olan hacmini ifade etmektedir. Teorik maksimum özgül ağırlık (D_t), Denklem 31 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$D_t = \frac{W_{agrega} + W_{bitüm}}{V_{se} + V_{bitüm}} = \frac{100 + w_a}{\frac{100}{G_{eff}} + \frac{w_a}{G_b}} \quad (31)$$

2. Marshall Karışım Dizaynının Ana Hatları

Optimum bitüm içeriğini belirlemek için belirli bir orandan başlanılarak ardışık olarak %0.5 oranında artışlarla beş farklı bitüm içeriğinde en az on beş Marshall briketi (her bitüm içeriği için üçer briket) hazırlanır (Gültekin vd., 2021; Bostancıoğlu, 2012). Her bir briket için belirlenen gradasyonda 1.100 – 1.200 g (1150 g) agregata tartılır. Hazırlanan bitüm ve agregata Tablo 18’de verilmekte olan şartnamede belirtilen sıcaklıklarda daneler tamamen bitümle kaplanıncaya kadar karıştırılır.

Tablo 18. Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları (KGM, 2023)

Bitümlü Bağlayıcı	Bitüm		Agrega	
	Min. Sıcaklık (°C)	Maks. Sıcaklık (°C)	Min. Sıcaklık (°C)	Maks. Sıcaklık (°C)
40/60, 50/70 pen. Bitümle hazırlanan karışımlarda	145	160	150	165
70/100 pen. Bitümle hazırlanan karışımlarda	140	155	145	160

Karıştırmanın tamamlanmasının ardından karışım kaba doldurulur ve serbest düşüş yapan Marshall tokmağı ile her iki yüzüne sıcak karışım tipine göre darba uygulanarak sıkıştırılır. Sıkıştırılan briketler soğumaya bırakılır. Soğuyan briketler kalıptan çıkartıldıktan sonra havadaki ağırlıkları, doymun kuru yüzey ağırlıkları ve sudaki ağırlıkları tartılır. Daha sonra bu ağırlıklar; briketlerin özgül ağırlıklarının, bitümle dolu boşluk oranlarının ve boşluk oranlarının tespit edilmesinde kullanılmaktadır.

Gerekli tartımları yapılan briketlerin yükseklikleri belirlendikten sonra Marshall stabilite ve akmalarının tespit edilebilmesi için $60 \pm 1^\circ\text{C}$ su banyosunda 30-40 dk veya 120-130 dk süreyle etüvde bekletilir (Gültekin vd., 2021; Bostancıoğlu, 2012). Bu süre sonunda briketler Marshall stabilite cihazına yerleştirilerek yüklenir ve yüklemeye en yüksek yük değeri elde edilinceye kadar devam edilerek en yüksek yükleme değerindeki akma okunur.

Marshall stabilite deneyinde briket yüksekliği 63.5 mm olduğundan yüksekliği bu yükseklikten farklı ölçülen briketlerin stabilite değerleri düzeltme katsayıları ile çarpılır. Düzeltme katsayıları Ek-1’de verilmektedir.

Marshall dizayn çalışmaları sonucunda elde edilen verilere göre bitüm yüzdeleri için D_p , stabilite, akma, V_h , VMA ve V_{FA} grafikleri çizilerek seçilen agrega karışım gradasyonu için optimum bitüm içeri belirlenir. Optimum bitüm içeriği Denklem 32 kullanılarak hesaplanmaktadır (Arslan, 2014).

$$\text{Opt. Bitüm \% 'si} = \frac{D_p \text{ için } W_a + V_f \text{ için } W_a + V_h \text{ için } W_a + \text{Stabilite için } W_a}{4} \quad (32)$$

Asfalt betonu ve TMA dizayn kriterleri sırasıyla Tablo 19 ve Tablo 20’de verilmektedir.

Tablo 19. Asfalt betonu dizayn kriterleri (KGM, 2023)

“Özellikler	Binder		Aşınma Tip-1 Tip-2		Aşınma Tip-3		Deney Standardı
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75		75		TS EN 12697-30 ASTM D 6926
Marshall Stabilesi, kg	750	-	900	-	400	-	TS EN 12697-34 ASTM D 6927

Tablo 20. TMA dizayn kriterleri (KGM, 2023)

Özellikler		Şartname Limitleri		Deney Standardı
		TMA Aşınma	TMA Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı		50	50	TS EN 12697-30 ASTM D 6926
Hava Boşlukları, (%) Sıcak iklim Bölgelerinde Hava Boşlukları, (%)		2-4 3-4	3-4	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk (VMA), (%) min.	TİP-1	16	13	TS EN 12697-8
	TİP-2	17		
Bitümlü bağlayıcı, (%) min.	TİP-1	5.8	5.2	TS EN 12697-1 AASHTO T 164
	TİP-2	6.5		
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, % min.		80	80	AASHTO T 283
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, (Koşullu-Koşulsuz), İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) kg/cm ² , min.		5	5	
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C’de 10 cm kalınlığında numune), % maks.		6	6	TS EN 12697-22 (Büyük Ebatlı cihazla: LCPC)
Tekerlek İzinde Oturma (10.000 devirde, (20.000 geçişte), 60°C’de 5 cm kalınlığında numune), (RDort) mm, maks.		3.5	3.5	TS EN 12697-22 (Küçük Ebatlı cihazla: HWT, Metot B, Havada)
Elyaf Miktarı, (%)		0.3 - 1.0	0.2 - 0.8	
Behar Metodu ile Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks.		0.3	0.3	EK-A
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48’e göre yapılabilir.				

4. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Bitümlü sıcak karışımlara uygulanan deneyler aşağıda verilmektedir.

a. Beher Metodu ile Bitüm Süzülme Deneyi

Normal bitümlü TMA karışımları $145 \pm 5^\circ\text{C}$ ve modifiye bitümlü TMA karışımlarda katkının üretici tarafından belirtilen sıcaklıkta her bir deney numunesi (üç agrega grubu) için yaklaşık 1000 g hazırlanır. Bitüm süzülme deney sıcaklığı, TMA karışımının hazırlanma sıcaklığının 25°C üzerinde olur (KGM, 2023). Üç cam beher (800ml – 1000 ml arasında hacme sahip) numaralandırıldıktan sonra deney sıcaklığında en az 15 dakika etüvde bekletilir ve boşken 0.1 g hassasiyetle ayrı ayrı tartılır (W_{1i}) (Gültekin vd., 2021). Daha sonra cam beherler bekletilmeden içerisine TMA numuneleri konularak 0.1 g hassasiyetle ayrı ayrı tartılır (W_{2i}). TMA karışımı ile doldurulan beherler deney sıcaklığındaki etüvde 60 dakika bekletilir ve bu sürenin sonunda beherler sırayla çıkarılarak bekletilmeden ters çevrilip tek bir silkeleme hareketi ile boşaltılır ve baş aşağı konumda 10 saniye bekletilir. Ardından beherler sırasıyla 0.1 g hassasiyetle ayrı ayrı tartılır (W_{3i}). Beher içerisine yapışmış agrega veya bitümlü harç varsa beherin içerisindeki malzeme 1 mm çapındaki elek üzerinde çözücüyle yıkanır ve elek üzerinde kalan malzeme kurutulduktan sonra 0,1 g hassasiyetle tartılır (W_{4i}). Bitüm süzülme miktarı, her bir beher için ayrı ayrı Denklem 33 kullanılarak hesaplanır ve bitüm süzülme deney sonucu olarak üç beher için hesaplanan değerlerin ortalaması alınır. Deney sonunda beher içerisinde kalan kalıntı malzeme yüzdesi (K) %5'den büyükse deney sıcaklığı 5°C artırılarak deney tekrar edilir. Elek üzerindeki kalıntı malzeme yüzdesi ise Denklem 34 kullanılarak hesaplanır.

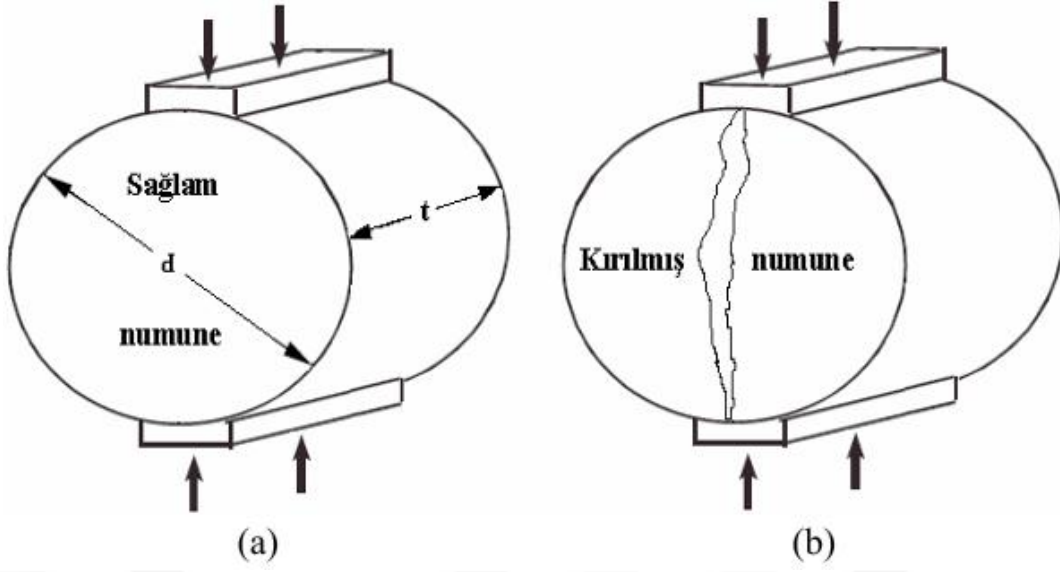
$$BSD_i = 100 \times \frac{(W_{3i} - W_{1i} - W_{4i})}{(W_{2i} - W_{1i})} \quad (33)$$

$$K_i = 100 \times \frac{W_{4i}}{W_{2i} - W_{1i}} \quad (34)$$

BSD_i , her bir beher için süzülme değerini (%) ve K_i , her bir beher için kalıntı malzeme yüzdesini ifade etmektedir.

b. Dolaylı (İndirekt) Çekme Mukavemeti Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti (Indirect Tensile Strength, ITS) deneyi, genellikle bitümlü karışımların çekme mukavemeti özelliklerini ve kohezyon kuvvetini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. AASHTO T283 standardına göre yapılan deney, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanır. Numuneler şartlandırılmış ve şartlandırılmamış olmak üzere iki gruba ayrılır. Koşullandırılmış gruptaki numuneler vakum piknometresi ile %70-80 arasında su ile doyurulur (İskender vd., 2020). Daha sonra numuneler plastik bir filmle sıkıca kapatılır ve 10 ± 5 ml su içeren plastik bir torbaya yerleştirilir. Doymuş numuneler en az 16 saat boyunca $18 \pm 3^\circ\text{C}$ 'de dondurulur. Dondurma işlemi tamamlanan numuneler bekletilmeden 24 ± 2 saat boyunca $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 'deki su banyosuna yerleştirilir (İskender vd., 2020). Su banyosundan sonra plastik torba ve film çıkarılır. Koşullandırılmış numuneler $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 'deki su banyosuna 2 saat ± 10 dakika süreyle yerleştirilir. Su banyosundan çıkarılan numuneler dolaylı çekme dayanımı yöntemi ile test edilir. Deney, silindirik asfalt numunesinin çap düzlemi doğrultusuna paralel bir şekilde 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulanarak gerçekleştirilir ve numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilerek numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir (Yılmaz, 2016). Deney aşamasındaki deformasyon, uygulanan yükte herhangi bir artış olmadığı veya en yüksek yükün meydana geldiği zaman olarak tanımlanır ve numunenin dayanabileceği en yüksek yük, dolaylı çekme dayanımı olarak alınır (İskender vd., 2021). Şekil 32'de numunenin, deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu şematik olarak verilmektedir. ITS, Denklem 35 kullanılarak hesaplanmaktadır (Geçkil, 2008).



Şekil 32. (a) ITS deneyi yükleme durumu ve (b) kırılma düzlemi (Geçkil, 2008)

$$ITS = \frac{2P_{maks}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (35)$$

ITS, dolaylı çekme mukavemetini (kPa); P_{maks} , maksimum yükü (kN); h , numune yüksekliğini (mm) ve d , numune çapını (mm) ifade etmektedir.

c. Su Hasarı (Modifiye Lottman) Deneyi

Deney, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların suyun etkilerine karşı hassasiyetlerinin başka bir deyişle karışımlarda su etkisiyle meydana gelen dayanım kaybının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Geçkil, 2008; Bostancıoğlu, 2012). Yöntemde değerlendirme, koşullandırılmamış ve bir dizi koşullandırmaya tabi tutulmuş asfalt karışım numunelerine dolaylı çekme mukavemeti deneyinin gerçekleştirilmesiyle yapılır (Ayyıldız vd., 2021).

AASHTO T 283-14 Modifiye Lottman deneyi, Lottman deneyi ile Tunnicliff ve Root koşullandırma deneyinin bir kombinasyonu şeklindedir. Marshall sıkıştırma yöntemine göre altı adet briket hazırlanır ve bunlar iki gruba (koşulsuz ve koşullu olmak üzere) ayrılır. 3 adet numune vakum aracılığıyla damıtılmış suya doymun hale getirilir. Ardından, doymun numuneler 16 saat süreyle -18°C 'deki soğutucuya bırakılır. Soğutucudan çıkarılan numuneler, 60°C 'deki su banyosunda 24 saat süreyle bekletilir. Koşullandırılmamış 3 adet numune ve koşullandırılan numuneler 25°C 'deki su banyosunda 2 saat bekletilir ve numuneler dolaylı çekme mukavemeti deneyine tabi tutulur. Dolaylı çekme mukavemeti

deneyine göre maksimum yük Denklem 36 kullanılarak hesaplanmaktadır (Çevrim, 2021). Koşullandırılmış (yaş) numunelerin dolaylı çekme mukavemeti ($ITS_{yaş}$), koşullandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) oranı ise Denklem 37 kullanılarak hesaplanmaktadır (Bostancıoğlu, 2012).

$$ITS = \frac{2000 \times P_{max}}{\pi \times h \times D} \quad (36)$$

ITS, dolaylı çekme mukavemetini (kPa); P_{max} , maksimum yükü (N); h, ortalama kalınlığı (mm) ve D, çapı (mm) ifade etmektedir.

$$ITSR = \frac{ITS_{yaş}}{ITS_{kuru}} \times 100 \quad (37)$$

ITSR, dolaylı çekme mukavemeti oranını (%); $ITS_{yaş}$, koşullandırılmış numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemetini (kPa) ve ITS_{kuru} , koşullandırılmamış numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemetini (kPa) ifade etmektedir.

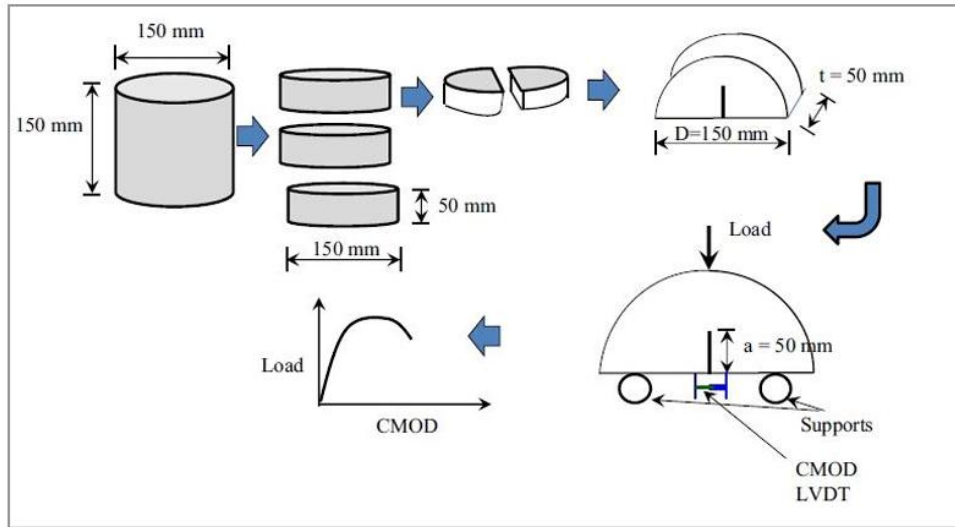
d. Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyi

Deney, bitümlü sıcak karışımların dinamik (tekrarlı) yükler altındaki dayanımın belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Deneyde; numunelere belirli bir vuruş periyodu içerisinde, tek eksenli tekrarlanan basınç yüküne maruz bırakılır ve her bir yük tekrarından sonra numune içerisinde oluşan kalıcı deformasyon ölçülür (Yılmaz, 2016). Deney; istenilen sıcaklıkta, önceden belirlenmiş gerilme ve yükleme sayılarında gerçekleştirilebilir. Deneyde 100 ya da 150 mm çaplı Marshall briketlerinin yanı sıra karot örnekleri de kullanılabilir (İskender ve Aksoy, 2021).

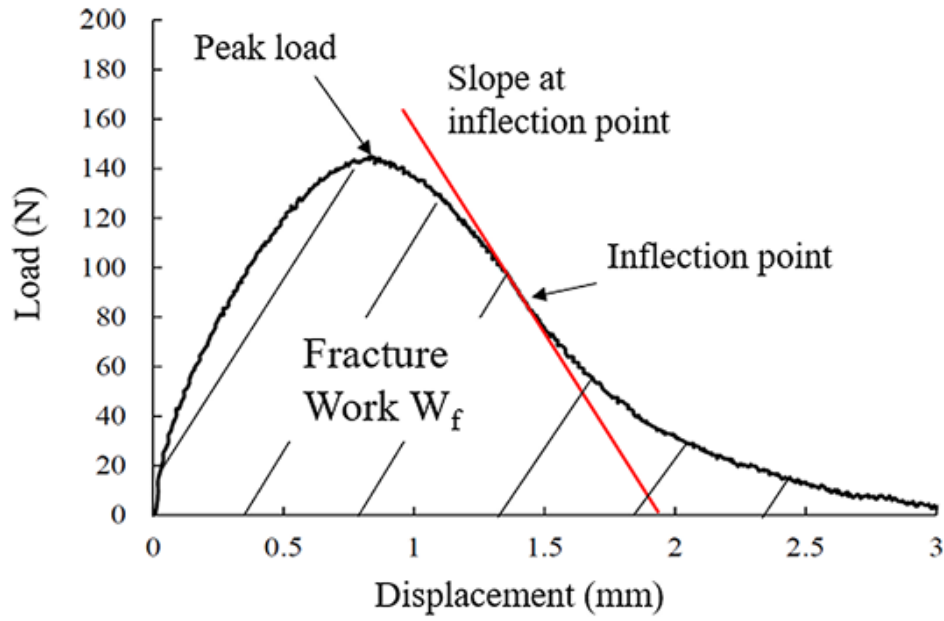
Deneyde, numuneler belirlenen deney sıcaklığında en az 3 saat bekletilir ve sonrasında numuneler asfalt tester cihazına yerleştirilerek LVDT sensörlerinin ayarlaması yapılır. Cihaz içindeki referans numunenin istenilen sıcaklığı gösterdiği an deneye başlanır (Bozdemir, 2023). Numunelere ilk olarak ön yükleme yapılır ve sonrasında belirlenen basınç yükü tekrarlı olarak numunelere uygulanır.

e. Yarım Daire Eğilme (SCB) Deneyi

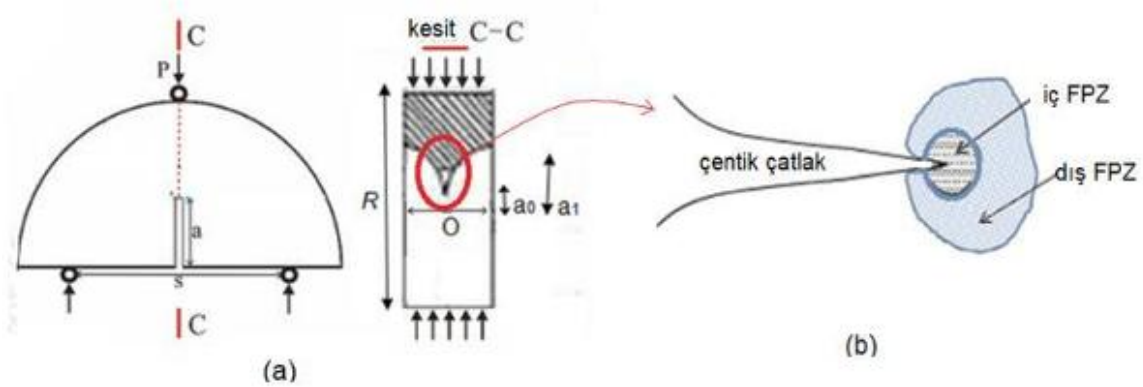
İlk olarak kaya malzemelerin kırılma dirençlerini değerlendirmek için kullanılan bu yöntem, daha sonra düzenlenerek asfalt karışımların çatlak dirençleri ve kırılma davranışlarını incelenmesi için kullanılmıştır (Özdemir vd., 2023). Deney, belirli bir boyuttaki yarım daire şeklindeki bir asfalt karışımı numunesi için, numunenin üst kısmının ortasına, numune kırılincaya kadar belirli bir destek noktası aralığıyla yük uygulanması, yükleme işlemi sırasında yük ve deformasyonun kaydedilmesi, hesaplama ve analiz yoluyla hesaplanması ve analiz edilmesidir (Meng vd., 2023). Kırılma tokluğu, kırılma enerjisi ve çatlak uzaması gibi morfolojik değişiklikler şeklindeki parametreler, asfalt karışımlarının çatlama karşı performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Şekil 33'te SCB deneyi numune üretimi ve eksenel yükleme durumu için bir gösterim verilmektedir. Şekil 34'te SCB deneyinde elde edilen tipik bir yük-yer değiştirme eğrisi ve kırılma parametresi tanımları gösterilmektedir. Burada yükleme esnasında numune, Mod I deformasyonuna (çatlak açılması) maruz kalmaktadır. Bununla birlikte, SCB numune geometrisi ile, çentik çatlak uçunda oluşan elastoplastik deformasyonların incelenmesi için çatlak gelişme alanı olan FPZ'nin (Fracture Process Zone) incelenmesi de mümkün olmaktadır (Şekil 35). FPZ genel olarak iki bölgede incelenir; ilki iç bölge (ilk gerilme kaynaklı çatlak gelişimi) ve ikincisi ise dış bölge (kararsız/duraysız çatlak gelişimi) şeklindedir (Eraslan, 2023). Deney sonuçları kullanılarak Denklem 38 ve 39 yardımıyla σ_t ve M_r parametreleri hesaplanmaktadır (Molenaar vd., 2002).



Şekil 33. SCB deneyi numune üretimi ve yükleme paterni (Abut ve Karaşahin, 2017)



Şekil 34. SCB deneyinde elde edilen tipik bir yük-yer değiştirme eğrisi ve kırılma parametresi tanımları (Lu vd., 2021)



Şekil 35. SCB numune geometri parametreleri ve çentik önünde FPZ bölgeleri (Eraslan, 2023)

$$\theta_t = 4.8 \times \frac{F}{D} \quad (38)$$

$$M_r = 1.84 \times \frac{F}{V} \quad (39)$$

σ_t , numunenin alt kısmındaki çekme gerilmesi; F , kırılma anında numunenin birim genişliği başına düşen yük; D , numunenin çapı; M_r , esneklik modülü ve V , düşey deformasyonu ifade etmektedir.

Ayrıca şartnameler ve araştırmacılar tarafından SCB deneylerinde asfalt karışım numunelerinin çatlak direncini karakterize etmek için çeşitli göstergeler kullanılmaktadır. Aşağıda birkaç yaygın SCB deneyi karakterizasyon parametresi listelenmektedir (Meng vd., 2023).

- Kırılma enerjisi, kırılmanın başlangıcından tam kırılmaya kadar kırılma yüzeyinin tükettiği enerjinin, SCB numunesinin bağ/ligament alanına bölünmesiyle elde edilir; bu, birim kalınlık başına kırılma işidir. Hesaplanan kırılma enerjisi ne kadar yüksekse, numunenin belirli bir sıcaklıktaki çatlak direnci o kadar iyidir. Kırılma enerjisi (G_f), numuneyi kırmak için gereken bağ alanı başına enerji olarak belirlenmektedir ve Denklem 40'da verilmektedir (Lu vd., 2021).

$$G_f = \frac{W_f}{t \times L} \times 1000 \text{ (joule/m}^2\text{)} \quad (40)$$

W_f , kırılma işi veya şekil değiştirme enerjisi (Nmm), yük eğrisi altında kalan alanın yer değiştirmeye oranı olarak tanımlanmakta; L , ligament/bağ uzunluğunu (mm) ve t numune kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

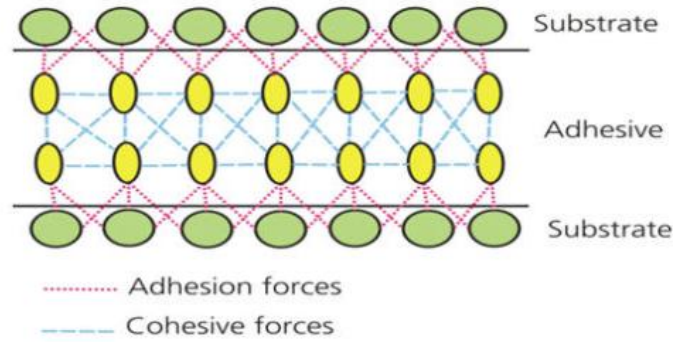
- Kırılma tokluğu (KIC), malzemelerin kırılma sürecinde enerjiyi emme kabiliyetini yansıtabilen asfalt karışımlarının düşük sıcaklık performansını da gösterebilir. Tokluk ne kadar yüksekse, numunenin çatlak yayılmasını önleme kabiliyeti de o kadar güçlüdür.
- Sertlik, malzemelerin deformasyon direncini değerlendirmek için kullanılan bir endekstir ve aynı zamanda asfalt malzemelerin elastik deformasyonunun zorluğunun bir simgesidir. Yük-yer değiştirme eğrisinin elastik aşamasında en küçük kareler regresyonu ile elde edilen eğim, malzeme sertliğini verir.
- Esneklik indeksi (FI), malzemelerin kırılabilirliğini karakterize edebilir ve çatlak yayılma hızı ile büyük bir korelasyona sahiptir. Denklem 41 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad (41)$$

m , dönüm noktasının eğiminin mutlak değerini (kN/mm); $A = 0,01$ birim dönüştürme ve ölçekleme faktörünü ifade etmektedir.

2. ADEZYON

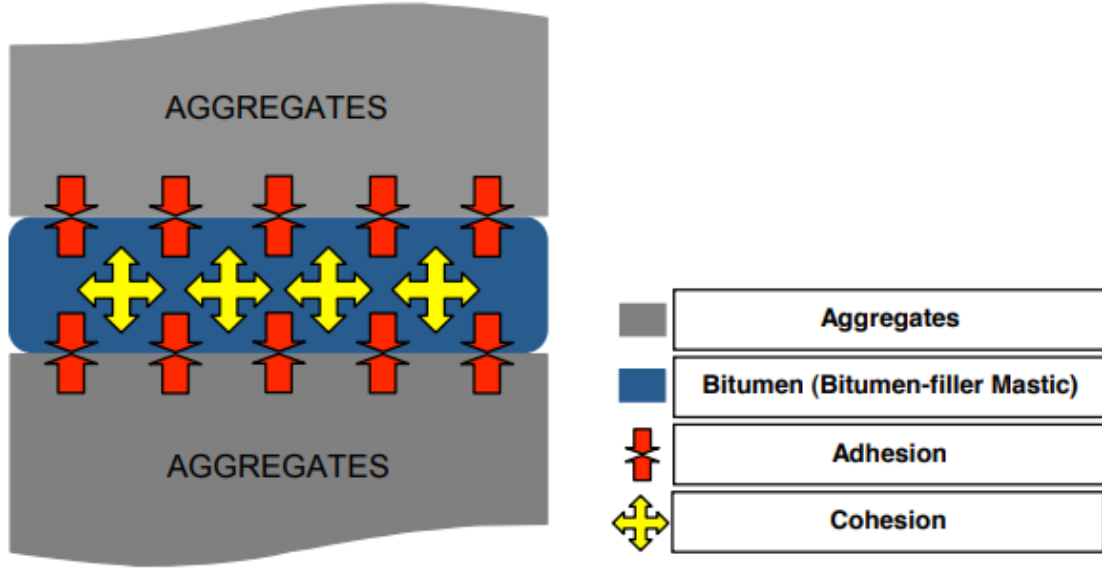
İki farklı yüzey arasındaki adezyon, birbirine benzemeyen parçacıkların/yüzeylerin valans kuvvetleri ve/veya kenetlenme kuvvetleri tarafından bir arada tutulduğu süreç olarak tanımlanmaktadır (Moraes vd., 2011). Adezyon, farklı cisimler arasındaki temas alanında cisimleri bir arada tutan moleküler çekim kuvveti olarak da tanımlanmaktadır (Copeland, 2007). Başka bir ifadeyle; katı bir madde başka bir katı, sıvı veya gaz maddeyle temas ettiğinde, iki maddenin ara yüzeyindeki parçacıklar arasında çekici bir etkileşim oluşmakta ve bu iki madde arasındaki bu çekim gücü adezyon olarak adlandırılmaktadır (Cihlářová vd., 2018). Buna karşılık, kohezyon, kütleyi oluşturan aynı gövde (yani yapıştırıcı/adhesiv veya substratlar/alt katmanlar) içinde gelişen moleküller arası kuvvettir (Jakarni, 2012). Şekil 36 sırasıyla yapıştırıcı ile alt tabakalar arasında ve yapıştırıcının kendi içinde mevcut olan adezyon ve kohezyonu göstermektedir.



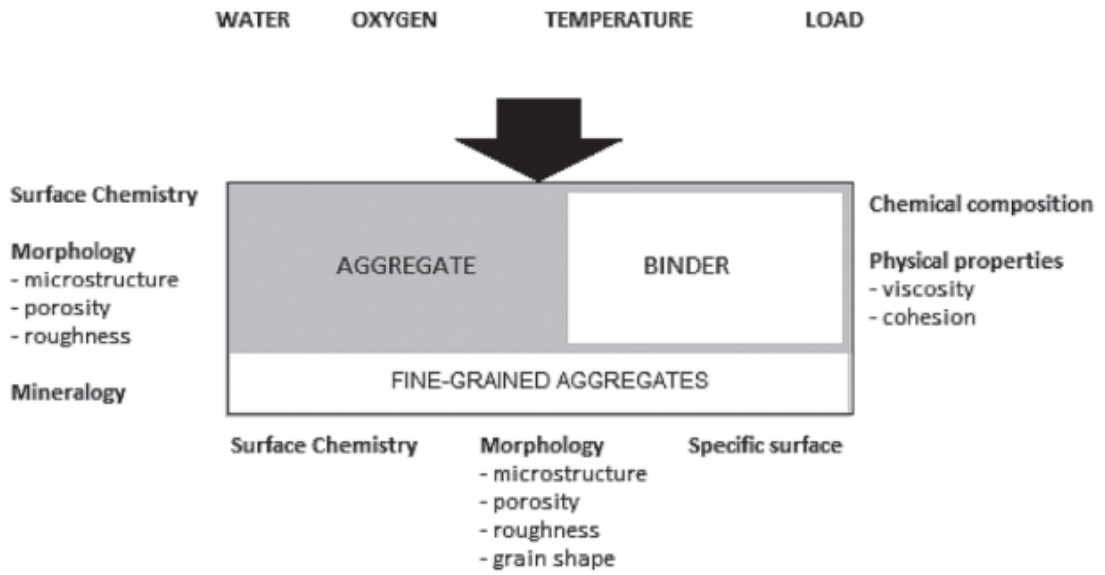
Şekil 36. Yapıştırıcı ile alt katmanlar arasında ve yapıştırıcının kendi içinde mevcut olan adezyon ve kohezyon, sırasıyla (URL-13, 2024)

Asfalt kaplamalar iki ana bileşen içerir: bitüm ve agregalar (kıрма taş) (Pstrowska vd., 2022). Tipik olarak kaplamanın %4-7'sini temsil eden bitüm, mineral malzeme parçacıklarını bağlayan yapıştırıcı işlevini gerçekleştirir (URL-2, 2024; Pstrowska vd., 2022). Bu nedenle bitümün agregat yüzeyi ile güçlü bağının olması çok önemlidir (Rahmany, 2019). Adezyon, agregat parçacıkları ile asfalt bağlayıcı arasında bulunan, kohezyon ise, asfalt bağlayıcı film içindeki moleküllerde bulunan bağlanma/bağ mekanizmasıdır (Sheng, 2019). Asfalt bağlayıcıları ve agregalar arasındaki adezyon ve kohezyon, asfalt karışımlarını

bir arada tutan kuvvetlerdir. Asfaltların adezyon özelliği kohezyon özelliğinden farklıken kohezyon özelliği asfaltın agregaya yapışma yeteneğine (adezyon özelliğine) bağlıdır (Çubuk, 2007). Asfaltın adezyon yeteneği yüksekse kohezyonu da yüksek olur (Kök, 2007). Şekil 37 sırasıyla bitümün (bitüm-filler mastik) ve agregaların adezyon ve kohezyonunu göstermektedir. Bitüm ile agreganın yapışmasını etkileyen malzeme özellikleri ve harici faktörler Şekil 38 ve Tablo 21’de verilmiştir.



Şekil 37. Bitümün (bitüm-filler mastik) ve agregaların adezyonu ve kohezyonu, sırasıyla (Jakarni, 2012)



Şekil 38. Asfalt karışımlarında adezyonu etkileyen faktörler (Cihlářová vd., 2018)

Tablo 21. Bitüm ile agreganın yapışmasını etkileyen malzeme özellikleri ve harici faktörler (Whitehoak, 1990; URL-15, 2024)

Agrega Özellikleri	Bitüm Özellikleri	Karışım Özellikleri	Harici Faktörler
Mineraloji	Reoloji	Boşluk oranı	Yağış miktarı
Yüzey dokusu	Elektriksel polarite	Geçirgenlik	Nem
Porozite	Kimyasal yapı	Bitüm miktarı	Suyun pH değeri
Toz		Bitüm film kalınlığı	Tuz varlığı
Yüzey alanı		Filler tipi	Sıcaklık
Absorbsiyon		Agrega gradasyonu	Sıcaklık değişimleri
Şekil		Karışım tipi	Trafik
Nem oranı		Kimyasal katkıları	Dizayn
Hava koşullarına maruz kalma		Polimer modifikasyonu	İşçilik
Dayanıklılık			Drenaj

Asfalt karışımların iki tür adezyonu vardır: aktif ve pasif. *Aktif adezyon*, asfalt betonu bileşenlerinin karıştırılması sırasında bağlayıcının agrega parçacıklarını tamamen çevreleme ve ona yapışma yeteneğidir (Pstrowska vd., 2022). Asfalt bağlayıcı ile agrega arasındaki bu adezyon, bağlayıcının agreganın ıslak yüzeyinden suyu hareket ettirebildiği zaman meydana gelir (Cihlářová vd., 2018). *Pasif adezyon*, dış kuvvetlerin bir sonucu olarak örneğin gözeneklerdeki artan basınçtan dolayı meydana gelir ve suyun asfalt karışımına nüfuz etmesine karşı koyma yeteneği olarak tanımlanabilir (Pstrowska vd., 2022). Bağlayıcının zayıf agrega kaplaması, yani HMA üretim süreci sırasında *yetersiz aktif adezyon*, suyun nüfuz edebileceği yolların oluşmasına yol açabilir ve istenmeyen bitüm kaplama davranışına ve istenmeyen karışımın işlenebilirliğine neden olur (Pasadín ve Pérez, 2015; Wang vd., 2022). HMA'nın hizmet ömrü boyunca su ve trafiğin etkisi sonucu *pasif adezyon kaybı*, sökülme, çatlama, kuma, çukurlar veya erken tekerlek izi oluşumu gibi çeşitli kaplama sorunlarının oluşmasını hızlandırabilir; boyutunu ve şiddetini de artırabilir (Pasadín ve Pérez, 2015).

2.1. Temel Adezyon Kuvvetleri

Adezyondan çeşitli etkileşim kuvvetleri sorumludur (Lamperti, 2011). Bu etkileşim kuvvetleri üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar:

- İyonlar arasındaki Coulomb kuvvetlerinden kaynaklanan elektrostatik etkileşimler,

- Van der Waals kuvvetleri aracılığıyla elektrodinamik etkileşimler,
- Elektron çifti paylaşımı yoluyla etkileşimlerdir.

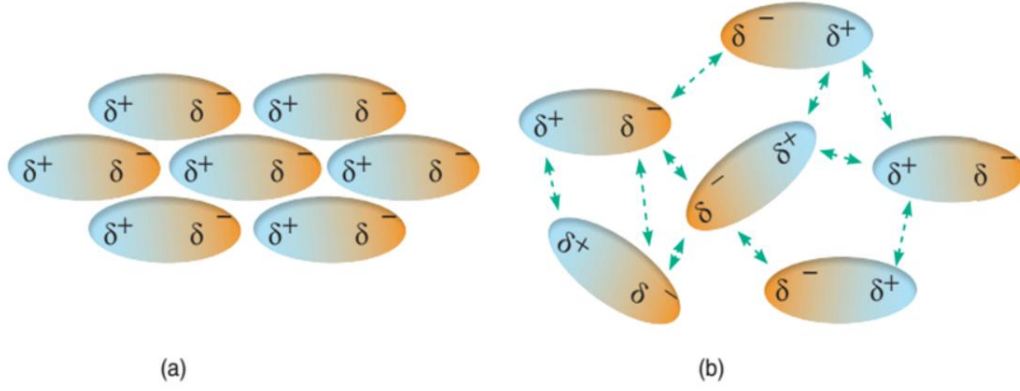
2.1.1. İyonlar Arasındaki Elektrostatik Etkileşimler

Moleküller arası kuvvetleri anlamamanın temeli, iki ayrı yük arasındaki elektrostatik kuvvet olan Coulomb kuvvetidir (Hefer vd., 2005). İyonik bağların oluşumunda elektrostatik kuvvetler birincil rol oynar (Hefer ve Little, 2005a). Elektrostatik kuvvetler, zıt yüklü iki kimyasal iyon arasındaki itici veya çekici kuvvetleri temsil eder (Twagirimana, 2014). İyonik bağların oluşumunda elektrostatik kuvvetler birincil rol oynar (Lamperti, 2011). İdeal bir iyonik bağ, yüklü parçacıklar olarak pozitif iyon (katyon) ve negatif iyon (anyon), Coulomb yasasına göre birbirini çektiğinde oluşur ve bu süreçte her iyon çifti klasik elektrostatik stabilizasyon enerjisi kazanır (Hefer ve Little, 2005a; Lamperti, 2011). İyonik bir bağdaki elektrostatik kuvvetler etkileşimin en güçlü kuvvetleridir.

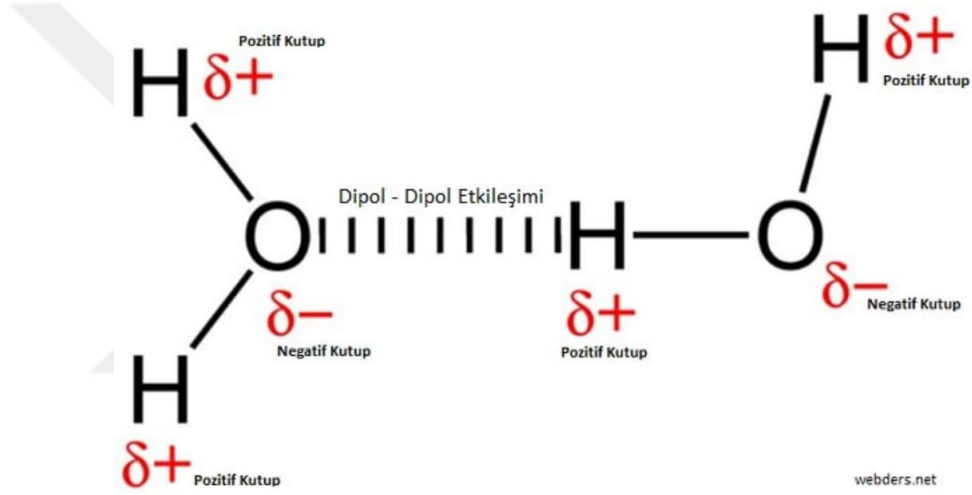
2.1.2. Van der Waals Kuvvetleri Aracılığıyla Elektrodinamik Etkileşimler

Van der Waals kuvveti üç etkileşimin toplamıdır: dipol-dipol etkileşimlerini (Keesom oryantasyon kuvvetleri), dipol kaynaklı dipol etkileşimlerini (Debye indüksiyon kuvvetleri) ve indüklenmiş dipol kaynaklı dipol etkileşimlerini (Londra dağılım kuvvetleri) (Lamperti, 2011). Bu kuvvetler, iyonik veya kovalent bağ kuvvetleriyle kıyaslandığında küçüktür ve tipik olarak 10 kcal/mol'den daha düşük kuvvetler sergiler (Twagirimana, 2014; Lamperti, 2011). Yukarıda bahsedilen etkileşimler aşağıdaki paragraflarda açıklanmaktadır.

Dipol - Dipol Etkileşimleri (Keesom Oryantasyon Kuvveti): Elektronegatiflik, bir atomun kimyasal bir bağdaki elektronları kendine doğru çekebilme yeteneğini tanımlayan kimyasal bir özelliktir (URL-16, 2024). Molekülün bir ucundaki yüksek elektronegatifliğe sahip bir atom, elektronları bu uçta diğerine göre daha fazla bulunacak şekilde çektiğinde, kısmi bir yük ayrılmasıyla sonuçlanan bir moleküler dipol oluşur (Hefer vd., 2005). İki dipol etkileştiğinde, dipollerin zıt yüklü uçları birbirini çekerken, diğer uçları doğal olarak iter ve bu onların göreceli/nispi uzaysal/konumsal yönelimini değiştirir (Şekil 39 ve 40) (Hefer ve Little, 2005a).

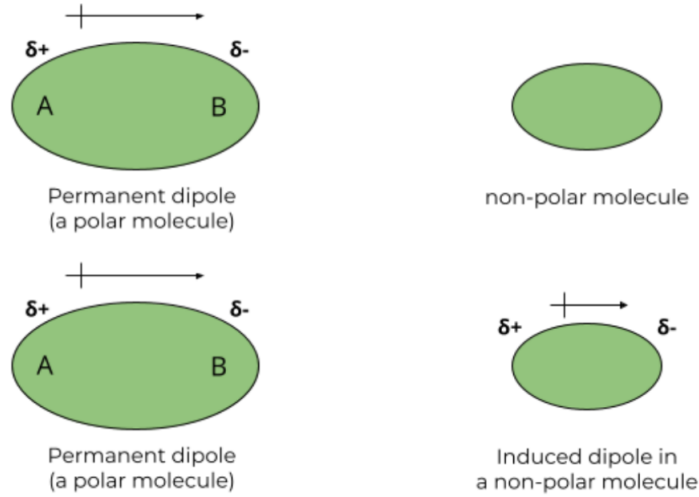


Şekil 39. (a) Dipollerin zıt yüklü uçları birbirini çeker (b) Dipollerin aynı yüklü uçları birbirini iter (URL-17, 2024)



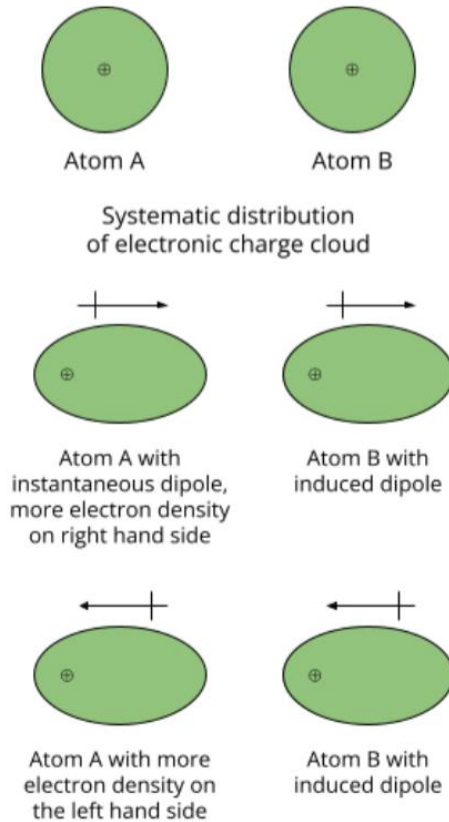
Şekil 40. Dipol-Dipol etkileşimi (Baygus, 2024)

Dipol - İndüklenmiş Dipol Etkileşimleri (Debye İndüksiyon Kuvveti): Polar bir molekülün, polar olmayan türlerdeki elektronların düzenini bozarak bir atomda veya polar olmayan bir molekülde bir dipolü indüklemesiyle (Atom içerisindeki elektronlar sürekli hareket halindedir. Negatif yüklü elektronlar bazı bölgelere yığılarak bölgesel yüklenmelere (polarlanmalara, kutuplaşmalara) neden olur. Buna indüklenme denir (Wikipedia, 2024)) sonuçlanan zayıf bir çekimdir (Choudhary, 2024). Dipol-indüklenmiş dipol etkileşimi Şekil 41’de verilmektedir.



Şekil 41. Dipol-İndüklenmiş Dipol Etkileşimi (URL-18, 2024)

İndüklenmiş Dipol - İndüklenmiş Dipol Etkileşimi (London Dağılım Kuvveti): Geçici bir çekici kuvvet olan bu kuvvet, iki bitişik/komşu atomdaki elektronların, atomların geçici dipoller oluşturmasını sağlayacak konumları işgal etmesiyle ortaya çıkmaktadır ve en zayıf moleküller arası kuvvettir (Choudhary, 2024). London dağılım kuvveti Şekil 42’de verilmektedir.



Şekil 42. London dağılım kuvveti (URL-18, 2024)

2.1.3. Elektron Çifti Paylaşma Aracılığıyla Etkileşimler

Salınımlı yüklerden kaynaklanan zayıf elektrik kuvvetlerinin kolaylaştırdığı/olanak tanıdığı etkileşimler fiziksel bağlanma olarak kabul edilirken, iki türün bir elektron çiftinin paylaşılması yoluyla birleşmesine genellikle kimyasal bağlanma olarak adlandırılır (Hefer vd., 2005). Kimyasal bağlanma, etkileşen elemanlar arasında dengeli elektron dağılımları oluşturmak için etkileşen elemanlar içindeki bağ elektronlarının yeniden düzenlenmesiyle gerçekleşir (Twagirimana, 2014). Bu, yapıdaki atomların elektronegatifliği tarafından yönetilir (Lamperti, 2011). Elektron çifti paylaşımıyla kimyasal bağlanmanın iki kategorisi aşağıda açıklanmıştır:

Her İki Elemandan Gelen Elektronların Katkıları Yoluyla Etkileşim: Bu tür etkileşimde her atom, yeni bir molekül oluşturmak için paylaşılan elektronlardan birine katkıda bulunur ve bu şekilde oluşan bağa *kovalent bağ* denir (Hefer ve Little, 2005a). Kovalent bağlar yönlü bir karaktere sahiptir ve etkileşim, adsorbatın yüzeye göre tam konumuna ve yönelimine büyük ölçüde bağlıdır (Twagirimana, 2014).

Tek Bir Eleman Tarafından Yalnız Bir Çift Elektronun Bağışlanması Yoluyla Etkileşim: Paylaşılan çift, etkileşen atomlardan biri tarafından bağışlanır ve diğeri alıcı olarak hareket eder. Bu durumda, bir atomun elektron eksikliği olması gerekir ve bu atom *alıcı* olarak bilinir. Diğerrinin ise paylaşılmayan bir çift elektronu olması gerekir ve *verici* olarak adlandırılır. Etkileşim, verici-alıcı etkileşimleri olarak bilinir ve ortaya çıkan bağa *koordinasyon bağı* denir. Koordinasyon bağları, kısmi iyonik karaktere sahip kovalent bağlara benzer (Twagirimana, 2014).

2.2. Adezyon Teorileri

Bitüm ve agregalar asfalt karışımının ana bileşenleri olarak kabul edilir ve bunların fiziksel ve kimyasal özellikleri karışımın performansı üzerinde doğrudan etkilidir (Paliukaitė vd., 2016). Bitüm ve agrega arasındaki adezyon mekanizmasını açıklamak için birçok teori öne sürülmüştür. Bu teoriler Tablo 22’de verilmektedir. Bu teorileri etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir (Little ve Jonas IV, 2003; Paliukaitė vd., 2016; Rahmany, 2019):

- Bitüm ve agreganın yüzey gerilimi,
- Bitüm ve agreganın kimyasal bileşimi,
- Bitüm viskozitesi,

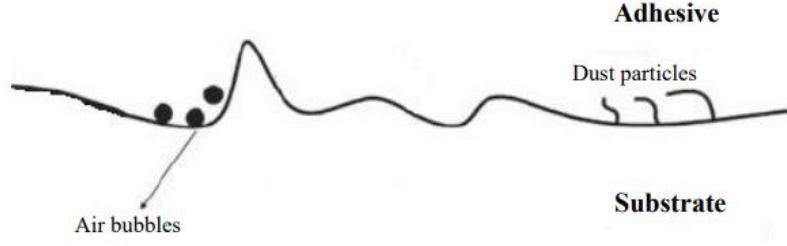
- Agreganın yüzey dokusu,
- Agreganın gözenekliliği,
- Agreganın temizliği,
- Bitüm ile karıştırılma sırasındaki agreganın nem içeriği ve sıcaklık.

Tablo 22. Adezyon mekanizmalarının teorisi (Pstrowska vd., 2022; Remišová, 2004; Cihlářová vd., 2018)

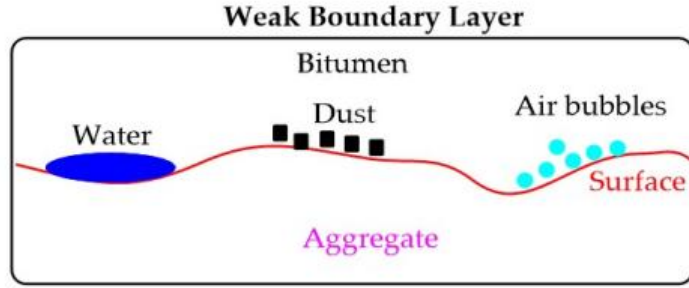
Teori	Mekanizma	Etkileşimin Dayanımı
Zayıf Sınır Tabaka	Tabakalanma	
Mekanik Kilitlenme	Kenetlenme, bağlayıcının agreganın gözeneklerine mekanik difüzyonu, yakın temasla ıslatma	Değişken
Elektrostatik	Potansiyel	
Kimyasal Bağlanma	Kovalent ve iyonik bağlar	Çok Güçlü
Termodinamik (Serbest Yüzey Enerjisi)	Serbest yüzey enerjisi, daha kritik yüzey gerilimine sahip bağlayıcı ve agreganın yüzeyi, ıslatma	Değişken
Adsorpsiyon (Fiziksel)	Van der Waals, H-bağı	Orta-Güçlü

2.2.1. Zayıf Sınır Tabakaları Teorisi

Zayıf sınır tabakası teorisi iki malzemenin birbirine nasıl yapışabileceğini değil neden yapışamayacağını açıklar (Kök, 2007). Bu teoriye göre, adeziv bağların bozulması, düşük kohezyon mukavemetine sahip bir ara yüzey bölgesinin varlığından dolayı ya yapıştırıcıda ya da alt tabakada meydana gelir (Pstrowska vd., 2022). Bu tabaka, agregaları kaplayan bir toz tabakasının varlığından veya bu kayalar oluşturan minerallerin karışım sonrası çözünmesinden dolayı HMA'da mevcut olabilir (Cala Pérez, 2017). Tozlu alt tabakalar etkili ıslanmayı ve yapıştırıcıyla yakın teması önleyebilir ve agregalar üzerindeki toz havayı hapsederek bitümle karışabilir ve dolayısıyla bitüm/agrega bağı zayıflatabilir (Şekil 43 ve 44) (Pstrowska vd., 2022). Zayıf sınır tabakalarının yaygın nedeni; bazı organik maddeler ve su gibi yüzeydeki düşük molekül ağırlıklı (ve dolayısıyla düşük kohezyon mukavemeti) kirletici maddelerdir (Lamperti, 2011).



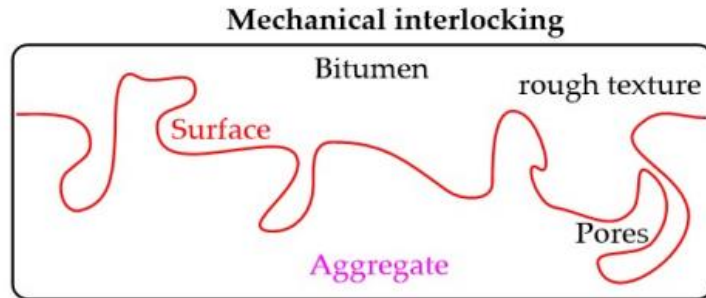
Şekil 43. Bağlanma yüzeyinin yakınında bulunan hava kabarcıklarının ve toz parçacıklarının temsili (Nageswaran, 2016)



Şekil 44. Zayıf sınır tabaka teorisi (Pstrowska vd., 2022)

2.2.2. Mekanik Kilitlenme Teorisi

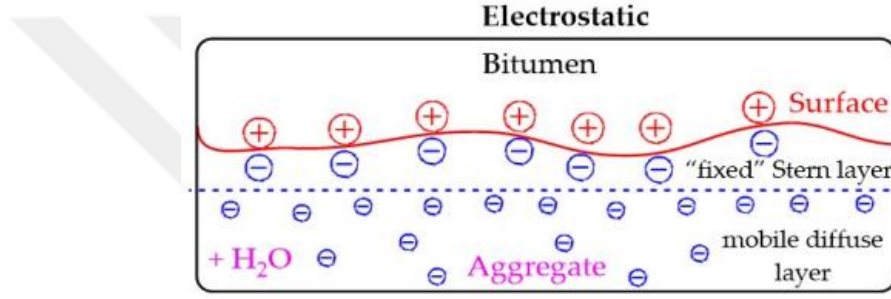
Adezyon, bağlayıcı malzemenin agrega yüzeyindeki düzensizliklere (gözenekler ve boşluklar) nüfuz etmesi yoluyla ve bağlayıcı ile agrega arasındaki “mekanik bağlantı” nedeniyle meydana gelir (Şekil 45) (Pstrowska vd., 2022). Pürüzlü yüzeyler, pürüzsüz yüzeye göre daha fazla yapışma sağlar. Mekanik yapışma, parçacık boyutu, yüzey dokusu, açısallık, porozite, emilme ve yüzey alanları gibi agregaların fiziksel özelliklerinin fonksiyonudur (Jakarni, 2012; Rahmany, 2019).



Şekil 45. Mekanik kenetlenme teorisi (Pstrowska vd., 2022)

2.2.3. Elektrostatik Teori

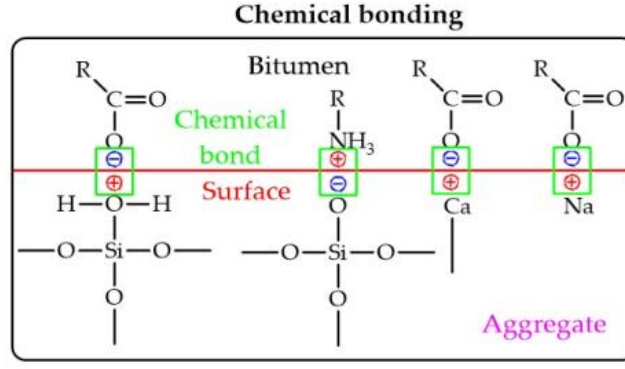
Teorinin temeli, herhangi bir malzemede serbest yüklerin bulunması ve zıt işaretli yüklerin birbirini çekerek elektriksel bir çift katman oluşturmalarıdır (Şekil 46) (Nageswaran, 2016). Suyun yüksek dielektrik sabitine sahip olmasından dolayı çoğu yüzey su varlığında yüklenir/ şarj edilir ve bu da onu iyonlar için iyi bir çözücü yapar (Hefer ve Little, 2005a). Bitüm/agrega yüzey sistemi suya maruz kaldığında agreganın mineral yapısı kolaylıkla bozulur ve iyonize olur/iyonlaşır ve bu sayede bitüm filminin agregaya üzerindeki adeziv yapısı kırılabilir ve iyonlaşabilir (Pstrowska vd., 2022).



Şekil 46. Elektrostatik teori (Pstrowska vd., 2022).

2.2.4. Kimyasal Bağlanma Teorisi

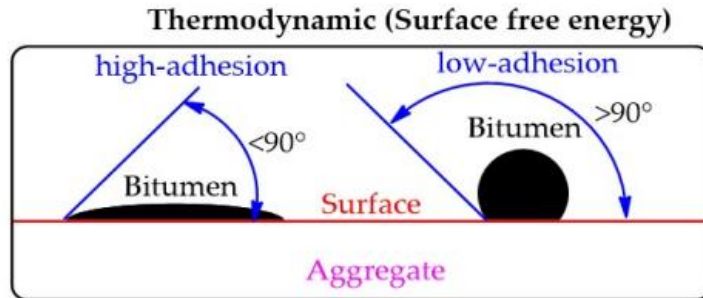
Teori, bitüm ve agregaya bileşenleri sisteminde kimyasal bağların oluşumuna dayanmaktadır (Şekil 47). Bitüm, agregaya göre çoğunlukla polar olmayan ve düşük reaktif hidrokarbonlardan oluşmasına rağmen, aynı zamanda heteroatomlar (O, S, N ve diğerleri) içeren polar bileşikler de içerir (Pstrowska vd., 2022). Bitümdeki bu polar moleküller, bitüm içindeki ve agregaya yüzeylerindeki belirli alanlarla etkileşime giren belirli noktalar (bölgeler) sergiler (Lamperti, 2011). Asfalt-agrega sisteminde kimyasal reaksiyonlar, asfalt bağlayıcının fonksiyonel grupları ile minerallerin bu bölgelerinde (*aktif bölgeler*) meydana gelir ve bu kimyasal reaksiyonlar agregaya asitliğinin bir fonksiyonudur (Cala Pérez, 2017). Bitümün asidik bileşenlerinin agregaya yüzeyinin bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek çözünmeyen tuzlar oluşturduğu ve bu sebeple bitümlü bağlayıcıların çoğu ile asidik agregalar (granit, kuvars vb.) arasındaki kimyasal reaksiyonun bitüm ile bazı agregalar (dolomit, kireçtaşı, vb.) arasındaki kimyasal reaksiyon kadar güçlü olmadığı ileri sürülmektedir (Twagirimana, 2014).



Şekil 47. Kimyasal bağlanma teorisi (Pstrowska vd., 2022)

2.2.5. Termodinamik Teori (Adsorpsiyon Teorisi/Serbest Yüzey Enerjisi)

Teori, bitümlü bağlayıcının, yakın temasın sağlanması koşuluyla ara yüzeyde oluşan moleküller arası kuvvetler nedeniyle agrega yüzeyine yapıştığı kavramına dayanmaktadır (Twagirimana, 2014). Bu temel kuvvetlerin büyüklüğü genellikle adeziv bağda yer alan malzemelerin serbest yüzey enerjileri gibi termodinamik büyüklüklerle ilişkilendirilebilir (Hefer vd., 2005). Serbest yüzey enerjisinin (adezyon işi) daha yüksek olması, bitüm ile agrega ara yüzeyi arasındaki adezyon dayanımının daha iyi olduğunu gösterir (Pstrowska vd., 2022). Bunun yanı sıra bu teori adezyon olayını, alt tabaka üzerindeki sıvı yapıştırıcı/adeziv damlasının ıslatabilirliğine, yayılmasına ve temas açısına (θ) dayalı olarak açıklar (Nageswaran, 2016). Bir yüzeyin ıslanması (veya sıvının yüzeye yayılması), yapıştırıcının yüzeyle yakın moleküler temasa geçtiği ve temel yapışma kuvvetlerini oluşturduğu süreçtir (Hefer ve Little, 2005a). Temas açısı ise, her iki malzeme temas ettiğinde bir sıvının katı bir yüzeyle oluşturduğu açıdır (Nageswaran, 2016). Temas açısı $>90^\circ$ ise ıslanabilirlik kötü, $<90^\circ$ ise ıslanabilirlik iyidir (Şekil 48 ve Tablo 23).



Şekil 48. Termodinamik teorisi (Pstrowska vd., 2022)

Tablo 23. Temas açıları ve karşılık gelen ıslanma dereceleri (Lamperti, 2011)

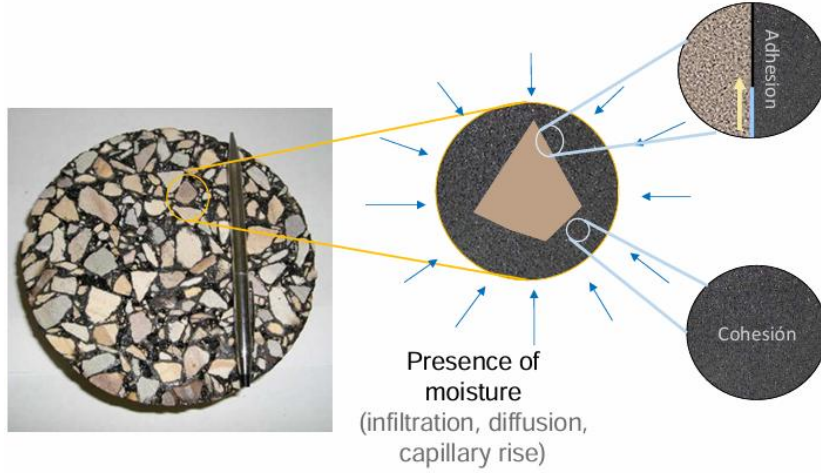
Temas Açısı	Islanma Derecesi	Katı-Sıvı Etkileşimi	Sıvı-Sıvı Etkileşimi
$\theta = 0^\circ$	Mükemmel Islanma	Güçlü	Zayıf
$0^\circ < \theta < 90^\circ$	Yüksek Islanabilirlik	Güçlü	Güçlü
		Zayıf	Zayıf
$90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	Düşük Islanabilirlik	Zayıf	Güçlü
$\theta = 180^\circ$	Mükemmel Islanmayan	Zayıf	Güçlü

2.2.6. Moleküler Oryantasyon Teorisi

Bu teori, bitüm bağlayıcının agrega ile temas etmesinden sonra, bitüm moleküllerinin agrega yüzeyinin enerji ihtiyacını karşılamak için kendilerini agrega yüzey iyonlarına doğru yönlendirdiklerini belirtmektedir (Twagirimana, 2014). Bitüm, polar olmayan ve polar moleküllerin bileşiminden oluşurken, su molekülleri dipolar ve hatta bitüm moleküllerinden daha polardır (Jakarni, 2018; Twagirimana, 2014). Su molekülleri agrega yüzeyinin enerji ihtiyacını bitüm moleküllerine göre daha iyi karşılayabilir bu yüzden bitüm (bitüm-filler mastik) ile agregalar arasındaki adezif bağın bozulmasına neden olur ve asfalt karışımlarının soyulmaya karşı hassasiyetini artırır (Twagirimana, 2014; Jakarni, 2018).

2.3. Adezyon Kaybı

Asfalt karışımları bağlamında, adezyon, bitüm (bitüm-filler mastik) ile agregalar arasındaki adezif bağ kırıkmak için gereken enerji miktarını ifade etmek için kullanılmasına karşın kohezyon, bitümün (bitüm-filler mastik) içinde gelişen, bitümün (bitüm-filler mastik) moleküllerini tutan ve viskoziteden etkilenen moleküller arası kuvvettir ve Şekil 49, bitümün (bitüm-filler mastik) ve agregaların sırasıyla adezyonunu ve kohezyonunu göstermektedir.



Şekil 49. Bitüm (bitüm-filler mastik) ve agregalar arasındaki adezyon ve kohezyon (Caro vd., 2025)

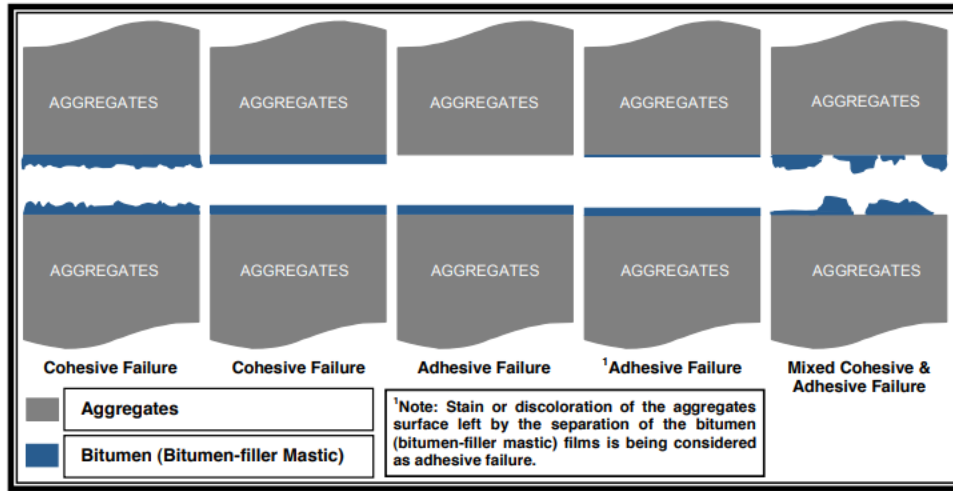
Esnek kaplamaların yapısındaki nemin varlığı ve asfalt karışımlarının özellikleri üzerindeki zararlı etkileri, yorulma çatlama, sökülme, soyulma ve tekerlek izi gibi çeşitli kaplama deformasyonlarına iştirak edebilir (Hasan vd., 2021). Ayrıca su veya nemin bitüm (bitüm- filler mastik) ve agregalarla etkileşimi, asfalt karışımların yapısal mukavemetinin ve sertliğinin kaybolmasına neden olabilir ve bu nem kaynaklı hasar olarak tanımlanabilir (Jakarni, 2012; Hasan vd., 2021). Ayrıca su hasarı; asfalt film kalınlığındaki azalma, asfalt bağlayıcıdaki değişiklikler, agrega kalitesindeki farklılıklar, seçilen tasarım farklılıkları ve düşük kalite kontrolü gibi faktörlerin fonksiyonu olarak da gelişmektedir (Aksoy vd., 2012). Bu yüzden nem varlığında bitüm ve agregalar arasındaki bağın mukavemeti tehlikeye girer ve soyulma (adezyon kaybı) ile ilgili sorunlara neden olabilir (Nageswaran, 2016).

Nemin bir asfalt karışımını bozduğu üç mekanizma vardır: (a) asfalt mastiği içindeki kohezyon kaybı, (b) agrega ve asfalt arasındaki adeziv bağın bozulması (yani soyulma) ve (c) agreganın bozulması/parçalanması (Moraes vd., 2011). Ayrıca agreganın (örneğin şekil, yüzey dokusu, gözeneklilik ve gradasyon) ve bağlayıcının (örneğin viskozite) fiziksel özellikleri nem hasarına neden olmada önemli bir rol oynar (Hossain ve Roy, 2018). Su hassasiyetini etkileyen faktörler Tablo 24’te verilmiştir (Little ve Jones IV, 2003). *Adezyon kaybı* (adeziv kırılma, soyulma), su bağlayıcı ve agrega arasına sızdığında, bağlayıcıyı agregadan fiziksel olarak ayırdığında meydana gelir; *kohezyon kaybı* (kohezif kırılma), yine taşıt yükleri tarafından oluşturulan yüksek gözenek basınçları nedeniyle su varlığında bağlayıcı mukavemeti zayıfladığında meydana gelir (Coleri vd., 2023). Şekil 50, bitüm (bitüm- filler mastik) ile agregalar arasında muhtemelen meydana gelebilecek kırılma türlerini (yani adeziv kırılma, kohezif kırılma ve karışık kohezif ve adeziv kırılma)

göstermektedir (Jakarni, 2012). Tablo 25’te gösterilen, asfalt kaplamalardaki nem hasarını tanımlamak için, ayrılma, yer değiştirme, film kopması, kendiliğinden emülsifikasyon, gözenek basıncı, hidrolik aşınma, pH dengesizliği ve çevresel faktörler dâhil olmak üzere çeşitli mekanizmalar önerilmiştir (Hossain ve Roy, 2018). Ayrıca Tablo 26’de adezyon kaybını açıklayan teoriler (bkz. 1.8.2. Adezyon Teorileri) ile soyulma mekanizmaları arasındaki önerilen ilişkiler verilmektedir (Little ve Jones IV, 2003).

Tablo 24. Su hassasiyetini etkileyen faktörler (Little ve Jones IV, 2003)

Değişken	Faktör
Mevcut Durum	Sıkıştırma Metodu
	Boşluklar
	Geçirimsizlik
	Ortam
	Zaman
	Su İçeriği
Malzeme	Asfalt
	Agrega
	Modifiyerler veya Katkılar
Koşullandırma	Kürleme
	Kuruya karşı Islak
	Sıvıya Daldırma/Doyurma
	Vakum Doygunluğu
	Donma-Çözünme
	Tekrarlanan Yükleme
	Kurutma
Diğer	Trafik
	Çevre
	Yaşlanma



Şekil 50. Asfalt karışımlarında oluşabilecek olası kırılma tipleri (Jakarni, 2012)

Tablo 25. Adezif ve kohezif kırılmaya ilişkin nem hasarı mekanizmaları (Hossain ve Roy, 2018)

Mekanizma	Adezyon	Kohezyon
Ayrılma	X	
Yer Değiştirme/ Film Kopması	X	
Doğal Emülsifikasyon		X
Gözenek Basıncı	X	X
Hidrolik Aşınma	X	
pH Dengesizliği	X	
Çevresel Faktörler	X	X

Tablo 26. Adezyon kaybını açıklayan teoriler ile soyulma mekanizmaları arasındaki önerilen ilişkiler

		TEORİ								
		Mekanik Kilitlenme			Kimyasal Reaksiyon			Arayüzey Enerjisi		
Soyulma Mekanizması	Önerilen Çalışma Şekli	P	C	P-C	P	C	P-C	P	C	P-C
	Ayrılma	S						S	W	
	Yer Değiştirme					S		S		
	Doğal Emülsifikasyon				S	W				
	Film Kopması	S								
	Gözenek Basıncı	S								
	Hidrolik Aşınma	S								
	pH Dengesizliği					S				S

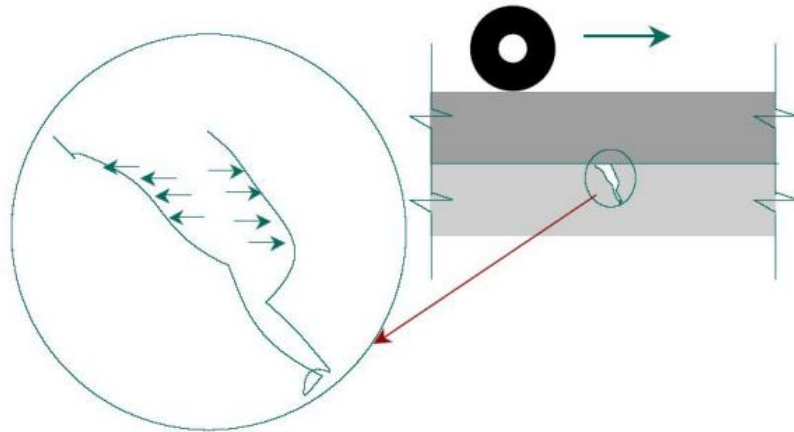
P: Fiziksel, C: Kimyasal, P-C: Fiziksel-Kimyasal, S: Birincil Katkıda Bulunan, W: İkincil Katkıda Bulunan

Ayrılma: Asfalt filminde belirgin bir kopma olmaksızın ince bir su tabakası tarafından asfalt filminin agrega yüzeyinden ayrılmasıdır (Hossain ve Roy, 2018). Ayrılma yoluyla soyulma meydana geldiğinde, asfalt filmi agregadan temiz bir şekilde soyulabilir ve bu da adezyonun tamamen kaybolduğunu gösterir (Tarrer ve Wagh, 1991).

Yer Değiştirme: Bu tip soyulma, agrega yüzeyindeki asfaltın yer değiştirmesi asfalt filmindeki bir kırılmadan meydana gelmesi yönüyle sökölme tipi soyulmadan ayrılmaktadır (Kök, 2007). Bitüm (bitüm-filler mastik) filmlerinin su veya nem tarafından agrega yüzeyinden uzaklaştırılmasıyla meydana gelir (Jakarni, 2012). Kopmanın kaynağı, agrega yüzeyinin eksik kaplanması, keskin agrega köşelerinde veya kenarlarında film kopması, agrega kaplamaları nedeniyle asfalt filminde oluşan iğne delikleri/gözenekler vb. olabilir (Little ve Jones IV, 2003).

Doğal Emülsifikasyon: Asfalt çimentosunda su damlacıklarının ters/evrik emülsiyonu oluştuğunda meydana gelir (Nageswaran, 2016). Bu tür emülsiyonların oluşumu, mineral kil veya asfalt katkı maddeleri gibi emülgatörlerin varlığıyla daha da kötüleşir (Hossain ve Roy, 2018).

Gözenek Basıncı: Asfalt karışımları içinde hapsolmuş su veya nem, tekrarlanan trafik yükleri ve donma ve çözülme döngüleri nedeniyle gözenek basıncı oluşumuna yol açabilir ve bu sürecin devam etmesi, sonunda bitümün (bitüm-filler mastik) ve agregaların adezif bağ mukavemetinin bozulmasına neden olur (Jakarni, 2012). Şekil 51’de gözenek basıncı verilmiştir (Kök, 2007).



Şekil 51. Tekrarlı yüklemelerden dolayı gelişen gözenek basıncı

Hidrolik Aşınma: Doymuş kaplama yüzeyinde hareket eden bir trafiğin etrafında kılcal çekme ve basıncın meydana gelmesiyle oluşur (Jakarni, 2012). Bu, basınç (su, lastiğin

önündeki kaplamaya bastırılır) ve çekme döngüsüne (lastiğin arkasındaki kaplamadan hemen emilir) neden olur ve bu da asfalt filminin agregadan soyulmasına katkıda bulunur (Hossain ve Roy, 2018).

pH Dengesizliği: Temas suyunun pH kararsızlığı (pH'daki kaymalar) kimyasal bağları dolayısıyla asfalt ile agrega arasındaki adezyonu etkilemesinin yanı sıra temas açısının değerini ve asfalt-agrega ara yüzeyinin ıslanma özelliklerini de etkileyebilir (Hossain ve Roy, 2018).

Çevresel Faktörler: Çevresel faktörler (sıcaklık, hava ve su gibi) kaplama dayanıklılığında önemli bir rol oynar (Hossain ve Roy, 2018). İyi kalitede asfalt ve agregaların bulunduğu ılıman iklimlerde, bozulmaya en büyük katkı trafik yüküdür ve bu kaplamada bozulmaya yol açar (Little ve Jones IV, 2003). Ancak, donma-çözülme koşulları, aşırı yağış, asfaltın aşırı yaşlanması vb. gibi sert hava koşullarıyla birlikte kalitesiz malzeme kullanımı, kaplamanın erken bozulmasına neden olabilir (Hossain ve Roy, 2018).

2.4. Adezyon Deney Yöntemleri

Bitüm-agrega sisteminde adezyonu doğrudan belirleme; pozitif sıcaklık aralığında adezif mukavemetinin kohezif göre fazla olması, taş malzemelerin polimineralliği, sonuçların sıcaklığa, şekil değiştirme (deformasyon) oranına, bağlayıcı tabaka kalınlığına önemli ölçüde bağlı olması gibi çeşitli nedenlerden ötürü zordur (Pstrowska vd., 2022). Bu nedenle laboratuvar da saha koşullarını simüle etmek zor olabileceğinden saha performansını da tam olarak değerlendirmek zor olacaktır. Dolayısıyla, laboratuvar deneyleri, suyun kaplanmış agrega üzerindeki etkisini (pasif yapışma) veya bitümün ıslak agregaya yapışma yeteneğini (aktif yapışma) incelemeye yoğunlaşmıştır (URL-14, 2024). Asfalt-agrega sistemindeki adezyon deneylerinin üç gruba ayrılabilir olduğu düşünülmektedir:

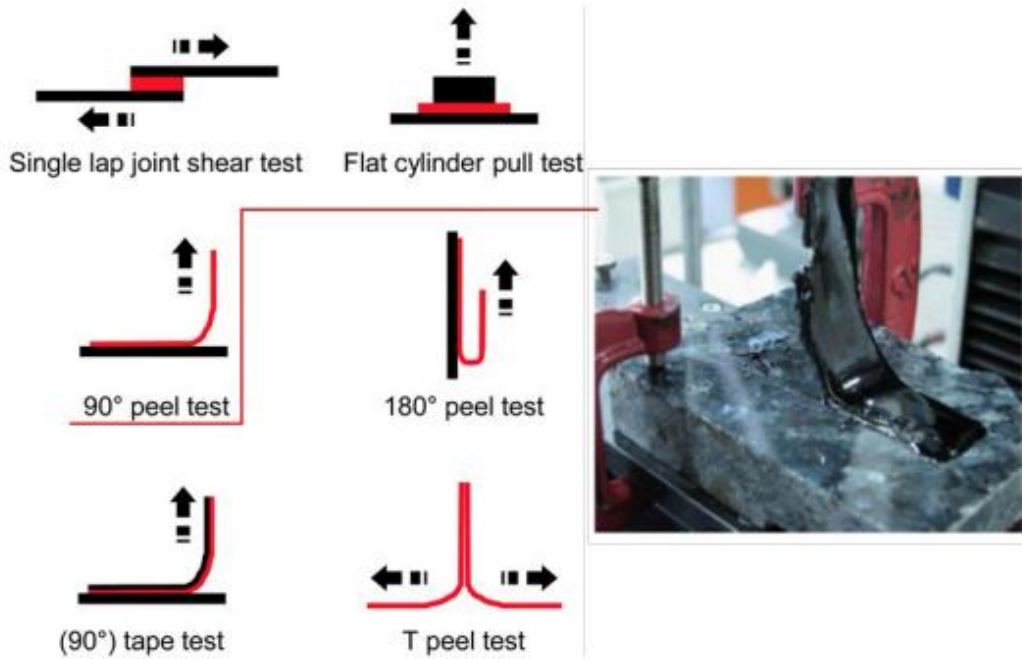
- Farklı malzemelerle asfalt için adezyon kuvvetlerinin belirlenmesi,
- Farklı malzemelerle asfaltın suyun soyulma etkisine karşı direncinin belirlenmesi,
- Adezyonun temel bir değer (temas açısı, serbest yüzey enerjisi, zeta potansiyeli, arayüz kırılma enerjisi, adsorpsiyon kapasitesi vd.) olarak tanımlanması (Pstrowska vd., 2022).

2.4.1. Farklı Malzemelerle Asfalt için Adezyon Kuvvetlerinin Belirlenmesi

Bu yöntemlerin temel prensibi mekanik ayırmadır (Pstrowska vd., 2022).

1. Peel (Soyulma) Deneyi

Peel deneyi, asfalt ile agrega arasındaki yapışmanın (yani adezif kırılma enerjisinin) ölçülmesine olanak tanır (Şekil 52) ve farklı asfalt-agrega kombinasyonlarının suya karşı dayanıklılığının birkaç gün suya batırıldıktan sonra değerlendirilebileceği şekilde uyarlanmıştır (Cui vd., 2014). Peel deney yöntemlerinin avantajları, deney ve cihaz tasarımının basitliği, herhangi bir bağlayıcının adezif mukavemetini belirleme yeteneği, sıcaklık etkilerinin değerlendirilmesi, şekil değiştirme oranı, su ve zararlı su ortamlarının soyulma etkisidir (Pstrowska vd., 2022).

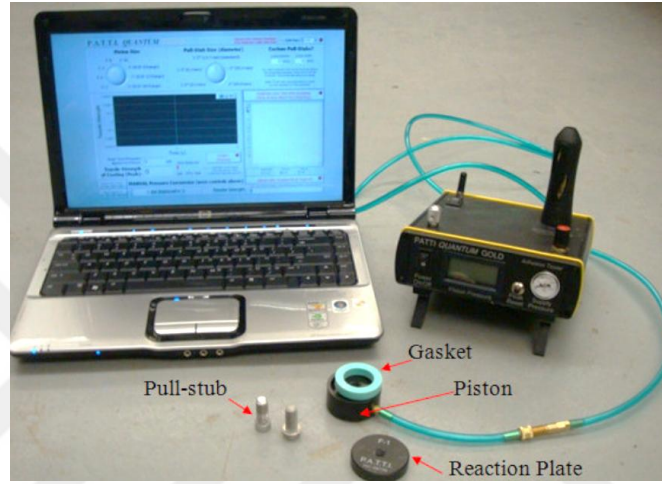


Şekil 52. Peel deneyindeki olası şemalar (Pstrowska vd., 2022)

2. Bitüm Bağ Dayanımı (BBS) Deneyi

Bitüm Bağ Dayanımı (BBS) deneyi asfalt-agrega sistemlerinin nem hasarı karakterizasyonu için Pnömatik Adezyon Çekme Deneyi Cihazı (PATTI) (Şekil 53) olarak bilinen adezyon deneyinin modifikasyonudur (Moraes vd., 2011). PATTI deneyi, deney

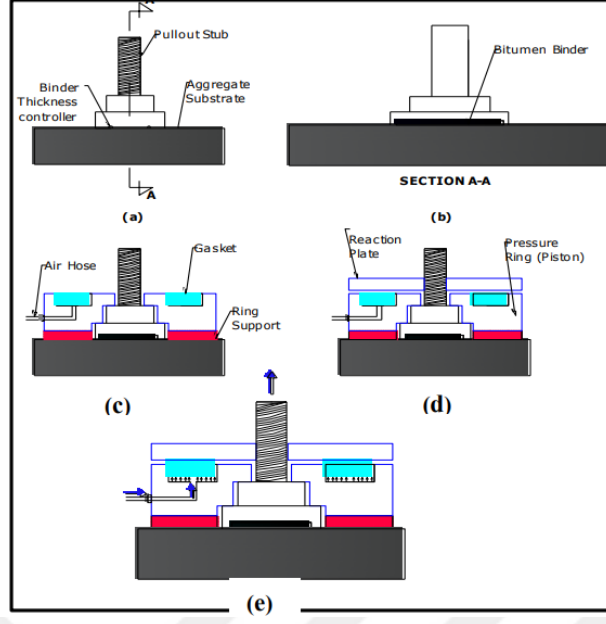
düzeneğinin operatöre bağımlılığı, bağlayıcı film kalınlığının doğru kontrolü, kürlenme, deney sıcaklığı, yükleme hızı belirleme, küçük çekme dayanımının test edilmesi gibi eksikliklerin bazılarının giderilmesi için geliştirilmiştir (Twagirimana, 2014). BBS deneyi, test edilecek yüzeye bitümle yapıştırılmış çalışma parçasının ayrılması için cihazın pnömomatik sistemi tarafından üretilen kuvvetin belirlenmesi için kullanılır (Pstrowska vd., 2022). Şekil 54 ve Şekil 55 sırasıyla BBS deneyinin ana bileşenlerini ve çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 53. Pnömatik adezyon çekme deneyi cihazı (Pinto vd., 2009)



Şekil 54. BBS deney aparatının ana bileşenlerinin gösterimi (Twagirimana, 2014)



Şekil 55. BBS deneyinin çalışma prensibi (Twagirimana, 2014)

3. Vialit Deneyi

Sathi kaplamalarda kullanılacak agregalar için agrega-bitüm adezyonunun suyun etkisiyle azalmasını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir (Rahmany, 2019). Bu deney metodu ile aşağıdaki ölçüm yöntemleri açıklanır (Gültekin vd., 2021):

- Bağlayıcının agrega yüzeyine mekanik adezyonu,
- Bağlayıcının mıcırlara aktif yapışabilirliğini,
- Bağlayıcının miktarına ya da bağlayıcı ve mıcır arasında bir adezyon malzemesi ekleyerek mekanik adezyonun gelişimi,
- Bağlayıcının agregayı ıslatma sıcaklığı,
- Kırılma sıcaklığının altında yapışabilirliğin değişimi.

19 mm'den geçip 9,5 mm'lik elek üzerinde kalan agrega numunesi iyice yıkayıp saf su ile çalkalandıktan sonra 110 °C'lik etüvde kurutulur (KGM, 2023). Deney 3 tekrar olarak uygulandığı için toplamda yassı ve uzun olmayan kübik danelerden 300 adet mıcır seçilir ve mıcır sericinin her bir gözüne bir adet olmak üzere 100 adet mıcır yerleştirilir (KGM, 2023; Erdoğan, 2023). Mıcırların düşürüleceği levhalar ve üzerine uygulanacak bitüm deneye başlamadan önce 145-150° C'ye kadar ısıtılır ve mıcır sericisine mıcırlar yerleştirildikten sonra bitümden 40 g tartılarak bir spatula yardımıyla levhanın üzerine düzgün bir şekilde yayılır (Erdoğan, 2023; Karadağ ve Saltan, 2021; KGM, 2023). Bitümlü levha mekanik

sericiye yerleştirildikten sonra, mıcır gözlerinin altındaki metal plaka hızla çekilir ve 20x20 cm boyutlu metal plaka üzerindeki bitüm tabakası üzerine serbestçe düşmesi sağlanır (Rahmany, 2019; Gürer ve Karaşahin, 2014). Silindirme sırasında mıcırların levha üzerinden kaymasını engelleyecek sıcaklığa düşmesi için mekanik sericiden çıkarılan levha, laboratuvar sıcaklığında 2-3 dakika bekletilir (KGM, 2023). Silindirme mıcır serili levha üzerinden üçer defa birbirine dik iki farklı yönde olacak şekilde toplam 6 geçiş olarak yapılır (Karadağ ve Saltan, 2021). Silindirilmiş levhalar laboratuvar ortamında 1 saat bekletildikten sonra 35°C'lik su banyosunda tutulur, ardından su banyosundan çıkarılan levhalara 50 cm yükseklikten 10 saniye aralıklarla çelik bilye toplam üç defa serbest olarak düşürülür (Karadağ ve Salta, 2021; KGM, 2023). Daha sonra levha çıkarılır ve düşen mıcırlar aşağıdaki gibi sayılır:

- Bitüm ile kaplanmayan düşen mıcırların sayısı a,
- Bitüm ile kaplanan düşen mıcırların sayısı b,
- Plakaya yapışan mıcır sayısı c.

Daha sonra Denklem 42 ve Denklem 43 kullanılarak adezyon miktarı belirlenir (Gültekin vd., 2021).

$$a + b + c = 100 \quad (42)$$

$$\text{Adezyon} = b + c \quad (43)$$

Vialit deney ekipmanı Şekil 56'da verilmektedir.



Şekil 56. Vialit deneyi ekipmanı (URL-19, 2025)

2.4.2. Farklı Malzemelerle Asfaltın Suyun Soyulma Etkisine Karşı Direncinin Belirlenmesi

Deney için taş, metal ve cam levhalar gibi farklı yüzeyler kullanılır. Bitümlü bağlayıcıların agregaların yüzeyinden soyulması görsel yöntemle yüzde ya da puan olarak tahmin edilir. Bu yöntem grubunun avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır (Pstrowska vd., 2022):

Avantajlar:

- Kolay uygulama,
- Özel ek bir ekipman yok,
- Çoğu yöntemde kısa deney süresi,
- Bitüm film kalınlığının danelerin adezyon değeri üzerindeki etkisini değerlendirmek aynı boyuttaki agrega danelerinin kullanılması nedeniyle mümkündür.

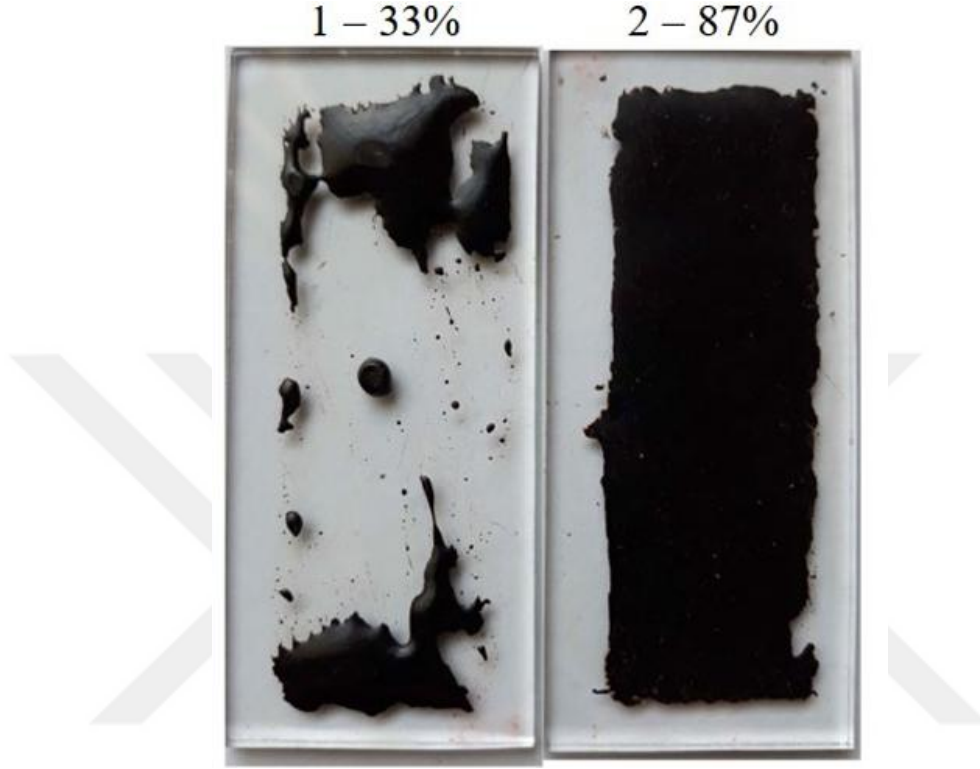
Dezavantajlar:

- Sonuçların görsel olarak değerlendirilmesinden dolayı hatalara neden olur,
- Sonuçlar agrega danelerinin boyutuna ve yüzeyine bağlıdır,
- Farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılamamaktadır.

a. Cam Yüzeye Yapıştırma Deneyi

Bitüm, 0.35 g olacak şekilde tartılır. Bitüm, 70 mm x 24 mm boyutlarında olan cam levha üzerine yerleştirilir ve levha üzerinde işaretlenen kontur boyunca kontur dışına taşmayacak ve eşit olacak şekilde yayılır. Bu levha, bitümün yumuşama noktasından 80°C daha yüksek sıcaklıkta 30 dakika tutulduktan sonra oda sıcaklığında 30 dakika hava ile soğutulur ve fotoğrafı çekilir. Daha sonra levha, 85°C'deki suda 25 dakika tutulduktan sonra bitümün yumuşama noktasından 10 °C daha düşük bir sıcaklığa getirmek için su banyosuna soğuk su eklenir ve plaka sudan çıkarılıp ikinci kez fotoğraflanır. Deney öncesi ve sonrası fotoğraflara dayanılarak ve uygulamalı program yazılımı kullanılarak cam üzerinde kalan bitüm filminin alanı yüzde olarak belirlenir (Pstrowska vd., 2022). Bu yöntemin dezavantajı, bitüme yapışma özelliği agregaların yüzeyinden çok daha kötü olan cam yüzey kullanılmasıdır.

Ukrayna'daki bazı laboratuvarlarında kullanılan bu deneyin modifiye edilmiş halinde, bitümle kaplanmış agrega danelerinin kaynamadan önce ve sonra tartılması sonrasında bu kütlelerin oranına göre adezyon % olarak hesaplanır (Şekil 57).



Şekil 57. İki bitüm numunesinin cam yüzeyine yapışmasının test edilmesinden sonra elde edilen sonuçlar (Pstrowska vd., 2022)

b. Nem Hasarını Belirleme

Nem hasarı, asfalt çimentosu ya da mastik (asfalt çimentosuna ilaveten mineral filler-74 μm ve daha küçük agrega) ile ince ve kaba agrega arasındaki bağ kaybından oluşabilir (Little ve Jones IV, 2003). Ayrıca nem hasarı, suyun varlığından kaynaklanan asfalt karışımlardaki mukavemet ve durabilite kaybı olarak tanımlanabilir ve kendini soyulma adı verilen bir olayla kendini gösterir (Yılmaz ve Sargın, 2016; Moares vd., 2011). Nem hasarı, nem mastiğe nüfuz edip onu zayıflattıkça hızlanır ve döngüsel yükleme sırasında neme karşı daha duyarlı hale getirir (Little ve Jones IV, 2003). Nem hasarı nedeniyle kaplama bütünlüğünün azalması; tekerlek izi, yorulma çatlaması, sökülme ve çukurlar gibi bozulma türlerinde önemli rol oynar (Moraes vd., 2011). Nem hasarını etkileyen faktörler Tablo 27'de verilmektedir.

Tablo 27. Nem hasarını etkileyen faktörler (Taib vd., 2019)

Faktörler	Belirlenen Özellikler	Uygun Özellikler
Agrega Özellikleri	Yüzey Dokusu, Mineraloji, Porozite, Yüzey Nemi, Yüzey Kimyasal Bileşimi ve Yüzey Kaplaması	Püzürlü Yüzey Dokusu, Karbonlu Agreg, Düşük Silika İçeriği, Optimum Gözeneklilik Miktarı, Yüzeyi Kuru Agreg, Kaplama Yok
Bitüm Özellikleri	Asfalt Film Kalınlığı, Viskozite, Fiziksel ve Kimyasal Yapı	Yüksek Asfalt Film Kalınlığı, Yüksek Viskozite, Fenol ve Azot (Nitrojen) Varlığı
Yapım Yöntemi	Kompaksiyon Yöntemi, Drenaj Sistemi, Hava Boşluğu Sistemi	Yeterli Sıkıştırma, Uygun Drenaj Sistemi, Düşük Hava Boşluğu Yüzdeleri, Her Bir Kaplama Katmanına Su Direnci Katkı Maddeleri Uygulaması
Çevresel Koşul	İklimler, Çevresel Sıcaklık	Sıcak İklimler, Ilıman Sıcaklık (Sıcaklıktaki Değişim Oranı Düşük), Donma-Çözülme Döngüsü Yok
Maruz Kalınan/ Uygulanan Trafik Yükleri	Trafik Yükü	Düşük Trafik

Nem hasarının zararlı etkisinden dolayı asfalt karışımların nem hasarına duyarlılığını belirlemek önemlidir. Bu amaçla geliştirilen deneyler iki ana kategoriye ayrılabilir: gevşek karışımlara uygulanan (nitel) deneyler ve sıkıştırılmış karışımlara uygulanan (nicel) deneyler.

1. Gevşek Karışımlara Uygulanan (Nitel) Deneyler

Bu deneyler, su varlığında asfalt kaplı agregalar üzerinde gerçekleştirilir ve asfalt ve agreganın uyumluluğunu ve soyulma potansiyelini değerlendirir (Solaimanian vd., 2003; Pstrowska vd., 2022). Bu deneylerin avantajı sıkıştırılmış numuneler üzerindeki deneylere kıyasla çok daha kısa sürede ve daha az maliyetle gerçekleştirilmeleridir (Taib vd., 2019). Ayrıca deneyleri gerçekleştirmek için basit ekipman ve prosedürlerin kullanılması bir diğer avantajdır (Pstrowska vd., 2022). Bu deneyin en büyük dezavantajı gözenek basıncını, trafik etkisini ve karışımın mekanik özelliklerini hesaba katamamasıdır (Yılmaz ve Sargın, 2012).

Ayrıca sonuçlar çoğunlukla niteldir ve sonuçların yorumlanması değerlendiricinin deneyimine ve yargısına bağlı olarak öznel bir konu haline gelir (Solaimanian vd., 2003). Gevşek karışımlara uygulanan deneyler statik ve dinamik deneyler olarak iki gruba ayrılır.

a. Statik Deneyler

Gevşek karışımlara uygulanan statik analiz yöntemleri esasen aşağıdaki sıralanan şekilde birbirinden farklılık gösterirler (Pstrowska vd.,2022):

- Asfalt/agrega oranı,
- Agreganın boyutu,
- Asfalt ve agreganın karıştırma ve hazırlama yöntemleri,
- Su koşullandırması (deney sıcaklığı oda sıcaklığından kaynama noktasına kadar),
- Kaplama derecesinin değerlendirilmesi (genellikle kaplamanın görsel tahmini ancak dijital görüntü işleme de mümkündür).

Statik deneyler aşağıda sıralanmaktadır:

1. Statik Deney:

Agrega ve bitüm arasındaki adezyon ve bu adezyonun soyulmaya olan etkisi bu deney yöntemi ile araştırılır (Gültekin vd., 2021). Her biri 11.2 mm elekten geçip 8 mm elek üzerinde kalan parçacık olmak üzere (ya da her biri 10 mm elekten geçip 6,3 mm elek üzerinde kalan parçacık olmak üzere) 150 dane elde edilir. Agreganın, bitüm ve karıştırma kabı, EN 12697 35'teki (Bitümlü Karışımlar – Deney Yöntemleri – Bölüm 35: Laboratuvarda Hazırlanan Karışımı) karıştırma sıcaklığında $\pm 5^{\circ}\text{C}$ toleransla ayrı ayrı ısıtılır. TS EN 12697-35'e sıcaklıklar verilmiştir (KTŞ, 2023):

- B 50/70 için $150 \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- B 70/100 için $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- B 100/150 için $140 \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- B 160/220 için $135 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Agregaların karıştırma kabına konulur ve agreganın ağırlığının %4'ü kadar bağlayıcı eklenir. Agreganın ve bitüm bağlayıcı agregaların tamamen bitümle kaplanana kadar elle karıştırılır. Agreganın ve bitüm karışımı 2 adet petri kabına eşit miktarda ve agreganın daneleri üst üste gelmeyecek şekilde yerleştirilir ve 1 saat ± 5 dk beklemeye bırakılır. Sürenin sonunda

petri kapları (19 ± 1) °C sabit sıcaklıkta saf su ile doldurulur ve bu sıcaklıkta (48 ± 1) saat boyunca bekletilir. Suda bekletme aşamasından sonra, su süzülür ve numune kurumaya bırakılır. Kuruyan parçacıklar hala kapta iken tam olarak bağlayıcıyla kaplanıp kaplanmadığını görmek için teker teker incelenir. Bir numunede 3 agregadan daha fazla tam olarak bağlayıcıyla kaplanmayan agregaya varsa, deneyin en başına dönülerek aynı işlemler 3 numune üzerinde daha uygulanır. Statik deney yönteminin koşulları Tablo 28’de özet halde verilmektedir.

Tablo 28. Statik deney yönteminin koşulları (Hugener vd., 2012; Pstrowska vd., 2022; Paliukaitė vd., 2016)

Parametreler	Statik Deney
Agreganın Kaplaması	
Bağlayıcı Miktarı	%4
Agrega Boyutu	8/11.2 ya da 6.3/10 mm
Agrega Miktarı	150 dane
Karıştırma Sıcaklığı	TS EN 12679-35’e göre ($\pm 5^\circ\text{C}$)
Soğuma Süresi	1 saat $\pm$ 5 dk
Suyun Koşullandırılması	
Koşullandırma Tipi	Statik
Su Sıcaklığı	$19 \pm 1^\circ\text{C}$
Koşullandırma Süresi	48 ± 1 saat
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Tamamen kaplanmamış agregaya sayısı (görsel)

2. Statik Daldırma Deneyi

Bu deneyde asfalt-agrega karışımı 60°C ’de 2 saat kürlenir ve sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılır (Kök, 2007). Ardından karışım bir cam kavanoza yerleştirilir ve 600 mL damıtılmış su ile doldurulur (Hossain ve Roy, 2018). Kavanoz kapatıldıktan sonra 25°C ’lik su banyosuna yerleştirilir ve su banyosunda 16-18 saat kalmak üzere bırakılır (Solaimanian vd., 2003). Soyulma derecesi, karışım hâlâ kavanozdayken görsel olarak değerlendirilir (Taib vd., 2019). Agreganın toplam görünür alanı %95’ten az veya %95’ten fazla olarak tahmin edilir (Solaimanian vd., 2003). Bu deneyin bazı dezavantajları vardır. Bunlardan ilki deney öznelidir ve bu nedenle yüksek değişkenliğe sahiptir; ikincisi ise deney doğrudan karışım performansı ile ilgili herhangi bir mukavemet deneyini içermez (Liu vd., 2014). Statik daldırma deney yönteminin koşulları Tablo 29’da özet halde verilmektedir.

Tablo 29. Statik daldırma deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022)

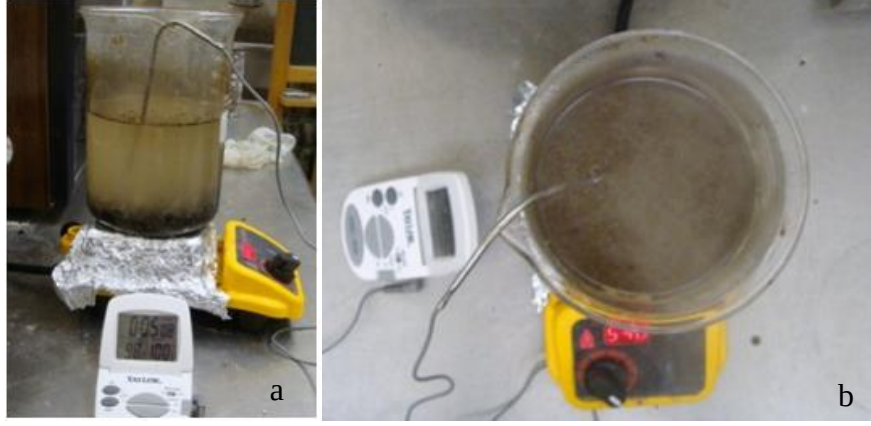
Parametreler	Statik Daldırma Deneyi
Agreganın Kaplaması	
Bağlayıcı Miktarı	5.5 g (%5.2)
Agrega Boyutu	6.3/9.5 mm
Agrega Miktarı	100 g
Su miktarı	600 ml
Suyun Koşullandırılması	
Koşullandırma Tipi	Statik
Su Sıcaklığı	25°C
Koşullandırma Süresi	16-18 saat
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Kaplamanın görsel tahmini, %95'ten az veya fazla

3. Toplam Suyu Daldırma Deneyi

Statik daldırma deneyinin bir diğer örneği olan bu deneyde, 14 mm tek boyutlu agregaya bilinen miktarda bitümle kaplanır ve ardından kaplanmış agregaya 25°C'de 48 saat boyunca damıtılmış su içerisinde bekletilir (Choi, 2005; Airey ve Choi, 2011). Daha sonra agregadan soyulan bitüm yüzdesi görsel olarak tahmin edilir (Whiteoak, 1990).

4. Kaynar Su ya da Texas Kaynar Su Deneyi

Bu deney, gevşek sıcak asfalt karışımların soyulma potansiyelinin değerlendirmek için çok yaygın ve hızlı olan deneylerden birisidir (K-C vd., 2022). Bu deneyde, asfalt-agrega karışımı kaynar suya eklenir ve daha sonra su tekrar kaynama noktasına getirilir (Hossain ve Roy, 2018). Şekil 58'de gösterildiği gibi karışım 10 dk kaynayan su içerisinde bekletildikten sonra sudan çıkartılır ve soğumaya bırakılır (Kök, 2007). Suyu drene edilir ve ıslak karışım kâğıt havlu üzerine alınarak kurumaya bırakılır (Solaimanian vd., 2003). Daha sonra soyulma seviyesi (bitüm kaybı miktarı) görsel değerlendirme ile belirlenir. Deney, kohezyon kaybını ele almamakla birlikte karışımın mekanik özelliklerini hesaba katmaz ve trafiğin etkilerini içermez (Airey ve Choi, 2011; Solaimanian vd., 2003). Kaynar su deney yönteminin koşulları Tablo 30'da özet halde verilmektedir.



Şekil 58. Kaynar su deneyine tabi tutulan asfalt karışımı (a: yandan görünüş, b: üstten görünüş) (Pinto vd., 2009)

Tablo 30. Kaynar su deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022; Airey ve Choi, 2011)

Parametreler	Kaynar Su Deneyi
Agreganın Kaplaması	
Bağlayıcı Miktarı	%2.3-%8
Agrega Boyutu	3/8 inç (tek boyut veya derecelendirilmiş)
Agrega Miktarı	300 ya da 100 g (200-300 g)
Su Miktarı	500 ml
Suyun Koşullandırılması	
Koşullandırma Tipi	Statik
Su Sıcaklığı	Kaynar Su
Koşullandırma Süresi	10 dk
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Kaplanmanın görsel tahmini

5. Kaynar Su Soyulma Deneyi

Kaynar su deneyi, soyulma oranı kalibrasyon eğrisi kullanılarak soyulma miktarını değerlendirmenin daha nesnel bir yolu ile Belçika Yol Araştırma Merkezi tarafından birleştirildi ve böylece görsel değerlendirmeyeyle ilişkili düşük hassasiyet ortadan kaldırıldı (Choi, 2005). Prosedür, 1.5 kg agreganın kütleye %1.8 bitümle kaplanmasını kapsamaktadır (Airey ve Choi, 2011). Kaplanmamış ve kaplanmış agregalar üretilir ve kaplanmamış agregaların yüzdesine karşı asit tüketiminin kalibrasyon eğrisinin üretilmesi için kimyasal saldırıya maruz bırakılır (Choi, 2005). Sonrasında 200 g kaplanmış agregaya 600 ml demineralize suda 10 dk kaynatılır, kurumaya bırakılır ve kimyasal saldırıya maruz bırakılarak kalibrasyon eğrisi yardımıyla soyulma miktarı belirlenir (Airey ve Choi, 2011). Kaynar su soyulma deney yönteminin koşulları Tablo 31’de özet halde verilmektedir.

Tablo 31. Kaynar su soyulma deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022, Choi, 2005)

Parametreler	Kaynar Su Soyulma Deneyi
Agreganın Kaplaması	
Bağlayıcı Miktarı	%1.8
Agrega Boyutu	8/11.2 ya da 6/10 mm
Agrega Miktarı	1500 g
Deney İçin Miktarlar	
Su Miktarı	600 ml
Gevşek Karışım Miktarı	200 g
Suyun Koşullandırılması	
Koşullandırma Tipi	Statik
Su Sıcaklığı	$20 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Koşullandırma Süresi	10 dk
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Kaplamanın görsel tahmini

6. Kimyasal Daldırma Deneyi

Deney, asfalt ile agreganın arasındaki adezyonun asfalt kaplı agreganın damıtılmış suda art arda kaynatılması yoluyla belirlenmesini kapsamaktadır (Solaimanian vd., 2003). Bu deneyde, Riedel ve Weber (R&W) sayısı olarak adlandırılan 0 ile 9 arasında numaralandırılan (0: damıtılmış suyu, 1: 1 L suda 0.41 g sodyum karbonatı ve 9: 1 L suda 106 g sodyum karbonatı ifade eder) artan sodyum karbonat (Na_2CO_3) konsantrasyonları kullanılır (Hossain ve Roy, 2018). Soyulma değeri, asfaltın artık bir film olmaktan çıkıp sadece lekeler veya damlacıklar haline geldiği konsantrasyon sayısına denir (Hossain ve Roy, 2018; Solaimanian vd., 2003; Twagirimana, 2014). 100 g'lık asfalt-agrega deney numunesi 110°C 'lik bir fırında kurutulur. Agreganın, yüksek sıcaklıkta bağlayıcı ile karıştırılır ve oda sıcaklığına soğumaya bırakılır. Damıtılmış su kullanılarak farklı konsantrasyonlarda sodyum karbonat çözeltileri hazırlanır. Ardından yaklaşık 50 mL damıtılmış su, 200 mL'lik bir cam beherde kaynatılır. Daha sonra, hazırlanan agreganın bağlayıcı karışımından 10 g kaynar suya ilave edilir. 1 dakika kaynadıktan sonra su boşaltılır ve numune filtre kâğıdına yerleştirilir. Numune kuruduktan sonra soyulma açısından incelenir. Agreganın soyulma değeri, soyulmanın meydana geldiği en düşük konsantrasyonun R&W sayısıdır (Hossain ve Roy, 2018; Solaimanian vd., 2003).

7. Yüzey Reaksiyon Deneyi

Deney, kalkerli ya da silisli minerallerin kimyasal reaksiyon ürünleri içinde bir gaz oluşturmak üzere uygun bir reaktifle reaksiyona girmesi ilkesine dayanmaktadır (Hossain ve Roy, 2018; Solaimanian vd., 2003). Kapalı kaptaki üretilen bu gaz, genellikle asit olarak kullanılan reaktifte maruz bırakılan mineral yüzey alanıyla orantılı kabul edilebilecek bir basınç oluşturacaktır. Deney, suyun soyulma etkilerine maruz aldıktan sonra asfalt-agrega karışımı üzerinde gerçekleştirilir. Agreganın parçacıklarının farklı maruz kalan yüzey alanları farklı soyulma seviyelerine neden olur. Deneyin tekrarlanabilir olması ve 10 dakikadan az sürmesi gibi avantajlarının aksine son derece aşındırıcı ve toksik asitlerin kullanılması dezavantajlarıdır.

8. Net Adsorpsiyon Deneyi

Deney, bir asfalt-agrega çiftinin afinitesini, uyumluluğunu ve sistemin suya duyarlılığını belirlemek için kullanılır (Solaimanian vd., 2003). Deney iki aşamadan oluşur. İlk olarak, toluen içerisinde çözünen asfalt agreganın yüzeyine adsorbe edilir, çözeltide kalan asfalt miktarı ölçülür ve agregaya adsorbe edilen asfalt miktarı hesaplanır (Choi, 2005; Hossain ve Roy, 2018). İkinci olarak, sisteme su ilave edilir böylece asfalt agreganın yüzeyinden desorbe edilir (uzaklaştırılır) ve ardından yine çözeltide bulunan asfalt miktarı ölçülür ve agreganın yüzeyinde kalan miktar hesaplanır (Kök, 2007; Solaimanian vd., 2003). Desorpsiyondan sonra yüzeyde kalan asfalt miktarına net adsorpsiyon denir (Hossain ve Roy, 2018). Asfaltın %90'ından fazlası agreganın yüzeyinde tutulursa asfalt ve agreganın uyumlu olduğu, tutulan miktarın %70'ten az olması durumunda sistemin uyumsuz olduğu kabul edilirken %70 ile %90 arasında olması durumunda ise uyumluluğun şüpheli olduğu kabul edilir (Airey ve Choi, 2011). Net adsorpsiyon deney yönteminin koşulları Tablo 32'de özet halde verilmektedir.

Tablo 32. Net adsorpsiyon deney yönteminin koşulları (Airey ve Choi, 2011)

Parametreler	Net Adsorpsiyon Deneyi
Bağlayıcı ve Toluene Miktarı	140 ml
Agrega Boyutu	4.75' in aşağı
Agrega Miktarı	50 g

Tablo 32'nin devamı

Su Miktarı	2 ml
Süre	6 saat ve 8 saat
Sonuçların Doğrulanması	Asfaltın agregaya üzerinde tutulan miktarının belirlenmesi

9. Modifiye Net Adsorpsiyon Deneyi

Deneyde agregaya sadece 4.75 mm'lik elekten geçmek yerine belirli bir gradasyona göre hırlandırılır (Choi, 2005). Ayrıca bağlayıcı-agrega sisteminin soyulmaya karşı afinitesini ve direncinin daha ayırt edici bir değerlendirmesini sağlamak için bir başlangıç adsorpsiyon değerinin yanı sıra net adsorpsiyon değeri hesaplanır (Airey ve Choi, 2011). Modifiye net adsorpsiyon deney yönteminin koşulları Tablo 33'te özet halde verilmektedir.

Tablo 33. Modifiye net adsorpsiyon deney yönteminin koşulları (Airey ve Choi, 2011)

Parametreler	Modifiye Net Adsorpsiyon Deneyi
Bağlayıcı ve Toluen Miktarı	140 ml
Agrega Boyutu	4.75'ın aşağı derecelendirilmiş
Agrega Miktarı	50 g
Su Miktarı	2 ml
Süre	6 saat ve 8 saat

10. Ultrasonik Yöntem

Deney, kaplanmış agregaların soyulma direncini ölçmek için geliştirilmiştir (Liu vd., 2014). Deneyde, cilalanmış taş parçasının (20 x 80 x 10 (kalınlık) mm) 0.12 mm'lik bir bağlayıcı film kalınlığı elde etmek için 2 g asfaltla kaplanır (Choi, 2005). Daha sonra kaplanmış deney parçası su altında ultrasona tabi tutularak asfalt taştan mekanik olarak soyulur (Airey ve Choi, 2011, Liu vd., 2014). Soyulma derecesi, soyulmuş deney parçası tartılarak ya da görsel değerlendirme ile belirlenir (Choi, 2005). Ultrasonik yönteminin koşulları Tablo 34'te özet halde verilmektedir.

Tablo 34. Ultrasonik yönteminin koşulları (Airey ve Choi, 2011; Liu vd., 2014)

Parametreler	Ultrasonik Yöntem
Agreganın Kaplaması	
Bağlayıcı Miktarı	2 g (0.12 mm film kalınlığı)
Agrega Boyutu	20 x 80 x 10 mm
Agrega Miktarı	Yaklaşık 30 parça
Koşullandırma Süresi	5 – 10 – 15 - 20 dk
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Soyulmuş deney parçasının tartılması veya görsel değerlendirme

11. Pnömatik Pull-Off Deneyi

Asfalt bağlayıcıların nem hassasiyetin değerlendirilmesinin hızlı ve tekrarlanabilir bir yöntemini sağlayan bu deney prosedüründe, suya maruz bırakıldığında cam levhaya uygulanan asfalt bağlayıcının çekme ve bağlanma (yapışma) mukavemetini zamanın fonksiyonu olarak ölçülür (Solaimanian vd., 2003). Ağırlıkça %1 cam boncuk içeren asfalt bağlayıcı, gözenekli diske uygulanır ve sonrasında cam levha üstüne bastırılır (Hossain ve Roy, 2018). Asfalt filminin kalınlığını kontrol etmek için kullanılan cam boncukların sonuçlar üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Koşullandırılmış numunenin soyulması (debond) için gereken basınç (tipik olarak çekme hızı yaklaşık 66 kPa/s), 25°C’de pnömatik adezyon deney cihazı ile ölçülür (Solaimanian vd., 2003). Deneyde ıslanma süresi önemli bir faktördür ve bu da soyulmaya duyarlı karışımın suya daha uzun süre maruz kalması durumunda daha yüksek soyulma hasarı göstermesi anlamına gelir (Hossain ve Roy, 2018).

12. Ancona Soyulma Deneyi

Deney, asfalt-agrega sisteminin soyulma potansiyelini değerlendirmek için kullanılır. Asfaltlı çakıl numunesi (10 mm elekten geçen ve 6 mm elekte tutulan, 3 g asfalt ile karıştırılmış 60 g çakıl) 200 ml damıtılmış su içeren 600 ml’lik bir behere yerleştirilir (Choi, 2005; Airey ve Choi, 2011). Ardından beher, 600 ml kaynar su içeren 2000 ml’lik daha büyük bir behere yerleştirilir ve 45 dakika sonra beher çıkarılır ve ortam sıcaklığında soğutulur (Pasetto vd., 2018). Daha sonra soyulma yüzdesinin görsel değerlendirilmesi yapılır. Ancona soyulma deney yönteminin koşulları Tablo 35’te özet halde verilmektedir.

Tablo 35. Ancona soyulma deney yönteminin koşulları (Choi, 2005; Airey ve Choi, 2011)

Parametreler	Ancona Soyulma Deneyi
Agreganın Kaplaması	
Bağlayıcı Miktarı	3 g
Agrega Boyutu	6/10 mm
Agrega Miktarı	60 g
Su Miktarı	200 ml
Suyun Koşullandırılması	
Su Sıcaklığı	Kaynar su
Koşullandırma Süresi	45 dk
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Kaplamanın görsel tahmini

b. Dinamik Deneyler

Gevşek karışımlara uygulanan dinamik analiz yöntemleri arasındaki fark, statik analiz yöntemleri ile aynıdır (bkz. 1.8.4.2.2.1.1. Statik Deneyler) buna karşın statik yöntemlerden tek farkı asfalt/agrega sisteminin suda karıştırılmasıdır (Pstrowska vd.,2022). Dinamik deneyler aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

1. Dönen Şişe Deneyi

Deneyde, suyun varlığında mekanik karıştırma işleminin etkisinden sonra sıkıştırılmamış asfalt kaplı mineral agreg a parçacıkları üzerindeki asfalt kaplama derecesinin görsel tahmini ile afinite ifade edilir (Liu vd., 2014). Bu deney, basit ve öznel bir deney olmasının yanı sıra rutin deneyler için uygundur. Ancak çok aşındırıcı olan agregalar için uygun değildir (European Committee for Standardization, 2012). Deneyde, 510 ± 2 g agreg a 16 ± 0.2 g asfaltla karıştırıldıktan sonra kaplanmış agreg a deiyonize soğuk su ve cam çubuk içeren şişeye yerleştirilir ve üç gün boyunca 40 rpm’de döndürülerek karışım çalkalanır (Mei vd., 2021; Choi, 2005; Airey ve Choi, 2011; Solaimanian vd., 2003). Daha sonra agregaların kaplanması düzenli aralıklarla görsel olarak tahmin edilir (Hossain ve Roy, 2018). Dönen şişe deney yöntemi Şekil 59’da ve yöntemin koşulları özet halde Tablo 36’da verilmektedir.



Şekil 59. Döner şişe deney yöntemi (URL-20, 2025)

Tablo 36. Döner şişe deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022)

Parametreler	Döner Şişe Deneyi
Agreganın Kaplaması	
Numune Sayısı	3
Bağlayıcı Miktarı	16 g (%3)
Agrega Boyutu	8/11.2 (5.6/8, 6.3/10) mm
Agrega Miktarı	510 g 3 set için
Deney İçin Miktarlar	
Su Miktarı	500 ml (karışımlar dâhil)
Gevşek Karışım Miktarı	150 g
Suyun Koşullandırılması	
Koşullandırma Tipi	Dinamik
Su Sıcaklığı	25°C
Koşullandırma Süresi	6 saat ve 24 saat, gerekirse 48 saat ve 72 saat
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Kaplamanın görsel tahmini

2. Film Soyulma Deneyi (Kaliforniya Deneyi 302)

Deney, bitümlü malzemenin kayaç parçacıklarından soyulmaya karşı direncini ölçme, mineral agregayı değerlendirmek için kullanılmasının yanı sıra bitümlü malzemenin adezif kapasitesini değerlendirmek için de kullanılabilir (Department of Transportation, 2002). Bu deney, AASHTO T182 (Bitüm-Agrega Karışımlarının Kaplanması ve Soyulması) deneyinin modifiye edilmiş bir versiyonudur (Kök, 2007; Hossain ve Roy, 2018). Asfaltla kaplanmış 60 gr agregası 60°C'lik etüvde 15-18 saat boyunca bekletildikten sonra numune oda

sıcaklığına soğutulur ve yaklaşık 175 mL damıtılmış suyla dolu kavanoza yerleştirilerek kapağı sıkıca kapatılır (Kök, 2007; Solaimanian vd., 2003). Yaklaşık 35 rpm’lik dönüşle 15 dakika boyunca kalmak üzere deney cihazına yerleştirilir ve sonuçlar soyulan toplam agreganın yüzeyinin yüzdesi olarak belirlenir (Kök, 2007; Solaimanian vd., 2003; Hossain ve Roy, 2018). Film soyulma deney yöntemi Şekil 60’ta ve yöntemin koşulları özet halde Tablo 37’de verilmektedir.



Şekil 60. Film Soyulma Deney Cihazı (URL-21, 2025)

Tablo 37. Film soyulma deney yönteminin koşulları (Pstrowska vd., 2022)

Parametreler	Film Soyulma Deneyi
Agreganın Kaplaması	
Bağlayıcı Miktarı	%3.6
Agrega Boyutu	3/8 inç
Agrega Miktarı	60 g
Suyun Koşullandırılması	
Koşullandırma Tipi	Dinamik
Koşullandırma Süresi	15 dk
Kaplanma Derecesini Değerlendirme	
Sonuçların Doğrulanması	Sonucun doğrulanması

3. Dinamik Daldırma Deneyi

Deney, karışımın çalkalanarak ya da yoğrularak mekanik olarak karıştırılması (çalkalanması) dışında statik daldırma deneylerine benzerdir ve statik daldırma deneyine kıyasla soyulma etkisini hızlandırmak için kullanılır (Airey ve Choi, 2011; Hossain ve Roy, 2018). Ancak bu deney standartlaştırılmamıştır ve yaygın olarak kullanılmamaktadır (Solaimanian vd., 2003). Asfalt- agreganın karışım numuneleri statik daldırma deneyinde

olduğu gibi hazırlanır lakin 4 saatlik çalkalamaya tabi tutulur ve çalkalama süresi arttıkça soyulma derecesi artar (Hossain ve Roy, 2018; Solaimanian vd., 2003). Daha sonra soyulma derecesini tahmin etmek için görsel bir değerlendirme yapılır. Ancak hem statik hem de dinamik daldırma deneyleri, gevşek karışımlar üzerindeki tüm deneylerde olduğu gibi gözenek basıncı etkisini ve trafik etkisini ele almada başarısız olur (Hossain ve Roy, 2018).

2. Sıkıştırılmış Karışımlara Uygulanan (Nicel) Deneyler

Bu grup, asfalt beton numunelerinin (farklı şekiller) farklı sıcaklıklarda suya bırakılmadan önce ve sonra karakteristik değişikliklerine dayanan yöntemleri içerir (Pstrowska vd., 2022). Bu deneylerin avantajı, karışımın fiziksel ve mekanik özelliklerinin, su/trafik etkisinin ve gözenek basıncı etkilerinin hesaba katılabilmesidir (Solaimanian vd., 2003). Bununla birlikte sonuçların nicel olarak ölçülebilmesi, deney sonuçlarının öznel değerlendirilmesini en aza indirir. Ancak bu deneylerin dezavantajı, çok pahalı ve karmaşık deney ekipmanları içermesi, gerçekleştirilmesinin daha uzun sürmesi ve daha zahmetli deney prosedürleri gerektirmesidir (Taib vd., 2018). Sıkıştırılmış silindirik karışımlara uygulanan çoğu yöntem esas olarak aşağıda sıralanan şekillerde birbirinden farklılık gösterir (Pstrowska vd., 2022):

- Numune boyutu,
- Kuru ve ıslak numunelerin hazırlanması,
- Kuru ve ıslak numuneler için farklı performans göstergelerinin belirlenmesi,
- Basınç dayanımı,
- Marshall stabilitesi vd.

Sıkıştırılmış karışımlara uygulanan deneyler aşağıda sıralanmaktadır.

a. İndirekt Çekme Dayanımı Deneyi

Deney, sıkıştırılmış asfalt karışımların nemden ya da sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncini belirlemek için yapılır (Şanlıer, 2018). İndirekt çekme dayanımındaki değişim 6 adet numune (3 adet kuru ve 3 adet suya maruz bırakılmış) ile kontrol edilir (Grönniger vd., 2010). Deney, Marshall stabilitesi deney cihazı ve indirekt çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak silindirik numunelere çap düzlemi doğrultusuna paralel şekilde 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yüklemesine tabi tutulur (Yılmaz, 2016).

Kırılma anındaki maksimum yük ölçülür (Grönniger vd., 2010). İndirekt çekme mukavemeti (ITS) ve indirekt çekme mukavemeti oranı (ITSR) sırasıyla Denklem 44 ve 45 kullanılarak hesaplanır (Yılmaz, 2016; Grönniger vd., 2010). Şekil 61’de indirekt çekme dayanımı deneyi cihazı ve Tablo 38’de deneyin koşulları verilmektedir.

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (44)$$

$$ITSR = \frac{ITS_{\text{wet}}}{ITS_{\text{dry}}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (45)$$

Burada;

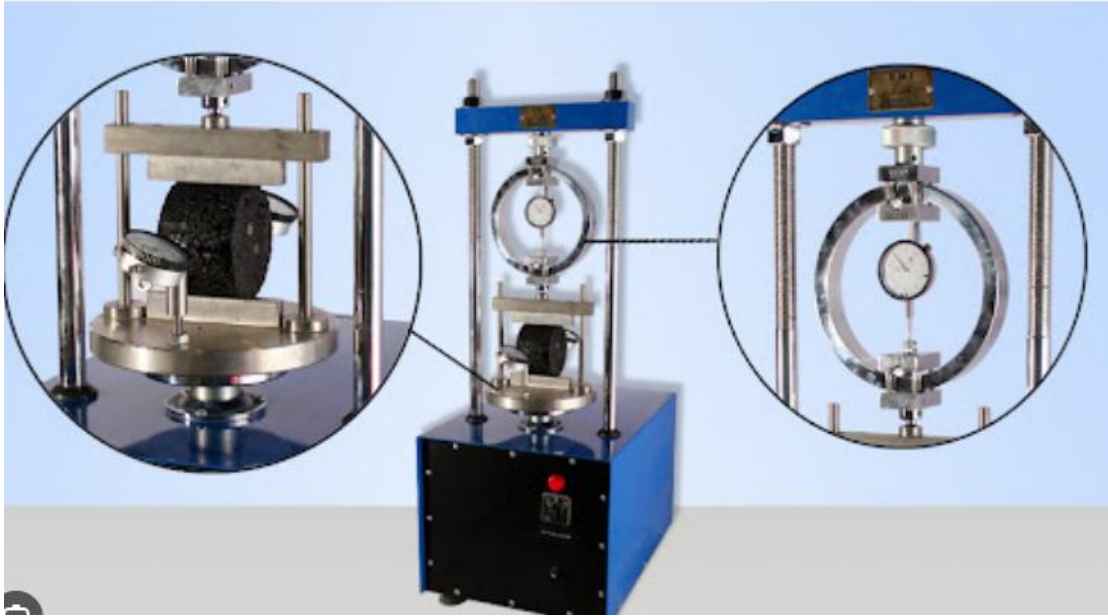
ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kg/cm^2),

$P_{\max}$: Maksimum yük (kg),

h : Numune yüksekliği (cm),

d : Numune çapı (cm) ve

ITSR : İndirekt çekme mukavemeti oranını (%) ifade etmektedir.



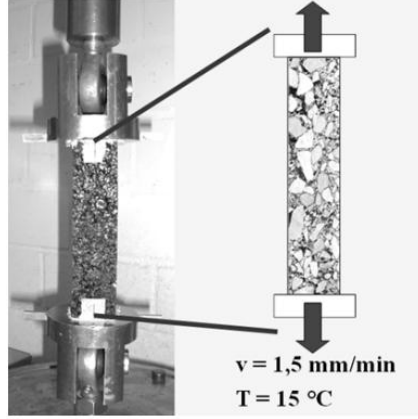
Şekil 61. İndirekt çekme dayanımı deneyi cihazı (URL-22, 2025)

Tablo 38. İndirekt çekme dayanımı deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)

Parametreler	İndirekt Çekme Dayanımı Deneyi
Numune Boyutu	
Çap	80, 100, 120, 150 ve 160 mm
Kuru Numunelerin Hazırlanması	
20°C (Hava)	
Islak Numunelerin Hazırlanması	
Suya Doygunluk	30 Dakika (Vakum)
	40°C, 68-72 Saat (Su)
Deney	
Soğutma	2-4 Saat (Su)
Sıcaklık	25°C
Yöntem	İndirekt Çekme Gerilmesi (ITS-İÇM, kPa) 
Sonuçlar	
İndeks	İndirekt Çekme Gerilmesi Oranı (ITSR)
Hesaplama	$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} (\%)$

b. Direkt Çekme Dayanımı Deneyi

Deney, prizmatik asfalt karışım numunelerinin yanı sıra agrega kayacından delinip asfalt filmiyle birbirine yapıştırılmış kırımlar üzerinde gerçekleştirilir (Şekil 62) (Pstrowska vd., 2022). Prizmatik asfalt kırımlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler için sıkıştırılmış asfalt karışım levhalarından 6 adet kırış (3 adet kuru ve 3 adet ıslak) yuvarlanma/haddeleme yönünde 250 mm yükseklik, 50 mm genişlik ve 50 mm uzunlukta kesilir (Grönniger vd., 2010; Xia vd., 2019). Numunelerin makineye yüklenebilmesi için adaptörler, numunelerin yüzeylerine iki bileşenli yapıştırıcı ile tutturulur. 15°C sıcaklıkta 1.5 mm/dk hızında bir çekme kuvveti uygulanır ve numune kırıldıktan sonra çekme dayanımı maksimum gerilme ve direkt çekme dayanımı oranından (DTSR) belirlenir (Denklem 46 ve 47) (Grönniger vd., 2010).



Şekil 62. Direkt çekme dayanımı deney prensibi (Grönniger vd., 2010)

$$DTS = \frac{2 \cdot F_{\max}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (46)$$

$$DTSR = \frac{DTS_{\text{wet}}}{DTS_{\text{dry}}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (47)$$

Burada;

DTS : Dolaylı çekme mukavemeti (N/mm²),

F_{max} : Maksimum yük (N),

h : Numune yüksekliği (mm),

d : Numune çapı (mm) ve

DTSR : Dolaylı çekme mukavemeti oranını (%) ifade etmektedir.

c. Orijinal Lottman İndirekt Çekme Dayanımı Deneyi

Prosedür, iki grup numune (kuru ve koşullandırılmış) gerektirmektedir ve numuneler 4 inç çapında ve 2.5 inç kalınlığındadır (Hossain ve Roy, 2018). Koşullandırma işleminde numuneler 30 dk boyunca 26 inç civa (600 mmHg-80 kPa) basıncında ve ardından 30 dk boyunca atmosferik basınçta doymuş hale getirilir (Kök, 2007; Choi, 2005). Kısmen doymuş numuneler 15 saat boyunca 0°F’de dondurulur ve daha sonra 140°F su banyosunda 24 saat bekletilir (Solaimanian vd. 2003). Lottman alternatif olarak termal döngüsel koşullandırmayı önermektedir. Döngüsel sistemde numuneler 4 saat boyunca 0°F’de ve ardından 140°F’de bekletilir ve böylece tam bir termal döngü 8 saat sürmektedir (Hossain ve Roy, 2018). Numuneler bu sistemde, 18 termal döngüye tabi tutulur. Sonuç olarak kuru

ve koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme dayanım değerleri oranlanır (Kök, 2007). Deneylerde 55°F'de (13°C) yükleme hızı 0.065 inç/dk iken 73°F'de (23°C) 0.150 inç/dk şeklindedir (Taib vd., 2019).

d. Tunncliff-Root Deneyi

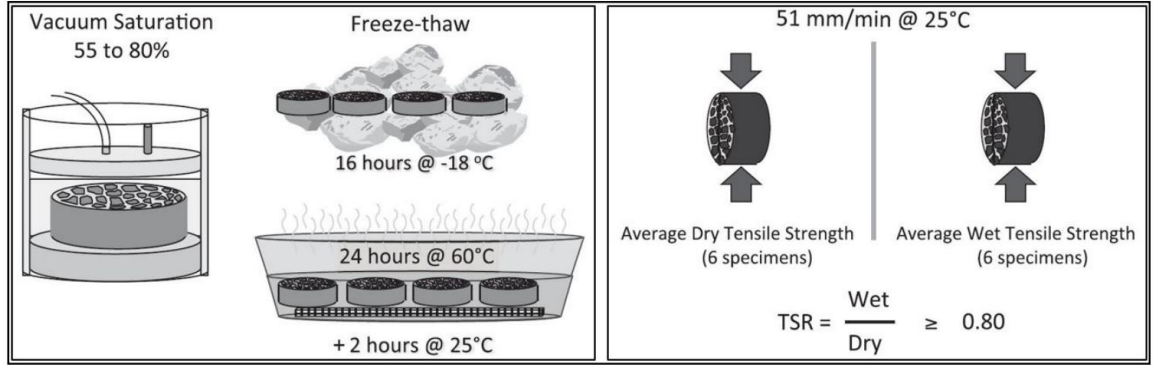
Bu deney, modifiye Lottman deneyi ile karşılaştırılabilir. Her iki yöntemde de donma döngüsü isteğe bağlıdır, ancak Tunncliff-Root deney prosedüründe gevşek karışımın 16 saat boyunca 60°C'lik bir etüvde kürlenmesi kaldırılmıştır (Solaimanian vd., 2003). %6 ile %8 arasında eşit hava boşluğuna sahip üçer numuneden oluşan iki grup belirlenir (Coleri vd., 2023). Birinci grup numuneleri koşullandırılmamışken ikinci grup numuneleri damıtılmış suya daldırılarak %55 ile %80 arasında bir doygunluk derecesine ulaşılan kadar 5 dakikalık artışlarla kademeli olarak 508 mmHg'lik (68kPa) kısmi bir vakumla doyurulur (Choi, 2005). Ardından numuneler 24 saat boyunca 60°C'de (140°F) damıtılmış su banyosuna yerleştirilir ve daha sonra 1 saat boyunca 25°C'lik suda bekletilir (Cross vd., 2013). Şartlandırılmamış numuneler 25°C'lik (77°F) su banyosunda 20 dakika bekletilir (Coleri vd., 2023). Daha sonra her iki grup indirekt çekme mukavemeti açısından test edilir ve TSR değerleri elde edilir. Genellikle minimum 0.80 TSR önerilir (Cross vd., 2013).

e. Modifiye Lottman İndirekt Çekme Dayanımı Deneyi

Prosedür, hem Lottman hem de Tunncliff-Root prosedürlerinin özelliklerini birleştirir (Taib vd., 2019). Lottman prosedürü numunelerinde %100 doygunluk seviyesine ulaşmaya çalışırken Tunncliff-Root prosedürü doygunluk seviyesini %55 ile %80 arasında kontrol etmeye çalışır (Airey ve Choi, 2011). Vakumlama sürecinde uygulanan negatif basıncın numunelerde nemle ilgili olmayan ekstra hasara neden olabileceği aşırı doygunluk endişeleri nedeniyle, Modifiye Lottman prosedürü %60 ile %80 arasında azaltılmış bir doygunluk seviyesi kullanır (Choi, 2005). Ayrıca Modifiye Lottman deneyinin Lottman deneyinden diğer bir farkı yükleme hızıdır ve yükleme hızı bu deneyde 25°C'de (77°F) 2 inç/dk (5cm/dk) şeklindedir (Hossain ve Roy, 2018).

Deneyde, önce gevşek karışımlar 60°C'de 16 saat boyunca kürlenmesinin ardından 135°C'de 2 saat yaşlanma işlemine maruz bırakılır (Solaimanian vd., 2003). %6.5 ile %7.5 arasında hava boşluğuna sahip olan üçer numuneden oluşan iki grup belirlenir (Coleri vd.,

2023). 3 adet numune önce -18°C’de 16 saat dondurucuda daha sonra 60°C’lik su banyosunda 24 saat bekletilerek koşullandırılır (Kök, 2007; Hossain ve Roy, 2018). Diğer 3 adet numune koşullandırılmamış olarak kabul edilir. Numunelerin tümü sabit bir sıcaklığa getirilir ve tüm numunelerin indirekt çekme dayanımları ölçülerek oranlanır. Bu oranın minimum %80 olması gerekir (Kök, 2007). Şekil 63’te modifiye Lottman deneyinin yapılışı, Tablo 39’da ise deneyin koşulları verilmektedir.



Şekil 63. Modifiye Lottman indirekt çekme dayanımı deneyi yapılışı (Hossain ve Roy, 2018)

Tablo 39. Modifiye Lottman indirekt çekme dayanımı deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)

Parametreler	Modifiye Lottman İndirekt Çekme Dayanımı Deneyi
Numune Boyutu	
Çap	63.5 ve 150 mm
Kuru Numunelerin Hazırlanması	
25°C, 2 Saat (Plastik Filmde, Su)	
Islak Numunelerin Hazırlanması	
Suya Doygunluk	10 Dakika (Su, Vakum)
	18°C, 16 Saat (Plastik Filmde, Dondurucu)
	60°C, 24 Saat (Plastik Filmde, Su)
Deney	
Soğutma	2 Saat (Plastik Filmde, Su)
Sıcaklık	25°C

Tablo 39'un devamı

Yöntem	İndirekt Çekme Gerilmesi (ITS-İÇM, kPa) 50.8 mm/min P 
Sonuçlar	
İndeks	Çekme Gerilmesi Oranı (ITSR)
Hesaplama	$TSR = 100 \times \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} (\%)$

f. Basınç Dayanımı Deneyi

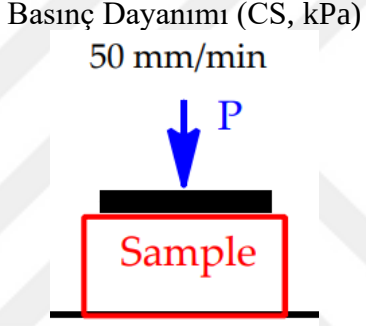
Deney, asfalt çimentosu içeren sıkıştırılmış asfalt karışımlar üzerinde suyun etkisinden kaynaklanan basınç dayanımı kaybının ölçülmesini kapsar (URL-23, 2025). Karışım silindirik kalıba iki katman halinde dökülür ve daha sonra 1 MPa'lık bir başlangıç gerilmesine tabi tutulur, ardından 100 mm'lik bir numune yüksekliğine ulaşmak için iki dakika boyunca 20,7 MPa'ya çıkarılır (Adwar ve Albayati, 2024). Karışımından altı numune hazırlanır. Bundan sonra, numuneler iki gruba ayrılır. İlk gruptaki numuneler (kuru numuneler) 25°C'de test edilir. İkinci gruptaki numuneler (ıslak numuneler) 60°C'de (24 saat) bir su banyosuna daldırılır. Daha sonra numuneler çıkarılıp 25°C'de (2 saat) başka bir su banyosuna yerleştirilir ve ardından 50,8 mm/dakika hızında eksenel yük uygulanarak test edilir. Maksimum basınç yükü kaydedilir ve basınç dayanımı, yük numunenin kesit alanına bölerek elde edilir. Korunan/Tutulan Dayanım İndeksi Denklem 48'e göre hesaplanır:

$$IRS = 100 \times \frac{CS_{wet}}{CS_{dry}} (\%) \quad (48)$$

Burada, CS_{wet} ıslak basınç dayanımı ve CS_{dry} kuru basınç dayanımıdır, her ikisi de kPa birimindedir.

Silindirik olmayan numuneler için Tablo 40'ta basınç dayanımı deneyi koşulları verilmiştir.

Tablo 40. Basınç dayanımı deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)

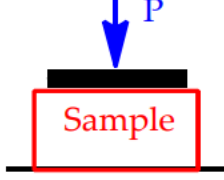
Parametreler	Basınç Dayanımı Deneyi
Numune Boyutu	
Çap	80, 100, 120, 150 ve 160 mm
Kuru Numunelerin Hazırlanması	
18°C (Hava)	
Islak Numunelerin Hazırlanması	
Suya Doygunluk	60 Dakika (Vakum)
	120 Dakika (Su, Vakum)
	18°C, 7 Gün (Su)
Deney	
Soğutma	-
Sıcaklık	18°C
Yöntem	 Basınç Dayanımı (CS, kPa) 50 mm/min
Sonuçlar	
İndeks	Korunan Dayanım İndeksi (IRS)
Hesaplama	$100 \times \frac{CS_{wet}}{CS_{dry}} (\%)$

g. Daldırma-Basınç Deneyi

Deney, nem hasarının belirlenmesinde kullanılan ilk deneylerden biridir (Kök, 2007). Deney için 6 adet numune gereklidir. Numuneler (çapı ve yüksekliği 4 inç), 2 dakika boyunca 3000 psi basınçla çift piston sıkıştırma kullanılarak %6 hava boşluğu içeriğine sıkıştırılır (Cross vd., 2013). Bu sıkıştırılmış numuneler, kontrol grubu ve koşullandırılmış grup olarak iki gruba ayrılır. Kontrol grubu numuneleri deneyden önce 4 saat boyunca 77°F'de (25°C) tutulur. Koşullandırılmış gruptaki numuneler ya 4 gün boyunca 120°F (49°C) ya da 24 saat boyunca 140°C (60°C) sıcaklıktaki su banyonuna daldırılır (Taib vd., 2019). Basınç dayanımı; her iki gruptaki numuneler üzerinde 77°F'de numune yüksekliğinin her bir inç'i için 0.05 inç/dakika (1.27 mm/dk) deformasyon hızında ölçülür (Solaimanian

vd., 2003). Sonuç olarak koşullandırılmış gruptaki numunelerin dayanımının kontrol grubundaki numunelerin dayanımına oranı tespit edilir (Kök, 2007). Çoğu kurum tarafından geçme sınırı (minimum sınır) olarak %70 oranı kullanılmıştır (Cross vd., 2013). Tablo 41’de daldırma-basınç deneyi koşulları verilmiştir.

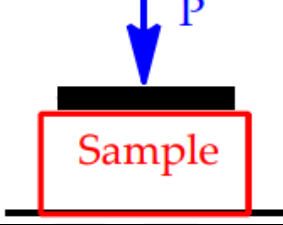
Tablo 41. Daldırma-basınç deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)

Parametreler	Daldırma-Basınç Deneyi
Numune Boyutu	
Çap	101.6 mm
Kuru Numunelerin Hazırlanması	
25°C, 4 Saat (Hava)	
Islak Numunelerin Hazırlanması	
Suya Doygunluk	60°C, 24 Saat ya da 49°C, 4 Gün (Su)
Deney	
Soğutma	2 Saat (Su)
Sıcaklık	25°C
Yöntem	Basınç Dayanımı (CS, kPa) 1.27 mm/min 
Sonuçlar	
İndeks	Korunan Basınç Dayanımı (RCS)
Hesaplama	$100 \times \frac{CS_{wet}}{CS_{dry}} (\%)$

h. Marshall Daldırma Deneyi

Deneyin koşullandırma aşaması, daldırma-basınç deneyi için kullanılan aşamalarla aynıdır (Hossain ve Roy, 2018). Ancak Marshall stabilitesi basınç dayanımı yerine bir dayanım parametresi olarak kullanılır (Solaimanian vd., 2003). Tablo 42’de Marshall daldırma deneyi koşulları verilmiştir.

Tablo 42. Marshall daldırma deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)

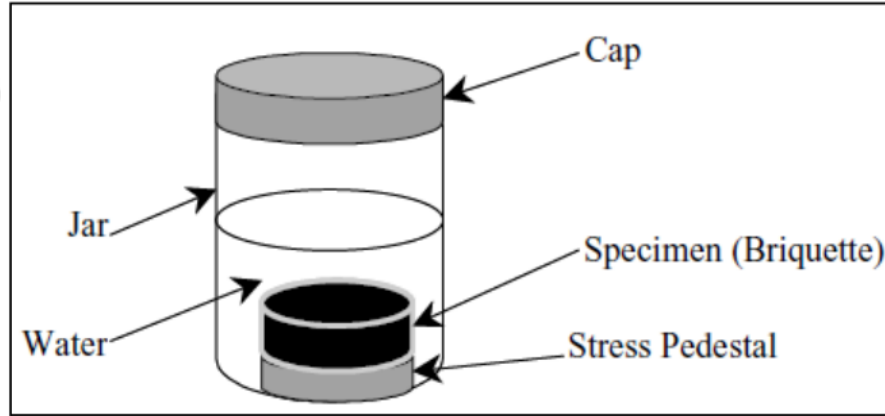
Parametreler	Marshall Daldırma Deneyi
Numune Boyutu	
Çap	100 mm (Silindir Yüksekliği 75 mm)
Kuru Numunelerin Hazırlanması	
25°C, 4 Saat (Hava)	
Islak Numunelerin Hazırlanması	
Suya Doygunluk	60°C, 24 Saat (Su)
Deney	
Soğutma	2 Saat (Su)
Sıcaklık	25°C
Yöntem	Basınç Dayanımı (CS, kPa) 1.27 mm/min  The diagram illustrates the Marshall test setup. A blue arrow labeled 'P' points downwards onto a black rectangular plunger. Below the plunger is a red-outlined rectangular box labeled 'Sample' in red text. The sample is resting on a black horizontal base.
Sonuçlar	
İndeks	Korunan Dayanım İndeksi (RSI)
Hesaplama	$100 \times \frac{MS_{wet}}{MS_{dry}} (\%)$

i. Teksas Donma-Çözülme Kaide Deneyi

Deney, asfalt bağlayıcı ile agregası arasındaki uyumluluğu ve buna karşılık gelen yapışkanlığı değerlendirir (Hossain ve Roy, 2018). Agregası gradasyonu, yoğunluk, agregası kenetlenmesi gibi fiziksel özelliklerin değişimi veya etkisi, tek boyutlu agregası kullanılarak en aza indirilir, böylece deney öncelikle bağlanma mukavemetini ve bağlayıcı kohezyonunu değerlendirir (Airey ve Choi, 2011). Deneyde ince bir agregası fraksiyonu [No. 20 (0.85 mm) elekten geçip No. 35 (0.50 mm) elekte kalan] ve 150°C sıcaklıkta asfalt kullanılarak sıcak karışım hazırlanır (Solaimanian vd., 2003). Sıcak karışım 150°C’de 2 saat etüvde tutulur ve her saat sıcaklığın üniformluğunu sağlamak için karıştırılır (Hossain ve Roy, 2018). Karışım süre sonunda etüvden çıkarılır ve soğutulur. Ardından tekrar 150°C’ye ısıtıldıktan sonra 19 mm yüksekliğinde ve 41 mm çapında bir briket oluşturmak için yaklaşık 28 kN’lık bir yük ile 15 dakika sıkıştırılır. (Solaimanian vd., 2003). Daha sonra briket oda sıcaklığında 3 gün boyunca kürlenir ve damıtılmış su dolu kapalı bir kavanozun içindeki bir kaide üzerine

yerleştirilir (Şekil 64) (Hossain ve Roy, 2018). -12°C 'de 15 saat'lik ve ardından 49°C 'de 9 saat'lik termal bir döngüye tabi tutulur (Solaimanian vd., 2003). Her döngüden sonra briket yüzeyi çatlaklar açısından kontrol edilir. Çatlamanın oluşması için gereken döngü sayısı, su duyarlılığının bir ölçüsüdür (tipik olarak 10 donma-çözülme döngüsü) (Hossain ve Roy, 2018).

Kaide deney numuneleri, %5 asfaltla kaplanmış dar bir aralıktaki düzgün boyutlu agrega parçacıklarından hazırlanır. Bu formülasyon, karışım matrisindeki agrega parçacık etkileşimlerini azaltır ve agrega parçacıkları arasındaki ince asfalt kaplaması oldukça geçirgen olan ve böylece suyun agrega parçacıkları arasında bulunan boşluklara kolayca nüfuz etmesini sağlayan bir deney numunesi üretir. Bu nedenle, numunedeki nem kaynaklı hasar, asfalt-agrega arayüz bölgesindeki bağ kopmasından (soyulma) veya agrega parçacıklarını bağlayan ince asfalt-çimento filmlerinin buz kristalleri oluşumuyla kırılmasından (kohezif kopma) kolayca ortaya çıkabilir. Tablo 43'te Teksas donma-çözülme taban deneyi koşulları verilmiştir.

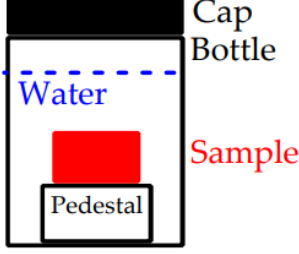


Şekil 64. Texas donma-çözülme deneyi sırasında su kavanozunda tipik sıkıştırılmış numune (Hosaain ve Roy, 2018)

Tablo 43. Teksas donma-çözülme kaide deneyi koşulları (Pstrowska vd., 2022)

Parametreler	Teksas Donma Çözülme Kaide Deneyi
	Numune Boyutu
Çap	41.3 mm (Silindir Yüksekliği 19.5 mm)
	Kuru Numunelerin Hazırlanması
	-
	Islak Numunelerin Hazırlanması
Suya Doygunluk	3 Gün (Hava)
	Donma-Çözülme Döngüleri Şişesi (-12°C , 24 Saat (Dondurucu); 49° , 9 Saat (Su))

Tablo 43'ün devamı

Deney	
Soğutma	-
Sıcaklık	-
Yöntem	Her Donma-Çözülme Döngüsünden Sonra Briket Yüzeyinde Çatlak Olup Olmadığı Kontrol Edilir 
Sonuçlar	
İndeks	Çatlamanın Oluşması İçin Gereken Döngü Sayısı, Su Duyarlılığının Bir Ölçüsüdür (Tipik Olarak 10 Donma-Çözülme Döngüsü)
Hesaplama	-

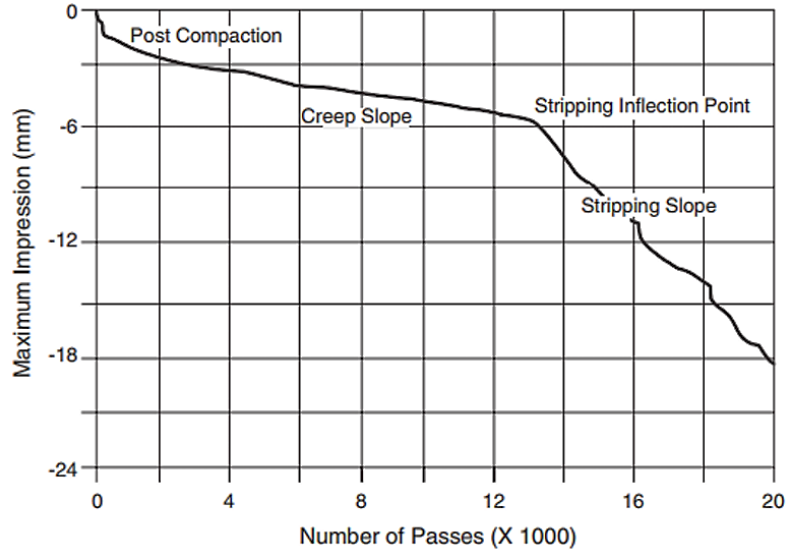
j. Hamburg Tekerlek İzi Deneyi

Deney, laboratuvar ortamında üretilen veya araziden alınan asfalt kaplama numunelerinin tekerlek izi ve su hasarı direncinin belirlendiği tahribatlı bir metoddur (İskender vd., 2022). Deneyde, sıcak suya batırılmış asfalt karışım numunesinin yüzeyinde çelik tekerlek yuvarlanarak (ileri-geri) tekerlek izi ve nem hasarının birleşik etkileri ölçülür (Şekil 65) (Solaimanian vd., 2003). Deneyde silindirik veya kübik numuneler kullanılabilir. 705 N yük altında yuvarlanan tekerlek, her bir numunenin üzerinden dakikada 50 kez maksimum 34 cm/sn hızla geçer (Copeland, 2007). Deney, 20.000 geçişe veya 20 mm'lik tekerlek izi oluşuncaya kadar gerçekleştirilir (Airey ve Choi, 2011). Tekerlek izi derinliğine (yani deformasyon) karşı geçiş sayısı kullanılarak bir grafik çizilir (Copeland, 2007). Grafik, sıkıştırma sonrası konsolidasyonu, sünme eğimini, soyulma eğimini ve soyulma büküm noktasını içerir (Şekil 66) (Kök, 2007). Sıkıştırma sonrası konsolidasyon, tekerleğin ilk 1000 geçişinde karışımı yoğunlaştırdığı varsayılarak 1000 geçişte ölçülen deformasyondur (Solaimanian vd., 2003). Sünme eğimi, viskoz akış nedeniyle 1 mm'lik tekerlek izi derinliği oluşturmak için tekrar veya tekerlek geçiş sayısıdır (Hossain ve Roy, 2018). Soyulma eğimi, soyulma başladıktan sonra ve deney sonuna kadar deformasyon eğrisinin doğrusal bölümünde deformasyon hızının tersinin alınması ile elde edilir (Kök, 2007). Soyulma

büküm noktası, sünme eğimi ile soyulma eğiminin kesiştiği noktadaki geçiş sayısıdır (Solaimanian vd., 2003). Bu nokta, BSK'ların nem hassasiyet dayanımını gösterir ve soyulmanın başladığı yer olarak kabul edilir (Kök, 2007).



Şekil 65. Hamburg tekerlek izi deneyi (İskender vd., 2022)

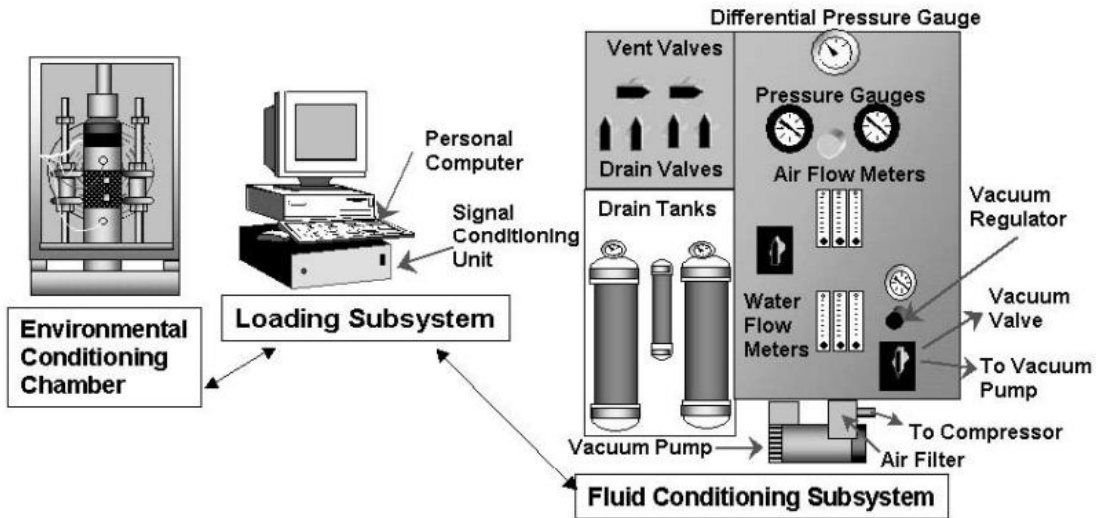


Şekil 66. Deney parametreleri ile hamburg eğrisi (Coleri vd., 2023)

k. Çevresel Koşullandırma Sistemi (ECS) Deneyi

SHRP (The Strategic Highway Research Program) asfalt araştırma programının bir parçası olarak nem hasarından sorumlu mekanizmalar kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyetini tahmin etmek için yeni bir sistem

geliştirilmiştir (Solaimanian vd., 2003). Prosedür; BSK'ların sıcaklık, nem doygunluğu ve dinamik yükleme gibi üstyapıda oluşabilecek koşullar altında nem hassasiyetini belirlemek için tasarlanmıştır (Kök, 2007). Deneyde, membran kapsüllü bir numune (102 ± 4 mm çap ve yüksekliğine ve $\%7.5 \pm 0.5$ hava boşluğu içeriğine sahip) sıcaklık, tekrarlı yük ve nem koşullandırma döngülerine tabi tutulur (Solaimanian vd., 2003). Öncelikle AASHTO TP4-93'e göre hazırlanan sıkıştırılmamış karışım kısa süreli yaşlandırmaya tabi tutulur ve ardından yine AASHTO TP4-93'e göre Superpave yoğurmalı kompaktör kullanılarak sıkıştırılır. Sıkıştırılmış numuneler oda sıcaklığında 1 gün soğumaya bırakılır ve daha sonra numunenin etrafı membranla kaplanarak 15 saat kurumaya bırakılır (Kök, 2007). ECS yük çerçevesine yerleştirilen numunelerin hava permeabilitesi ve esneklik modülleri belirlenir. Hava permeabilitesi, numuneden 68 kPa seviyesindeki vakum ile hava geçirilerek tespit edilir. Esneklik modülünün belirlenmesinde yükleme periyodu 0.1 saniye ve dinlenme periyodu 0.9 saniyedir. Sonrasında 68 kPa vakum seviyesindeki damıtılmış su, numune içerisinden geçirilerek numune doymun hale getirilir ve ardından numunenin su permeabilitesi belirlenir. Tekrarlı yükleme sırasında doymun hale gelmiş numunelerin sıcaklığı 6 saat boyunca 60°C 'ye yükseltilir ve sonrasında 2 saat boyunca 25°C 'ye soğutulur. 8 saatin sonunda koşullandırılmış esneklik modülü belirlenir. Koşullandırılmış numunelerin esneklik modülünün kuru (koşullandırılmamış) numunelerin esneklik modülüne oranı 0.70'ten az ise karışım neme duyarlı olarak kabul edilir. Şekil 67'de ECS deneyinin şematik şekli verilmektedir.



Şekil 67. ECS deneyinin şematik şekli (Solaimanian vd., 2003)

1. Doygunluk Yaşlanma Çekme Rijitliği (SATS) Deneyi

Deney, nem varlığında yüksek sıcaklık ve basınçta önceden doyurulmuş asfalt karışımı numunelerini koşullandırarak hem yaşlanmayı hem de nem hasarını birleştiren ilk deney prosedürüdür (Zhang vd., 2016). Deney, çapı 100 mm ve yüksekliği 60 mm olan beş asfalt beton numunesi üzerinde gerçekleştirilir ve numuneler 2.1 MPa basınç ve 85°C sıcaklıkta 65 saat boyunca ve ardından basıncın atmosfer basıncına ve sıcaklığın 30°C'ye kademeli olarak düşürülmesiyle 24 saat daha deney odasında tutulur (Pstrowska vd., 2022) (Şekil 68). Koşullandırmadan sonra, numuneler için doygunluk yüzdesi belirlenir (korunan/tutulan doygunluk olarak adlandırılır) (DeCarlo vd., 2019). Koşullandırılmış numuneler, rijitlik açısından tekrar test edilir ve korunan rijitlik değeri, koşullandırılmış numunenin rijitlik modülünün ve koşullandırılmamış numunenin rijitlik modülüne oranının her bir numune için bulunmasıyla belirlenir (DeCarlo vd., 2019; Choi, 2005).

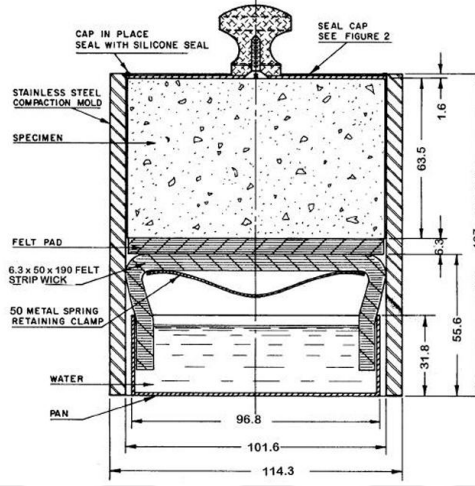


Şekil 68. Doygunluk yaşlanma çekme rijitliği (SATS) deney cihazı (Caro vd., 2025)

m. Nem Buharı Duyarlılığı Deneyi

Prosedür, Kaliforniya Ulaştırma Bakanlığı tarafından geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Kaliforniya Test Yöntemi 307) (Solaimanian vd., 2003). Karışım tasarımı deneyinde olduğu gibi, yoğurma kompaktörü kullanılarak iki adet numune hazırlanır ve sıkıştırılır, ancak numuneler paslanmaz çelik kalıplarda hazırlanır (Hossain ve Roy, 2018). Her numunenin sıkıştırılmış yüzeyine bir alüminyum conta kapağı yerleştirilir ve nem buharının kaçmasını önlemek için kenarlarına bir silikon sızdırmazlık maddesi uygulanır (Department of Transportation Engineering Service Center, 2000). Keçe tampon, conta kapağı ve şerit

fitilden oluşan bir düzenek, şerit fitilin serbest uçları suya konularak numuneye su buharı sağlamak için hazırlanır (Şekil 69) (Hossain ve Roy, 2018). Düzenek, 60°C'de bir fırında 75 saat boyunca su üzerinde asılı bırakıldıktan sonra, numune çıkarılır ve hemen Hveem stabilometresinde test edilir (Şekil 70) (Solaimanian vd., 2003).



Şekil 69. Nem buharı duyarlılığı deneyi düzeneği (Department of Transportation Engineering Service Center, 2000)



Şekil 70. Hveem stabilometresi (URL-24, 2025)

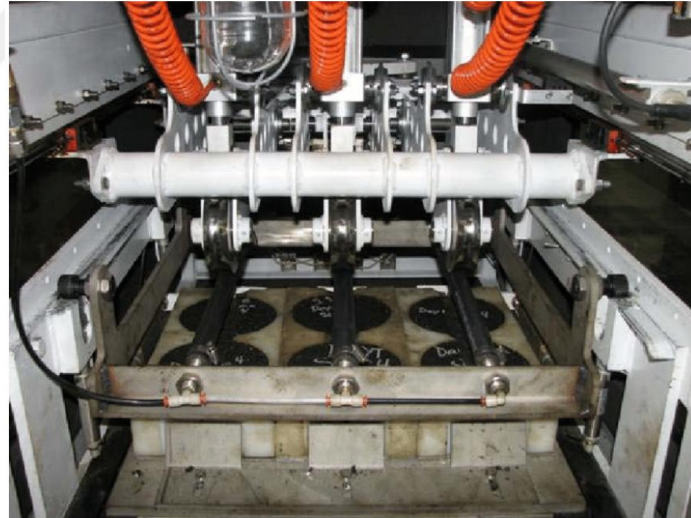
n. Asfalt Kaplama Analizörü Deneyi (APA)

Asfalt kaplama analizörü (APA), Şekil 71'de gösterilen Georgia Yüklü Tekerlek Deney Cihazı'nın (GLWT) bir modifikasyonudur ve sıcak asfalt karışımların tekerlek izi, yorulma ve nem direncini değerlendirmek için kullanılır (Hossain ve Roy, 2018). Şekil 72'de gösterilen APA, GLWT'nin ikinci nesli olduğundan, benzer bir tekerlek izi deneyi prosedürünü takip eder (Kandhal ve Cooley Jr., 2003). Bir tekerlek, basınçlı doğrusal bir

hortuma yüklenir ve tekerlek oluşturmak için bir deney numunesi üzerinde ileri geri hareket ettirilir (Cooley Jr. vd., 2000). Deney kriteri, koşullandırılmış tekerlek izi derinliğinin koşullandırılmamış tekerlek izi derinliğine oranıdır ve burada 1'den büyük değerler karışımın nem hasarına karşı hassas olduğunu gösterir (Hossain ve Roy, 2018).



Şekil 71. Georgia yüklü tekerlek deney cihazı ve çelik çerçeve (Hunter ve Ksaibati, 2002)



Şekil 72. Asfalt kaplama analizörü (Tran vd., 2010)

o. Duriez Deneyi

Deney, 7 günlük bir daldırma süresinden sonra basınç dayanımındaki düşüşü ölçerek bir asfalt karışımının su direncini değerlendirmeye olanak sağlar (Akacem vd., 2024). Prosedür, 12 MPa basınç altında statik olarak sıkıştırılmış 80 mm veya 120 mm çaplı silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilir (Airey ve Choi, 2011). Su koşullandırması,

numunelerin yedi gün boyunca 18°C'de suya daldırılmasından oluşur. Daha sonra suya duyarlılık, koşullandırılmış numunelerin koşullandırılmamış numunelere göre serbest basınç dayanımının 18°C sıcaklıkta ve 1 mm/s yükleme hızındaki oranı olarak değerlendirilir (Choi, 2005). Duriez deney setleri Şekil 73'te verilmektedir.



Şekil 73. Duriez basınç deney setleri (URL-25, 2025)

2.4.3. Adezyonun Temel Bir Değer Olarak Tanımlanması

Daha önce bahsedilen deneylerin temel problemi, düşük tekrarlanabilirliğin yanı sıra soyulmanın ve sonuçların doğruluğunun belirlenmesi için görsel gözleme bağımlılıktır. Bu deney grubu, bahsedilen eksikliklerin ortadan kaldırılmasına olanak tanır.

Agreganın yüksek oranda ıslanması iyi bir adezyon için esastır ve bu yüzden temas açısı, serbest yüzey enerjisi ve türevlerinin ölçülmesi asfalt-agrega sisteminde adezyon karakterizasyonu için esastır (Pstrowska vd., 2022). Bu göstergelerin belirlenebilmesi için birçok yöntem mevcuttur.

a. Serbest Yüzey Enerjisi Karakterizasyonu

Serbest yüzey enerjisi (SFE), yeni bir yüzeyin birim alanını oluşturmak için yapılan revize edilebilir/değiştirilebilir iştir ve birimi mJ/m^2 şeklindedir (Derun ve Luo, 2019). SFE, vakumda yeni bir arayüz oluşturmak için katı veya sıvıyı ayırmak için gereken enerji olarak tanımlanır (Huang vd., 2022). Ya da SFE, vakum altında sonsuz bir malzeme kütleinde/yığınında yeni bir yüzey oluşturmak için gereken iş miktarıdır (Dalhat, 2024).

Benzer şekilde, temas halindeki iki farklı fazdan oluşan bir arayüzden iki arayüz oluşturmak için gereken serbest enerjiye, o malzemenin adezyon/yapışma işi denir (Ghabchi vd., 2013). Adezyon işi, asfalt bağlayıcının agrega arayüzünden soyulması için gereken enerjiyi yansıtır ve hem afalt bağlayıcının hem de agreganın SFE'sinin bir fonksiyonudur (Hasan vd., 2021). SFE bilgisi, asfalt-agrega yapışması, asfalt kohezyonu, asfalt betonunun nem hasarı ve direnci, asfalt karışımlarının soyulmaya karşı direnci ve asfalt yaşlanmasının etkisi vb. gibi malzemeler arasındaki etkileşimlerin incelenmesi için önemlidir (Dalhat, 2024). Bir malzemenin SFE'si genellikle iki bileşene ayrılır: Lifshitz polar olmayan bileşen (γ^{LW}) ve Lewis polar bileşeni (γ^{AB}). Lewis polar bileşeni ayrıca Lewis polar asit bileşenini (γ^+) ve Lewis polar baz bileşenini (γ^-) içerir. Bu bağlamda, *toplam SFE*, SFE bileşenleri biçiminde Denklem 49'daki gibi ifade edilebilir (Derun ve Luo, 2019):

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+\gamma^-} \quad (49)$$

Genel olarak SFE, temas açısı ölçümü ve buhar emilimi yöntemleri kullanılarak yapılır. Buna göre, bu iki yaklaşıma uygulanan Good-van Oss-Chaudhury (GvOC) modelleri sırasıyla Denklem 50 ve Denklem 51'de ifade edilir (Derun ve Luo, 2019):

$$(1 + \cos \theta)\gamma_L = 2(\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_A^+\gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_A^-\gamma_L^+}) \quad (50)$$

$$2\gamma_L + \pi_{e(SL)} = 2(\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^+\gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^-\gamma_L^+}) \quad (51)$$

Burada; γ_L deney sıvısının toplam SFE'sini, θ asfalt-deney sıvısı arasındaki temas açısını, $\pi_{e(SL)}$ agrega-deney sıvısı arasındaki yayılma basıncını ve "S", "W", "A" alt simgeleri sırasıyla agrega, su ve asfalt bağlayıcıyı ifade eder.

Adezyonun temel bir değer olarak tanımlanmasında kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmaktadır.

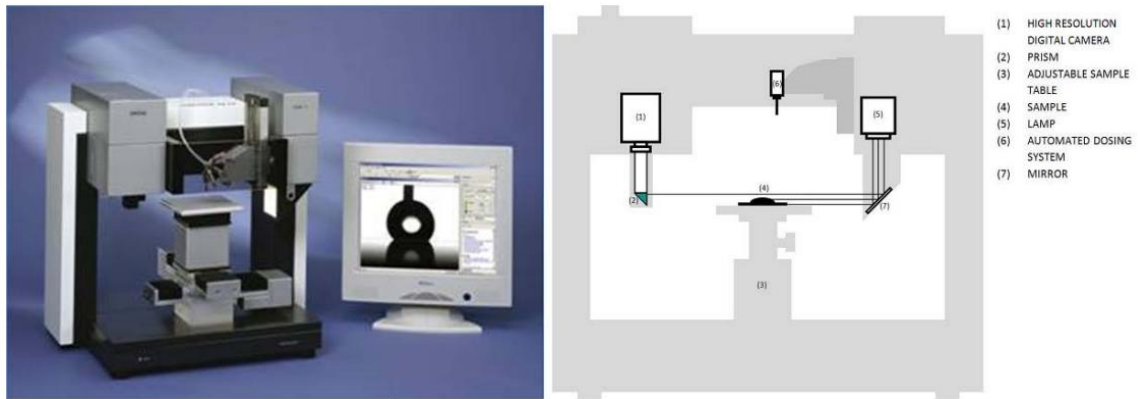
1. Temas Açısı Yöntemleri

Bitüm analizi için temas açısı ölçümü farklı şekillerde kullanılabilir: cam üzerinde bitüm damlası yöntemi, sarkan damla yöntemi ve bitüm yüzeyinde su damlası yöntemi

(Grönniger vd., 2010). Ayrıca Wilhelmy plaka yöntemi ve durağan damla yöntemi bitüm yüzeylerindeki farklı sıvıların temas açılarını ölçmek için kullanılır (Hefer ve Little, 2005b). Temas açısı yöntemleri aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

a. Cam Üzerinde Bitüm Damlası Yöntemi

Mineral agregalar kullanılarak mükemmel pürüzsüz ve kimyasal olarak homojen bir yüzey sağlamak zor olduğundan, ön/ilk deneyde cam lamalar kullanılır. Mikroskobik bir lama küçük bir bitüm damlası uygulanır ve ardından 70°C'de 30 dakika bekletilir (Grönniger vd., 2010). Daha sonra, numune oda sıcaklığına soğutulur ve damla, otomatik numune dozajlama cihazı içeren bir goniometrik düzenek olan DSA100 kullanılarak analiz edilir (Şekil 74) (Grönniger vd., 2010; Pstrowska vd., 2022). Ek olarak, ölçümler 50°C'de kısa bir süre (30 dakika) su depolandıktan sonra tekrarlanır (Grönniger vd., 2010).



Şekil 74. DSA100'ün fotoğrafı ve deney düzeneğinin şeması (Grönniger vd., 2010)

b. Sarkan Damla Yöntemi

Bu yöntem, mekanik dengede asılı bir sıvı damlasının profil belirlemesini içerir ve yerçekimi ile yüzey gerilimi/gerilmesi arasındaki denge nedeniyle ikincisi belirlenebilir. Yüzey gerilmesi, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenir. Serbest yüzey enerjisi farklı sıcaklıklarda hesaplanır ve doğrusal regresyonla ortam sıcaklığındaki serbest yüzey enerjisi tahmin edilir. Bitüm, DSA100'e sabitlenmiş bir enjektör ile alınır. Daha sonra bitüm, iğneden istenen sıcaklıkta önceden sıcaklığı ayarlanmış bir hazneye sıkılır. Mümkün olduğunca büyük oluşturulan bitüm sıvı damlası, iğne ucundan aşağı doğru sarkar. Yazılım tarafından

damla profili belirlenir ve bitümün yüzey gerilmesi, Young-Laplace denklemi kullanılarak hesaplanabilir (Grönniger vd., 2010).

Yöntem, yerçekimi kuvvetiyle deforme olmuş bir sarkıt damlanın profilinin analizine dayanır (URL-26, 2025). Sıvının yüzey serbest enerjisi, ince bir kılcal tüp veya iğneden uçtan ayrılmadan hemen önce dağıtıldığında sıvı damlasının şeklinden ölçülür (Osmari vd., 2013).

c. Bitüm Yüzeyinde Su Damlası Yöntemi

Yöntem, Grönniger vd.,'e (2010) göre aşağıdaki şekilde anlatılmıştır:

- Dendeyde kullanılacak bitüm numuneleri 100°C'ye kadar ısıtılır ve daha sonra lam üzerine sürülür/uygulanır.
- Bitüm yüzeyinin yüzey gevşemesine ve pürüzsüzleşmesine izin vermek/olanak vermek için numune 24 saat boyunca 50°C'de tutulur.
- Daha sonra numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulur ve bir su damlasının bitüm yüzeyindeki temas açısı ölçülür.
- Dozaj sisteminin iğnesi, numune yüzeyinden sadece 3 mm yukarıya hareket ettirilir.
- 5µl deiyonize su 1µl/dakika hızında çıkarılır.
- Daha sonra iğne, sadece resimde görünür kalacak şekilde kaldırılır, çünkü iğnenin standart çapı, yazılım tarafından boyut kalibrasyonu olarak gereklidir.

d. Wilhelm Plaka Yöntemi

Yöntem, son derece hassas bir teraziden asılı ince bir plakanın çok yavaş ve sabit bir hızda bir sıvıya daldırılması veya sıvıdan çekilmesi sırasında oluşan kinetik kuvvet dengesine dayanır (Hefer ve Little, 2005a). Bu kinetik kuvvet dengesine dayalı olarak asfalt bağlayıcı ile deney sıvısı arasındaki dinamik temas açısını ölçülür (Derun ve Luo, 2019). Daldırma işlemi sırasında ölçülen dinamik temas açısına *ilerleyen temas açısı* (ıslatma işlemi) denirken, geri çekme işlemi sırasında ölçülen dinamik temas açısına *gerileyen temas açısı* (ıslatmayı giderme işlemi) denir (Şekil 75) (Hefer ve Little, 2005a). Şekil 76'da gösterildiği gibi, ekipmanın mikro terazisi, plaka sabit 3 mm/dakika hızda sıvıya ilerlerken asfalt kaplı plakaya uygulanan kuvveti sürekli olarak ölçer ve deney sıcaklığı termostat tarafından $20 \pm 0,5$ °C'de kontrol edilir ve sıcaklık sensörü tarafından izlenir. Daha sonra

asfalt ile deney sıvısı arasındaki temas açısı Denklem 52'deki gibi hesaplanabilir (Derun ve Luo, 2019):

$$\theta = \arccos \left[\frac{\Delta F + abh\rho_L g}{2(a+b)\gamma_L} \right] \quad (52)$$

Burada;

θ : asfalt bağlayıcı ile test sıvısı arasındaki dinamik temas açısı,

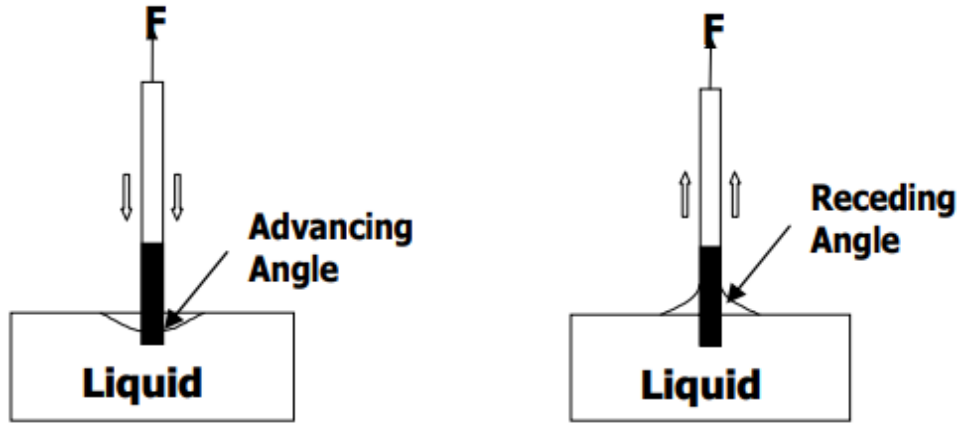
a b : asfalt kaplı plakanın genişliği ve kalınlığı,

ρ_L : sıvı yoğunluğu,

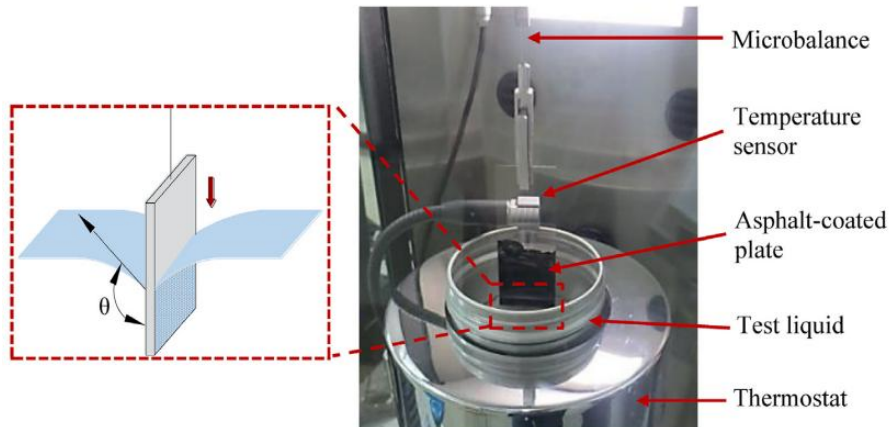
γ_L sıvı yüzey gerilmesi,

g : yerçekimi ivmesi ve

ΔF : h daldırma yüksekliğinde mikro terazinin ölçtüğü kuvvettir.



Şekil 75. Wilhelmy plaka tekniğinin şematik gösterimi (Hefer ve Little, 2005a)

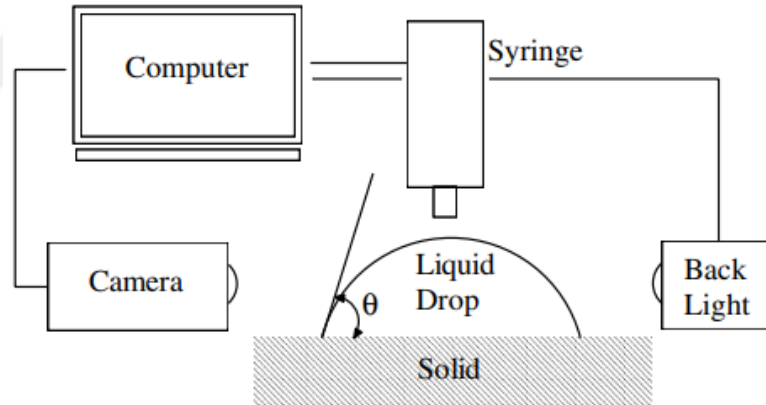


Şekil 76. Wilhelmy plaka deneyinden ölçülen dinamik temas açısı (Derun ve Luo, 2019)

Ölçülen temas açısına ve deney sıvılarının bilinen SFE bileşenlerine dayanılarak, GvOC modeli asfalt bağlayıcının SFE bileşenlerini belirlemek için kullanılır.

e. Durağan Damla Yöntemi

Düşük enerjili katılarla sıvıların temas açılarını ölçmek için kullanılan statik bir yöntemdir (Bhasin, 2006). Sıvı bir damla, mikro şırıngadan yatay olarak konumlandırılmış kaplanmış cam lam üzerine dağıtılır (Hefer ve Little, 2005b). Damlanın şekli bir kamera tarafından kaydedilir ve sıvının katı yüzeyle temas açısı, elle veya bir görüntü işleme yazılımı kullanılarak hesaplanır (Bhasin, 2006). Şekil 77’de durağan damla yönteminin şematik çizimi verilmiştir. Bu yöntemde, bilinen yüzey enerjisine sahip sıvının damla resmi, Young-Laplace denklemini kullanarak katının yüzey enerjisini hesaplamak için damlanın geometrisini ölçmek üzere hassas bir şekilde kaydedilir ve Young-Laplace denklemi Denklem 53’te verilmiştir (Bahramian, 2012).



Şekil 77. Durağan damla yönteminin şematik çizimi (Koc ve Bulut, 2014)

$$\sigma_s = \gamma_{sl} + \sigma_l \cos \theta \quad (53)$$

Burada;

σ_s : Katının yüzey gerilmesi,

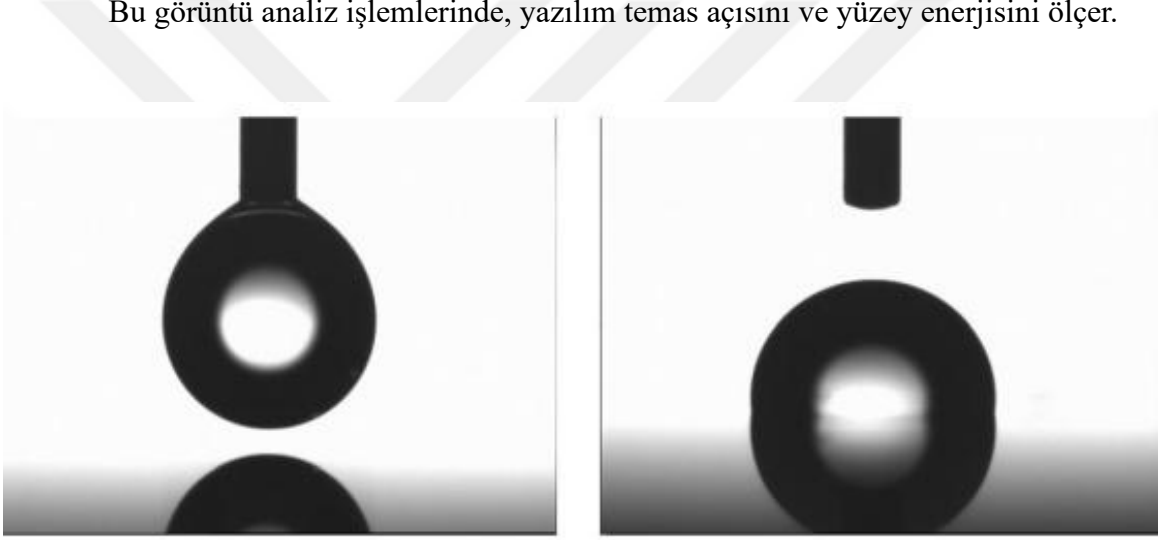
σ_l : Sıvının yüzey gerilmesi,

γ_{sl} : Katı ile sıvı arasındaki arayüz enerjisidir.

Bu deney için bitüm hazırlama süreci Bhramian’a (2012) göre aşağıda verilmiştir:

- 6 adet bitüm numunesi kutusunun sıcaklığı 145°C olarak ayarlanır.

- Film camları bitümle kaplanmadan önce, üzerlerinde toz olmadığından emin olmak için film camları gaz alevinden geçirilir.
- Camların bir tarafı bitümle kaplanır, camlardaki bitüm filminin kalınlığının mümkün olduğunca eşit tutulması önemlidir.
- Tüm lamalar nemin etkisini azaltmak için bir kurutma kabına yerleştirilir.
- Cihaz kurulduktan sonra, numuneler hassas kamera tarafından yakalanmak üzere uygun pozisyona yerleştirilir.
- Numunenin üstünde bulunan şırıngaya bağlı çok hassas bir mikro pompa ile bitümün yüzeyine küçük bir sıvı damlası konulur.
- Damlanın kaydedilen görüntüsü görüntü analiz yazılımı ile analiz edilir (Şekil 78). Bu görüntü analiz işlemlerinde, yazılım temas açısını ve yüzey enerjisini ölçer.



Şekil 78. Asfalt yüzeyindeki durağan damla (Wei ve Zhang, 2012)

2. Buhar Emilimi/Sorpsiyon Yöntemi

Buhar varlığında katı yüzeylerin enerjisi azalır ve yüzey enerjisindeki bu azalmaya *denge yayılma basıncı* denir (Hefer ve Little, 2005b). Temas açılarına benzer şekilde denge yayılma basıncı, buhar ile katı yüzey arasındaki adezyonun serbest enerjisinin hesaplanmasına olanak tanır. Buhar sorpsiyon teknikleri iki geniş kategoriye ayrılabilir (Hefer, 2004):

- 1) Bir buhar sorpsiyon izoterminin geliştirilmesine dayanan teknikler örneğin; sabit bir sıcaklık ve kısmi basınçta katı yüzeye adsorbe edilen veya desorbe edilen buhar miktarı,

2) Bir kolondan ayrıştırıldığında prob buharının yüzeyle adsorpsiyon-desorpsiyon etkileşimini kolaylaştırmak için gereken 'taşıyıcı' gaz hacmine dayanan teknikler.

İlk kategori bazen “statik” sorpsiyon ve ikinci kategori “dinamik” sorpsiyon olarak adlandırılır.

Buhar emilimi yöntemleri aşağıda sıralanmaktadır.

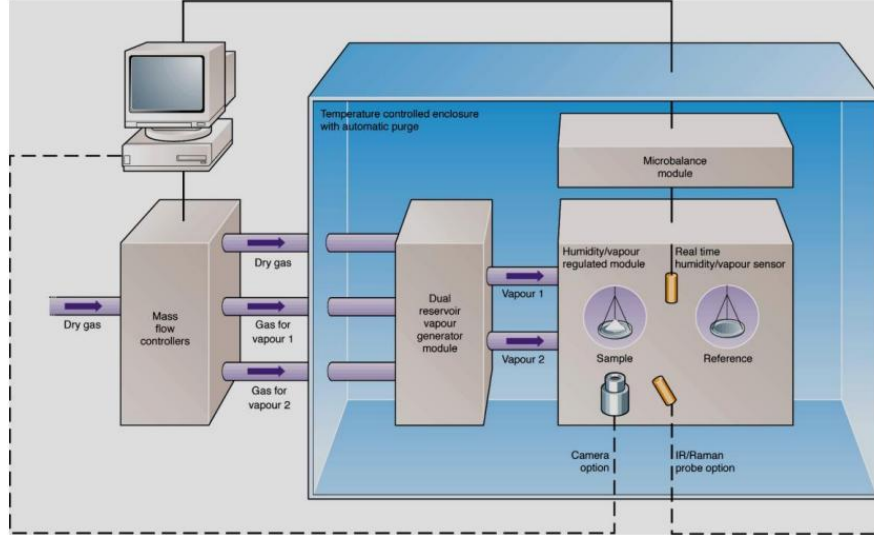
a. Vakum Statik Buhar Emilimi Yöntemi

Yöntem, Hefer ve Little’a (2005b) göre aşağıda veilmiştir:

- Deneyde kullanılan ekipman normalde son derece hassas bir manyetik süspansiyon terazisi ve teraziden ayrılmış bir numune haznesi içerir.
- Yaklaşık 20 g kütleye sahip ve 2.35 mm'den büyük ve 4.75 mm'den küçük fraksiyonlardan oluşan bir agrega numunesi, ince alüminyum ızgaradan/elekten yapılmış bir sepet içindeki ölçüm çengeline asılır.
- Seçilen sıvı maddelerin her biri, isteğe bağlı olarak/gelişigüzel bir dizi basınç seviyesine bölünen benzersiz bir saturasyon buhar basıncına sahiptir. Buhar, bir sonraki basınç seviyesine çıkmadan/ilerlemeden önce dengeye ulaşılan kadar numune haznesine kademeli olarak verilir. Bu işlem, söz konusu sıvı madde için saturasyon buhar basıncına ulaşılan kadar tekrarlanır.
- Bu şekilde, *adsorpsiyon izotermi* yani önceden belirlenmiş bir basınç seviyesinde adsorbe edilen gaz miktarı oluşturulur.
- Böyle bir izoterm, agrega numunesine adsorbe edilen her buhar için denge yayılma basıncını hesaplamak için gereken temel veridir.

b. Dinamik Buhar Emilimi (DVS) Yöntemi

Çoğu agreganın SFE’sinin nispeten yüksek (genellikle 60 mJ/m^2 ’den büyüktür) olması nedeniyle agregalar söz konusu olduğunda temas açısı tekniği kullanılamaz çünkü yaygın olarak kullanılan prob sıvıları yüksek enerjili yüzeylerde kolayca yayılır ve temas açıları sıfıra yaklaşır (Grenfell vd., 2014). Bu yüzden agregaların yüzey enerji parametrelerini belirlemek için bu yöntem kullanılır (Şekil 79).



Şekil 79. DVS cihazının şematik görünümü (Airey, 2024)

Deney aşamaları Lamperti (2011) ve Grenfell vd.'e (2014) göre aşağıda anlatılmıştır:

- Test edilecek agregalar önce deiyonize su ile yıkanır ve daha sonra 110°C'de sabit kütleye (16 saate kadar) bir etüvde kurutulur.
- Genellikle deneyler için 5 mm'yi geçen ve 2,36 mm'de tutulan agreg fraksiyonu kullanılır, ancak daha küçük boyutlu fraksiyonlar da kullanılabilir. Agreg boyutu ve ağırlığındaki üst sınır, numune haznesinin malzeme tutma kapasitesi ve mikro terazinin kapasitesi ile sınırlandırılır.
 - Prob buharları, inert bir taşıyıcı gaz yardımıyla, kontrollü sıcaklık ve kısmi buhar basıncı koşulları altında agreg numunesinden geçirilir.
 - Terazi, agreg haznesinin yüzeyine adsorbe edilen çözücü miktarını ölçer.
 - x eksenindeki prob buharının kısmi buhar basıncı ile y eksenindeki adsorplanan kütle arasında bir adsorpsiyon izotermi çizilir ve bu daha sonra yayılma basıncını ve katının özgül yüzey alanını hesaplamak için kullanılır.

Katının özgül yüzey alanı, Brunauer Emmett-Teller (BET) yaklaşımı (Denklem 54) kullanılarak belirlenir (Airey, 2024).

$$A = \left(\frac{n_m N_0}{M} \right) a \quad (54)$$

Burada;

A: Katının özgül yüzey alanı (m²),

n_m : Agrega yüzeyinde adsorbe edilen buharın tek tabaka özgül miktarı, mg (adsorban üzerindeki adsorbe çözünenin/çözünmüşün tek tabaka kapasitesi),

N_0 : Avogadro sayısı ($6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

M : Buharın moleküler ağırlığı (g/mol)

A : Buhar tek molekülünün izdüşüm veya kesit alanıdır.

Katı yüzeydeki bir tek tabakadan adsorbe edilen ve gereken buhar moleküllerinin sayısı Langmuir yaklaşımı (Denklem 55) kullanılarak belirlenir (Lamperti, 2011).

$$\frac{P}{n(P_0 - P)} = \left(\frac{c-1}{n_m c} \right) \frac{P}{P_0} + \frac{1}{n_m c} \quad (55)$$

Burada;

P : Kısmi buhar basıncı (Pa),

P_0 : Çözücünün doymuş buhar basıncı (Pa),

n : Adsorbanın yüzeyine adsorbe edilen özgül miktar (mg),

c : BET sabitidir (teorik olarak adsorpsiyonun net molar entalpisi ile ilişkili parametre).

Buhar moleküllerinin agrega yüzeyinde adsorpsiyonu, yüzey enerjisini azaltır. Yani, buhar moleküllerinin adsorpsiyonu sonucu oluşan yayılma basıncı Denklem 56'daki gibi ifade edilebilir (Lamperti, 2011):

$$\pi_e = \gamma_s - \gamma_{sv} \quad (56)$$

Her çözücü için maksimum doymuş buhar basıncında yayılma basıncı (π_e), Gibbs serbest enerji denklemi (Denklem 57) kullanılarak hesaplanır (Airey, 2024):

$$\pi_e = \frac{RT}{A} \int_0^{P_0} \frac{n}{P} dP \quad (57)$$

Burada:

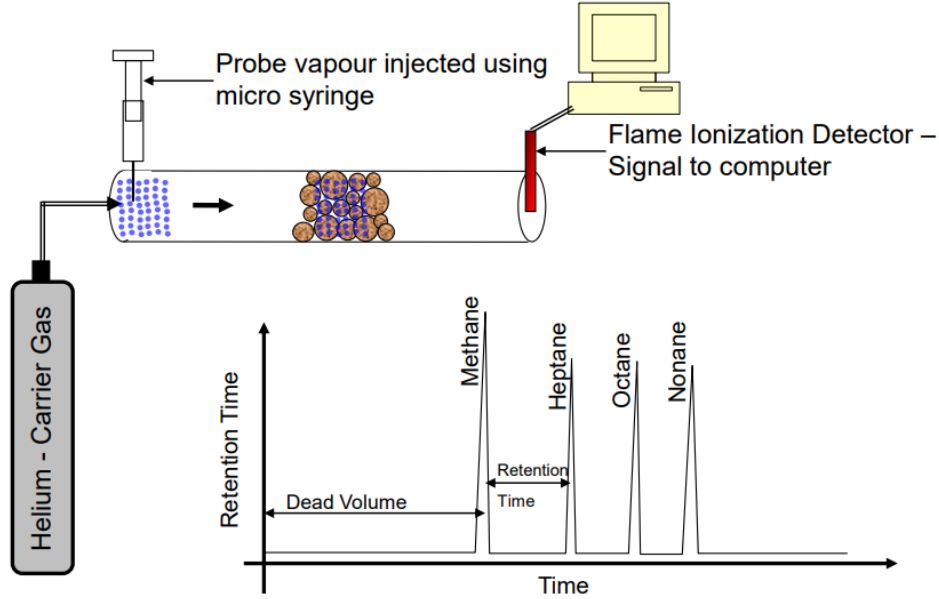
R : Evrensel gaz sabiti ($83.14 \text{ cm}^3 \text{ bar/mol.K}$)

T : Mutlak sıcaklık (K)

3. Ters Gaz Kromatografisi (IGC) Yöntemi

Gaz kromatografisi, bir karışımdaki çözünmüş maddelerin ayrılması için basit bir tekniktir. Her çözünmüş madde, kromatografik kolonda bilinen bir malzemeye (sabit faz) farklı bir etkileşime sahiptir, bu da kolon boyunca inert bir gaz tarafından taşınan farklı çözünen maddeler için farklı geçiş süreleriyle sonuçlanır (Hefer ve Little, 2005a). Her çözünenin tutulma süresi, sabit fazın doğasına ve çözünenin doğasına bağlıdır. Her çözünmüş maddenin tutulma süresi, sabit fazın doğasına ve çözünmüş maddenin doğasına bağlıdır (Hefer, 2004).

Ters gaz kromatografisinde, bilinen özelliklere sahip çözünmüş maddeler veya prob molekülleri, araştırılan malzemeye dolu bir kolon boyunca inert bir gaz tarafından taşınır (Hefer ve Little, 2005a). Kolondan geçen moleküllerin tutulma süresi, tutulma hacmiyle ilişkilidir ve bu da adezyonun (veya adsorpsiyonun) serbest enerjisiyle ilişkilidir (Şekil 80) (Hefer ve Little, 2005b).



Şekil 80. Ters gaz kromatografisi (Airey, 2024)

Net tutulma hacmi (V_N), istenen termodinamik parametrelerin belirlenebileceği miktardır ve ilgili katıyı içeren kromatografik kolondan prob molekülünü itmek için gereken taşıyıcı gaz hacmidir. Çözünmüş madde konsantrasyonu yeterince küçükse (sonsuz seyreltilmiş bir sistem olarak bilinir), o zaman bir adsorbe eden probun V_N 'si *taşıyıcı gazın*

akış hızından (D_C) ve *ölçülen net tutulma süresinden* (t_N) Denklem 58 yardımıyla hesaplanabilir (Hefer ve Little, 2005a).

$$V_N = D_C \times t_N \quad (58)$$

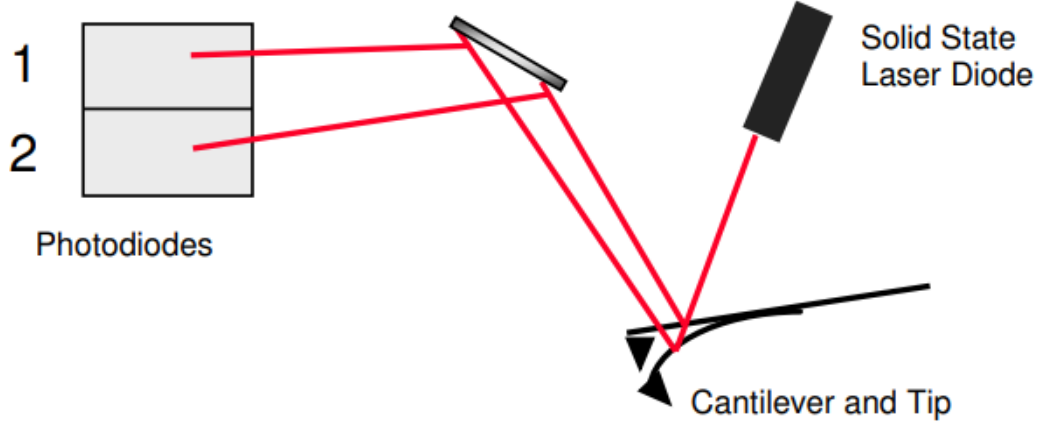
Bir probun *adsorpsiyon serbest enerjisi* (ΔG_a), Denklem 59 aracılığıyla V_N ile ilişkilidir (Hefer, 2004).

$$-\Delta G_a = RT \ln V_N \quad (59)$$

Burada, R evrensel gaz sabiti ve T ise sıcaklıktır.

4. Kuvvet Mikroskopisi Yöntemi

Çoğu teknik, temas açıları, denge yayılma basıncı ve tutma süresi gibi parametreler aracılığıyla yapışmayı dolaylı olarak karakterize ederken, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yapışmayı doğrudan ölçer (Hefer ve Little, 2005b). Bu teknikte, bir uç (30 ila 50 nm) esnek bir konsola tutturulur ve ucun yüzeye yaklaştırıldığında deneyimlediği/karşılaştığı/maruz kaldığı kuvvet, konsolu bükerek (Şekil 81) (Hefer, 2004). Daha sonra konsol kaldırılır ve uç yüzeyden çekilir. Çekme (pull-off) kuvveti adezyonun doğrudan ölçüsüdür ve adezyonun serbest enerjisiyle ilişkilidir (Hefer ve Little, 2005b). Ölçülen adezyon kuvveti veya çekme kuvveti, adezyon işinin (W_a) hesaplanması için temel parametredir. Ancak ölçülen kuvveti adezyon işine dönüştürmenin ön koşulu, konsol ucu ile alt tabaka arasındaki temas alanını bilmektir. Bu temas alanı ölçülemez ve genellikle temas mekaniği modelleri kullanılarak tahmin edilir. Derjagun-Muller-Toporov (DMT) modeli ve Johnson-Kendal-Roberts (JKR) modeli yaygın olarak kullanılır. DMT modeli, sert ve düşük yüzey enerjilerine sahip daha küçük parçacıklara uygulanabilirken, JKR modeli daha büyük parçacık yarıçaplarına ve yüksek yüzey enerjilerine sahip daha uyumlu malzemelere uygulanabilir (Hefer, 2004). Sadece kısa menzilli yüzey kuvvetlerini dikkate alan JKR modeli, yapıştırıcı bağlamanın etkisini açıkça ele alır. Uzun menzilli etkileşimleri içeren DMT modeli, adezyon kontrollü uyumluluk etkilerini doğru bir şekilde değerlendirmez (Thomas vd., 1995). Denklem 60 ve 61, adezyon kuvveti değerlerinden adezyon işini elde etmek için kullanılır (Hefer, 2004).



Şekil 81. Genel AFM uç sapması ölçümü (Hefer, 2004)

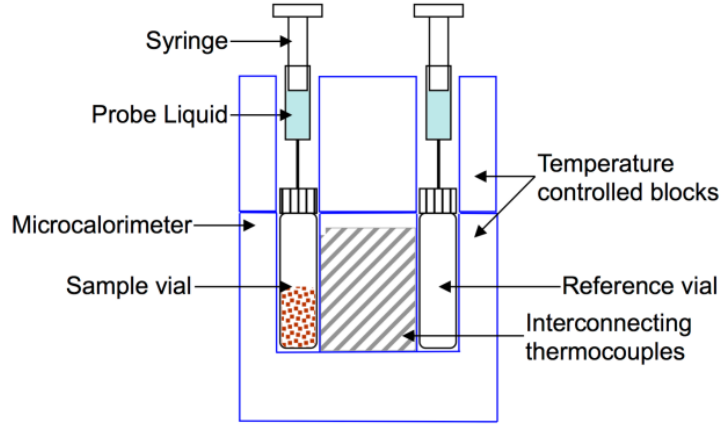
$$\text{DMT Modeli: } F_a = 2\pi RW \quad (60)$$

$$\text{JKR Modeli: } F_a = \frac{2}{3}\pi RW \quad (61)$$

Burada; F_a adezyon kuvveti veya ölçülen çekme kuvveti, R parçacık yarıçapı ve W adezyon işidir.

5. Mikrokaleorimetre Yöntemi

Yöntem, sorpsiyon ısılarını doğrudan ölçmek için kullanılan nispeten basit bir tekniktir ve daldırma entalpisi biçiminde katı-sıvı veya sıvı-sıvı etkileşiminin toplam enerjisini ölçmek için kullanılabilir (Şekil 82) (Hefer ve Little, 2005b; Miller vd., 2011). Aslında, agregalar bitümle temas ettirilir ve etkileşim sırasında ve zamanla açığa çıkan enerji hassas bir mikrokaleorimetre ile ölçülür (Hefer ve Little, 2005b). Bu yaklaşım esasen entalpiyi, yani söz konusu toplam enerjiyi karakterize eder. Bu özelliği farklı polaritelere sahip sıvılar kullanılarak ölçmek mümkün olsa da adezyonun (veya adsorpsiyonun) serbest enerjisinin belirlenmesi, Denklem 61'de tanımlandığı gibi entropi teriminin nicelleştirilmesini gerektirir (Hefer ve Little, 2005b).



Şekil 82. Mikrokalemetrenin çalışma prensibini gösteren şema (Miller vd., 2011)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (61)$$

Adezyon entalpisi Denklem 62’de verilmiştir (Hefer, 2004).

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S = \Delta G - T \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right) \quad (62)$$

Young Denklemi, Denklem 63’te verilmiştir (Hefer, 2004).

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (63)$$

Islatma deneyinde, daldırma serbest enerjisi Denklem 64’te verilir (Hefer, 2004).

$$\Delta G_i = \gamma_{SL} - \gamma_{SV} \quad (64)$$

Denklem 64, Denklem 62’de yerine konulursa Denklem 65 elde edilir.

$$\Delta H = \gamma_{LV} \cos \theta - T \left(\frac{\partial (\gamma_{LV} \cos \theta)}{\partial T} \right) \quad (65)$$

Denklem 65, ıslatma daldırma kalorimetrisinden temas açısının veya adezyon entalpisinin hesaplanabileceği anlamına gelir (Hefer, 2004). Bu teknik, söz konusu sıcaklıklarda entropi teriminin ihmal edilebilir olduğu kanıtlanırsa düşünülebilir (Hefer ve Little, 2005b).

6. Elektrofrez-Zeta Potansiyeli Yöntemi

Elektrik alanında hareket halindeki yük parçacıklarının incelenmesine *elektroforez* denir (Hefer ve Little, 2005b). Elektroforezler, nem hasarını veya soyulmayı açıklamak için bitüm-agrega sistemlerine uygulanabilir. *Zeta potansiyeli*, esasen yüzey yükü, bu deneylerden elde edilen ana özelliktir. Zeta potansiyeli deneyi, önemli ölçüde daha kısa dönüş süreleriyle geleneksel adezyon deneylerine alternatif olarak hareket etme potansiyeline sahiptir (Nomlala vd., 2022).

7. Blister/Kabarcık (Arayüz Kırılma Enerjisi-IFE) Yöntemi

Yöntem, bağlayıcı film elastikiyet modülünü ve yapıştırıcı mukavemetine karşılık gelen arayüz kırılma enerjisini belirlemeye olanak tanır. Deneyin prensibi yapıştırıcı ile yapışan arasındaki arayüze basınç uygulayarak arayüz bağı kırma işlemidir (Pstrowska vd., 2022). Bağlanmadan önce ve sırasında yapıştırıcının basınç miktarı ve deformasyonu IFE'yi hesaplamak için kullanılır. Kaplamayla ilgili alanlarda, deney, su veya nem varlığında bitüm ve agregaların adhezif bağ mukavemetinin nicel değerlendirmesi için olası yaklaşımlardan biri olarak tanımlanır (Jakarni, 2012).

Ayrıca önceki bölümde bahsedilen Yüzey Reaksiyon, Net Adsorpsiyon ve Modifiye Net Adsorpsiyon (bkz. 2.4.3.1 başlığı altında) Metodları Adezyonun Temel Bir Değer Olarak Tanımlanmasında da kullanılırlar.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan malzemeler olan mineral agrega, bitüm ve elyaf hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1. Bitüm

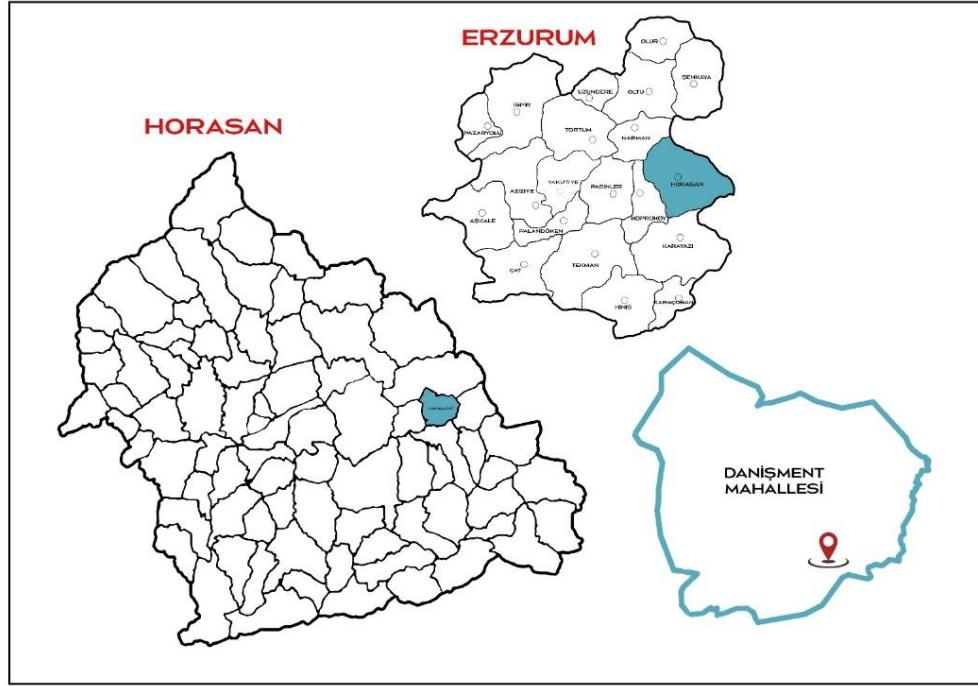
Karışım tasarımında bağlayıcı olarak Kırıkkale Tüpraş Rafinerisinden temin edilen B50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır.

3.1.2. Mineral Agrega

Çalışmada, Erzurum ve Ağrı illerinde bulunan 4 taş ocağından bazalt numuneleri edilmiştir. Taş ocaklarına ait yer bulduru haritaları, uydu görüntüleri ve ocak fotoğrafları sırasıyla Şekil 83-94'te verilmiştir.



Şekil 83. İllere ait yer bulduru haritası



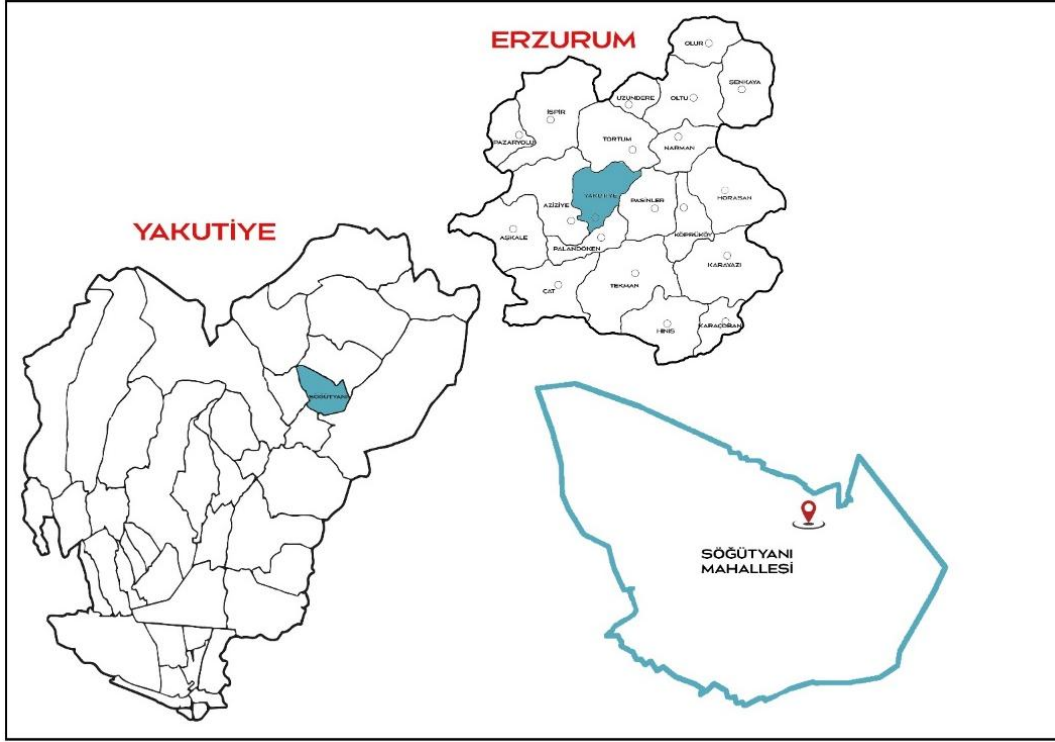
Şekil 84. 1 numaralı taş ocağına (TO1) ait yer bulduru haritası



Şekil 85. 1 numaralı taş ocağına (TO1) ait uydu görüntüsü ve çalışma alanı



Şekil 86. 1 numaralı taş ocağının (TO1) mevcut görüntüsü



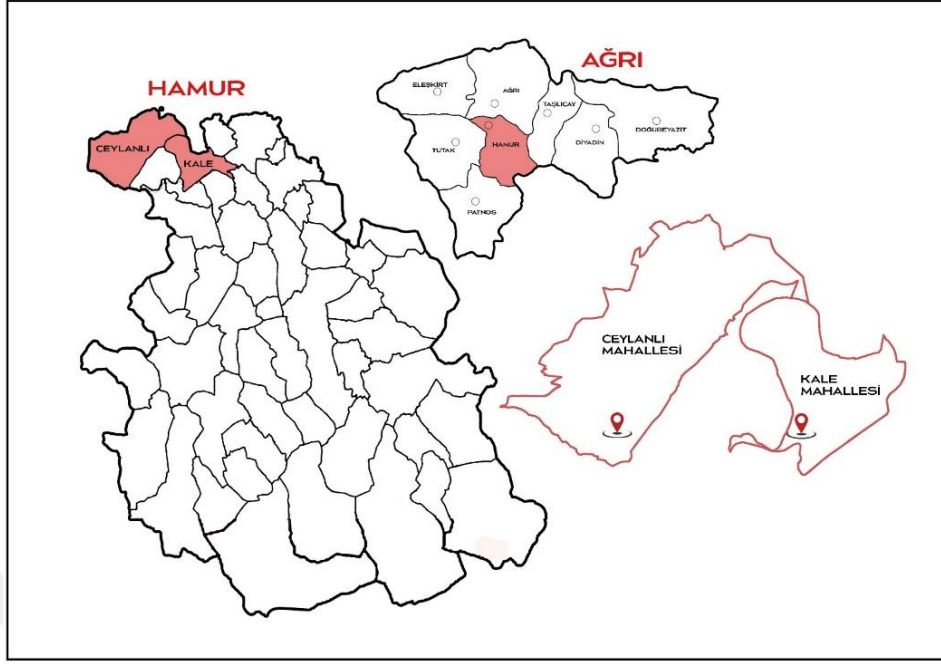
Şekil 87. 2 numaralı taş ocağına ait (TO2) yer bulduru haritası



Şekil 88. 2 numaralı taş ocağına ait (TO2) uydu görüntüsü ve çalışma alanı



Şekil 89. 2 numaralı taş ocağının (TO2) mevcut görüntüsü



Şekil 90. 3 ve 4 numaralı taş ocaklarına (TO3 ve TO4) ait yer bulduru haritası



Şekil 91. 3 numaralı taş ocağına (TO3) ait uydu görüntüsü ve çalışma alanı



Şekil 92. 3 numaralı taş ocağının (TO3) mevcut görüntüsü



Şekil 93. 4 numaralı taş ocağına (TO4) ait uydu görüntüsü ve çalışma alanı



Şekil 94. 4 numaralı taş ocağının (TO4) mevcut görüntüsü

3.1.3. Elyaf

Bitüm oranı yüksek olan TMA karışımların hazırlık, yapım ve sıkıştırma işlemleri sırasında bitümün kusmasını ve/veya karışımdan ayrılmasına engel olmak için elyaf ilavesi gerektiğinden çalışmada; Viatop Premium kullanılmıştır (Şekil 95). Viatop Premium, ağırlıkça %90 ARCOBEL® ZZ8/1 ve ağırlıkça %10 bitüm 50/70'in pelet haline getirilmiş bir karışımdır. Viatop, agregaya karışımına dâhil edilmeden önce öğütülmüştür.

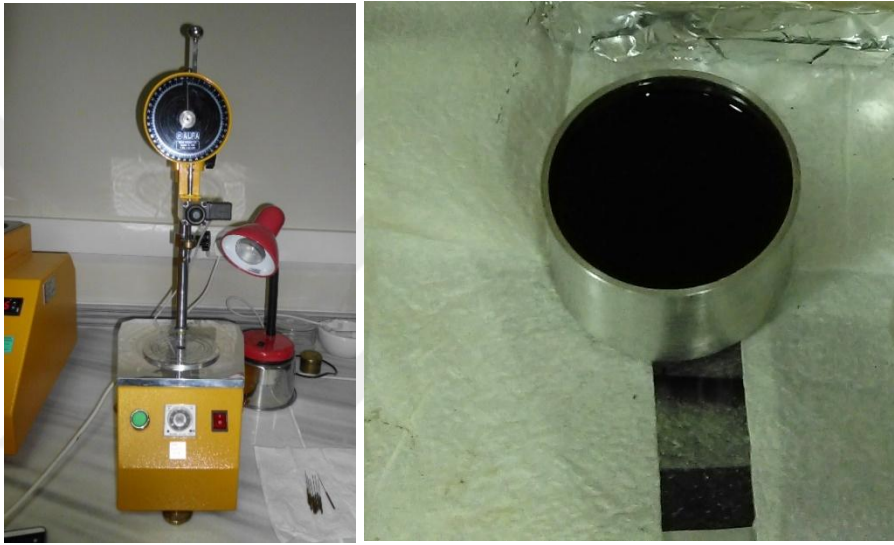


Şekil 95. Çalışmada kullanılan elyaf (Viatop Premium)

3.2. Deneysel Çalışmalar

3.2.1. Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi

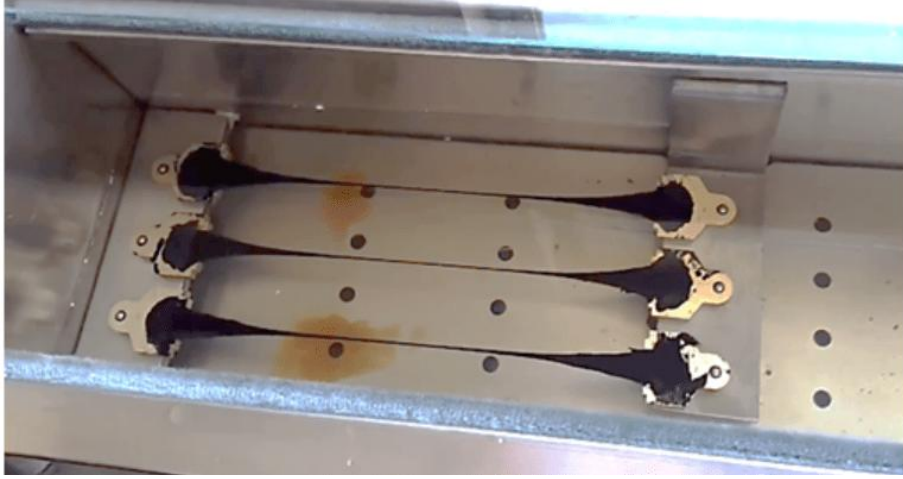
Çalışma kapsamında hazırlanmış olan AB ve TMA aşınma karışımlarında kullanılan bitümün özelliklerinin belirlenebilmesi için penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, düktilite, parlama noktası, çözünürlük ve özgül ağırlık deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait görseller, sırasıyla Şekil 96-101’de verilmiştir.



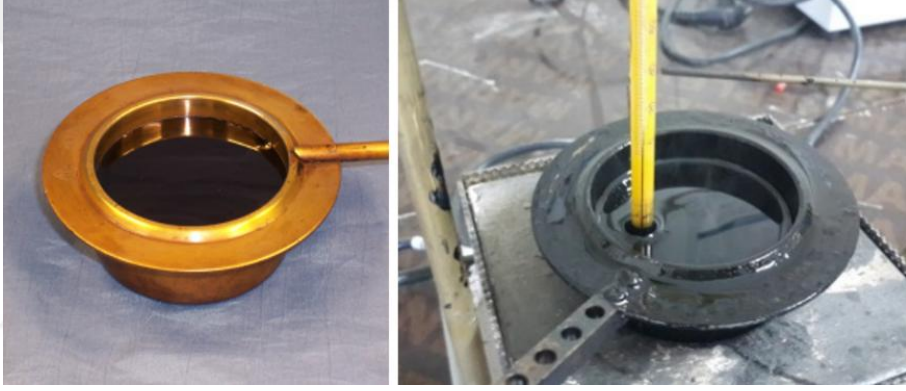
Şekil 96. Penetrasyon Deneyi Cihazı



Şekil 97. Yumuşama noktası deneyi



Şekil 98. Düktilite deneyi



Şekil 99. Parlama noktası deneyi



Şekil 100. Çözünürlük deneyi



Şekil 101. Özgöl ağırlık deneyi

3.2.2. Agrega Özelliklerinin Belirlenmesi

Ocaklardan toplanan kayaç numuneleri ilk olarak laboratuvar ortamında mobil çeneli kırıcı ile kırılmış ve sonrasında elenerek istenilen çaptaki sınıflara ayrılmıştır (Şekil 102-103). Karışımlarda kullanıma hazır hale gelen agregaların mineralojik-petrografik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla aşağıdaki analizler ve deneyler gerçekleştirilir:

- Mikroskopik tanımlama (mineralojik değerlendirme),
- X-ışını floresans spektrometresi,
- Los Angeles parçalanma direnci deneyi,
- Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi,
- Cilalanma deneyi,
- Metilen mavisi deneyi,
- Yassılık indeksi deneyi,
- Kaba ve ince agrega için özgül ağırlık ve su emme deneyi,
- Mineral filler için özgül ağırlık deneyi.

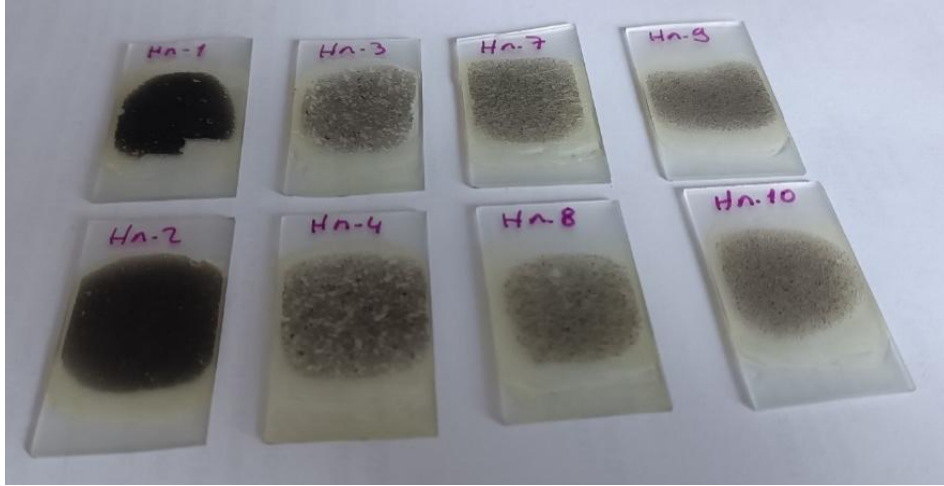


Şekil 102. Ocaklara ait kayaç numunelerini kırma işlemleri



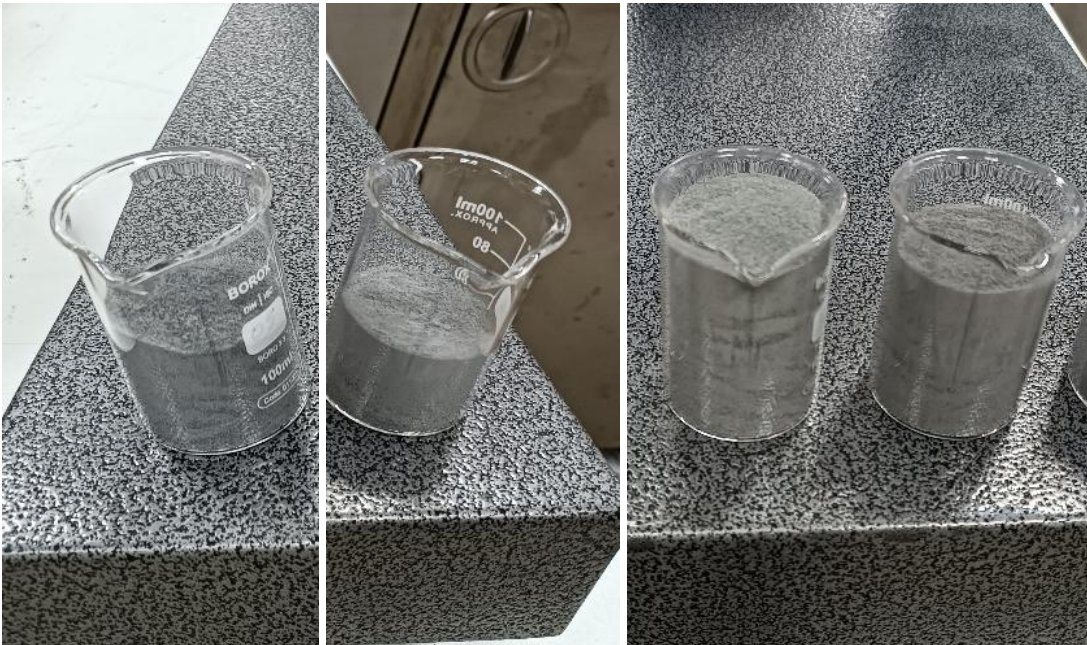
Şekil 103. Ocaklara ait kayaç numunelerinin eleme işlemleri

Kayaç numunelerinin ince kesitleri Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde hazırlanmıştır. 4 ocağa ait kayaç numuneleri için 8 adet (2şer) ince kesit hazırlanmıştır (Şekil 104).



Şekil 104. Kayaç numunelerinden hazırlanan ince kesitler

Kayaç numunelerinin kimyasal analizleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. 4 adet örnek 105°C'de 1 gece kurutulduktan sonra herhangi bir katkı maddesi eklenmeden pellet olarak hazırlanmıştır. Ancak pelletlerin kenarında çatlama olduğundan 01-04 kodlu örnekler 10mm'lik tutucuda çalışılmıştır. Bor-Uranyum aralığında yarı niceliksel olarak metal formunda çalışılmış ve sonuçlar metal ve oksit olarak hazırlanmıştır (Şekil 105).



Şekil 105. Kimyasal aniliz için hazırlanan kayaç numuneleri

Fiziksel deneylere ait görseller, sırasıyla Şekil 106-113'te verilmiştir.



Şekil 106. Los Angeles deney aşamaları



Şekil 107. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney aşamaları



Şekil 108. Cilalanma deneyi



Şekil 109. Metilen mavisi deney aşamaları



Şekil 110. Yassılık indeksi deneyi



Şekil 111. Kaba agregâ özgül ağırlık ve su emme deney aşamaları



Şekil 112. İnce agregâ özgül ağırlık ve su emme deneyi



Şekil 113. Mineral filler özgül ağırlık deneyi

3.2.3. Marshall Yöntemi ile AB ve TMA Aşınma Karışımlarının Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi

Temin edilen agregaya numunelerine uygulanan deneyler sonrasında AB ve TMA aşınma Marshall dizaynı yapılmıştır. Bu amaçla ilk olarak elek analizleri yapılmış ve bu elek serilerinin ortalamalarından aşınma tabakaları için agregaya karışım yüzdeleri ve gradasyonu bulunmuştur.

Karayolları teknik şartnamesi gradasyon şartname limitleri sınırlarında hazırlanan ve 160 - 165°C ısıtılan agregaya, 150 - 155 °C sıcaklıkta bitüm ilave edilmiştir. Bitüm miktarı %4.5 - %6.5 aralığında olan sıcak karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan bitümlü sıcak karışımlardan otomatik Marshall tokmağı ile AB numuneleri için 75 darbe sayısında 140 - 145°C'de, TMA numuneleri için 50 darbe sayısında 150 - 155°C'de sıkıştırılmış briketler hazırlanmıştır. Gradasyonu belli her bir karışımın ağırlığı 1150 g olan toplamda 15 adet briket deneye tabi tutulmuştur. Yapılan sıcak karışım dizaynında; optimum bitüm, yoğunluklar, boşluk, agregalar arası boşluk, teorik özgül ağırlıklar ile bu briketlerin Marshall stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında bitümlü sıcak karışımlardan aşınma tabakaları için ayrı ayrı örnek dizaynlar oluşturulmuştur. Deney aşamaları Şekil 114'te verilmiştir.





Şekil 114. Marshall dizayn yöntemi ile sıcak karışımların optimum bitüm içeriğini belirleme aşamaları

YG AB ve TMA karışımlarının optimum bitüm içerikleri belirlendikten sonra TMA karışımlar için Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2023) göre süzülme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 115).



Şekil 115. Beher metodu ile bitüm süzülme deneyi aşamaları

3.2.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi

YG-AB ve TMA aşınma karışımlarının optimum bitüm oranlarının belirlenmesinden sonra TMA karışımlar için bitüm süzülme deneyi yapılmıştır. Ardından her bir karışım için mekanik deneylerin uygulanması için 15'er Marshall briketi hazırlanmıştır. Üretilen briketlerin yükseklikleri, havadaki ağırlıkları, sudaki ağırlıkları ve doymun yüzey ağırlıkları ölçülmüştür. Briketlere, indirekt çekme mukavemeti deneyi, su hasarı (modifiye Lottman) deneyi, tekrarlı yük sünme deneyi ve yarım daire eğilme deneyi yapılmıştır.

İndirek Çekme Mukavemeti Deneyi: Deneyde kullanılmak üzere üçer adet özdeş Marshall briketi hazırlanmıştır. Numuneleri koşullandırmak için, numuneler ilk olarak briketler vakum piknometresi ile %70-80 arasında suya doymun hale getirilmiştir (Şekil 116). Daha sonra numuneler plastik bir filmle sıkıca kapatılmış ve 10 ± 5 ml su içeren plastik bir torbaya yerleştirilmiştir. Ardından briketler, -18°C 'de 20 saat soğutucuda bekletilmiştir. Daha sonra bu numuneler, 60°C 'lik su banyosunda 24 saat ve sonrasında 2 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numuneler, 24 saat süreyle 0°C 'lik buzdolabında bekletilmiştir. Koşullandırma işlemleri tamamlanan numuneler Marshall stabilite cihazına entegre edilen dolaylı çekme başlığı ile 50 mm/dk hızda kırılmıştır. Deney aşamaları Şekil 117'de verilmiştir.



Şekil 116. Briketlerin suya doyurulması işlemi





Şekil 117. İndirekt çekme dayanımı deney aşamaları

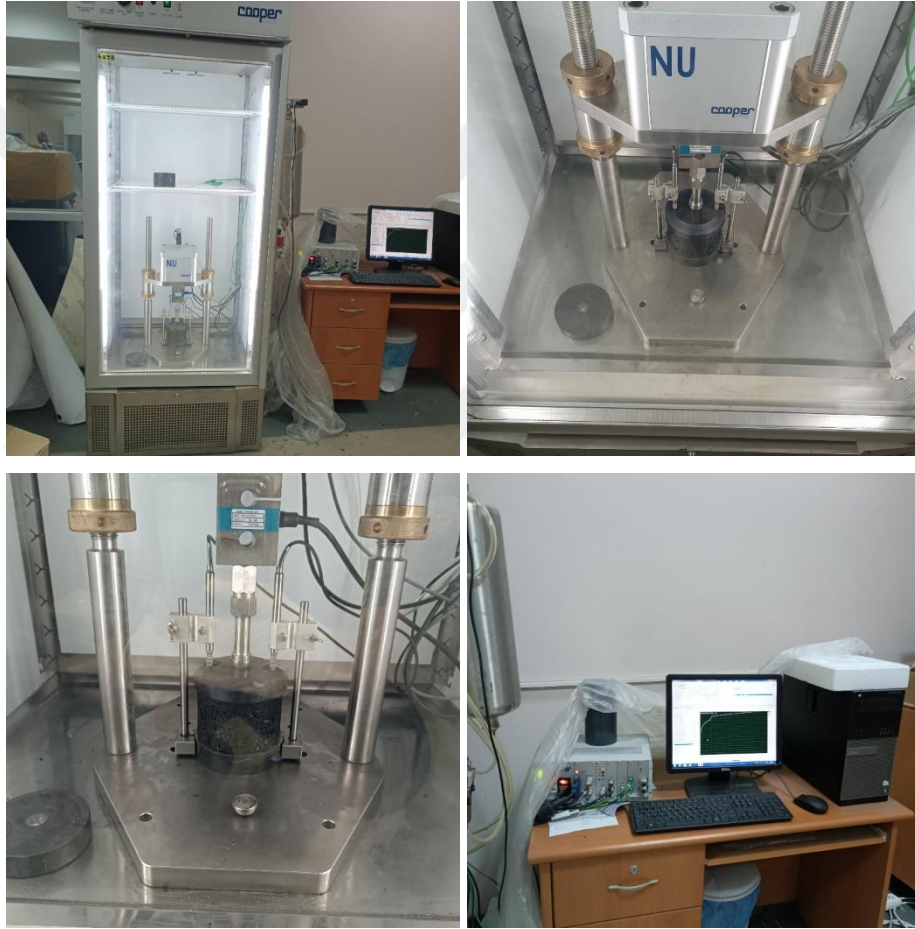
Su Hasarı (Modifiye Lottman) Deneyi: Deneyde kullanılmak üzere altışar adet Marshall briketi hazırlanmıştır. Bunlar iki gruba (koşulsuz ve koşullu olmak üzere) ayrılmış ve 3'er adet numune vakum aracılığıyla damıtılmış suya doymun hale getirilmiştir. Ardından, doymun numuneler 16 saat süreyle -18°C 'deki soğutucuya bırakılmıştır. Soğutucudan çıkarılan numuneler, 60°C 'deki su banyosunda 24 saat süreyle bekletilmiştir. Koşullandırılmamış 3'er adet numune ve koşullandırılmış numuneler 25°C 'deki su banyosunda 2 saat bekletilmiş ve numuneler dolaylı çekme mukavemeti deneyine tabi tutulmuştur. Deney aşamaları Şekil 118'de verilmiştir.



Şekil 118. Su hasarı (modifiye Lottman) deneyi aşamaları

Tekrarlı Sünme Deneyi: Üretilen briketlerin (3'er adet) deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Briketler istenen sıcaklıkta $\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilmiş ve deney sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Briketlerin gerçek sıcaklıkları ölçülemediği için briketler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat bekletildikten sonra

deneye tabi tutulmuştur. Deney 40°C 'de 10000 döngü ile gerçekleştirilmiştir. Yarı sinüzoidal ön hazırlık gerilmesi 1sn'lik periyotta 0,1 sn yüklü ve 0,9 sn yüksüz olacak şekilde uygulanmıştır. Ön hazırlık sonunda geri dönen düşey deformasyon ölçülmüş ve buradan da elastisite modülü hesaplanmıştır. Ön hazırlık yükünün sıfıra inmesi ile, $\pm 2\%$ 'lik hata ile tekrarlı yük uygulanmıştır. Tüm yükleme süresince düşey deformasyonlar kaydedilmiştir. Tekrarlı yükün ardından, geri dönen deformasyonun ölçülmesi için ilave bir 60 dakika yük uygulanmaksızın düşey yer değiştirmeler ölçülmüştür. Deney aşamaları Şekil 119'da verilmiştir.



Şekil 119. Tekrarlı sünme deneyi aşamaları

Yarım Daire Eğilme Deneyi (SCB): Deneyde kullanılmak üzere 3'er adet briket hazırlanmıştır. Bu briketler, daha sonra numunenin orta çapı boyunca kesilerek iki yarım daire elde edilmiştir (Şekil 119-120). Kesilen numuneler -20°C 'de 24 saat bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur (Şekil 120-123).



Şekil 120. Numunelerin orta çapının belirlenmesi ve kesilmesi



Şekil 121. Kesilmiş numuneler



Şekil 122. Soğutucuda bekletilen numuneler



Şekil 123. SCB numunelerinin deneye tabi tutulması

4. BULGULAR VE İRDELEME

4.1. Bitüme Uygulanan Deney Sonuçları

Bitümün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Tablo 44'te verilmiştir.

Tablo 44. Bitümün fiziksel özellikleri

Deney	Standart	Sonuçlar	Şartname Limitleri
Penetrasyon (25°C) (0.1 mm)	TS EN 1426	62	50-70
Yumuşama Noktası (°C)	TS EN 1427	52	46-54
Düktilite (25°C) (mm)	ASTM D-113	100+	
Parlama Noktası (°C)	TS EN ISO 2592	240	≥ 230
Çözünürlük (%)	TS EN 12592	99.8	≥ 99.0
Özgül Ağırlık (25°C)	ASTM D 70	1,029	

Bitüme uygulanan deneyler vasıtasıyla elde edilen sonuçların Karayolları Teknik Şartnamesi limitlerini sağladığı görülmüştür.

4.2. Agregalara Uygulanan Deney Sonuçları

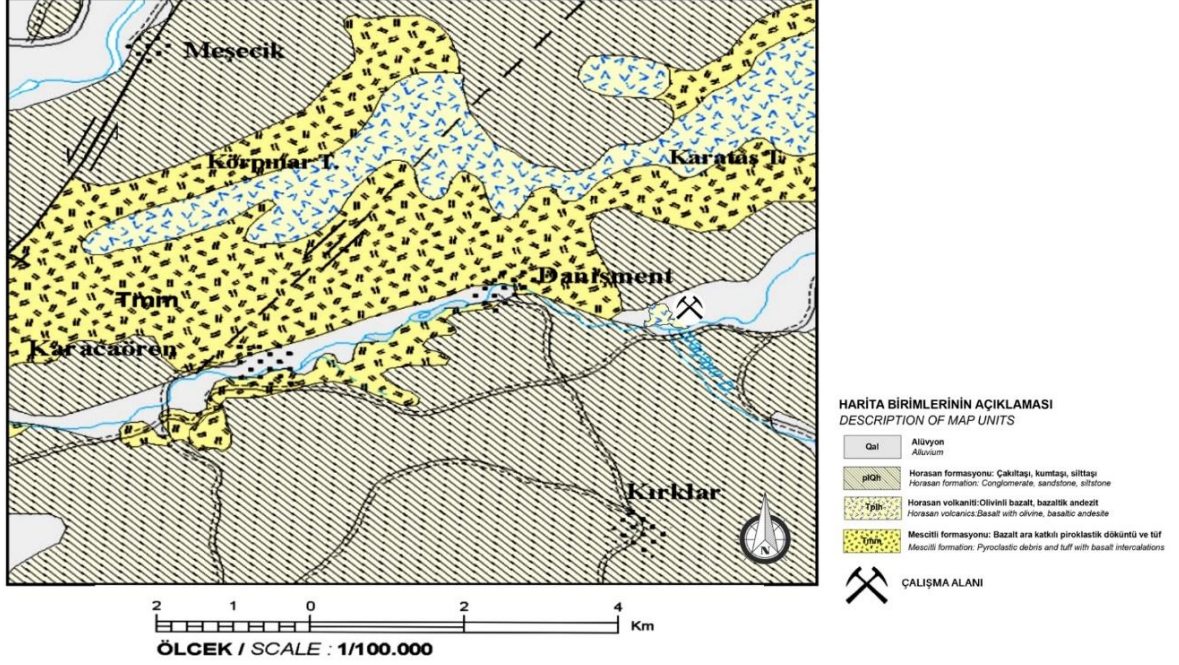
4.2.1. Mineralojik-Petrografik Analiz Sonuçları

İlk olarak, çalışma kapsamında kullanılan agregaların temin edildiği ocakların jeolojik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Taş Ocağı 1 (TO1): Erzurum ili Horasan ilçesi Danişment Mahallesi Kotan mevkiinde bulunan 1 numaralı taş ocağı, Erken Pliyosen yaşlı volkanitlere ait Horasan volkaniti (Tplh) formasyonu içerisinde bulunmaktadır.

Bazalt-bazaltik andezit bileşimli siyah-koyu renkli afiritik lav akıntılarından oluşan bu formasyon, Keskin (1998) tarafından tanımlanmıştır. Tipik olarak Süphan Dağı'nda (Horasan) yüzeyleme veren birim siyah-koyu gri renkli, gözenekli ve yer yer sütunsal yapıya sahiptir. Vitrofirik, hyalopilitik, intersertal ve nadiren mikroporfiritik ve kümülüs

sergileyen lavlar, plajiyoklas, olivin ve klinopiroksen fenokristalleri içerir (Konak ve Sümengen, 2009a). Taş ocağının bulunduğu alanın jeoloji haritası Şekil 124'te verilmiştir.



Şekil 124. 1 numaralı taş ocağının bulunduğu bölgenin 1/100 000 ölçekli jeoloji haritası (Konak ve Sümengen, 2009b'den değiştirilerek alınmıştır)

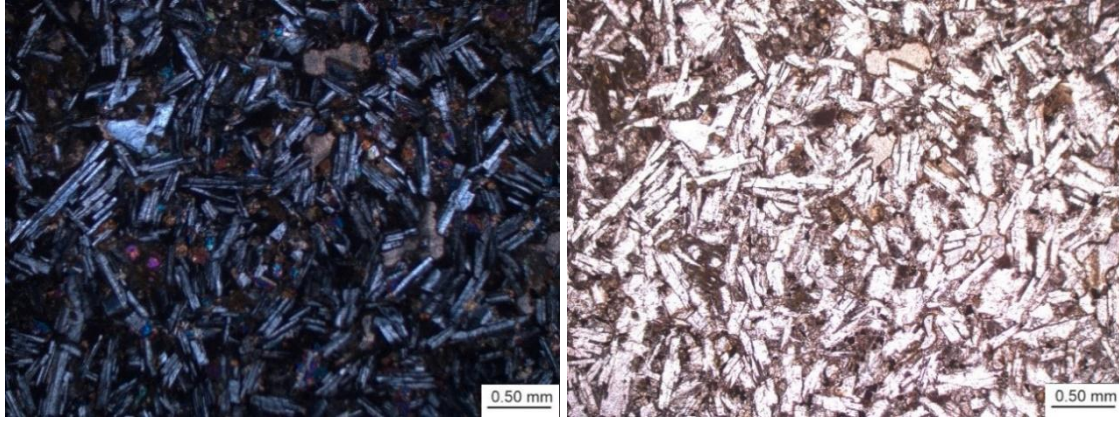
1 numaralı taş ocağına ait ince kesitlerin incelenmesiyle aşağıdaki sonuçlara varılmıştır (Şekil 125):

Mineraller:

- Plajiyoklas (kısa latalar şeklinde gözlenmekte olup, albit ikizi sunarlar)
- Klinopiroksen (plajiyoklas latalarının arasını doldurmuştur)
- Olivin (kenarlarında ve çatlaklarından itibaren iddingsitleşme göstermekte olup, plajiyoklas latalarının arasını doldurmuştur)
- Opak mineral (hamur içerisinde özşekilsiz kristaller halinde bulunur)
- Yer yer boşluk dolgusu olarak ikincil karbonat gözlenmiştir

Doku: İntersertal

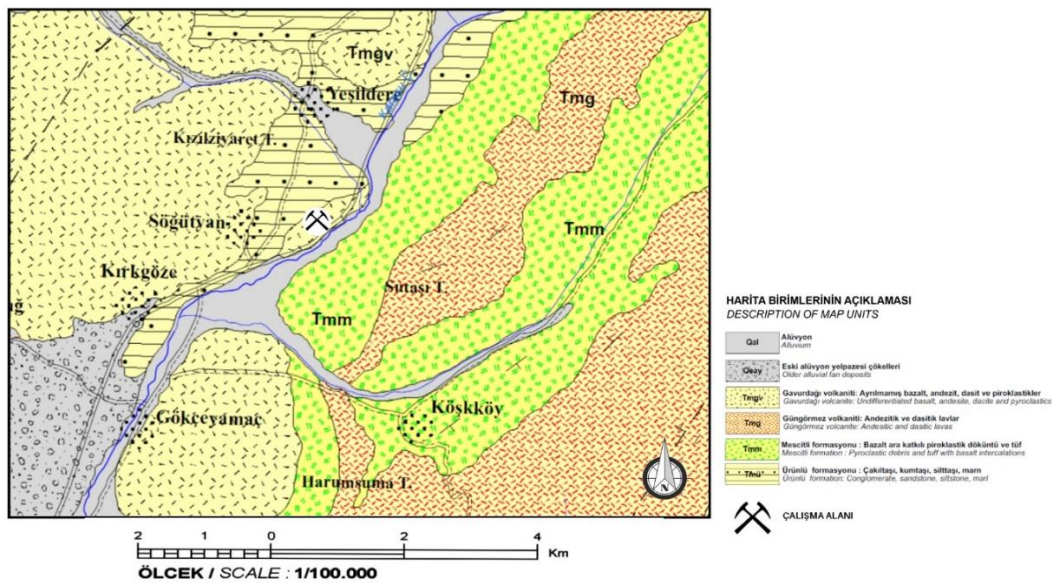
Kayaç adı: **Olivin-ojit bazalt**



Şekil 125. 1 numaralı taş ocağına ait ince kesit görüntüleri

Taş Ocağı 2 (TO2): Erzurum ili Yakutiye ilçesi Söğütyanı mahallesi Kayalık Tepesi mevkiinde bulunan 2 numaralı taş ocağı, Geç Miyosen yaşlı Gavurdağı Volkaniti (Tmgv) (ya da Erdavut Volkaniti) formasyonu içerisinde bulunmaktadır.

Formasyon; Keskin (1994) tarafından çeşitli bazaltik, andezitik, trakiandezitik ve dasitik volkanik ve piroklastik kayalar şeklinde ayrıtılırken Konak vd. (2001) tarafından gri, mor, kahve, yeşilimsi siyah renkli bazaltik kayalar, andezitik-dasitik lav ve piroklastikler şeklinde tanımlamıştır (Yılmaz ve Yılmaz, 2016; Konak ve Sümengen, 2009a). Ayrıca formasyonun andezit, bazaltik andezit ve bazaltik lavlardan oluştuğu da belirtilmiştir (Atar ve Kopar, 2020). Taş ocağının bulunduğu alanın jeoloji haritası Şekil 126'da verilmiştir.



Şekil 126. 2 numaralı taş ocağının bulunduğu bölgenin 1/100 000 ölçekli jeoloji haritası (Sümengen, 2011)

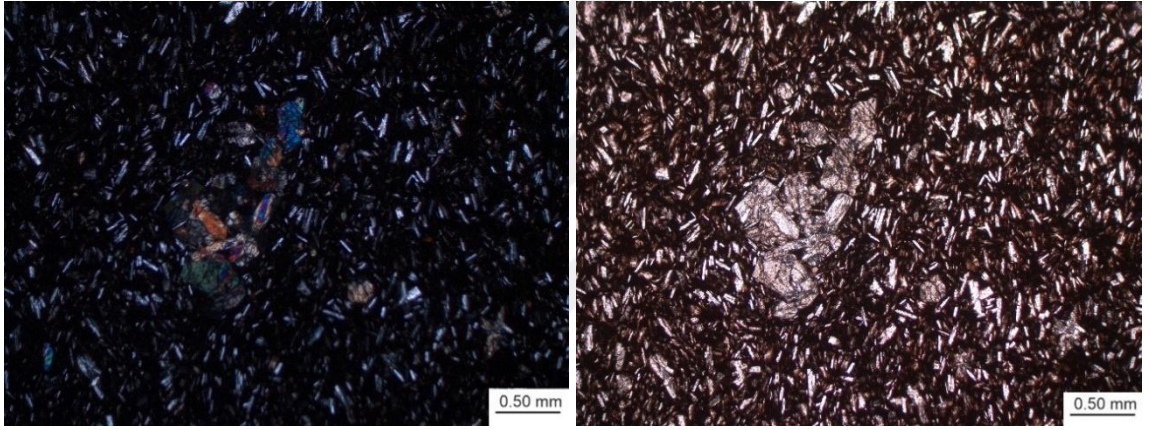
2 numaralı taş ocağına ait ince kesitlerin incelenmesiyle aşağıdaki sonuçlara varılmıştır (Şekil 127):

Mineraller:

- Plajiyoklas (mikrofenokristal lataları ve mikrolitler halinde gözlenirler, bazı mikrofenokristaller elek dokusu ve yenme gösterirler)
- Klinopiroksen (glomeroporfirik doku sunarlar)
- Hamur (devitrifiye olmuş cam ve mikrolitlerden oluşur)
- Opak mineral (hamur içerisinde özşekilsiz kristaller halinde bulunur)

Doku: Yer yer glomeroporfirik, genelde mikrolitik porfirik, hyalomikrolitik porfirik

Kayaç adı: **Bazaltik andezit**



Şekil 127. 2 numaralı taş ocağına ait ince kesit görüntüleri

Taş Ocağı 3 (TO3): Ağrı ili Hamur ilçesi Kale mahallesi Abdi Düzü mevkiinde bulunan 3 numaralı taş ocağı Geç Pliyosen-Pleyistosen yaşlı Tutak Volkaniti (plQtu) içerisinde yer almaktadır.

Gri, siyah, şarabi renkli, akma yapılı, yer yer cüruf, bazalt ve bazaltik andezitten oluşan birim, Türkecan vd. (1992) tarafından adlandırılmıştır (Keskin ve Dönmez, 2013). Fenokristal plajiyoklas ve olivin içerir. Taş ocağının bulunduğu alanın jeoloji haritası Şekil 128’de verilmiştir.

Taş Ocağı 4 (TO4): Ağrı ili Hamur ilçesi Ceylanlı mahallesi Abdikalesi Tepesi mevkiinde bulunan 4 numaralı taş ocağı Orta-Geç Miyosen yaşlı Sekirdağ Volkanitleri (Tms) içerisinde yer almaktadır.

Daist, andezit, tuf ve aglomeradan oluşan birim, Türkecan vd. tarafından adlandırılmıştır. Sekirdağ volkanitleri andezitik ve dasitik türdeki lavlar (Tmsl), piroklastik kayalar (Tmsp) olarak ayırtlanmıştır (Keskin ve Dönmez, 2013). Andezitik ve dasitik lav birimi; pembe-gri renkli, ince kristalli ve sert olup yer yer akma yapıları, yer yer sütun yapıları gözlenmektedir. Taş ocağının bulunduğu alanın jeoloji haritası Şekil 128’de verilmiştir.

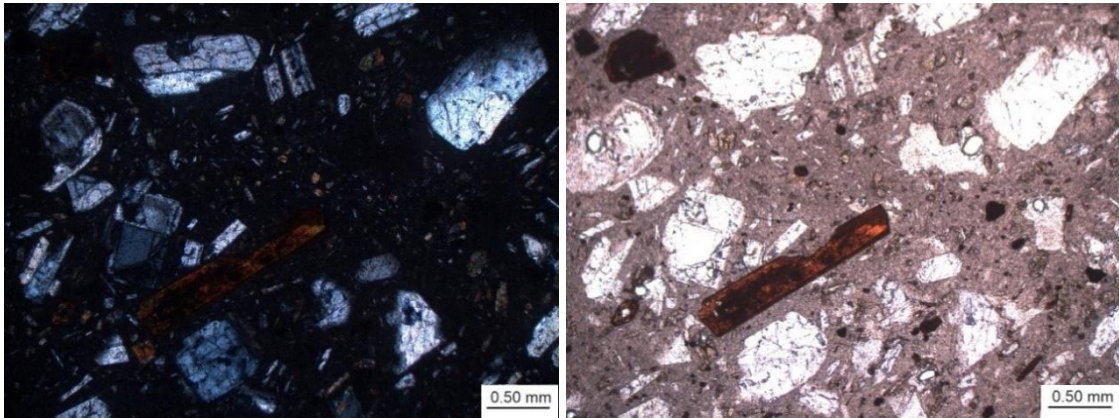
4 numaralı taş ocağına ait ince kesitlerin incelenmesiyle aşağıdaki sonuçlara varılmıştır (Şekil 130):

Mineraller:

- Plajiyoklas (genellikle yarıözşekilli fenokristaller halinde gözlenmekte olup, karakteristik albit ikizi sunarlar)
- Hornblend (yer yer özşekilli, karakteristik dilinimleri var, kahverengi tonlarında pleokroizma gösteriyor)
- Biyotit (ince-uzun latalar halinde gözlenirler)
- Klinopiroksen (çok az gözlenmekte olup, çoğunlukla özşekilsizdirler)
- Hamur (devitrifiye olmuş cam ve mikrolitlerden oluşur)
- Opak mineral (hamur içerisinde özşekilsiz kristaller halinde bulunur)

Doku: Hyalomikrolitik porfirik

Kayaç adı: **Andezit**



Şekil 130. 4 numaralı taş ocağına ait ince kesit görüntüleri

3.2.2. Kimyasal Analiz Sonuçları

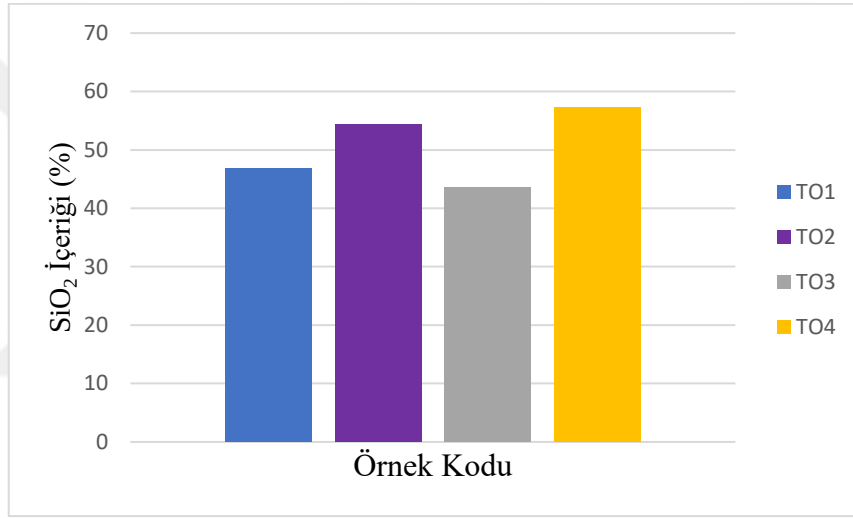
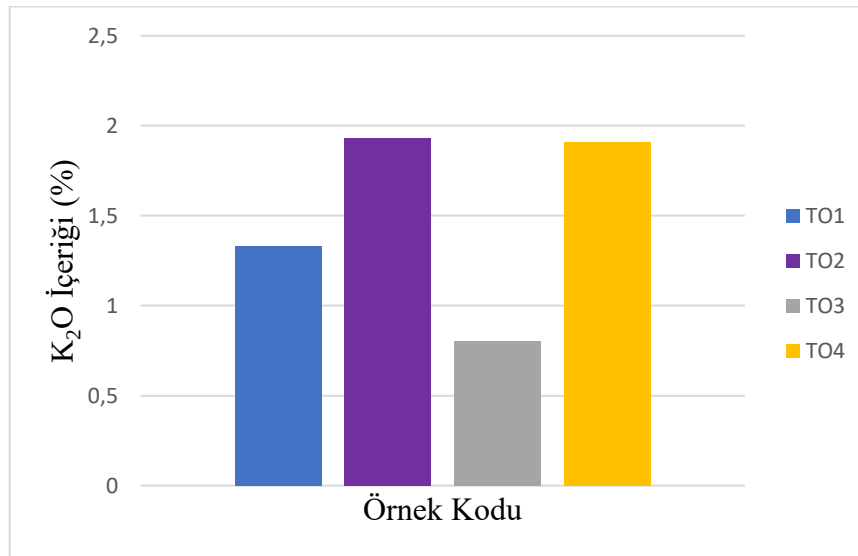
Kimyasal olarak, çalışma alanından alınan volkanik kayaç örneklerinin tüm kayaç ana oksit analizleri Tablo 45'te verilmiştir. Volkanik kayaçların ana element oksit yüzdeleri değerlendirildiğinde; %43.5-57.2 arasında değişmektedir. En yüksek SiO₂ yüzdesi TO4 örneğinde, en düşük ise TO3 örneğindedir (Şekil 131). K₂O miktarı %0.805-1.93 arasında değişmektedir. En yüksek K₂O yüzdesi TO2 örneğinde, en düşük ise TO3 örneğindedir (Şekil 132). Şekil 133'te Al₂O₃, Fe₂O₃, CO₂, CaO, MgO, Na₂O, TiO₂ ve P₂O₅ yüzdelерinin karşılaştırılması verilmiştir.

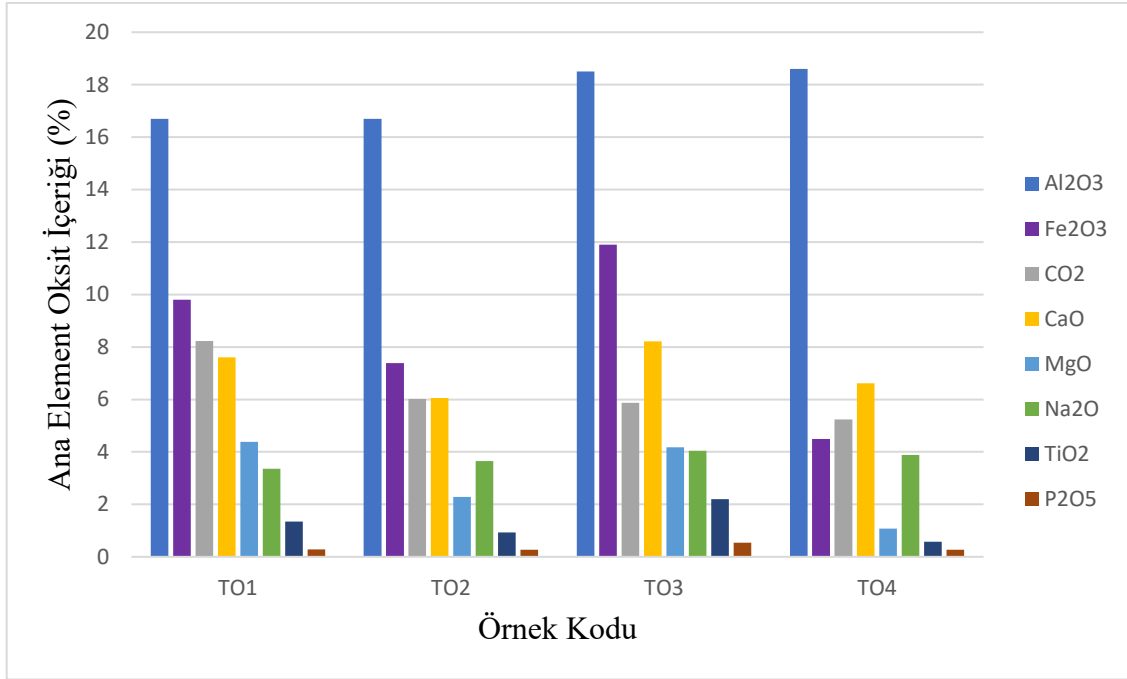
Tablo 45. İncelen volkanik kayaçların metal ve ana element oksit yüzdeleri

% Ağırlık				
	TO1	TO2	TO3	TO4
O	50,5	50,6	48,6	50,9
Si	20,7	24,2	19,5	25,5
Al	8,42	8,5	9,44	9,46
Fe	6,27	4,79	7,73	2,9
Ca	5,04	4,05	5,55	4,41
Mg	2,54	1,33	2,44	0,627
Na	2,4	2,63	2,91	2,8
C	2,15	1,58	1,55	1,37
K	1,03	1,5	0,632	1,48
Ti	0,739	0,521	1,24	0,321
P	0,113	0,112	0,222	0,111
Mn	x	x	0,146	0,0561
Sr	0,0449	x	0,0529	0,0776
Ni	0,0162	x	x	x
Zr	0,0123	0,0215	0,0171	0,0122
Zn	x	x	0,0123	x
S	0,0095	0,117	0,01	x
Cr	x	0,0319	x	x
SiO₂	46,9	54,4	43,5	57,2
Al₂O₃	16,7	16,7	18,5	18,6
Fe₂O₃	9,8	7,39	11,9	4,49
CO₂	8,23	6,02	5,87	5,24
CaO	7,6	6,06	8,22	6,62
MgO	4,38	2,28	4,18	1,08
Na₂O	3,36	3,65	4,04	3,88

Tablo 45'in devamı

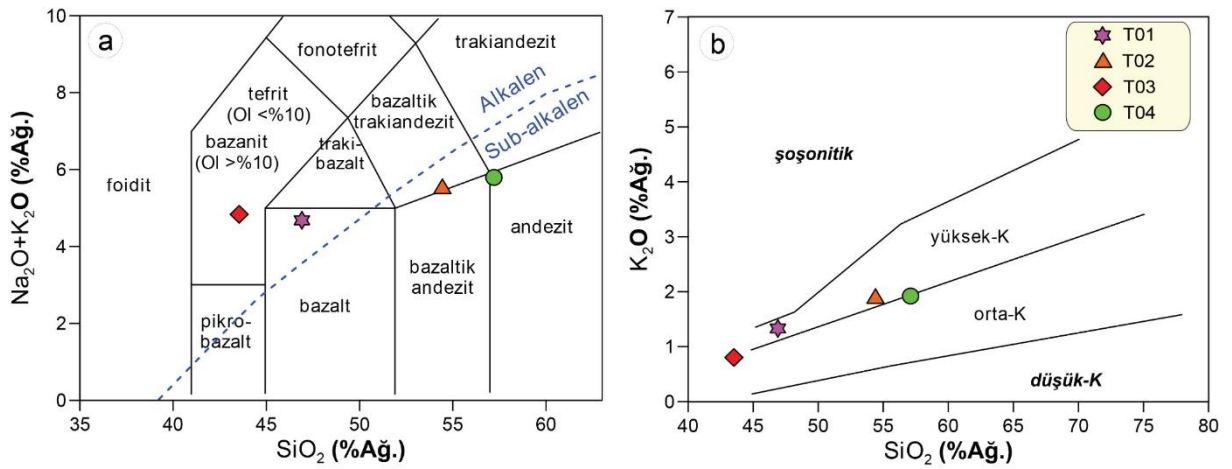
TiO₂	1,34	0,935	2,2	0,577
K₂O	1,33	1,93	0,805	1,91
P₂O₅	0,278	0,274	0,535	0,271
MnO	x	x	0,201	0,0783
SrO	0,0589	x	0,0679	0,1
SO₃	0,0254	0,309	0,0264	x
NiO	0,0227	x	x	x
ZrO₂	0,0181	0,0317	0,0248	0,0174
ZnO	x	x	0,0166	x
Cr₂O₃	x	0,0503	x	x

Şekil 131. İncelenen volkanik kayaların SiO₂ içeriklerinin karşılaştırılmasıŞekil 132. İncelenen volkanik kayaların K₂O içeriklerinin karşılaştırılması



Şekil 133. İncelenen volkanik kayaçların ana element oksit yüzdelерinin karşılaştırılması

İncelenen kayaç örnekleri toplam alkali-silis sınıflandırma diyagramına (TAS; Le Maitre vd., 2002) göre sınıflandırıldığında; TO1 örneği bazalt alanında, TO2 örneği bazaltik andezit alanında, TO3 örneği tefrit ($Ol < 10$) alanında ve TO4 örneği ise andezit alanında yer almaktadır (Şekil 134a). İncelenen TO3 ve TO1 örnekleri alkali özelliğe sahipken, TO2 ve TO4 örnekleri sub-alkali karaktere sahiptir. İncelenen volkanik kayaç örnekleri SiO_2 'ye karşı K_2O diyagramında (Le Maitre vd., 2002) yüksek-K jeokimyasal karaktere sahiptir (Şekil 134b).



Şekil 134. İncelenen volkanik kayaç örneklerinin (a) toplam alkali-silis (TAS) ve (b) SiO_2 'ye karşı K_2O sınıflama diyagramları (Le Maitre vd., 2002)

Eker (2019), kayaçların BSK'larda uzun ömürlü olabilmesi için alkali feldispat (ortoklaz, sanidin, mikroklin, anortoklaz) içeriklerinin oransal olarak mümkün olduğu kadar en az seviyelerde olması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca bünyesinde potasyum içermesi ve bunun da alkali değerlerinin yükselmesine sebep olması dolayısıyla biyotitin de bu kısma dahil edilebileceğini ifade etmiştir. Alkali feldispat minerallerindeki alkali içeriğinin yüksek olması sebebiyle zamanla bozulmayla birlikte ayrışarak killeşebileceklerini ve bunun da bazalt gibi kayaçlarda dane boyutunun hızla dağılmasıyla ufalanmasına yol açabileceğini ifade etmiştir. Bu nedenle tercihen alkali feldispat oranı düşük olabilen kayaçlar (mafik bileşimli) olması gerektiği belirtilmiştir. Dahası, minerallerin tamamıyla birincil, alkali feldispat içeriğinin %1-2 civarında olması gerektiği ve silis içeriğinin %54'ten fazla olmaması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca alkali bileşik oranları Na_2O ve K_2O toplamının %4'ün altında olması gerektiği ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra özellikle birincil mineraller içinde amfibol oranının piroksenlerden mutlaka az olması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca petrografik olarak alterasyon oranının %2'yi geçmemesi gerektiği de belirtilmiştir.

Mineralojik ve kimyasal analiz sonuçları bu bağlamda değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- TO1 taş ocağına ait numunelerde alkali feldispat mineralinin bulunmadığı, SiO_2 oranının %54'ten az olduğu (%46.9), amfibol mineralinin bulunmadığı ve alterasyon oranının %2'den az olduğu tespit edilmiştir. Ama $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ oranı toplamının (%4.69) %4'ü geçtiği ama sınır değere yakın olduğu belirlenmiştir.
- TO2 taş ocağına ait numunelerde alkali feldispat mineralinin ve amfibol mineralinin bulunmadığı ve alterasyon oranının %2'den az olduğu tespit edilmiştir. SiO_2 oranının %54'ten fazla olduğu (%54.4) ama sınır değere çok yakın olduğu ayrıca $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ oranı toplamının (%5.58) %4'ü geçtiği belirlenmiştir.
- TO3 taş ocağına ait numunelerde alkali feldispat mineralinin bulunmadığı, SiO_2 oranının %54'ten az olduğu (%43.5), amfibol mineralinin bulunmadığı ve alterasyon oranının %2'den az olduğu tespit edilmiştir. Ama $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ oranı toplamının (%4.845) %4'ü geçtiği ama sınır değere yakın olduğu belirlenmiştir.
- TO4 taş ocağına ait numunelerde alkali feldispat mineralinin (biyotit) bulunduğu ama %2'den az olduğu belirlenmiştir. Amfibol (hornblend) mineralinin bulunduğu ve piroksen minerali miktarından fazla olduğu tespit edilmiştir. SiO_2 oranının %54'ten fazla olduğu (%57.2) ayrıca $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ oranı toplamının (%5.79) %4'ü

geçtiği belirlenmiştir. Gözenek suyunun büyük bir kısmı mikaların veya diğer sulu minerallerin parçalanmasından gelir. Bununla birlikte, hornblendin kendisi çok yüksek sıcaklıklarda parçalanır. Hornblend kolayca klorit , biyotit veya diğer Fe-Mg minerallere dönüşür.

4.2.3. Fiziksel-Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi için Yapılan Deneylerin Sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Tablo 46’da verilmiştir.

Tablo 46. Agregaların fiziksel özellikleri

	TO1	TO2	TO3	TO4
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	15.64	17.87	18.36	16
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO ₄ ile Kayıp) %	0.40	0.465	0.90	10.7
Metilen Mavisini (g/kg)	0.50	0.25	1.25	0.50
Yassılık İndeksi (%)	22.92	8.67	7.00	4.89
Cilalanma Değeri (%)	53.30	52.4	53.5	51.9
Kaba Agreganın Hacim Özgöl Ağırlığı (g/cm ³)	2.690	2.663	2.815	2.582
Kaba Agreganın Zahirî Özgöl Ağırlığı (g/cm ³)	2.753	2.652	2.901	2.657
Kaba Agreganın Su Emme (%)	0.84	0.15	1.05	1.09
İnce Agreganın Hacim Özgöl Ağırlığı (g/cm ³)	2.729	2.531	2.779	2.537

Tablo 46'nın devamı

İnce Agrega Zahirî Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.799	2.619	2.889	2.660
İnce Agrega Su Emme (%)	0.91	1.33	1.37	1.82
Filler Zahirî Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.800	2.641	2.918	2.655

Daha yüksek kuvars ve feldispat içeriği Los Angeles'a karşı direnci artırır, kayaçlardaki %15-20'ye kadar mika içeriği genel dayanımı etkilemez. 1 mm'den küçük dane boyutunun ince daneli bileşim dokusuyla birlikte bulunması, kayaçların parçalanma ve aşınma direncine katkıda bulunmaktadır. Buna karşılık, 1 mm'den büyük dane boyutunun veya bazı durumlarda orta ve iri daneli dokuların varlığı, LA deneyi sırasında uygulanan darbe etkisi altında kayaçların parçalanma eğilimini artırmaktadır. Ayrıca bazı kayaçlar, ince-orta-iri daneli ya da ince-orta veya orta-iri daneli bileşimlerin bir arada görüldüğü heterojen dokusal özellikler sergiler. Bu tür heterojen yapılara sahip kayaçlarda dane kilitlenmesi zayıf olup, bu durum LA'ya karşı direncin azalmasına neden olmaktadır (Adomako vd., 2021). KTŞ'ye (2023) göre, Los Angeles parçalanma direnci kayıp değerleri aşınma tabakası için asfalt betonu karışımlarında $\leq$ %27 ve taş mastik asfaltlarda $\leq$ %25 şeklinde olmalıdır. Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek kayıp değeri %18.36 ortalama ile TO3 ocağına (parçalanma ve aşınmaya en dirençsiz), en düşük kayıp değeri ise %15.64 ortalama ile TO1 ocağına (parçalanma ve aşınmaya en dirençli) ait olduğu görülmüştür. TO3 ocağının Los Angeles kayıp değerinin yüksek olmasının, 1 mm'den büyük dane boyutları içermesi ve ince-orta-iri daneli (heterojen) dokuya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak tüm ocakların Los Angeles parçalanma direnci kayıp değerlerinin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı görülmüştür.

KTŞ'ye (2023) göre, hava tesirlerine karşı dayanıklılık kayıp (MgSO₄ ile kayıp) değerleri aşınma tabakası için asfalt betonu karışımlarında %16 ve taş mastik asfaltlarda $\leq$ %14 şeklinde olmalıdır. Hava tesirlerine karşı dayanımı en az olan yani don kaybının en yüksek olduğu numunelerin %10.7 ortalamayla TO4 ocağına ait olduğu görülmüştür. En yüksek dayanımı olan numunelerin ise %0.40 ortalamayla TO1 ocağına ait olduğu belirlenmiştir. TO4 ocağının hava tesirlerine karşı dayanıklılık kayıp değerlerinin yüksek olmasının, bünyesinde amfibol ve biyotit gibi sulu ferromagnezyen (mafik) mineraller barındırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu mineraller, yapılarında hidroksil

(OH⁻) grupları bulundurmaları nedeniyle su ile kolay etkileşime giren hidrofilik bir karakter sergiler. Su, bu mineraller tarafından hem yüzeyde adsorbe edilmekte hem de mineral daneleri arasındaki mikro çatlaklarda tutulmaktadır. Donma-çözülme döngüleri sırasında bu suyun hacimsel genişmesi, agrega bünyesinde iç gerilmelerin artmasına ve sonuç olarak parçalanmanın hızlanmasına neden olmaktadır. Bu süreç, söz konusu agregaların hava tesirlerine karşı dayanımının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak tüm ocakların hava tesirlerine karşı dayanıklılık kayıp değerlerinin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı görülmüştür.

Barksdale (1991) ve Woodside'e (1998) göre yassı agrega danelerinin çekme gerilmeleri düşük olduğu için sıcak asfalt karışımları içerisinde zayıf bölgeler oluşturmakta ve üst yapının dayanımını düşürerek deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır (Yılmaz, 2012). Ayrıca Özen vd.'e (2004) göre asfalt karışımı içinde yer alan yassı agrega dane miktarının artmasıyla karışımın performansı da doğru orantılı olarak azalmaktadır (Sönmez, 2010). KTŞ'ye (2023) göre, yassılık indeksi değerleri aşınma tabakası için asfalt betonu karışımlarda ve taş mastik asfalt karışımlarda BS 812 standardına göre $\leq$ %25 ve TS EN 933-3 standardına göre $\leq$ %15 şeklinde olmalıdır. Deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda, tüm taş ocaklarından temin edilen örneklerin yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt karışımların aşınma tabakasına ait yassılık indeksi sonuçlarının Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı görülmüş, sadece TO1 taş ocağının yassılık indeksi değeri; BS 812 deney standardına göre şartname limitini sağlamasına rağmen TS EN 933-3 deney standardına göre %7.92 fazladır. Bu durumun, söz konusu taş ocağına ait kayaçların mineralojik dokusundan kaynaklandığı ve daha sert bir karakter sergilemesi nedeniyle geliştiği düşünülmektedir.

Sönmez'e (2010) göre yassılık indeksi, Los Angeles katsayısı ve magnezyum sülfat değeri agregaların dayanımı ile ilgilidir. Bu değerlerin istenen ideal değerlere yakın olması asfalt karışımlarının stabilitelerinin yüksek olması ve tekerlek izinde oturma değerlerinin de düşük olması sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Verhoef (1992) ve Stapel ve Verhoef'e (1989) göre, ince agrega tarafından metilen mavisi absorpsiyonu ince agrega içerisinde zararlı kilin varlığına işaret eder yani düşük absorpsiyon değerleri düşük oranda zararlı kil varlığını gösterir (Sönmez, 2010). KTŞ'ye (2023) göre, ince agreganın 0/2 mm kısmına ait metilen mavisi değerleri magmatik kayaçlar için asfalt betonu ve taş mastik karışımlar için $\leq$ 3.5 olmalıdır. Deney sonuçlarına bakıldığında, en düşük oranın (0.25g/kg) TO2 ocağına ait olduğu, en yüksek oranın (1.25

g/kg) ise TO3 ocağına ait olduğu görülmüştür. TO3 ocağına ait agregalar içerisinde zararlı kilin varlığı diğer ocaklara göre daha fazladır. Ancak tüm ocaklara ait değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı görülmüştür.

Orhan'a (2012) göre sert ve pürüzlü agregalarda (bazalt, granit vb.) cilalanma değeri yüksektir ve bu agregalarla yapılan kaplamanın pürüzlülüğü ve buna bağlı olarak kaymaya karşı direnci fazladır. KTŞ'ye (2023) göre, cilalanma değeri aşınma tabakalarında asfalt betonu karışımları için $T_{8,2} < 10$ milyon olması durumunda $\geq \%45$, $T_{8,2} \geq 10$ milyon olması durumunda ise $\geq \%50$ olması gerekmektedir. Taş mastik asfalt karışımlarda ise $\geq \%50$ olması gerekmektedir. Deney sonuçlarına bakıldığında, en düşük oranın (%51.9) TO4 ocağına ait olduğu, en yüksek oranın (%53.5) ise TO3 ocağına ait olduğu görülmüştür. TO3 ocağına ait kayaçların cilalanma direncinin yüksek olmasının, içerisinde piroksen ve olivin gibi sert minerallerin bulunmasından ve ayrıca sıkı dane kenetlenmesine sahip, kompakt yapılı intersertal ve yer yer ofitik dokulara sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer özelliklere sahip TO1 ocağına ait agregalar da yine yüksek cilalanma direnci göstermiştir. Ancak tüm ocaklara ait değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı görülmüştür.

Eker'e (2019) agregada yüksek absorpsiyon değeri bitümlü sıcak karışımlarda, bitüm miktarını artırmakta ve bu durum asfalt betonunda kuma, erken yaşlanma, yüzey kaymaları vb. gibi olumsuz etkilere yol açmaktadır. Ayrıca Smith ve Collis'e (2001) göre, agregaların su emme değeri, don etkilerinin belirlenmesinde etkin bir değerlendirme ölçütü olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yılmaz, 2012). Bunlarla birlikte agregaların su emmesi aynı zamanda agrega porozitesi ile de ilgilidir ve porozitenin artması agrega-asfalt adezyonunu da artırmaktadır (Sönmez, 2010). KTŞ'ye (2023) göre, kaba agregalar için su emme oranı asfalt betonu karışımları aşınma tabakası için $\leq \%2$ ve taş mastik asfalt karışımlar için ise $\leq \%2$ olmalıdır. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek su emme oranının (%1.09) TO4 ocağına ait olduğu, en düşük su emme oranının ise (%0.15) TO2 ocağına ait olduğu görülmüştür. Ancak tüm ocaklara ait değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı görülmüştür. KTŞ'ye (2023) göre, ince agregalar için su emme oranı asfalt betonu karışımları aşınma tabakası için $\leq \%2$ ve taş mastik asfalt karışımlar için ise $\leq \%2$ olmalıdır. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek su emme oranının (%1.82) TO4 ocağına ait olduğu, en düşük su emme oranının ise (%0.91) TO1 ocağına ait olduğu görülmüştür. TO4 ocağının su emme oranının yüksek olmasının, agregalarında biyotit ve amfibol gibi sulu mafik minerallerin bulunmasından kaynaklandığı

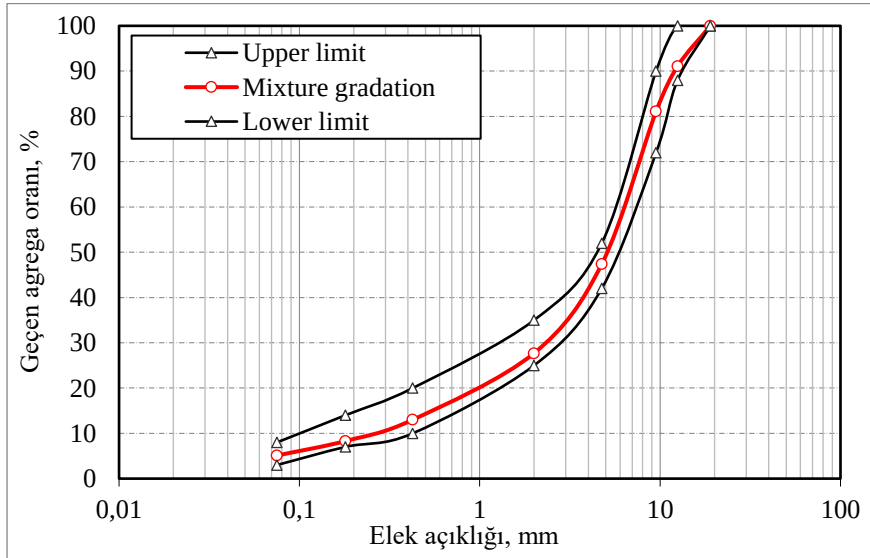
düşünülmektedir. Buna karşılık, TO1 ocağının su emme oranının düşük olmasının nedeni, danelerin sıkı kenetlenmiş ve kompakt yapılı intersertal sahip olması nedeniyle suyun nüfuz etmesinin sınırlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak tüm ocaklara ait değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı görülmüştür. İnce agregalarda yüzey alanının artmasına bağlı olarak su emme oranları kaba agregaya nazaran daha yüksek çıktıgı belirlenmiştir.

4.3. Sıcak Karışımlara Uygulanan Deney Sonuçları

Marshall yöntemi ile yapılan dizayn çalışmasında kullanılan agrega gradasyonları Tablo 47- 48 ve Şekil 135 - 136 verilmiştir.

Tablo 47. AB karışımı için agrega gradasyonu

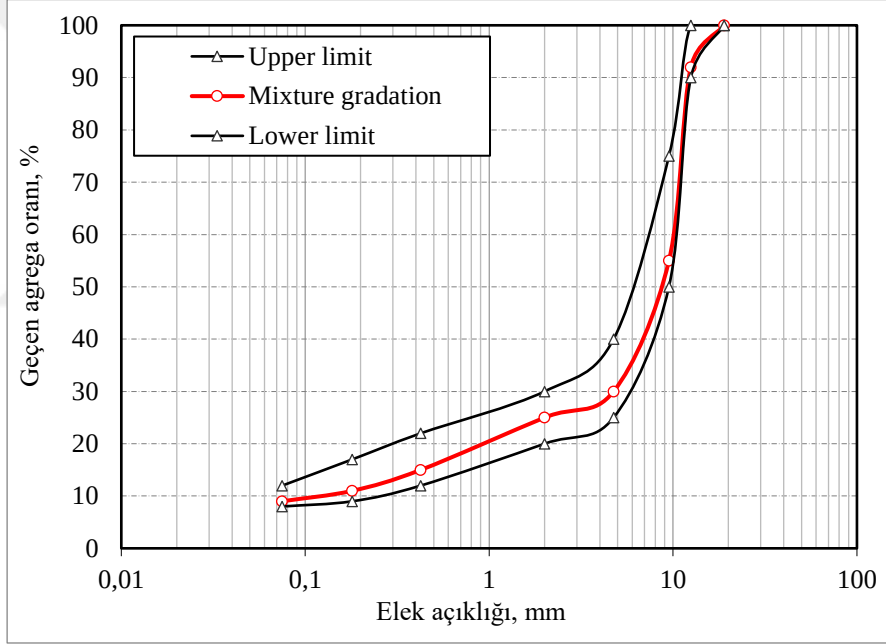
Elek No	Elek Analizi Verileri		Şartname Limitleri	
Ölçüt (mm)	Kalan (%)	Karışım Gradasyonu	Alt Limit	Üst Limit
19	0.0	100.0	100	100
12.5	8.90	91.10	88	100
9.5	18.90	81.10	72	90
4.75	52.60	47.40	42	52
2	72.30	27.70	25	35
0.425	87.00	13.00	10	20
0.18	91.70	8.30	7	14
0.075	94.90	5.10	3	8



Şekil 135. AB karışımı için karışım gradasyonu grafiği

Tablo 48. TMA karışımı için agrega gradasyonu

Elek No	Elek Analizi Verileri		Şartname Limitleri	
Ölçüt (mm)	Kalan (%)	Karışım Gradasyonu	Alt Limit	Üst Limit
19	0.0	100.0	100	100
12.5	8.00	92.00	90	100
9.5	45.00	55.00	50	75
4.75	70.00	30.00	25	40
2	75.00	25.00	20	30
0.425	85.00	15.00	12	22
0.18	89.00	11.00	9	17
0.075	91.00	9.00	8	12



Şekil 136. TMA karışımı için karışım gradasyonu grafiği

White vd.'ne (2006) göre; agregalar, sıcak asfalt karışımlarının iskeletini oluşturmakta ve dane büyüklüğü dağılımı da bu iskeletin sağlamlık ve dayanıklılığı üzerinde etkili olmaktadır (Yılmaz, 2012). Sonuçlar değerlendirildiğinde yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt karışımlarda tüm dane boyutlarında agregaların Karayolları Teknik Şartnamesi Limitleri içerisinde kaldığı görülmüştür.

Dizayn çalışması sonucunda taş ocaklarından temin edilen agrega ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin ve taş mastik asfalt karışım örneklerinin hacimsel özellikleri Tablo 49-56'da verilmiştir.

Tablo 49. TO1 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	63,88	4,55	14,74	69,1
2	64,34	4,67	14,85	68,6
3	63,70	4,18	14,41	71,0
4	64,58	4,26	14,49	70,6
5	63,44	4,84	15,00	67,7
6	65,03	4,55	14,74	69,1
7	63,76	4,59	14,78	68,9
8	64,48	4,72	14,89	68,3
9	64,41	4,30	14,52	70,4
10	63,93	4,14	14,37	71,2
11	64,04	4,51	14,71	69,3
12	66,95	4,59	14,78	68,9
13	63,66	4,43	14,63	69,7
14	66,92	4,39	14,60	69,9
15	63,68	4,80	14,97	67,9

Tablo 50. TO2 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	63,45	4,25	15,85	73,2
2	63,71	4,22	15,84	73,3
3	63,87	4,18	15,80	73,5
4	63,90	3,88	15,53	75,0
5	64,17	4,06	15,69	74,1
6	63,76	3,98	15,63	74,5
7	64,97	4,11	15,74	73,9
8	64,20	3,86	15,52	75,1
9	64,28	3,94	15,59	74,7
10	63,60	3,94	15,59	74,7
11	64,51	4,11	15,73	73,9
12	63,95	4,03	15,66	74,3
13	64,23	3,90	15,55	74,9
14	63,96	4,06	15,69	74,1
15	63,94	4,11	15,73	73,9

Tablo 51. TO3 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	63,62	3,97	15,00	73,5
2	63,31	4,13	15,14	72,7
3	63,23	3,97	15,00	73,5
4	63,92	4,33	15,31	71,7
5	63,48	4,05	15,07	73,1
6	63,28	3,77	14,82	74,6
7	63,08	3,97	15,00	73,5
8	64,40	3,89	14,92	74,0
9	63,68	4,49	15,46	71,0
10	63,36	4,41	15,39	71,3
11	63,09	4,33	15,31	71,7
12	63,71	4,33	15,31	71,7
13	63,58	4,09	15,10	72,9
14	63,28	4,25	15,24	72,1
15	63,56	4,17	15,17	72,5

Tablo 52. TO3 agregası ile üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	65,09	4,24	15,95	73,4
2	63,98	3,99	15,73	74,6
3	64,22	4,16	15,87	73,8
4	64,27	4,20	15,91	73,6
5	63,67	4,24	15,95	73,4
6	64,12	3,95	15,69	74,8
7	63,71	3,95	15,69	74,8
8	64,50	4,16	15,87	73,8
9	64,16	3,99	15,73	74,6
10	63,46	4,08	15,80	74,2
11	64,10	4,03	15,77	74,4
12	64,20	4,16	15,87	73,8
13	65,07	3,99	15,73	74,6
14	64,11	4,32	16,02	73,0
15	63,73	3,99	15,73	74,6

KTŞ'ye (2023) göre asfalt betonu Tip-1 aşınma tabakası dizayn kriterleri; boşluk oranı minimum %3 ve maksimum %5, asfaltla dolu boşluk oranı minimum %65 ve maksimum %75 ve agregalar arası boşluk oranı (V.M.A) minimum %14 ve maksimum %16 şeklindedir. Bu bağlamda deney sonuçları değerlendirildiğinde; TO1 ocağına ait yoğun gradasyonlu asfalt betonu karışımının boşluk oranının %4.14-4.84, asfaltla dolu boşluk oranının %67.7-71.0 ve agregalar arası boşluk oranının %14.37-15.0 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitleri içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

TO2 ocağına ait yoğun gradasyonlu asfalt betonu karışımının boşluk oranının %3.86-4.25, asfaltla dolu boşluk oranının %73.2-75.1 ve agregalar arası boşluk oranının %15.53-15.84 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitleri içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

TO3 ocağına ait yoğun gradasyonlu asfalt betonu karışımının boşluk oranının %3.77-4.49, asfaltla dolu boşluk oranının %71.0-73.5 ve agregalar arası boşluk oranının %14.82-15.46 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitleri içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

TO4 ocağına ait yoğun gradasyonlu asfalt betonu karışımının boşluk oranının %3.95-4.32, asfaltla dolu boşluk oranının %73.0-74.8 ve agregalar arası boşluk oranının %15.69-16.02 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitleri içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

Tablo 53. TO1 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	63,61	2,47	17,07	85,5
2	64,07	2,92	17,45	83,3
3	64,16	2,67	17,25	84,5
4	64,19	2,71	17,28	84,3
5	65,64	2,75	17,31	84,1
6	63,44	2,06	16,73	87,7
7	64,78	2,51	17,11	85,3
8	64,02	2,27	16,90	86,6
9	64,52	2,55	17,14	85,1
10	63,88	2,39	17,00	86,0
11	64,06	2,67	17,25	84,5
12	63,63	2,59	17,18	84,9
13	63,65	2,31	16,93	86,4
14	64,13	2,14	16,80	87,2
15	63,91	2,23	16,87	86,8

Tablo 54. TO2 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	64,40	2,96	17,49	83,1
2	64,50	2,51	17,11	85,3
3	64,63	2,55	17,14	85,1
4	64,87	2,67	17,25	84,5
5	63,79	2,75	17,31	84,1
6	64,01	2,67	17,25	84,5
7	64,08	2,39	17,00	86,0
8	64,33	2,43	17,04	85,7
9	64,23	2,43	17,04	85,7
10	64,74	2,92	17,45	83,3
11	64,13	3,04	17,56	82,7
12	64,87	2,87	17,42	83,5
13	65,12	2,59	17,18	84,9
14	64,11	2,96	17,49	83,1
15	64,57	2,59	17,18	84,9

Tablo 55. TO3 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	64,40	2,56	18,67	86,3
2	64,50	2,53	18,64	86,5
3	64,63	2,87	18,93	84,8
4	64,87	2,56	18,67	86,3
5	63,79	2,68	18,77	85,7
6	64,01	2,80	18,87	85,2
7	64,08	2,60	18,71	86,1
8	64,33	2,95	19,00	84,5
9	64,23	2,45	18,58	86,8
10	64,74	2,41	18,54	87,0
11	64,13	2,80	18,87	85,2
12	64,87	2,25	18,41	87,8
13	65,12	2,76	18,84	85,4
14	64,11	2,45	18,58	86,8
15	64,57	2,76	18,84	85,4

Tablo 56. TO4 agregası ile üretilen TMA örneklerinin hacimsel özellikleri

Örnek No	Ort. Yükseklik, mm	Boşluk, %	Mineral Agregalar Arası Boşluk, %	Asfaltla Dolu Boşluk
		V _h	V.M.A	V _f
1	64,46	2,97	16,32	81,8
2	64,52	3,01	16,36	81,6
3	64,18	2,92	16,29	82,0
4	64,53	2,88	16,25	82,3
5	64,72	3,01	16,36	81,6
6	64,46	2,97	16,32	81,8
7	64,10	2,92	16,29	82,0
8	64,14	2,97	16,32	81,8
9	64,61	3,26	16,58	80,3
10	64,07	3,09	16,43	81,2
11	64,64	2,92	16,29	82,0
12	64,56	3,17	16,51	80,8
13	64,19	3,30	16,61	80,1
14	64,80	3,26	16,58	80,3
15	64,46	2,88	16,25	82,3

KTŞ'ye (2023) göre TMA Tip-1 aşınma tabakası dizayn kriterleri; hava boşlukları %2-4 ve agregalar arası boşluk oranı (V.M.A) minimum %16 şeklindedir. Bu bağlamda deney sonuçları değerlendirildiğinde; TO1 ocağına ait TMA karışımının boşluk oranının %2.06-2.92 ve agregalar arası boşluk oranının %16.73-17.45 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı belirlenmiştir.

TO2 ocağına ait TMA karışımının boşluk oranının %2.39-3.04 ve agregalar arası boşluk oranının %17.0-17.49 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitlerini sağladığı belirlenmiştir.

TO3 ocağına ait TMA karışımının boşluk oranının %2.41-2.87 ve agregalar arası boşluk oranının %18.41-19.0 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitleri sağladığı belirlenmiştir.

TO4 ocağına ait TMA karışımının boşluk oranının %2.88-3.30 ve agregalar arası boşluk oranının %16.25-16.61 arasında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi Limitleri sağladığı belirlenmiştir.

Hesaplamalar sonrasında üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt örnekleri için belirlenen optimum bitüm oranları Tablo 57'de verilmiştir.

Tablo 57. Üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt örnekleri için belirlenen optimum bitüm oranları

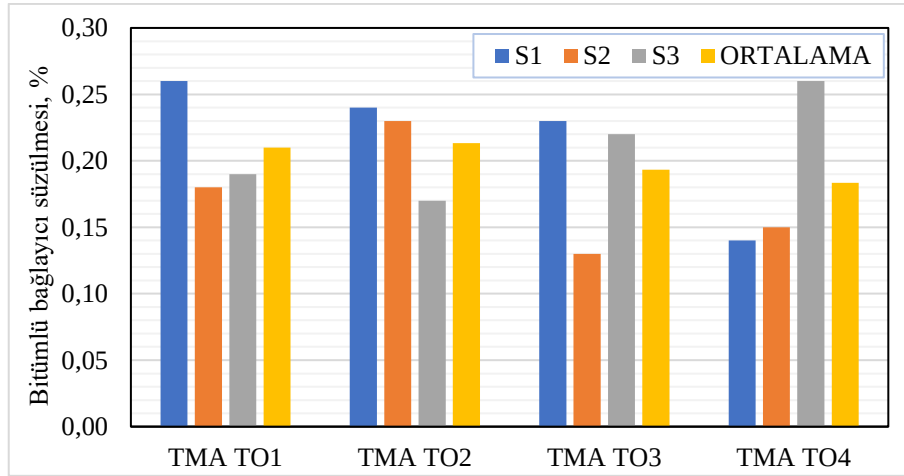
Taş Ocağı Kodu	Optimum Bitüm Yüzdesi	
	Yoğun Gradasyonlu AB	TMA
TO1	5.50	6.45
TO2	5.40	6.45
TO3	5.35	6.45
TO4	5.35	6.45

KTŞ'ye (2023) göre asfalt betonu ve TMA Tip-1 aşınma tabakası için bitüm oranı (ağırlıkça, 100'e) sırasıyla %4-7 ve minimum %5.8 şeklindedir. Bu bağlamda; hesaplamalar sonrasında üretilen yoğun gradasyonlu asfalt betonu ve taş mastik asfalt örnekleri için belirlenen optimum bitüm oranlarının KTŞ'ye (2023) uygun olduğu görülmüştür.

Optimum bitüm içeriği belirlenen TMA aşınma karışımlarına süzülme deneyi yapılarak kullanılması gereken elyaf oranı belirlenmiştir (Tablo 58 ve Şekil 137).

Tablo 58. Süzülme deney sonuçları

	TO1	TO2	TO3	TO4
S1	0,260	0,240	0,23	0,14
S2	0,180	0,230	0,13	0,15
S3	0,190	0,170	0,22	0,26
Ortalama	0,210	0,213	0,193	0,183



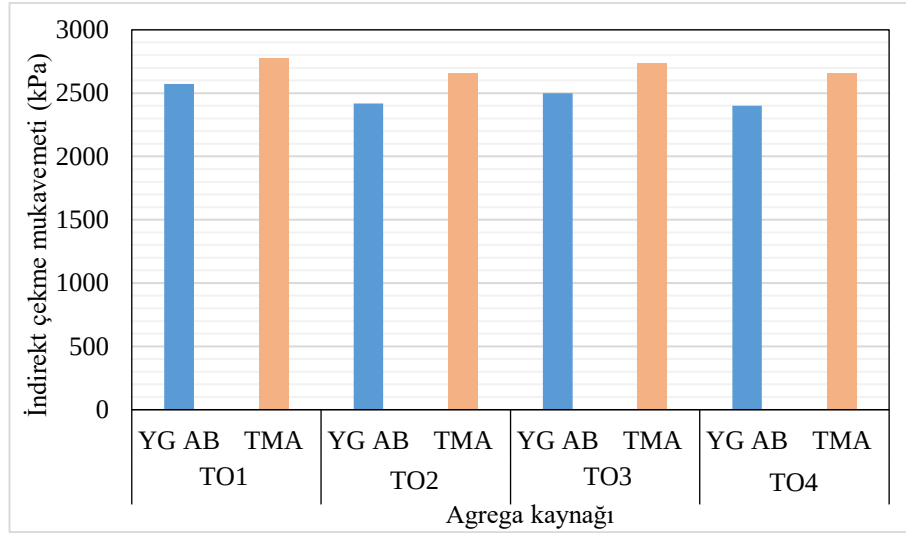
Şekil 137. Süzülme deney sonuçlarına ait karşılaştırma grafiği

KTŞ'ye (2023) göre TMA Tip-1 aşınma tabakası için elyaf oranının beher metodu ile bitüm süzülme deneyi sonucunda maksimum %0.3 olması gerekmektedir. Deneyler sonucunda elyaf oranı, TO1, TO2, TO3 ve TO4 ocakları için sırasıyla %0.210, %0.213, %0.193 ve %0.183 olarak hesaplanmıştır. Bu miktarların KTŞ'ye (2023) uygun olduğu görülmüştür.

Tasarımları tamamlanan yoğun gradasyonlu AB ve TMA Aşınma karışımlarının performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları Tablo 59 ve Şekil 138'de verilmiştir.

Tablo 59. Koşullandırılmış numunelerin İÇM değerleri (kPa)

Ocak	Karışım	Numune	Yükseklik	kN	Koşullandırılmış İÇM (kPa)	Ortalama İÇM (kPa)
TO1	YG AB	4	64,58	26,19	2541,112384	2572,61
		5	63,44	26,9	2656,901908	
		6	65,03	26,15	2519,803159	
	TMA	4	64,19	29,3	2860,284369	2777,42
		5	65,64	28,09	2681,585427	
		6	63,44	28,25	2790,387467	
TO2	YG AB	4	63,90	24,52	2404,396143	2418,37
		5	64,17	25,18	2458,725818	
		6	63,76	24,34	2391,986259	
	TMA	4	64,87	26,83	2591,438306	2660,20
		5	63,79	27	2652,008329	
		6	64,01	27,96	2737,148572	
TO3	YG AB	4	63,92	25,3	2479,976255	2500,47
		5	63,48	25,68	2534,937883	
		6	63,28	25,11	2486,506133	
	TMA	4	64,87	27,2	2627,175622	2734,28
		5	63,79	28,52	2801,306575	
		6	64,01	28,34	2774,348731	
TO4	YG AB	4	64,27	26,63	2596,266571	2401,75
		5	63,67	22,89	2252,786812	
		6	64,12	24,11	2356,202918	
	TMA	4	64,53	27,74	2693,449104	2658,82
		5	64,72	27,8	2691,628207	
		6	64,46	26,66	2591,396104	



Şekil 138. Koşullandırılmış numunelerin İÇM değerlerinin grafiği

TO1 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımları için koşullandırılmış numunelerin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 2572,61 ve 2777,42 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %7.96 fazla olduğu hesaplanmıştır. TO2 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımları için koşullandırılmış numunelerin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 2418.37 ve 2660.20 olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %9.99 fazla olduğu hesaplanmıştır. TO3 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımları için koşullandırılmış numunelerin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 2500.47 ve 2734.28 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %9.35 fazla olduğu hesaplanmıştır. TO4 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımları için koşullandırılmış numunelerin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 2401.75 ve 2658.82 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %10.70 fazla olduğu hesaplanmıştır.

İÇM değerleri YG AB karışımları için ocaklar bazında kıyaslandığında, en yüksek değer 2572.61 kPa değeriyle TO1 ocağına, en düşük değer ise 2401.75 kPa değeriyle TO4 ocağına ait olduğu görülmüştür. Tüm ocaklar kıyaslandığında ise sırasıyla en yüksekten en düşüğe 2572.61, 2500.47, 2418.37 ve 2401.75 kPa değerleriyle TO1, TO3, TO2 ve TO4 ocaklarının olduğu görülmüştür. Bu kıyas TMA karışımları için yapıldığında, en yüksek değer 2777.42 kPa değeriyle TO1 ocağına, en düşük değer ise 2658.82 kPa değeriyle TO4 ocağına ait olduğu görülmüştür. Tüm ocaklar kıyaslandığında ise sırasıyla en yüksekten en düşüğe 2777.42, 2734.28, 2660.20 ve 2658.82 kPa değerleriyle TO1, TO3, TO2 ve TO4

ocaklarının olduğu görülmüştür. Her iki karışım türü kıyaslandığında TMA karışımların çatlama direncinin YG AB karışımlara nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca hem YG AB karışımlar hem de TMA karışımlar için TO4 ocağının en düşük direnci sergilemesinin sebebinin hem cam içermesi hem de porfirik dokuya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü cam, hızlı soğuma ürünü olan amorf bir malzemedir ve atmosferik koşullar altında bozunması daha kolaydır. Ayrıca porfirik doku, iri fenokristallerin daha ince daneli veya camsı bir matriks içinde geliştiği ve iki farklı soğuma hızıyla oluşan bir doku türüdür ve bu heterojen yapı direncin düşmesine sebep olabilir. Bunun aksine TO1 ocağının en yüksek direnci sergilemesinin sebebinin daha yavaş soğuma hızıyla oluşan ve danelerin sıkı kenetlenmiş olduğu intersertal dokuya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

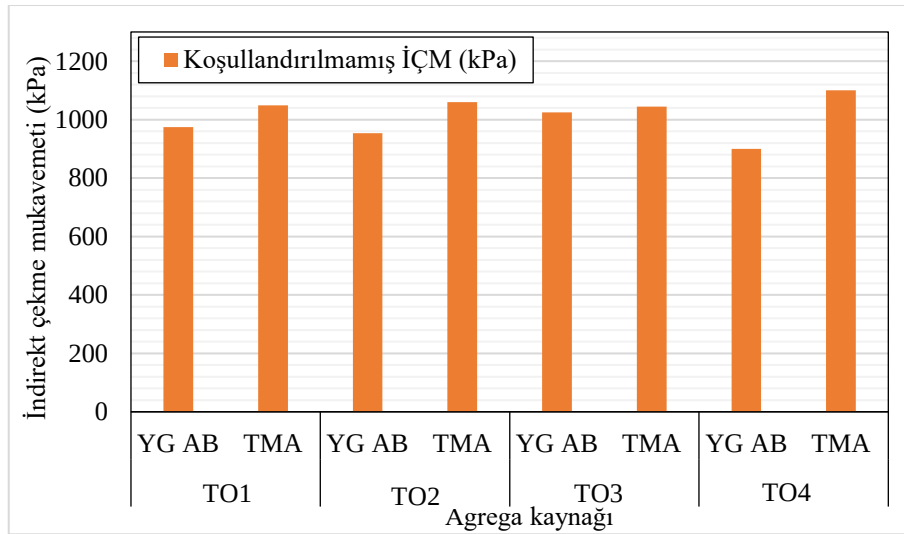
Yoğun gradasyonlu AB ve TMA Aşınma karışımlarının performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen Modifiye Lottman (su hasarı) deney sonuçları Tablo 60-61 ve Şekil 139-143’de verilmiştir.

Tablo 60. Modifiye Lottman deney sonuçları

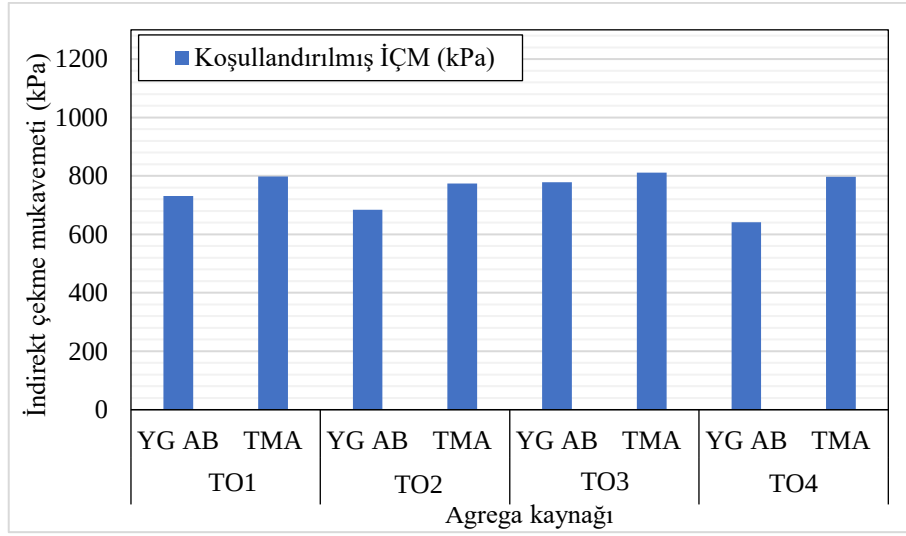
Ocak	Karışım	KOŞULLANDIRILMIŞ			KOŞULLANDIRILMAMIŞ		
		Numune	Yükseklik	Koşullu (kN)	Numune	Yükseklik	Koşulsuz (kN)
TO1	YG AB	1	65,88	7,71	10	65,93	10,23
		2	66,34	8,10	11	66,04	10,68
		3	65,70	7,28	12	68,95	10,31
	TMA	1	65,61	8,00	10	65,88	11,37
		2	66,07	8,16	11	66,06	10,13
		3	66,16	9,06	12	65,63	11,56
TO2	YG AB	1	67,45	8,13	10	67,60	10,11
		2	67,71	6,84	11	68,51	10,81
		3	67,87	7,18	12	67,95	10,15
	TMA	1	67,40	8,09	10	67,74	11,89
		2	67,50	8,71	11	67,13	11,05
		3	67,63	8,22	12	67,87	11,37
TO3	YG AB	1	63,62	7,43	10	63,36	10,18
		2	63,31	7,81	11	63,09	9,85
		3	63,23	8,38	12	61,71	10,73
	TMA	1	64,40	7,70	10	64,61	11,28
		2	63,74	8,71	11	68,53	11,08
		3	63,85	8,45	12	64,40	10,54
TO4	YG AB	1	67,09	7,04	10	68,46	9,45
		2	68,98	7,32	11	69,10	10,37
		3	69,22	6,64	12	69,20	9,89
	TMA	1	65,46	7,94	10	70,07	11,8
		2	65,52	8,15	11	66,64	12,54
		3	65,18	8,85	12	69,56	11,86

Tablo 61. Hesaplanan İÇM (kPa) ve İÇMO (%) değerleri

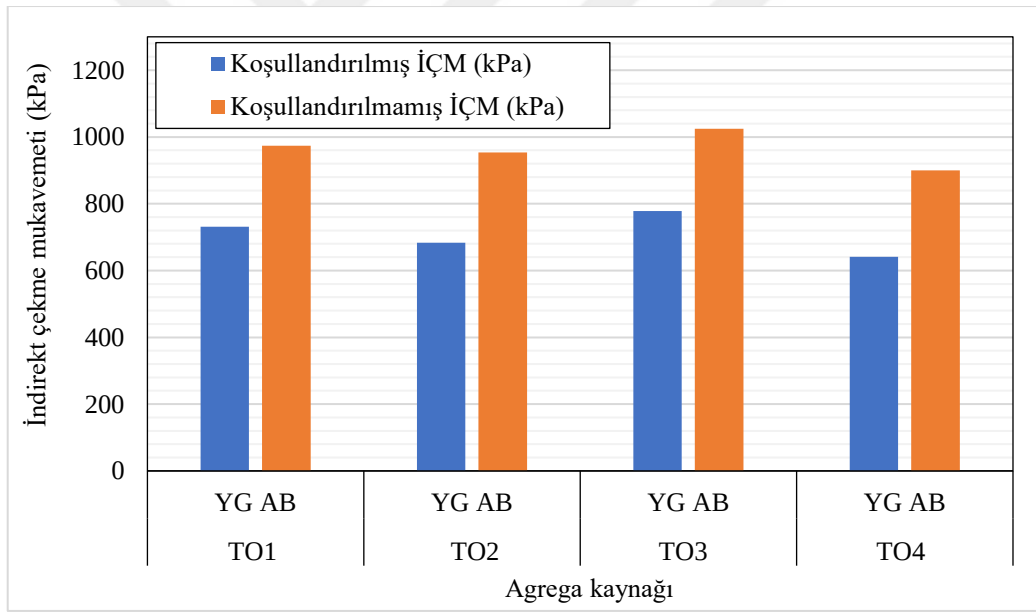
Ocak	Koşullu İÇM (kPa)	Koşulsuz İÇM (kPa)	Koşullandırılmış İÇM (kPa)	Koşullandırılmamış İÇM (kPa)	İÇMO (%)
TO1	733,27	972,20	730,89	974,17	75,03
	765,06	1013,38			
	694,34	936,94			
	763,98	1081,47	798,61	1048,68	76,15
	773,84	960,90			
	858,02	1103,68			
TO2	755,29	937,11	683,72	953,95	71,67
	632,98	988,73			
	662,88	936,02			
	752,14	1099,77	774,10	1060,31	73,01
	808,58	1031,46			
	761,59	1049,71			
TO3	731,74	1006,69	778,40	1024,84	75,95
	772,97	978,33			
	830,48	1089,51			
	749,19	1094,00	811,53	1044,18	77,72
	856,19	1013,08			
	829,20	1025,46			
TO4	657,51	864,93	641,18	900,28	71,22
	664,96	940,34			
	601,07	895,57			
	760,03	1055,15	796,77	1100,84	72,38
	779,46	1179,04			
	850,82	1068,35			



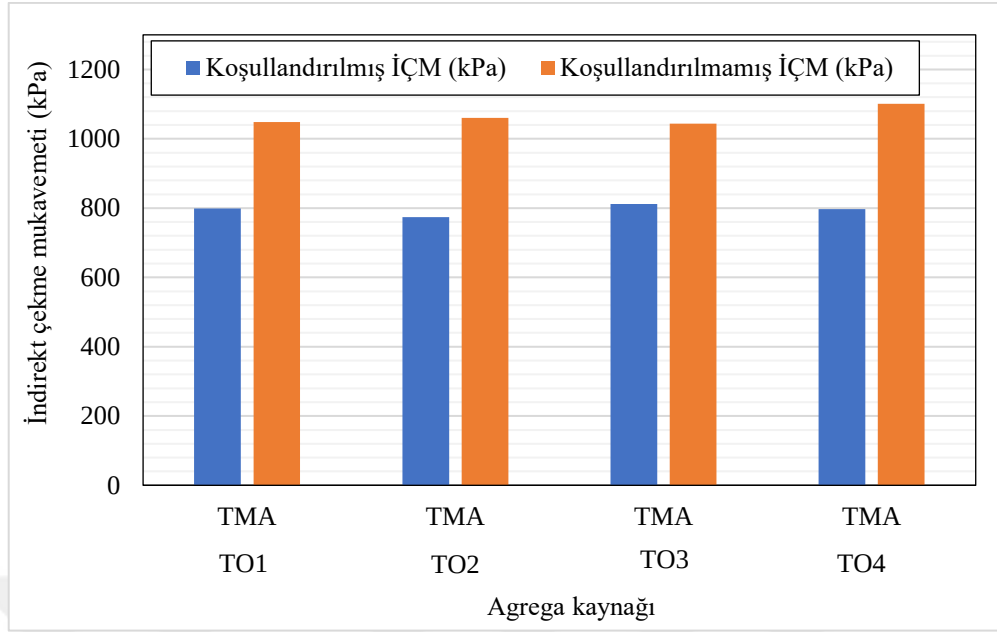
Şekil 139. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen koşullandırılmamış YG AB ve TMA örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiği



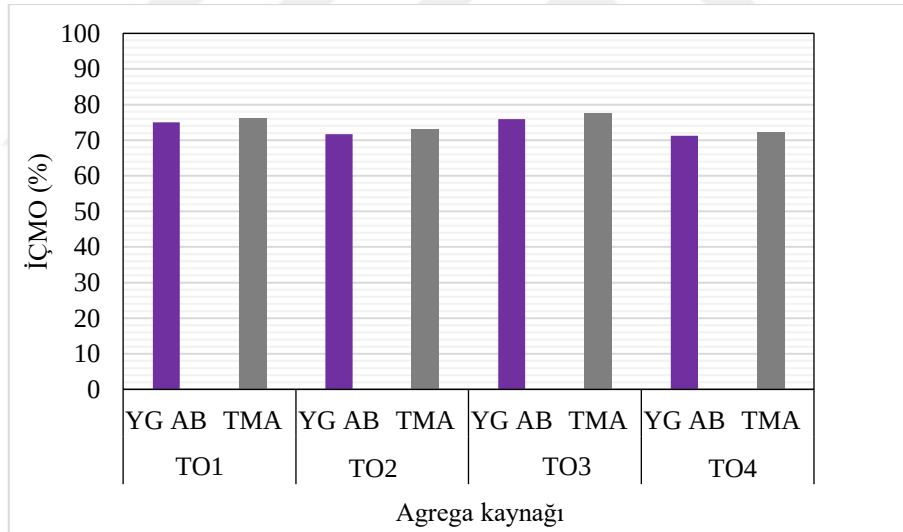
Şekil 140. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen koşullandırılmış YG AB ve TMA örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiği



Şekil 141. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen YG AB örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiği



Şekil 142. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen TMA örneklerine ait İÇM değerlerinin (kPa) grafiği



Şekil 143. Modifiye Lottman deney sonucu elde edilen yoğun gradasyonlu AB ve TMA örneklerine ait İÇMO (%) değerlerinin grafiği

Şekil 139 ve 140 incelendiğinde; TO1 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımlarının koşulsuz numunelerinin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 730.89 ve 798.61 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %9.27 fazla olduğu hesaplanmıştır. Koşullu numunelerin ise ortalama İÇM değerleri sırasıyla 974.14 ve 1048.68 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %7.65 fazla olduğu hesaplanmıştır.

TO2 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımların koşulsuz numunelerinin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 683.72 ve 774.10 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %13.22 fazla olduğu hesaplanmıştır. Koşullu numunelerin ise ortalama İÇM değerleri sırasıyla 953.95 ve 1060.31 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %11.15 fazla olduğu hesaplanmıştır.

TO3 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımların koşulsuz numunelerinin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 778.40 ve 811.53 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %4.26 fazla olduğu hesaplanmıştır. Koşullu numunelerin ise ortalama İÇM değerleri sırasıyla 1024.84 ve 1044.18 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %1.89 fazla olduğu hesaplanmıştır.

TO4 taş ocağı için YG AB ve TMA karışımların koşulsuz numunelerinin ortalama İÇM değerleri sırasıyla 641.18 ve 796.77 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %24.27 fazla olduğu hesaplanmıştır. Koşullu numunelerin ise ortalama İÇM değerleri sırasıyla 900.28 ve 1100.84 kPa olarak belirlenmiş ve TMA karışımına ait İÇM değerinin YG AB karışımına ait değerinden %22.28 fazla olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 141 incelendiğinde; YG AB karışımların koşulsuz örneklerinin ortalama İÇM değerlerinde en yüksek değer 778.40 kPa değer ile TO3 ocağına ve en düşük değer 641.18 kPa değer ile TO4 ocağına ait olduğu görülmüştür. Tüm ocaklar kıyaslandığında; ortalama İÇM değerleri sırasıyla en yüksekten en düşüğe 778.40, 730.89, 683.72 ve 641.18 kPa değerleriyle TO3, TO1, TO2 ve TO4 ocaklarına ait olduğu görülmüştür. Koşullu örneklerin ortalama İÇM değerlerinde ise en yüksek değer 1024.84 kPa değer ile TO3 ocağına ve en düşük değer 900.28 kPa değer ile TO4 ocağına ait olduğu görülmüştür. Tüm ocaklar kıyaslandığında; ortalama İÇM değerleri sırasıyla en yüksekten en düşüğe 1024.84, 974.17, 953.95 ve 900.28 kPa değerleriyle TO3, TO1, TO2 ve TO4 ocaklarına ait olduğu görülmüştür.

Şekil 142 incelendiğinde; TMA karışımların koşulsuz örneklerinin ortalama İÇM değerlerinde en yüksek değer 811.53 kPa değer ile TO3 ocağına ve en düşük değer 774.10 kPa değer ile TO2 ocağına ait olduğu görülmüştür. Tüm ocaklar kıyaslandığında; ortalama İÇM değerleri sırasıyla en yüksekten en düşüğe 811.53, 798.61, 796.77 ve 774.10 kPa değerleriyle TO3, TO1, TO4 ve TO2 ocaklarına ait olduğu görülmüştür. Koşullu

örneklerin ortalama İÇM değerlerinde ise en yüksek değerin 1100.84 kPa değer ile TO4 ocağına ve en düşük değerin 1044.18 kPa değer ile TO3 ocağına ait olduğu görülmüştür. Tüm ocaklar kıyaslandığında; ortalama İÇM değerleri sırasıyla en yüksekten en düşüğe 1100.84, 1060.31, 1048.68 ve 1044.18 kPa değerleriyle TO4, TO2, TO1 ve TO3 ocaklarına ait olduğu görülmüştür.

Hicks'e (1991) göre Lottman prosedürüne göre İÇMO değerinin 0.70'in üzerinde kabul edilebileceğini belirtmektedir (Çevrim, 2021). Bu doğrultuda tüm ocaklara ait YG AB ve TMA karışımlarının İÇMO değerleri bu eşik değeri sağladığı görülmüştür. Ancak Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre (KGM, 2023) bu oran 0.80 olarak önerilmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde ise ocaklara ait YG AB ve TMA karışımlarının İÇMO değerleri bu eşik değerin altında kaldığı görülmüştür. TO4 ocağına ait YG AB karışımın İÇMO değeri bu değerden %5.06 ve TMA karışımının değeri ise %2.85 daha az bir değerle eşik değerine en yakın sonucu verdiği belirlenmiştir. YG AB ve TMA karışımları için sırasıyla %6.21 ve %4.81 daha az bir değerle TO1 ocağının bu eşik değere yakın diğer ocak olduğu belirlenmiştir.

Sachin ve Mallesh'e (2019) göre; SiO₂, bazalt ve dolerit ile karşılaştırıldığında tüm granitik kayalarda baskındır. Benzer şekilde CaO, FeO ve MgO tüm granitik kayalarda düşük içerik oluştururken bazalt ve dolerit'te nispeten daha fazladır. İstatistiksel analiz, artan SiO₂ ve azalan CaO, FeO ve MgO ile daha fazla soyulma eğilimi olduğunu ve bazalt ve dolerit durumunda bunun tersinin olduğunu göstermiştir. Katı bir kayaç yüzeyinde bir sıvının diğeri tarafından yer değiştirmesi, bir sisteme etki eden fiziko-kimyasal kuvvetlerin sürecidir. Agregat yüzeyleri elektriksel olarak yüklüdür ve silika içeren agregalar zayıf negatif yüzey yüklerine sahiptir. Bitüm ile agregat yüzeyi arasındaki bağ, nispeten zayıf dispersiyon kuvvetlerinden kaynaklanır. Güçlü kuvvetler nedeniyle polar sıvı su, agregaların negatif yüklü yüzeylerine çok fazla çekilir. Bitüm agregat yüzeyine yapışsa da, su durumunda çekim kuvvetleri çok daha fazladır. Bu, agreganın hidrofilik özelliklerinden kaynaklanır ve bu, SiO₂ varlığında daha da artar. Ayrıca, CaO, FeO ve MgO içeriğinin nispeten düşük olması ve SiO₂ içeriğinin yüksek olması, granitik kayalarda soyulma sürecini hızlandırırken, bazalt kayalarında bu süreç tam tersidir.

Little ve Jones'a (2003) göre; genel bir hipotez, asidik agregaların hidrofobik, bazik agregaların ise hidrofilik olduğudur.

Udaltsov'a (2024) göre; agregaların mineral bileşimi, yüzey özellikleri, katkı maddeleri ve bitüm, malzemelerin yapışma özelliklerini etkilemektedir. Granit ve silisli

kayaçlar ile albit, anortit, kuvars ve feldispat mineralleri içeren agregalar adezyon üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Ayrıca, silika ve potasyum oksit miktarı arttıkça yapışma zayıflarken, büyük ölçüde alüminyum, magnezyum, kalsiyum oksit ve demir içeren agregalar yapışma özelliklerini iyileştirmektedir.

Zeng vd.'ne (2025) göre; agrega ile asfalt arasındaki adezyonu etkileyen oksitlerin başlıca dört türüdür: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO ve CaO . Bunlar arasında CaO ve MgO asfalta karşı daha güçlü adezyon gösterirken, SiO_2 ve Al_2O_3 daha zayıf adezyon sergilemektedir.

Deney sonuçları, yukarıda belirtilen bulgular doğrultusunda değerlendirildiğinde; İÇMO değerlerinin hem YG AB hem de TMA karışımları için yüksekten düşüğe doğru TO3, TO1, TO2 ve TO4 şeklinde sıralandığı görülmüştür. Benzer biçimde, SiO_2 ya da $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ yüzdeleri düşükten yükseğe doğru sıralandığında, İÇMO değerleri ile aynı sıralamanın ortaya çıktığı belirlenmiştir. Buna karşın, $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ veya $\text{CaO} + \text{MgO}$ içerikleri yüksekten düşüğe doğru sıralandığında yine İÇMO değerleriyle aynı sıralamanın oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, SiO_2 veya $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ içeriğinin artmasının soyulma eğilimini artırdığını ve dolayısıyla agreganın asfalta karşı daha zayıf bir adezyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ya da $\text{CaO} + \text{MgO}$ içeriğinin artması, agreganın asfalta karşı daha güçlü bir adezyon performansı sergilediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, agreganın kimyasal bileşiminin aderans davranışı üzerinde belirleyici olduğunu ve özellikle bazik oksit içeriklerinin artışının asfalt-agrega bağının güçlenmesine katkı sağladığını doğrulamaktadır.

Yoğun gradasyonlu AB ve TMA Aşınma karışımlarının performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen tekrarlı sünme deney sonuçları Tablo 62-63 ve Şekil 144-146'da verilmiştir. Ayrıca sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2) Tablo 64'te verilmiştir.

Tablo 62. YG AB karışımlarına ait tekrarlı sünme deney sonuçları

Yük Döngüsü	TO1 YG AB	TO2 YG AB	TO3 YG AB	TO4 YG AB
2	0,318755	0,381957	0,471067	0,398129
10	0,364458	0,433989	0,498327	0,443192
20	0,393192	0,465355	0,516269	0,472292
30	0,414471	0,488074	0,529521	0,494495
40	0,43124	0,505627	0,540028	0,512231
50	0,44492	0,519555	0,548774	0,526702
70	0,4657	0,541398	0,562825	0,549389
100	0,487715	0,564717	0,578467	0,573945
150	0,511716	0,590164	0,596402	0,601793

Tablo 62'nin devamı

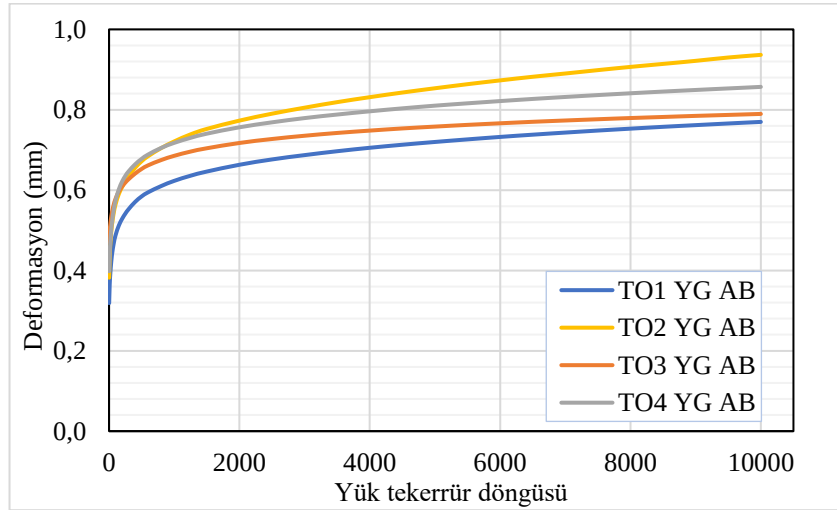
200	0,528331	0,60745	0,608943	0,621067
250	0,541434	0,622419	0,618715	0,635384
300	0,552532	0,635028	0,62707	0,646678
400	0,570533	0,655485	0,64108	0,664134
500	0,584309	0,671819	0,652616	0,677742
600	0,594587	0,684528	0,661747	0,688632
800	0,610084	0,704543	0,674833	0,705024
1000	0,623024	0,721141	0,685375	0,717631
1250	0,635739	0,738688	0,695881	0,730083
1500	0,646202	0,752306	0,704134	0,740458
2000	0,663046	0,772929	0,717277	0,756336
2500	0,676344	0,790166	0,727208	0,768662
3000	0,687109	0,805122	0,735304	0,77925
3500	0,696788	0,81896	0,742276	0,788103
4000	0,705335	0,831273	0,748083	0,796117
4500	0,712904	0,842819	0,753461	0,803481
5000	0,719827	0,853487	0,758075	0,810164
5500	0,726239	0,863602	0,762354	0,816011
6000	0,732387	0,873082	0,766302	0,821575
6500	0,737944	0,882069	0,769993	0,826893
7000	0,743213	0,890212	0,773287	0,831834
7500	0,748228	0,898593	0,776416	0,836517
8000	0,752943	0,906681	0,779376	0,841007
8500	0,757522	0,914071	0,782039	0,84527
9000	0,761726	0,92173	0,784726	0,849224
9500	0,765846	0,930014	0,787139	0,853063
10000	0,769774	0,936628	0,789608	0,856909

Tablo 63. TMA karışımlarına ait tekrarlı sünme deney sonuçları

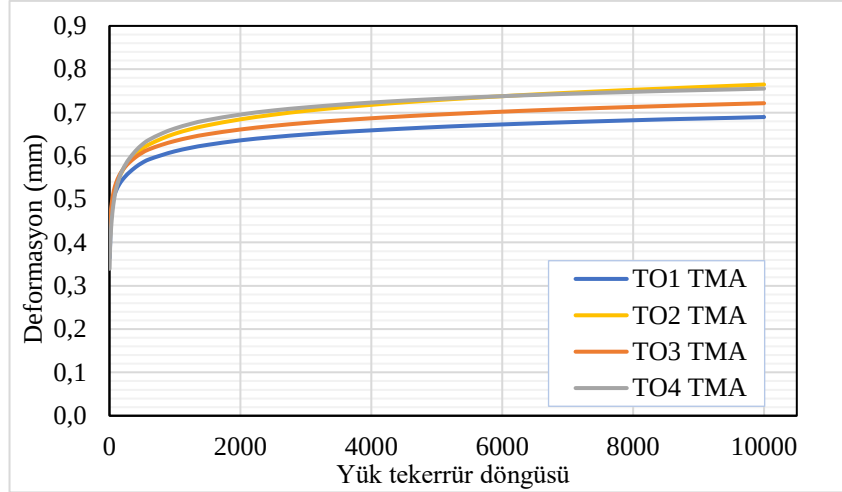
Yük Döngüsü	TO1 TMA	TO2 TMA	TO3 TMA	TO4 TMA
2,0000	0,3644	0,3775	0,4164	0,3392
10,0000	0,3961	0,4192	0,4481	0,3898
20,0000	0,4674	0,4450	0,4688	0,4211
30,0000	0,4788	0,4642	0,4842	0,4438
40,0000	0,4879	0,4790	0,4964	0,4614
50,0000	0,4955	0,4911	0,5062	0,4759
70,0000	0,5069	0,5096	0,5212	0,4986
100,0000	0,5196	0,5289	0,5371	0,5227
150,0000	0,5344	0,5507	0,5548	0,5494
200,0000	0,5451	0,5660	0,5670	0,5677
250,0000	0,5539	0,5781	0,5764	0,5814
300,0000	0,5614	0,5883	0,5842	0,5930
400,0000	0,5740	0,6046	0,5970	0,6116

Tablo 63'ün devamı

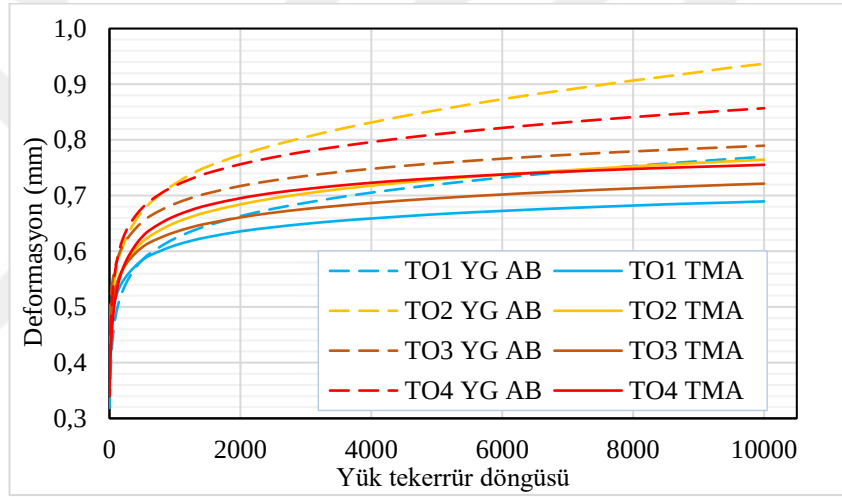
500,0000	0,5840	0,6168	0,6072	0,6260
600,0000	0,5916	0,6259	0,6149	0,6367
800,0000	0,6018	0,6398	0,6256	0,6516
1000,0000	0,6106	0,6511	0,6344	0,6633
1250,0000	0,6189	0,6619	0,6431	0,6742
1500,0000	0,6254	0,6707	0,6500	0,6828
2000,0000	0,6358	0,6843	0,6609	0,6954
2500,0000	0,6432	0,6950	0,6693	0,7048
3000,0000	0,6494	0,7039	0,6761	0,7118
3500,0000	0,6546	0,7114	0,6817	0,7179
4000,0000	0,6589	0,7178	0,6868	0,7230
4500,0000	0,6629	0,7236	0,6913	0,7275
5000,0000	0,6666	0,7288	0,6952	0,7313
5500,0000	0,6698	0,7334	0,6987	0,7348
6000,0000	0,6726	0,7378	0,7020	0,7379
6500,0000	0,6752	0,7419	0,7051	0,7406
7000,0000	0,6777	0,7456	0,7078	0,7433
7500,0000	0,6800	0,7490	0,7106	0,7456
8000,0000	0,6822	0,7525	0,7129	0,7478
8500,0000	0,6843	0,7555	0,7152	0,7499
9000,0000	0,6861	0,7587	0,7174	0,7517
9500,0000	0,6877	0,7617	0,7195	0,7534
10000,0000	0,6897	0,7647	0,7215	0,7553



Şekil 144. YG AB karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 145. TMA karışımlarının 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 146. YG AB ve TMA karışımlarının 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisinin kıyası

Tablo 64. Sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2)

TO1 YG AB	TO2 YG AB	TO3 YG AB	TO4 YG AB	TO1 TMA	TO2 TMA	TO3 TMA	TO4 TMA
2,732854	3,263783	3,877575	3,365281	3,042051	3,186866	3,458161	2,915981
3,78825	4,496718	5,072981	4,577417	4,317698	4,320999	4,58456	4,05424
4,038315	4,767144	5,228954	4,833934	4,731025	4,545922	4,764987	4,32427
4,228557	4,968505	5,347745	5,033631	4,833371	4,716208	4,90286	4,526044
4,380799	5,125909	5,444006	5,194665	4,917016	4,850864	5,012747	4,6868
9,106202	10,60953	11,11598	10,76091	10,02444	10,00677	10,2736	9,745139
14,30123	16,59172	17,11938	16,85001	15,39886	15,57651	15,87388	15,31875
24,98577	28,87203	29,37173	29,39346	26,35101	26,98919	27,29661	26,80106
26,00118	29,94035	30,13361	30,57151	26,98815	27,91744	28,04354	27,92586
26,74412	30,74674	30,69144	31,41127	27,47459	28,60211	28,58338	28,72742

Tablo 64'ün devamı

27,34914	31,43618	31,14463	32,05154	27,88019	29,15837	29,01546	29,36036
56,15324	64,52565	63,40749	65,54059	56,76794	59,64332	59,06419	60,22982
57,74207	66,36522	64,6848	67,09381	57,90117	61,06789	60,21161	61,8806
58,94476	67,81739	65,71817	68,31871	58,77954	62,13221	61,10256	63,13655
120,4671	138,9072	133,658	139,3656	119,3339	126,5675	124,0476	128,8386
123,3109	142,5685	136,0208	142,2655	121,2369	129,0902	126,003	131,4927
157,3454	182,4787	172,657	180,9643	153,6845	164,1307	159,6956	167,1905
160,2426	186,3742	175,0018	183,8176	155,5384	166,5748	161,6443	169,6246
327,3121	381,3085	355,3528	374,1985	315,3092	338,7457	327,7185	344,5317
334,8477	390,7737	361,1213	381,2495	319,7614	344,8253	332,5431	350,0381
340,8633	398,8221	365,628	386,978	323,1692	349,7272	336,3456	354,1564
345,9741	406,0206	369,395	391,8383	326,0115	353,8184	339,4559	357,4289
350,5306	412,5583	372,5899	396,0551	328,3806	357,2854	342,1309	360,2291
354,5597	418,5228	375,3862	399,8995	330,4547	360,3417	344,5092	362,6349
358,1828	424,0763	377,8841	403,4112	332,3718	363,0838	346,6023	364,7033
361,5164	429,2721	380,1073	406,5437	334,0831	365,5479	348,4717	366,5183
364,6565	434,1709	382,164	409,3963	335,5771	367,7973	350,1897	368,1538
367,5829	438,7876	384,0737	412,117	336,9404	369,903	351,7846	369,6232
370,2894	443,0701	385,8199	414,6819	338,2182	371,8528	353,2306	370,9731
372,8604	447,2012	387,4257	417,0879	339,4064	373,6474	354,5959	372,2111
375,2929	451,3186	388,9482	419,3812	340,5313	375,3797	355,8685	373,3559
377,6164	455,188	390,3539	421,5694	341,6196	377,0026	357,0289	374,4346
379,8121	458,9502	391,6914	423,6237	342,5958	378,5607	358,1516	375,4026
381,8931	462,936	392,9661	425,5718	343,4531	380,1041	359,2293	376,2856
383,9051	466,6604	394,1867	427,4929	344,3478	381,6009	360,26	377,1857
7029,6	8339,5	7440,8	7932,5	6551,4	7138,3	6831,7	7158,6

Tablo 64 incelendiğinde; ocaklara ait YG AB karışımların sünme eğrilerinin altında kalan toplam alanlar kıyaslandığında en yüksek deformasyonu (deformasyona karşı en dirençsiz) 8339.3 br² ile TO2 ve en düşük deformasyonu 7029.6 br² ile TO1 ocağı göstermiştir. Ocaklar arasındaki deformasyona en dirençsizden en dirençliye doğru sıralamanın TO2 (8339.5 br²) > TO4 (7932.5 br²) > TO3 (7440.8 br²) > TO1 (7029.6 br²) şeklinde olduğu görülmüştür. TMA karışımların sünme eğrilerinin altında kalan toplam alanlar kıyaslandığında ise en yüksek deformasyonu (deformasyona karşı en dirençsiz) 7158.6 br² ile TO4 ve en düşük deformasyonu 6554.4 br² ile TO1 ocağı göstermiştir. Ocaklar, deformasyona en dirençsizden en dirençliye doğru sıralandığında TO4 (7158.6 br²) > TO2 (7138.3 br²) > TO3 (6831.7 br²) > TO1 (6551.4 br²) şeklinde olduğu görülmüştür. YG-AB ve TMA karışımlarında TO4 ocağına ait agregaların en düşük deformasyon direncini göstermesi, bu kayacın hem cam fazı içermesi hem de porfirik doku özellikleri

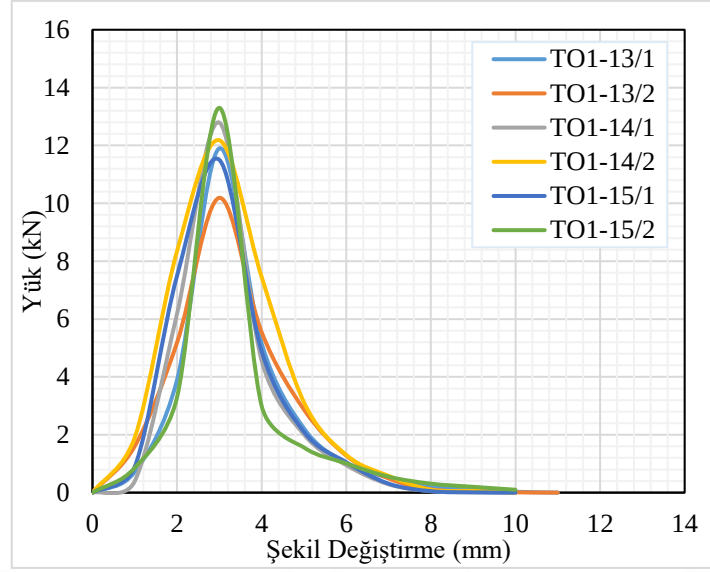
sergilemesiyle ilişkilendirilmektedir. Cam fazı, magmanın çok hızlı soğuması sonucu oluşan amorf bir yapı olup, kristal örgüsünün gelişmemiş olması nedeniyle atmosferik koşullar altında kimyasal ve fiziksel bozunmaya daha duyarlıdır. Öte yandan, porfirik doku; iri fenokristallerin, daha ince daneli veya camsı bir matriks içerisinde dağıldığı, iki evreli kristallenme sonucu oluşan heterojen bir yapıyı temsil eder. Bunun deformasyon direncinin zayıflamasına neden olabileceği düşünülmektedir. Buna karşılık, TO1 ocağı agregalarının en yüksek dayanımı sergilemesi, bu kayacın daha yavaş bir soğuma hızında kristallenmiş olması ve bu süreç sonucunda oluşan intersertal dokuya sahip bulunmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. İntersertal dokuda minerallerin sıkı bir biçimde kenetlenmiş olması, hem içyapısal sürekliliği artırmakta hem de dış yükler altında daha yüksek mekanik bütünlük sağlamaktadır. Bu nedenle, TO1 ocağı agregaları petrografik özellikleri bakımından daha dayanıklı bir davranış sergilemektedir.

TO1 ocağına ait YG AB ve TMA karışımları kıyaslandığında TMA karışımının deformasyona %7.30 daha dirençli olduğu belirlenmiştir. TO2 ocağına ait TMA karışımının YG AB karışıma kıyasla deformasyona %6.83 daha dirençli olduğu belirlenmiştir. TO3 ocağına ait karışımlar kıyaslandığında TMA karışımının YG AB karışıma göre deformasyona %8.92 daha dirençli olduğu görülmüştür. TO4 ocağına ait TMA karışımının YG AB karışımına göre deformasyona %10.81 daha dirençli olduğu tespit edilmiştir.

Yoğun gradasyonlu AB ve TMA Aşınma karışımlarının performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen SCB deney sonuçları ve sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2) Tablo 65 – 83 ve Şekil 147 -156’da verilmiştir.

Tablo 65. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları

TO1						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0	0	0	0	0	0
1	0,72	1,61	0,4	1,91	0,9	0,86
2	3,9	5,19	6,19	8,35	7,5	3,3
3	11,9	10,19	12,79	12,18	11,5	13,3
4	5,15	5,54	4,56	7,45	4,88	2,99
5	2,22	2,87	2,01	3,12	2,1	1,56
6	1,01	1,28	0,95	1,301	1,05	1,01
7	0,52	0,49	0,289	0,58	0,31	0,55
8	0,21	0,11	0,05	0,1	0,05	0,31
9	0,1	0,04	0,01	0,06	0,01	0,2
10	0,03	0,01	0	0	0	0,1
11	0	0				



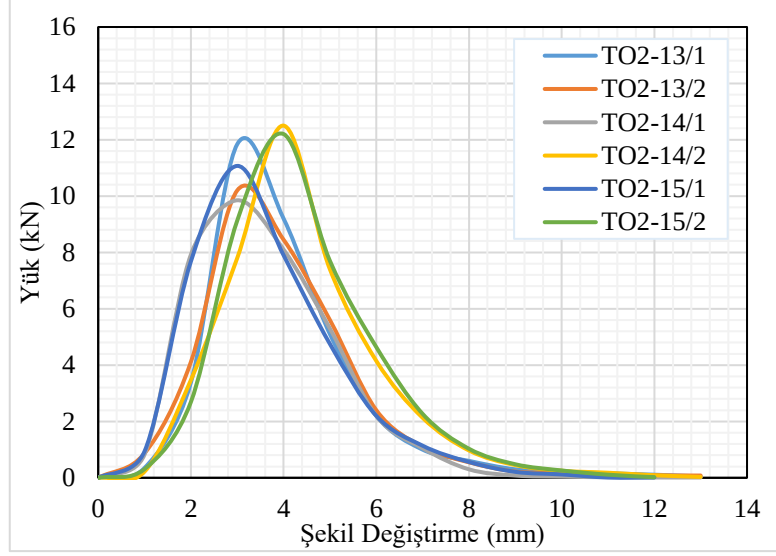
Şekil 147. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri

Tablo 66. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2)

TO1					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0,36	0,81	0,20	0,96	0,45	0,43
2,31	3,40	3,30	5,13	4,20	2,08
7,90	7,69	9,49	10,27	9,50	8,30
8,53	7,87	8,68	9,82	8,19	8,15
19,095	19,760	21,660	26,165	22,340	18,955
127.975					

Tablo 67. TO2 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları

TO2						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,35	0,87	0,83	0,22	0,94	0,31
2	3,38	4,11	7,92	3,47	7,68	2,69
3	11,84	10,20	9,85	7,80	11,07	9,13
4	9,20	8,45	8,10	12,50	7,90	12,20
5	5,10	5,60	5,30	7,40	4,75	7,70
6	2,20	2,40	2,20	4,15	2,20	4,64
7	1,00	1,10	1,05	2,13	1,14	2,27
8	0,60	0,55	0,30	0,97	0,56	1,03
9	0,30	0,22	0,08	0,45	0,21	0,48
10	0,22	0,18	0,04	0,25	0,12	0,26
11	0,16	0,14	0,02	0,18	0,01	0,11
12	0	0	0,01	0,09	0,01	0,02
13	0	0	0,01	0,03		



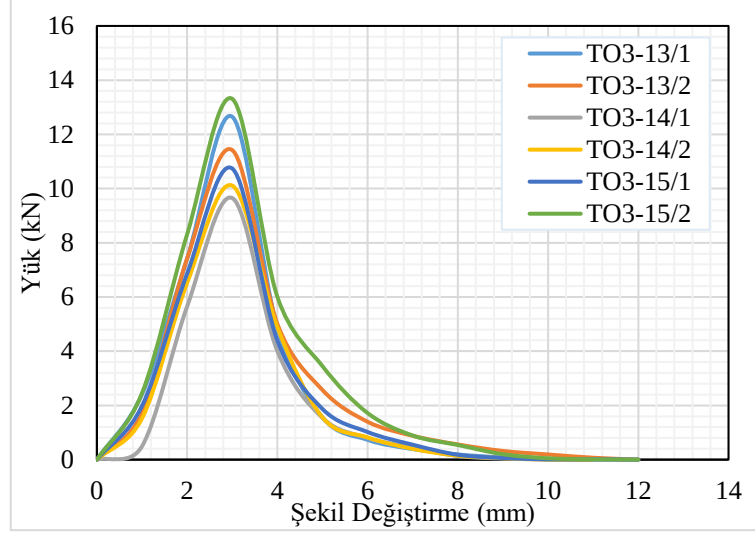
Şekil 148. TO2 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri

Tablo 68. TO2 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br²)

TO2					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0,175	0,435	0,415	0,11	0,47	0,155
1,865	2,49	4,375	1,845	4,31	1,5
7,61	7,155	8,885	5,635	9,375	5,91
10,52	9,325	8,975	10,15	9,485	10,665
			9,95		9,95
20,17	19,405	22,65	27,69	23,64	28,18
					141,735

Tablo 69. TO3 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları

TO3						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0	0	0	0	0	0
1	2,41	1,71	0,49	1,52	1,98	2,45
2	7,41	7,42	5,65	6,52	6,86	8,31
3	12,65	11,42	9,65	10,11	10,74	13,31
4	4,88	5,01	4,01	4,89	4,4	6,01
5	1,56	2,57	1,54	1,56	1,87	3,45
6	0,73	1,398	0,799	0,821	1,02	1,72
7	0,39	0,88	0,45	0,398	0,55	0,89
8	0,19	0,56	0,133	0,146	0,18	0,54
9	0,08	0,32	0,0411	0,055	0,06	0,2
10	0,01	0,19	0,01	0,002	0,01	0,05
11	0	0,07	0	0	0,01	0,01
12		0	0		0	0



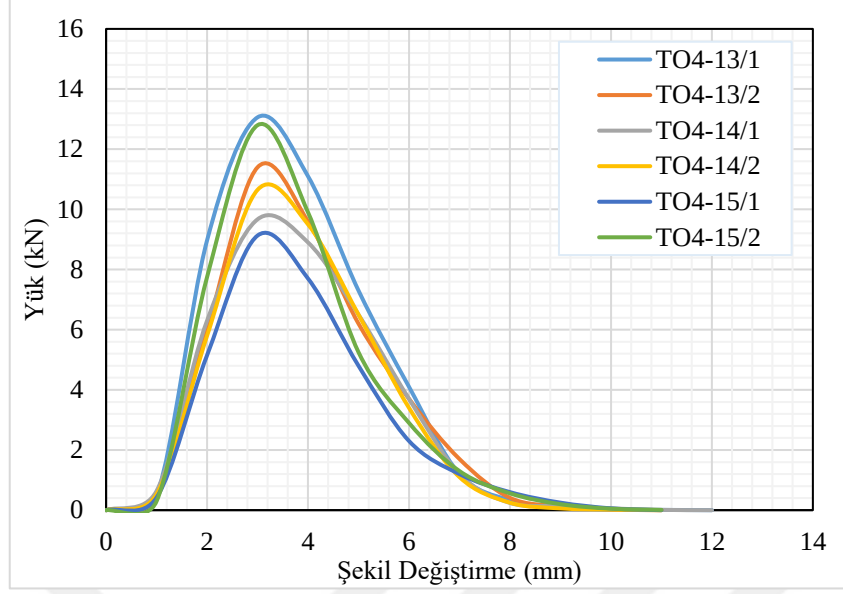
Şekil 149. TO3 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri

Tablo 70. TO3 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2)

TO3					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
1,205	0,855	0,245	0,76	0,99	1,225
4,91	4,565	3,07	4,02	4,42	5,38
10,03	9,42	7,65	8,315	8,8	10,81
8,765	8,215	6,83	7,5	7,57	9,66
24,910	23,055	17,795	20,595	21,780	27,075
					135,210

Tablo 71. TO4 taş ocağına ait YG AB karışımları için SCB deney sonuçları

TO4						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0	0	0	0	0	0
1	0,48	0,44	0,64	0,53	0,42	0,3
2	8,97	6,01	6,3	5,8	5,15	7,75
3	13,06	11,4	9,67	10,65	9,13	12,8
4	11,1	9,6	8,9	9,5	7,7	9,9
5	7,3	6,2	6,5	6,5	4,8	5,25
6	4,1	3,7	3,7	3,4	2,3	2,9
7	1,2	1,7	1,2	1,1	1,2	1,3
8	0,33	0,41	0,24	0,25	0,6	0,56
9	0,1	0,13	0,14	0,06	0,25	0,2
10	0,022	0,026	0,06	0,02	0,06	0,05
11	0,01	0	0,01	0	0	0,01
12	0		0			



Şekil 150. TO4 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri

Tablo 72. TO4 taş ocağına ait YG AB karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2)

TO4					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0,24	0,22	0,32	0,265	0,21	0,15
4,725	3,225	3,47	3,165	2,785	4,025
11,015	8,705	7,985	8,225	7,14	10,275
12,08	10,5	9,285	10,075	8,415	11,35
28,060	22,650	21,060	21,730	18,550	25,800
137,850					

Tablo 73. YG AB karışımlarına ait maksimum kırılma yükü ortalamaları

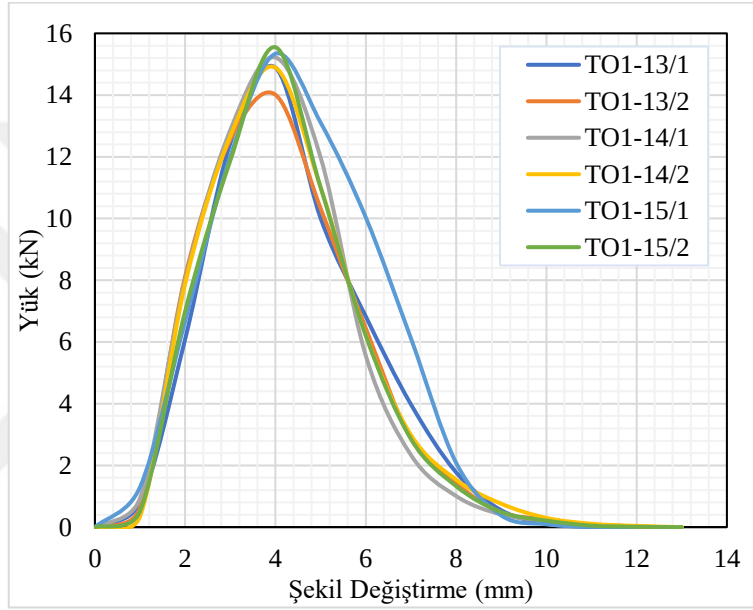
Ocak	Maks. Kırılma Yükü Ortalamaları
TO1	11.97
TO2	11.28
TO3	11.31
TO4	11.12

Tablo 74. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları

TO1						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0	0	0	0	0	0
1	0,8	0,62	0,94	0,35	1,3	0,52
2	6,1	8,13	8,02	7,89	6,68	7
3	12,44	12,56	12,87	12,67	12,01	11,88
4	14,89	14,01	15,22	14,89	15,34	15,55

Tablo 74'ün devamı

5	10,01	10,33	11,98	11,01	13,11	11,01
6	6,83	6,45	5,56	6,22	10,04	6,21
7	3,98	2,87	2,34	2,99	6,12	2,86
8	1,78	1,41	1,01	1,54	2,09	1,33
9	0,55	0,485	0,412	0,76	0,38	0,4901
10	0,11	0,25	0,205	0,3	0,094	0,2117
11	0,01	0,063	0,0704	0,11	0,01	0,05
12	0,01	0,0044	0	0,04	0	0,0125
13	0	0		0		0



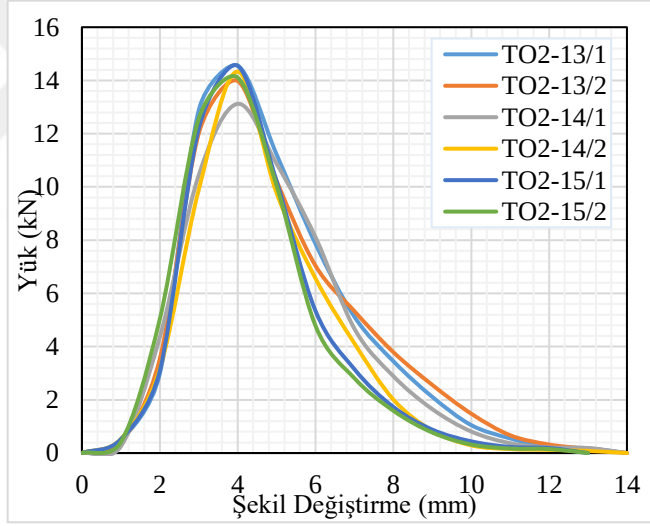
Şekil 151. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri

Tablo 75. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2)

TO1					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0,4	0,31	0,47	0,175	0,65	0,26
3,45	4,375	4,48	4,12	3,99	3,76
9,27	10,345	10,445	10,28	9,345	9,44
13,665	13,285	14,045	13,78	13,675	13,715
12,45	12,17	13,6	12,95	14,225	13,28
39,235	40,485	43,040	41,305	41,885	40,455
246,405					

Tablo 76. TO2 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları

TO2						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0	0	0	0	0	0
1	0,5	0,41	0,25	0,53	0,52	0,41
2	2,98	3,53	4,35	3,16	3,08	5,03
3	12,88	12,01	10,44	9,89	12,19	12,56
4	14,56	13,98	13,12	14,33	14,55	14,11
5	11,22	10,23	10,87	9,77	10,21	10,05
6	7,86	7,04	8,11	6,56	5,34	4,78
7	5,12	5,33	4,67	4,12	3,15	2,81
8	3,45	3,79	2,89	2,01	1,73	1,59
9	2,11	2,56	1,65	0,84	0,88	0,77
10	1,05	1,48	0,81	0,29	0,44	0,32
11	0,55	0,67	0,37	0,15	0,23	0,17
12	0,23	0,32	0,21	0,12	0,19	0,15
13	0,18	0,16	0,19	0,08	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00		



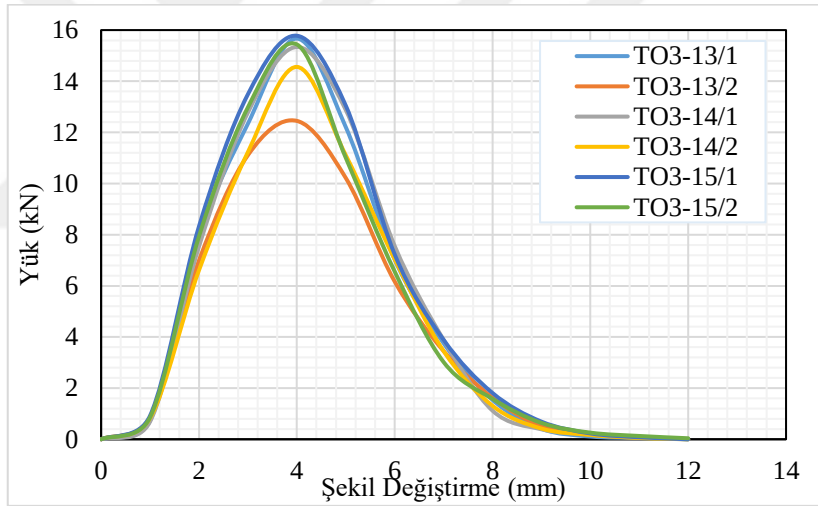
Şekil 152. TO2 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri

Tablo 77. TO2 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br²)

TO2					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0,25	0,205	0,125	0,265	0,26	0,205
1,74	1,97	2,3	1,845	1,8	2,72
7,93	7,77	7,395	6,525	7,635	8,795
13,72	12,995	11,78	12,11	13,37	13,335
12,89	12,105	11,995	12,05	12,38	12,08
36,530	35,045	33,595	32,795	35,445	37,135
					210,545

Tablo 78. TO3 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları

TO3						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0	0	0	0	0	0
1	0,73	0,85	0,69	0,83	0,92	0,86
2	7,91	6,99	7,54	6,61	8,32	7,93
3	12,34	11,11	12,78	11,23	13,49	12,98
4	15,67	12,45	15,34	14,56	15,78	15,44
5	12,21	10,22	12,88	11,11	13,05	11,01
6	7,03	6,17	7,56	7,04	7,23	6,56
7	3,76	3,45	3,89	3,45	3,89	3,02
8	1,54	1,63	1,12	1,31	1,81	1,58
9	0,41	0,51	0,39	0,42	0,69	0,64
10	0,11	0,178	0,189	0,17	0,23	0,26
11	0,05	0,08	0,08	0,05	0,08	0,13
12	0	0,01	0	0	0	0,04
13						0



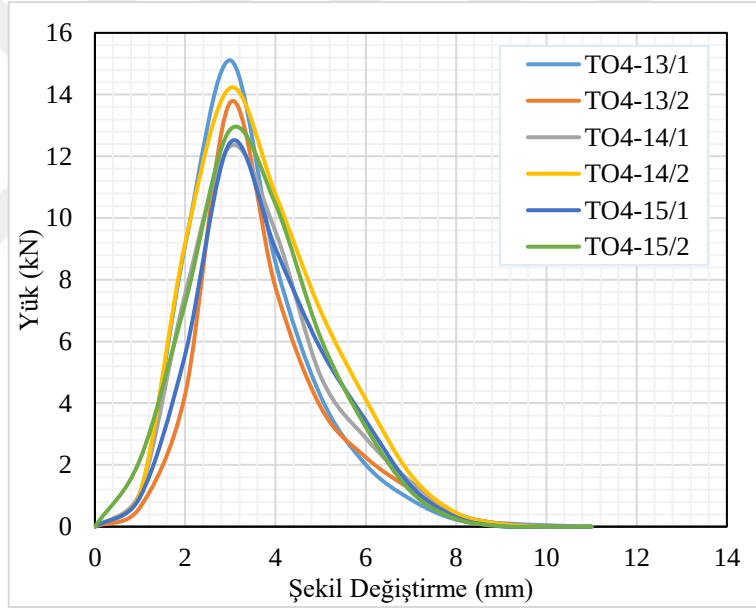
Şekil 153. TO3 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri

Tablo 79. TO3 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br²)

TO3					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0,37	0,43	0,35	0,42	0,46	0,43
4,32	3,92	4,12	3,72	4,62	4,40
10,13	9,05	10,16	8,92	10,91	10,46
14,01	11,78	14,06	12,90	14,64	14,21
13,94	11,34	14,11	12,84	14,42	13,23
42,755	36,510	42,790	38,785	45,035	42,715
248,590					

Tablo 80. TO4 taş ocağına ait TMA karışımları için SCB deney sonuçları

TO4						
	13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0	0	0	0	0	0	0
1	1,05	0,63	1,11	1,08	0,96	2,18
2	9,11	4,29	7,54	9,19	5,58	7,25
3	15,11	13,75	12,33	14,22	12,45	12,87
4	8,56	7,75	9,56	10,77	9,01	10,45
5	4,23	3,88	4,88	6,99	5,76	6,12
6	2,01	2,25	2,87	4,12	3,44	3,23
7	0,88	1,21	1,45	1,67	1,32	1,14
8	0,23	0,39	0,44	0,45	0,31	0,25
9	0,11	0,1	0,09	0,08	0,01	0,02
10	0,045	0,01	0,02	0	0	0,001
11	0	0	0		0	0



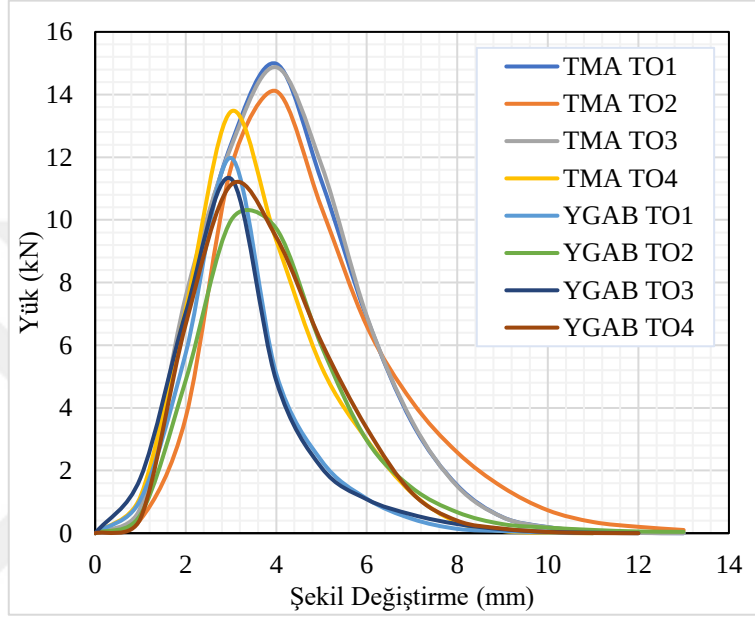
Şekil 154. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri

Tablo 81. TO1 taş ocağına ait TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan alanlar (br^2)

TO4					
13/1	13/2	14/1	14/2	15/1	15/2
0,53	0,32	0,56	0,54	0,48	1,09
5,08	2,46	4,33	5,14	3,27	4,72
12,11	9,02	9,94	11,71	9,02	10,06
11,84	10,75	10,95	12,50	10,73	11,66
29,550	22,545	25,760	29,875	23,495	27,525
					158,750

Tablo 82. TMA karışımlarına ait maksimum kırılma yükü ortalamaları

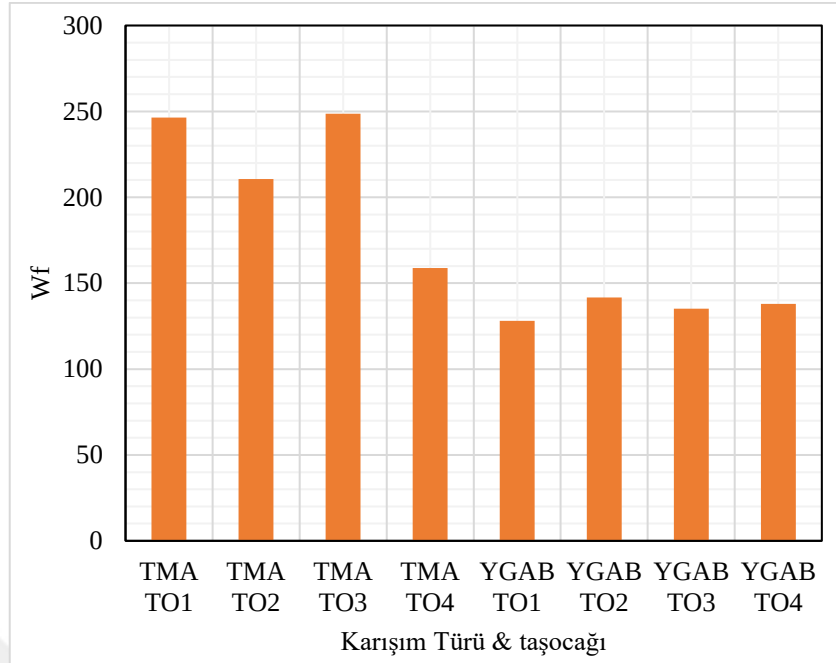
Ocak	Maks. Kırılma Yükü Ortalamaları
TO1	14.98
TO2	14.10
TO3	14.87
TO4	13.45



Şekil 155. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için sünme eğrileri

Tablo 83. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için sünme eğrileri altında kalan toplam alanlar (br²)

TMA TO1	246,405
TMA TO2	210,545
TMA TO3	248,590
TMA TO4	158,750
YGAB TO1	127,975
YGAB TO2	141,74
YGAB TO3	135,210
YGAB TO4	137,850

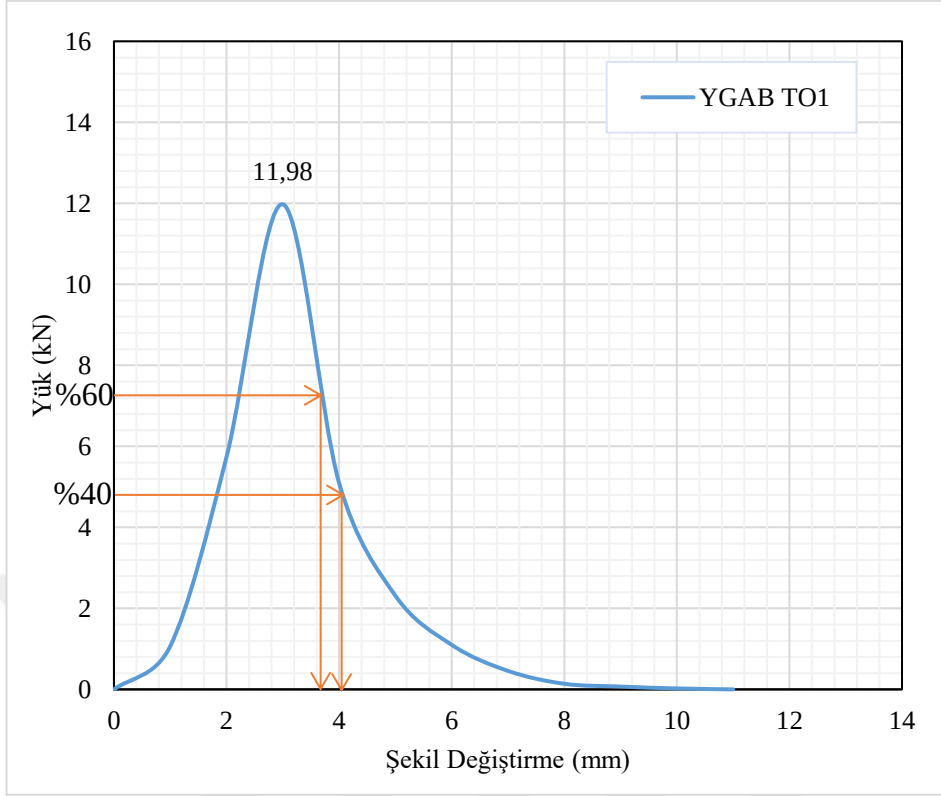


Şekil 156. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için kırılma işinin karşılaştırılması

Tablo 73 ve 82 incelendiğinde YG AB ve TMA karışımları için maksimum kırılma enerjilerinin ortalamaları kıyaslandığında $TO1 > TO3 > TO2 > TO4$ şeklinde sıralamaya sahip oldukları belirlenmiştir.

TO1 taş ocağına ait YG AB ve TMA karışımlarının maksimum kırılma enerjilerinin ortalaması kıyaslandığında TMA karışımının %25.15 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. TO2 taş ocağına ait karışımlar karşılaştırıldığında TMA karışımına değerin YG AB karışımına ait değerden %25 daha fazla olduğu görülmüştür. TO3 taş ocağına ait TMA karışımına ait değerin %31.48 daha fazla olduğu belirlenmiştir. TO4 taş ocağında ise benzer şekilde TMA karışımına ait değer %20.95 daha fazladır.

Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için sünme eğrilerine ait eğimler; grafiklerdeki pik değerlerin %60 ve %40'a denk gelen yük değerleri hesaplandıktan sonra bu değerlere karşılık gelen yer değiştirmeler belirlenmiş ve bu değerlerin oranlanması ile hesaplanmıştır (Şekil 157). Elde edilen sonuçlar Tablo 84'te verilmiştir.



Şekil 157. TO1 taş ocağına ait YG AB karışımının sünme eğrisine ait eğim hesabı

Tablo 84. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için sünme eğrilerine ait eğimler

Karışım	Ocak	Eğim (m)
YG AB	TO1	4,8898
	TO2	2,90857
	TO3	6,4647
	TO4	2,85085
TMA	TO1	4,99428
	TO2	3,52708
	TO3	4,24857
	TO4	4,34194

Eğim değerleri bulunduktan sonra kırılma kırılma enerjisi ve esneklik indeksi değerleri hesaplanmıştır (Tablo 85 - 86). Ayrıca çatlama direnci indeksi (CRI); kırılma enerjisinin maksimum yüke (Pmaks) oranı olarak hesaplanmış ve Tablo 87’de verilmiştir.

Tablo 85. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için kırılma enerjisi değerleri

Karışım	Ocak	Wf (joule)	Ligament uzunluğu	Kalınlık	Alan	G _f (joule/m ²)
YG AB	TO1	127,98	0,0508	0,06475	0,0032893	38906,45426
	TO2	141,74	0,0508	0,06004	0,00305	46471,64358
	TO3	135,21	0,0508	0,06347	0,0032243	41934,99564
	TO4	137,85	0,0508	0,0643	0,0032664	42201,90789
TMA	TO1	246,405	0,0508	0,0639	0,0032461	75907,54501
	TO2	210,55	0,0508	0,0646	0,0032817	64157,68753
	TO3	248,59	0,0508	0,0646	0,0032817	75750,83494
	TO4	158,75	0,0508	0,06448	0,0032756	48464,6402

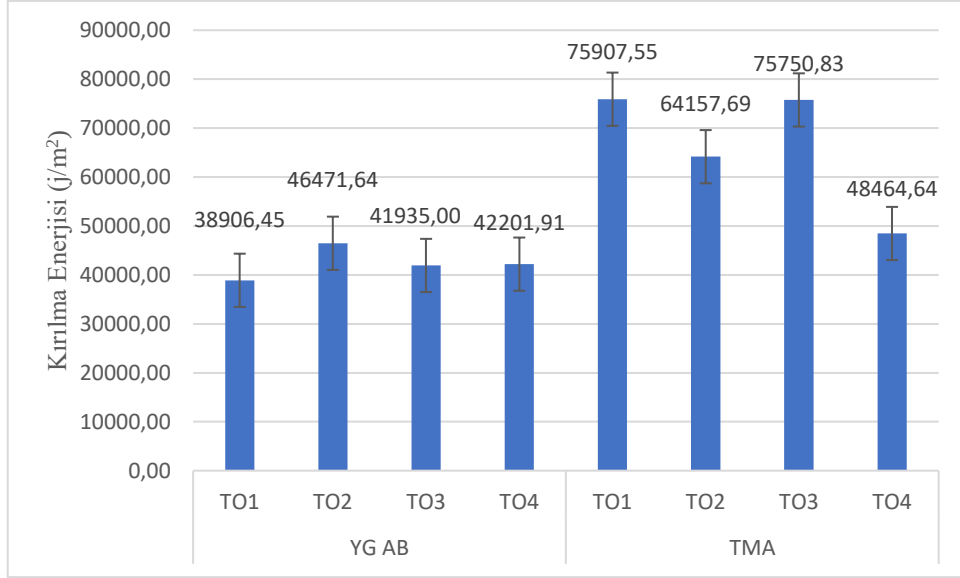
Tablo 86. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için esneklik indeksi (FI) değerleri

Karışım	Ocak	G _f (j/m ²)	m	A	FI
YG AB	TO1	38906,45426	4,8898	0,001	7,95665554
	TO2	46471,64358	2,90857	0,001	15,97748845
	TO3	41934,99564	6,4647	0,001	6,486765919
	TO4	42201,90789	2,85085	0,001	14,80327197
TMA	TO1	75907,54501	4,99428	0,001	15,19889654
	TO2	64157,68753	3,52708	0,001	18,19002901
	TO3	75750,83494	4,24857	0,001	17,82972505
	TO4	48464,6402	4,34194	0,001	11,16197833

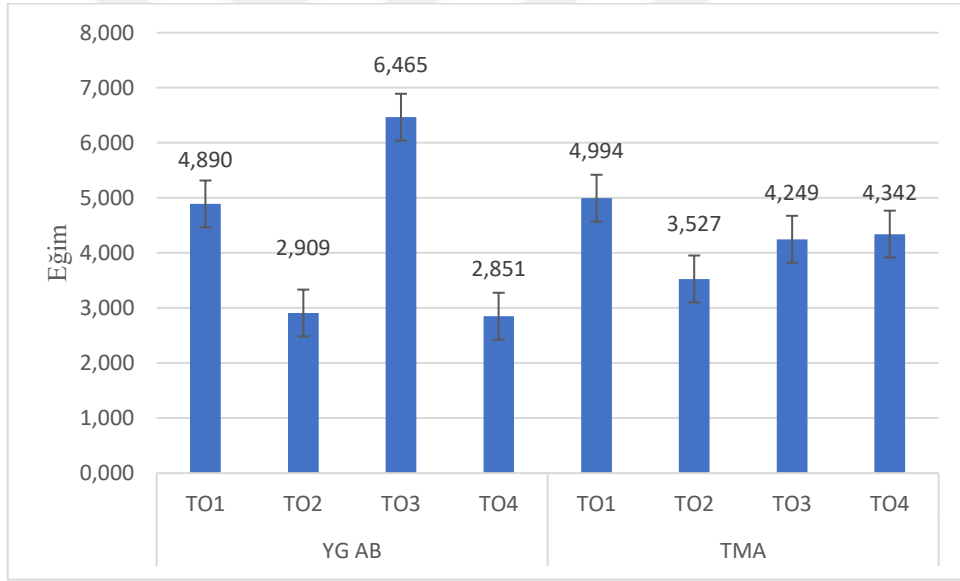
Tablo 87. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için çatlama direnci indeksi (CRI) değerleri

Karışım	Ocak	G _f	P _{max}	CRI
YG AB	TO1	38906,45	11,98	3247,62
	TO2	46471,64	10,18	4564,99
	TO3	41935,00	11,3133	3706,70
	TO4	42201,91	11,11833	3795,71
TMA	TO1	75907,55	14,9833	5066,14
	TO2	64157,69	14,1083	4547,51
	TO3	75750,83	14,87	5094,21
	TO4	48464,64	13,46	3600,64

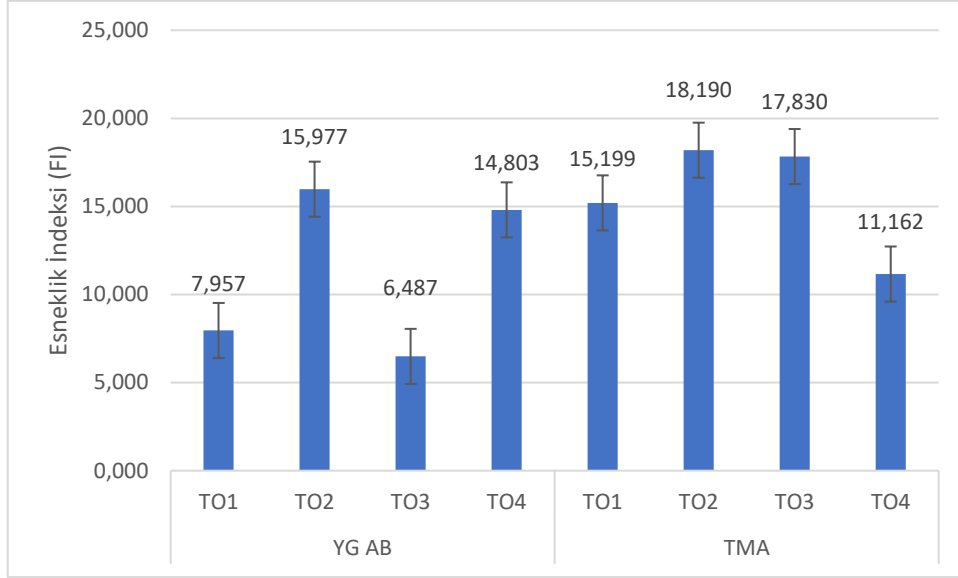
Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için kırılma enerjisi, eğim, esneklik indeksi, maksimum yük ve çatlama direnci indeksi grafikleri çizilmiştir (Şekil 158 – 162).



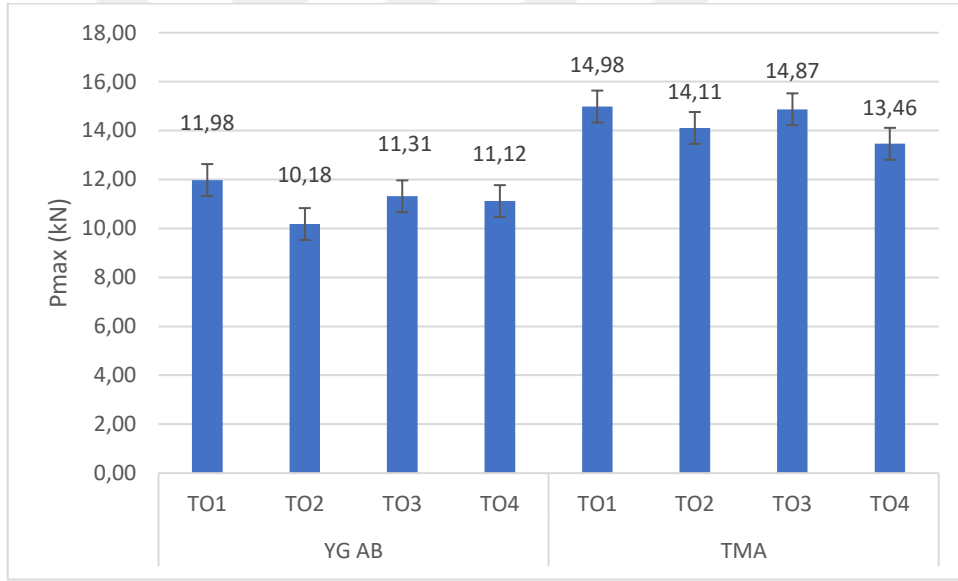
Şekil 158. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için kırılma enerjisi değerlerinin karşılaştırılması



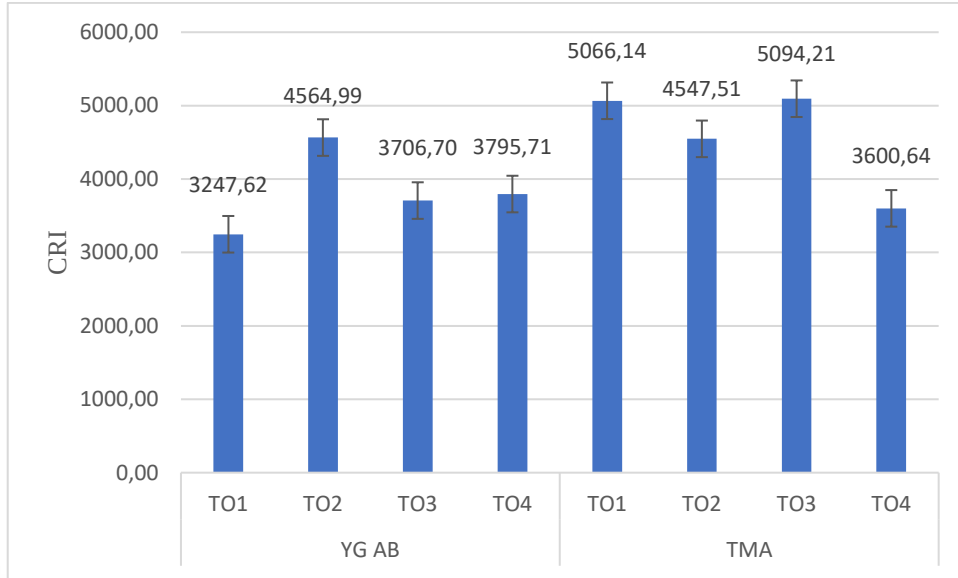
Şekil 159. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için eğim değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 160. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için esneklik indeksi değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 161. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için maksimum yük değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 162. Tüm taş ocaklarına ait YG AB ve TMA karışımları için değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 158 incelendiğinde; kırılma enerjisinin YG AB karışımlarına ait ocaklar için $TO2 > TO4 > TO3 > TO1$ şeklinde sıralandığı görülmüştür. TMA karışımları için ise $TO1 > TO3 > TO2 > TO4$ şeklinde sıralandığı belirlenmiştir. TO1, TO2, TO3 ve TO4 ocakları kıyaslandığında sırasıyla %95.1, %54.70, %80.64 ve %14.84 TMA karışımlarına ait değerlerin YG AB karışımlara ait değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 159 incelendiğinde; eğimin YG AB karışımlarına ait ocaklar için $TO3 > TO1 > TO2 > TO4$ şeklinde sıralandığı görülmüştür. TMA karışımları için ise $TO1 > TO4 > TO3 > TO2$ şeklinde sıralandığı belirlenmiştir. TO1, TO2 ve TO4 ocakları kıyaslandığında sırasıyla %2.13, %21.24 ve %52.30 TMA karışımlarına ait değerlerin YG AB karışımlara ait değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak TO3 ocağına kıyaslandığında ise TMA karışımına ait değer YG AB karışımına ait değerden %34.28 daha az olduğu belirlenmiştir.

Şekil 160 incelendiğinde; esneklik indeksi değerlerinin YG AB karışımlarına ait ocaklar için $TO2 > TO4 > TO1 > TO3$ ve TMA karışımları için ise $TO2 > TO3 > TO1 > TO4$ şeklinde sıralandığı görülmüştür. TO1, TO2 ve TO3 ocakları kıyaslandığında sırasıyla %91.01, %13.60 ve %174.86 TMA karışımlarına ait değerlerin YG AB karışımlara ait değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak TO4 ocağına kıyaslandığında ise TMA karışımına ait değer YG AB karışımına ait değerden %24.60 daha az olduğu belirlenmiştir.

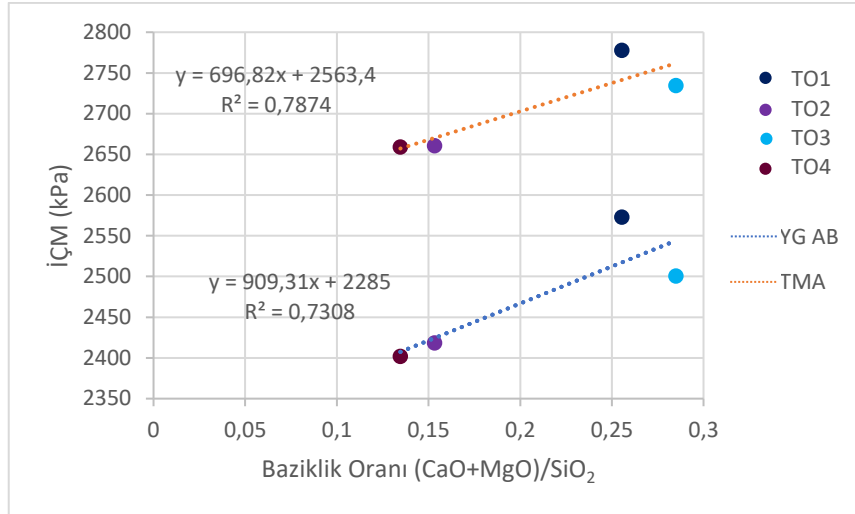
Şekil 161 incelendiğinde; maksimum yüklerin YG AB karışımlarına ait ocaklar için $TO1 > TO3 > TO4 > TO2$ ve TMA karışımları için ise $TO1 > TO3 > TO2 > TO4$ şeklinde sıralandığı görülmüştür. TO1, TO2, TO3 ve TO4 ocakları kıyaslandığında sırasıyla %25.04,

%38.61, %31.48 ve %21.04 TMA karışımlarına ait değerlerin YG AB karışımlara ait değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür.

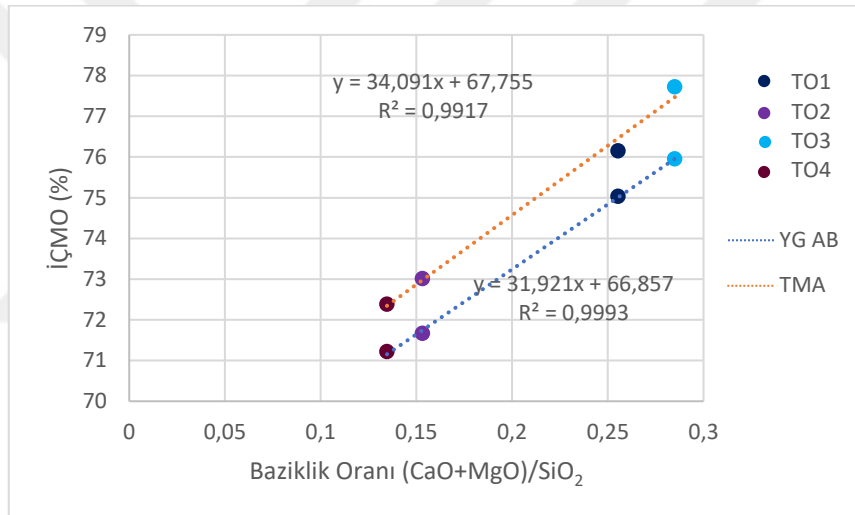
Şekil 162 incelendiğinde; çatlama direnci indeksi değerlerinin YG AB karışımlarına ait ocaklar için $TO1 > TO3 > TO4 > TO2$ ve TMA karışımları için ise $TO1 > TO3 > TO2 > TO4$ şeklinde sıralandığı görülmüştür. $TO1$ ve $TO3$ ocakları kıyaslandığında sırasıyla %56.0 ve %37.43 TMA karışımlarına ait değerlerin YG AB karışımlara ait değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak $TO2$ ve $TO4$ ocakları kıyaslandığında TMA karışımlarına ait değerlerin YG AB karışımlarına ait değerlerden %0.38 ve %5.14 daha az olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek CRI değerlerinin daha esnek karışımlar anlamına geldiği ve bunun da çatlama karşı daha iyi bir performansla sonuçlandığı bilinmektedir.

YG-AB ve TMA karışımlarında $TO2$ ocağına ait agregaların en düşük deformasyon direncini göstermesi, bu kayacın hem cam fazı içermesi hem de porfirik doku özellikleri sergilemesiyle ilişkilendirilmektedir. Cam fazı, magmanın çok hızlı soğuması sonucu oluşan amorf bir yapı olup, kristal örgüsünün gelişmemiş olması nedeniyle atmosferik koşullar altında kimyasal ve fiziksel bozunmaya daha duyarlıdır. Öte yandan, porfirik doku; iri fenokristallerin, daha ince daneli veya camsı bir matriks içerisinde dağıldığı, iki evreli kristallenme sonucu oluşan heterojen bir yapıyı temsil eder. Ayrıca yer yer glomeroporfirik dokuya sahip olması yani minerallerin toplu halde bulunması, yer yer heterojen mineral dağılımına ve zayıf zonlara yol açabilir. Buna karşılık, $TO1$ ocağı agregalarının en yüksek direnci sergilemesi, bu kayacın daha yavaş bir soğuma hızında kristallenmiş olması ve bu süreç sonucunda oluşan danelerin sıkı bir biçimde kenetlenmiş olduğu intersertal dokuya sahip bulunmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, $TO1$ ocağı agregaları petrografik özellikleri bakımından daha dayanıklı bir davranış sergilemektedir.

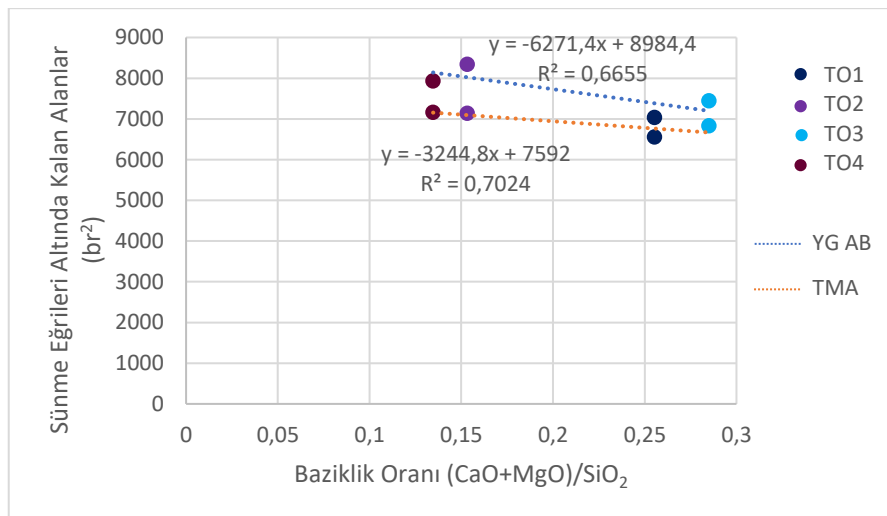
Agregaların kimyasal analiz sonuçları ile sıcak karışım asfalt karışım deney sonuçları arasındaki ilişkinin değerlendirilebilmesi için baziklik oranı, reaktivlik ve silis doygunluğu özelliklerine ait dağılım grafikleri çizilmiştir (Şekil 162-180).



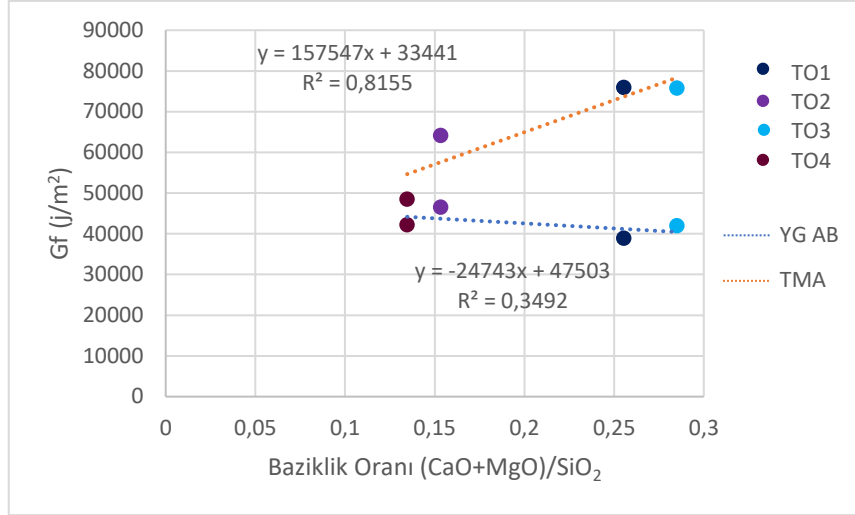
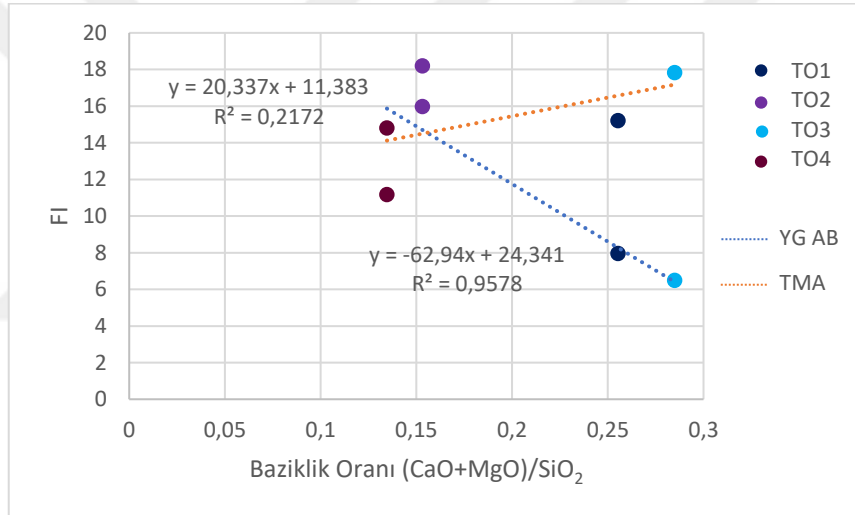
Şekil 163. İÇM değerleri ile baziklik oranının dağılım grafiği



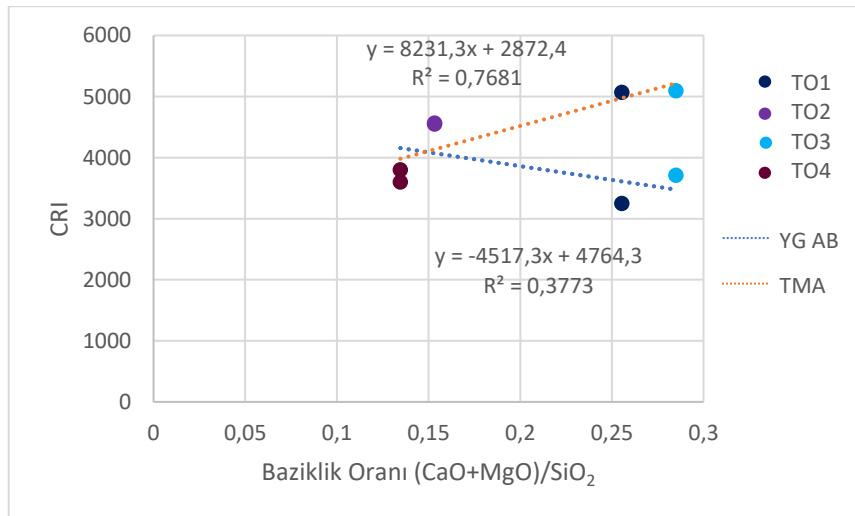
Şekil 164. İÇMO değerleri ile baziklik oranının dağılım grafiği



Şekil 165. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile baziklik oranının dağılım grafiği

Şekil 166. G_f değerleri ile bazıklık oranının dağılım grafiği

Şekil 167. FI değerleri ile bazıklık oranının dağılım grafiği



Şekil 168. CRI değerleri ile bazıklık oranının dağılım grafiği

İÇM değerleri (kPa) ile baziklik oranı dağılım grafiği değerlendirildiğinde hem YG AB hem de TMA karışımları için elde edilen R^2 (belirleme katsayısı) değerlerinden baziklik oranı ile indirekt çekme mukavemeti arasındaki doğrusal ilişkinin gücü belirlenmiştir. YG AB karışımları için R^2 'nin 0.7874 (pozitif eğilim) olması, indirekt çekme mukavemetindeki değişimin yaklaşık %79'unun baziklik oranı tarafından açıklandığını ve bu iki değişken arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu göstermiştir. TMA karışımları için ise R^2 'nin 0.7308 (pozitif eğilim) olması ilişkinin yine güçlü olduğunu göstermiştir. Bu durum, indirekt çekme mukavemetindeki değişimin yaklaşık %73'ünün baziklik oranı ile açıklanabildiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak; her iki karışım türünde de baziklik oranı, indirekt çekme mukavemetinin önemli bir belirleyicisi olmasına rağmen, YG AB karışım verilerini TMA karışımlarına göre daha iyi temsil etmiştir.

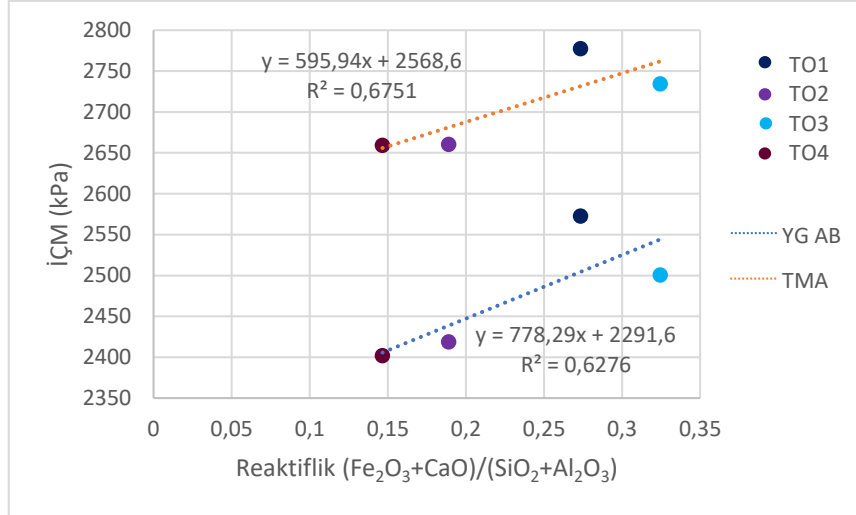
İÇMO değerleri (%) ile baziklik oranı dağılım grafiği değerlendirildiğinde; YG AB karışımları için 0.9993 olan R^2 değeri (pozitif eğilim), İÇMO değerlerinin neredeyse tamamen baziklik oranı tarafından açıklandığını; yani iki değişken arasında neredeyse mükemmel bir ilişki bulunduğunu göstermiştir. TMA karışımları için 0.9917 olan R^2 değeri (pozitif eğilim) yine oldukça yüksek olup, baziklik oranının İÇMO değerleri üzerindeki etkisini çok büyük ölçüde açıkladığını ortaya koymuştur. Her iki karışım türü için de ilişki son derece güçlü olmakla birlikte, YG AB karışımlara ait model veriyi biraz daha iyi temsil etmiştir. Bu sonuç, baziklik oranının İÇMO değerleri üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu ve karışımlar arasında çok küçük bir fark bulunduğunu göstermiştir. Bu durum, agrega bazikliğin bitüm-agrega aderansını artırarak neme karşı dayanımı iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Sünme eğrileri altında kalan alanlar (deformasyona karşı direnç) ile baziklik oranı dağılım grafiği değerlendirildiğinde; her iki karışım türü için iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin orta düzeyde (negatif eğilim) olduğu görülmüştür. YG AB karışımları için 0.6655 olan R^2 değeri, deformasyona karşı direnç değişiminin yaklaşık %66'sının baziklik oranı tarafından açıklandığını ve ilişki var olsa da güçlü olmadığını göstermiştir. TMA karışımlar için 0.7024 olan R^2 değeri, baziklik oranının İÇMO değerleri üzerindeki etkisini YG AB karışımlara kıyasla biraz daha iyi açıkladığını (%70) ancak güçlü bir ilişki olarak değerlendirilemeyeceğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, her iki karışım türünde de baziklik oranı; İÇMO değerleri üzerinde etkili bir parametre olmasının yanı sıra model, verileri yalnızca orta düzeyde açıkladığını ve İÇMO değerleri üzerinde baziklik oranı dışında farklı faktörlerin de rol oynadığını göstermiştir.

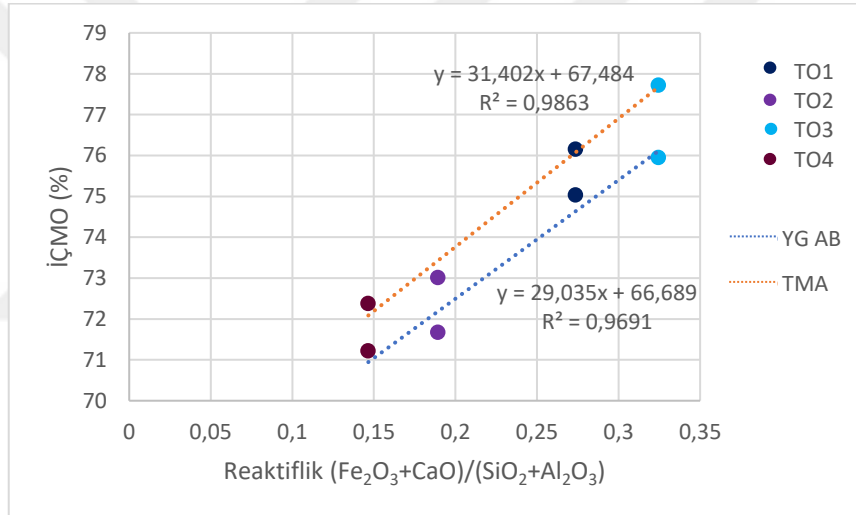
G_f (J/m^2) değerleri ile baziklik oranı dağılım grafiği değerlendirildiğinde; R^2 değerlerinin YG AB karışımları için 0.3492 (negatif eğilim), TMA karışımlar için 0.8155 (pozitif eğilim) olması, iki grup arasında ilişkinin gücü açısından belirgin bir farklılık bulunduğunu göstermiştir. YG AB karışımları için G_f değişiminin yaklaşık %35'inin baziklik oranı tarafından açıklandığını görülmüştür. Bunun zayıf-orta düzeyli bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yani bu sonuç, YG AB karışımları için baziklik oranının kırılma enerjisi üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu ve kırılma enerjisinin büyük oranda farklı faktörlere bağlı olduğunu göstermiştir. TMA karışımlarında ise kırılma enerjisindeki değişimin %81'inin baziklik oranı ile açıklanabildiğini görülmüştür. Dolayısıyla TMA karışımlar için iki değişken arasında güçlü ve anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

FI değerleri ile baziklik oranı dağılım grafiği değerlendirildiğinde; R^2 değerlerinin YG AB karışımlar için 0.9578 (negatif eğilim) ve TMA karışımlar için ise 0.2172 (pozitif eğilim) olması, bu iki parametre arasındaki ilişkinin karışım türleri arasında belirgin biçimde farklılaştığı belirlenmiştir. YG AB karışımlarda baziklik oranı, esneklik indeksindeki değişimin yaklaşık %96'sının açıklandığını ortaya koymuştur. Buna karşılık TMA karışımlarda R^2 'nin 0.2172 gibi düşük bir değere sahip olması, esneklik indeksinin baziklik oranından büyük ölçüde bağımsız olduğunu ve FI üzerinde farklı faktörlerin etkili olduğunu göstermiştir.

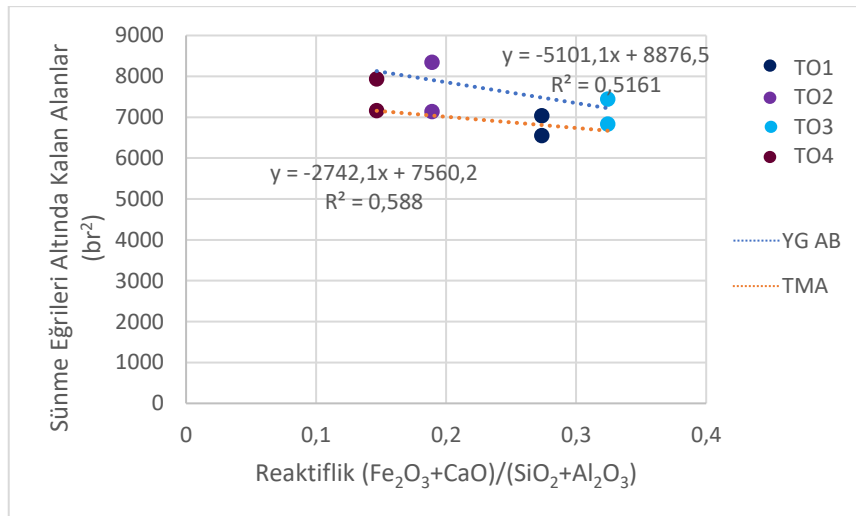
CRI değerleri ile baziklik oranı dağılım grafiği değerlendirildiğinde; R^2 değerlerinin YG AB karışımlar için 0.3773 (negatif eğilim) ve TMA karışımlar için 0.7681 (pozitif eğilim) olması, CRI ile baziklik oranı arasındaki ilişkinin iki karışım türü arasında oldukça farklı olduğunu göstermiştir. YG AB karışımlar için CRI'deki değişimin yaklaşık %38'inin baziklik oranı ile açıklanabildiğini göstermiştir. Buna karşılık TMA karışımlarda CRI'deki değişimin yaklaşık %77'sinin baziklik oranı ile açıklanabildiğini ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, baziklik oranının mekanik davranış üzerindeki etkisinin karışım türü özelliklerine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.



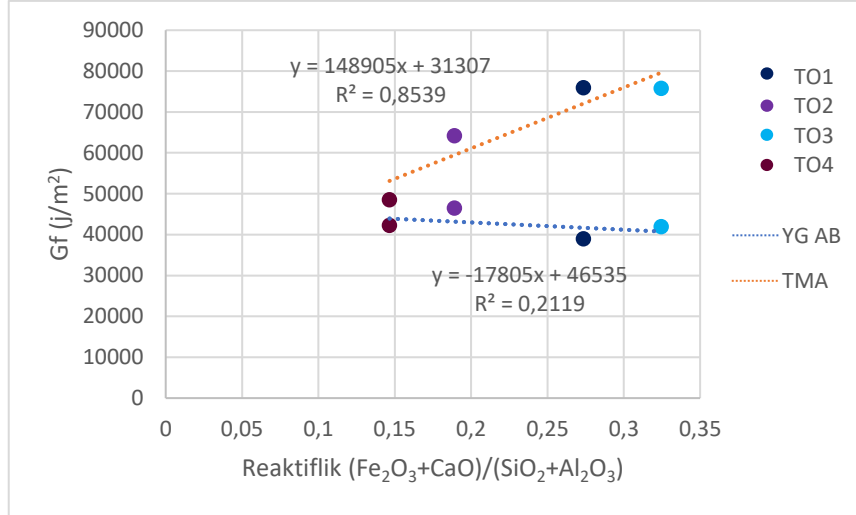
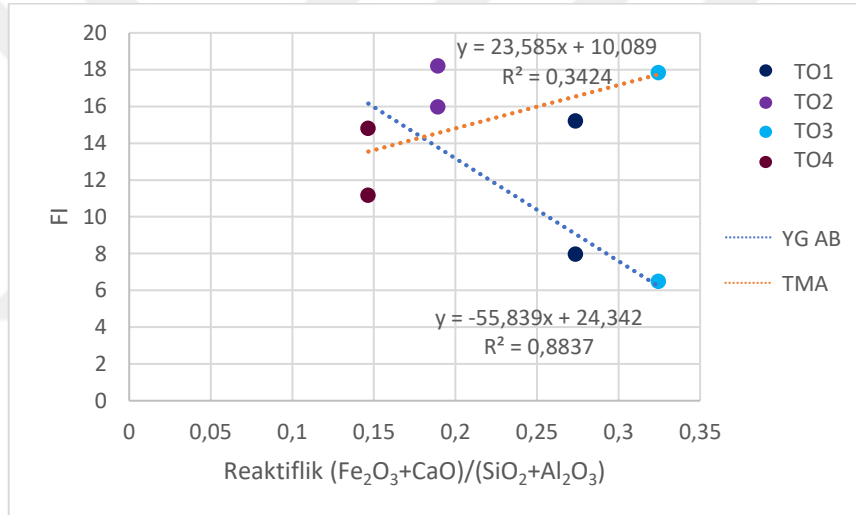
Şekil 169. İÇM değerleri ile reaktivlik değerinin dağılım grafiği



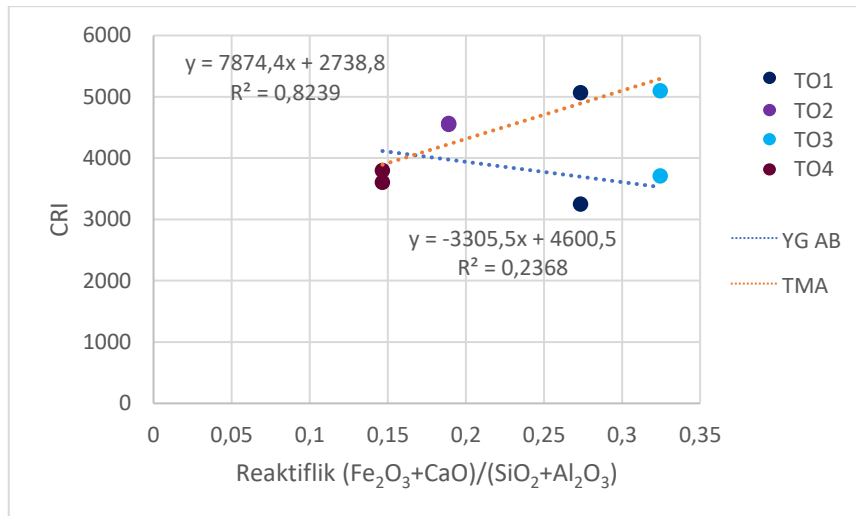
Şekil 170. İÇMO değerleri ile reaktivlik değerinin dağılım grafiği



Şekil 171. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile reaktivlik değerinin dağılım grafiği

Şekil 172. G_f değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği

Şekil 173. FI değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği



Şekil 174. CRI değerleri ile reaktiflik değerinin dağılım grafiği

İÇM değerleri (kPa) ile reaktiflik değeri dağılım grafiği değerlendirildiğinde; belirlenen R^2 değerleri, her iki karışım türünde de orta-yüksek düzeyde (pozitif eğilim) bir ilişki olduğunu göstermiştir. Yani sonuçlar, İÇM'deki değişimin yaklaşık %63–68'inin reaktivite ile açıklanabilir olduğunu ortaya koymuştur.

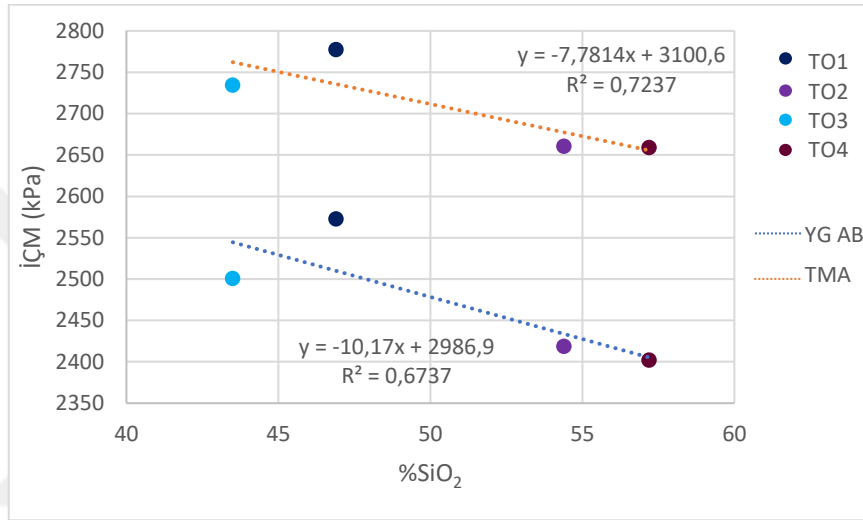
İÇMO değerleri (%) ile reaktiflik değeri dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin her iki karışım türü için de son derece güçlü (pozitif eğilim) olduğu tespit edilmiştir. YG AB karışımlar için 0.9691 olan R^2 değeri, İÇMO değerlerindeki değişimin yaklaşık %97'sinin reaktivite ile açıklanabilir olduğunu göstermiştir. TMA karışımlarda ise 0.9863 olan R^2 değeri ile ilişkinin biraz daha güçlendiği ve İÇMO değerlerindeki değişimin yaklaşık %98'inin reaktivite ile açıklanabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile reaktiflik değeri dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin her iki karışım türü için orta düzeyde (negatif eğilim) olduğu belirlenmiştir. YG AB karışımlar için 0.5161 olan R^2 değeri ile deformasyona karşı direnç değişimin yaklaşık %52'sinin reaktivitenin ile açıklanabildiği görülmüştür. TMA karışımlarda ise 0.588 olan R^2 değeri ile ilişki biraz daha güçlenmiş ve deformasyona karşı direncin yaklaşık %59'unun reaktivite ile açıklanabileceği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, reaktivite her iki karışım türünde de deformasyona karşı direnci etkileyen bir parametre olduğu görülmüştür.

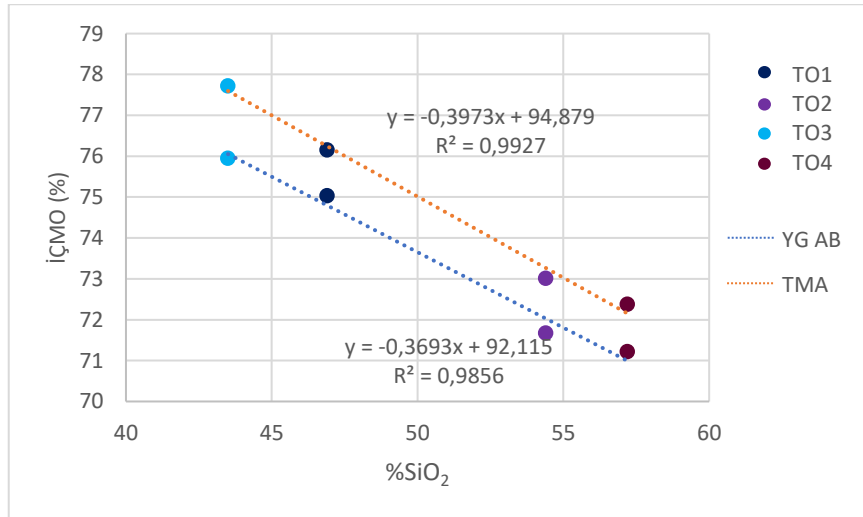
G_f (j/m²) değerleri ile reaktiflik değeri dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin iki karışım türü arasında belirgin şekilde farklı olduğu tespit edilmiştir. YG AB karışımlarda 0.2119 olan R^2 değeri (negatif eğilim), kırılma enerjisindeki değişimin yaklaşık %21'inin reaktivite ile açıklanabildiğini göstermiştir. Buna karşılık TMA karışımlarda 0.8539 olan R^2 değeri (pozitif eğilim) ile ilişki güçlenmiş ve kırılma enerjisindeki değişimin yaklaşık %85'inin reaktivite ile açıklanabileceği görülmüştür. Genel olarak, reaktivitenin kırılma enerjisi üzerindeki etkisi karışım türü özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermiştir.

FI değerleri ile reaktiflik değeri dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin iki karışım türü arasında önemli farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. YG AB karışımlarda 0,8837 olan R^2 değeri (negatif eğilim) ile esneklik indeksindeki değişimin yaklaşık %88'inin reaktivite ile açıklanabileceği görülmüştür. Buna karşılık TMA karışımlarda 0.3424 olan R^2 değeri (pozitif eğilim) ile ilişkinin orta-düşük düzeyde ve esneklik indeksinin yaklaşık %34'ünün reaktivite ile açıklanabilir olduğu ortaya konmuştur. Genel olarak, reaktivitenin FI üzerindeki etkisi karışım türü özelliklerine bağlı olarak değiştiği ve YG AB karışımlar için daha güçlü bir belirleyici olduğu tespit edilmiştir.

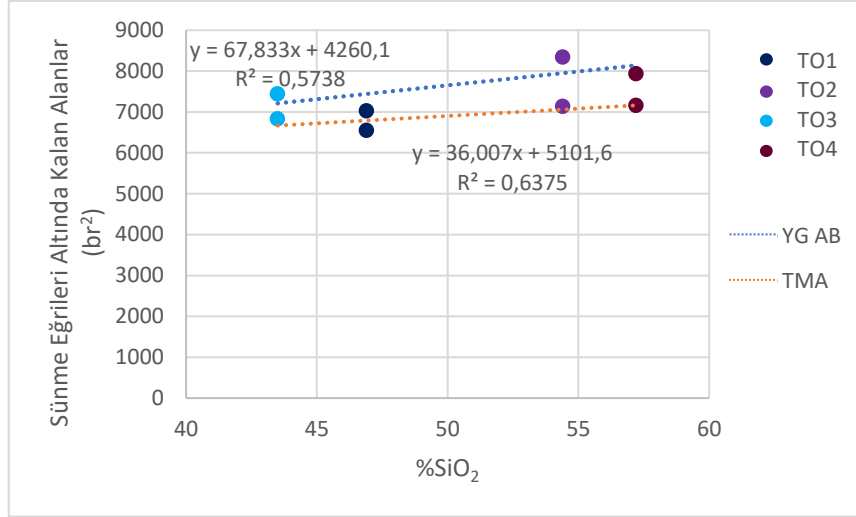
CRI değerleri ile reaktiflik değeri dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişki iki karışım türü arasında belirgin farklılık göstermiştir. YG AB karışımlar için 0.2368 olan R^2 değeri (negatif eğilim), çatlama direnci indeksindeki değişimin yaklaşık %24'ünün reaktivite ile açıklanabildiğini göstermiştir. Buna karşılık TMA karışımlarda 0.8239 olan R^2 ile (pozitif eğilim) ilişki güçlenmiş ve çatlama direnci indeksindeki değişimin yaklaşık %82'sinin reaktivite ile açıklanabildiği ortaya konmuştur. Genel olarak, reaktivitenin CRI üzerindeki etkisi, karışım türü özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermiştir.



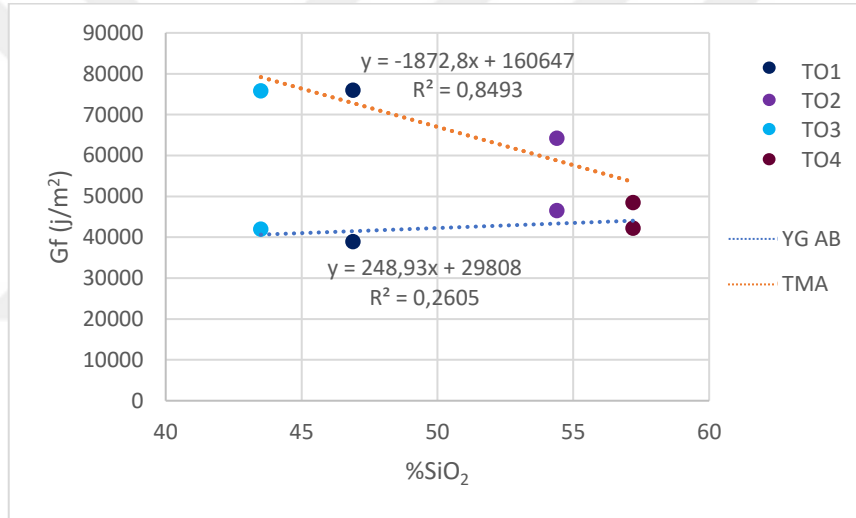
Şekil 175. İÇM değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği



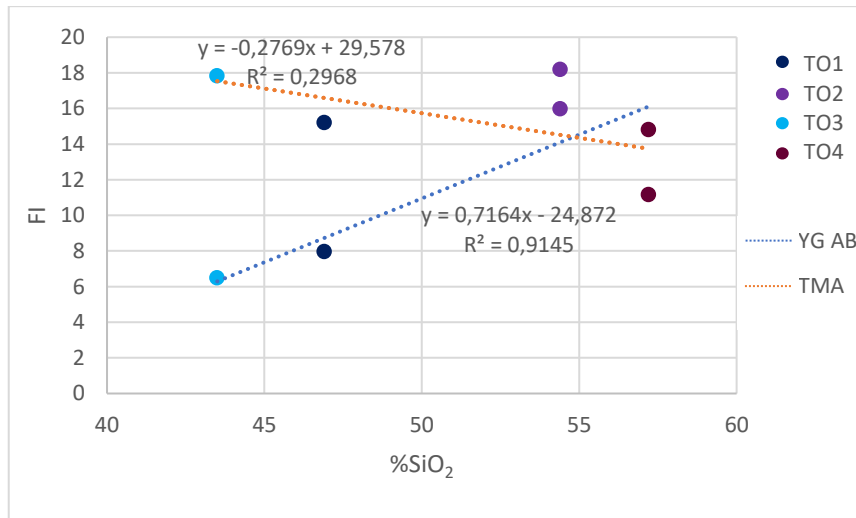
Şekil 176. İÇMO değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği



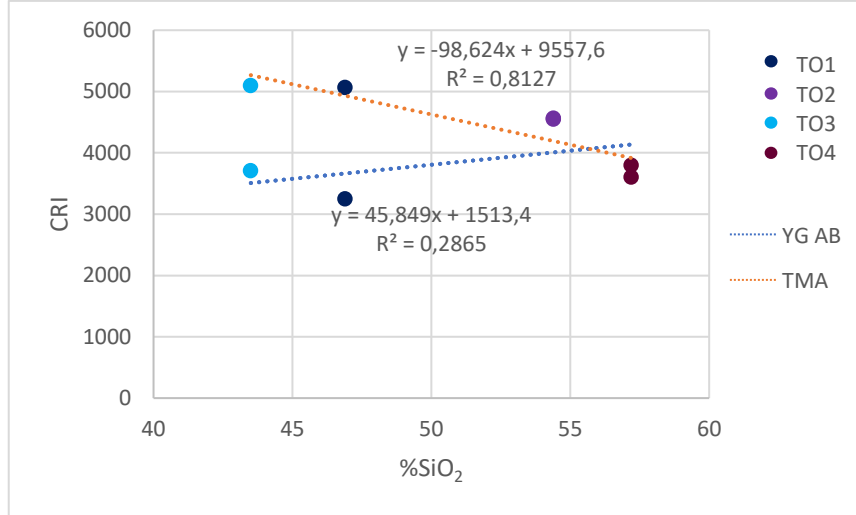
Şekil 177. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile silis doygunluğu dağılım grafiği



Şekil 178. G_f değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği



Şekil 179. FI değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği



Şekil 180. CRI değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği

Silis (SiO₂), magmatik kayaçların bileşimine katılan önemli bir bileşendir. Bu nedenle magmatik kayaçların kimyasal tanımlamalarında geniş ölçüde kullanılmaktadır. En basit yaklaşımla silis içeriklerine göre kayaçların sınıflandırılması aşağıda verilmektedir (Yavuz, 2013):

- Asidik: SiO₂ içeriği %63'ten fazla olan kayaçlar,
- Ortaç: SiO₂ içeriği %52-63 arasında olan kayaçlar,
- Bazik: SiO₂ içeriği %45-52 arasında olan kayaçlar ve
- Ultrabazik: SiO₂ içeriği %45'ten az olan kayaçlar şeklindedir.

Ayrıca silis içeriğine göre benzer bir sınıflandırma daha bulunmaktadır (Andrzejuk vd., 2019):

- Asidik: SiO₂ içeriği %65'ten fazla olan kayaçlar,
- Alkali: SiO₂ içeriği %55'ten az olan kayaçlar ve
- Ortaç: SiO₂ içeriği %55-65 aralığında olan kayaçlar şeklindedir.

İlk sınıflandırma dikkate alındığında; TO1, TO2, TO3 ve TO4 ocaklarına ait kayaçlar sırasıyla bazik, ortaç, ultrabazik ve ortaç karakterli olarak tanımlanırken ikinci sınıflandırmaya göre sırasıyla bazik, bazik, bazik ve ortaç karakterli olarak tanımlanmıştır.

İÇM değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin her iki karışım türü için orta-yüksek düzeyde (negatif eğilim) olduğu belirlenmiştir. YG AB karışımlar için 0.6737 olan R² değeri, İÇM değerlerindeki değişimin yaklaşık %67'sinin SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiğini göstermiştir. TMA karışımlarda ise 0.7237 olan R²

değeri, ilişkiyi biraz daha güçlendirmiş ve İÇM değerlerindeki değişimin yaklaşık %72'sinin SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiğini ortaya koymuştur.

İÇMO değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin her iki karışım türü için oldukça güçlü (negatif eğilim) olduğu belirlenmiştir. YG AB karışımlar için 0.9856 olan R² değeri, İÇMO değerlerindeki değişimin yaklaşık %99'unun SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiğini göstermiştir. TMA karışımlarda ise 0.9927 olan R² değeri, ilişkiyi daha da güçlendirmiş ve İÇMO değerlerindeki değişimin yaklaşık %99.3'ünün SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiğini ortaya koymuştur. Genel olarak; SiO₂ doygunluğu, her iki karışım türü için İÇMO'yu öngörmeye güvenilir bir parametre olduğu belirlenmiştir burada SiO₂ değerleri azalırken İÇMO değerlerinin arttığı görülmüştür.

Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile silis doygunluğu dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin her iki karışım türü için orta düzeyde (pozitif eğilim) olduğu görülmüştür. YG AB karışımlar için 0.5738 olan R² ile deformasyona karşı direnç değişimin yaklaşık %57'sinin SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiği belirlenmiştir. TMA karışımlarda ise 0.6375 olan R² değeri ile ilişki biraz daha güçlenmiş ve deformasyona karşı direncin yaklaşık %64'ünün SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiği görülmüştür. Sonuç olarak, SiO₂ doygunluğunun her iki karışım türü için deformasyona karşı direnci etkileyen bir parametre olduğu görülmüştür.

G_f değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin iki karışım türü arasında belirgin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. YG AB karışımlarda 0.2605 olan R² değeri (pozitif eğilim), kırılma enerjisindeki değişimin yaklaşık %26'sının SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiğini göstermiştir. Buna karşılık TMA karışımlarda 0.8493 olan R² değeri (negatif eğilim), ilişkiyi güçlendirmiş ve kırılma enerjisindeki değişimin yaklaşık %85'inin SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiğini ortaya koymuştur. Genel olarak, SiO₂ doygunluğunun kırılma enerjisi üzerindeki etkisi karışım türüne bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

FI değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkinin iki karışım türü arasında belirgin bir farklılık gösterdiği belirlenmiştir. YG AB karışımlarda 0.9145 olan R² değeri (pozitif eğilim), esneklik indeksindeki değişimin yaklaşık %91'inin SiO₂ doygunluğu ile açıklanabildiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık TMA karışımlarda 0.2968 olan R² değeri (negatif eğilim), ilişkinin zayıf olduğunu ve FI'deki değişimin yaklaşık %30'unun SiO₂ doygunluğu tarafından açıklanabildiğini göstermiştir. Genel olarak,

SiO₂ doygunluğunun FI üzerindeki etkisi karışım türüne bağlı olarak büyük ölçüde değişmiş olduğu ve YG AB karışımlarda daha baskın bir rol oynadığı belirlenmiştir.

CRI değerleri ile silis doygunluğu dağılım grafiği değerlendirildiğinde; ilişkiye ait belirleme katsayıları ve eğilim yönleri, karışım türleri arasında belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. YG AB karışımları için 0.2865 olan R² değeri, SiO₂ doygunluğunun çatlak direnci indeksindeki değişimin yaklaşık %29'unu açıkladığını ve hem düşük açıklayıcılık düzeyi hem de ilişkiye ait negatif eğilim, bu karışım türünde SiO₂ artışının çatlak direnci indeksini azalttığını ve ilişkinin zayıf olduğunu göstermiştir. Buna karşılık TMA karışımları için 0.8127 olan R² değeri, değişimin yaklaşık %81'inin SiO₂ doygunluğu tarafından açıklandığını ortaya koymuş ve bu yüksek açıklayıcılık düzeyi ile birlikte gözlenen pozitif eğilim, SiO₂ doygunluğu arttıkça çatlak direnci indeksinin de arttığını, dolayısıyla bu iki parametre arasında güçlü ve anlamlı bir ilişki bulunduğunu göstermiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Erzurum ve çevresindeki dört farklı taş ocağından temin edilen agregaların özellikleri belirlenmiş ve bu agregaların Asfalt Betonu (AB) ile Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Araştırma kapsamında, AB ve TMA karışım türleri, kullanılan agregaların mineralojik ve jeolojik özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, her iki karışım türünün mekanik performansı; deformasyon oluşumu (tekrarlı sünme deneyi), düşük sıcaklık çatlama direnci (yarım daire eğilme deneyi) ve su hasarı direnci (modifiye Lottman deneyi) gibi parametreler üzerinden kıyaslanmıştır. Bu amaçla indirekt çekme dayanımı deneyi de gerçekleştirilmiştir.

Dahası, TMA karışımının gerekliliklerini sağlayan agregaların AB karışımında kullanılması durumunda, TMA karışımına özgü performans kazanımlarının (örneğin artan kalıcı deformasyon direnci) elde edilip edilemeyeceği de incelenmiştir.

Yapılan değerlendirmeler ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Bitüm numunesine uygulanan deneyler vasıtasıyla elde edilen tüm sonuçların, Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) limitlerini başarıyla sağladığı görülmüştür. Bu bulgu, bağlayıcının asfalt karışımlarında kullanılmaya uygun standart performansa sahip olduğunu göstermektedir.
- Dört farklı taş ocağından (TO) temin edilen agregaların mineralojik-petrografik analizleri sonucunda kayaç tipleri belirlenmiştir. Buna göre; 1 numaralı taş ocağından elde edilen kayaç olivin-ojit bazalt, 2 numaralı taş ocağından elde edilen kayaç bazaltik andezit, 3 numaralı taş ocağından elde edilen kayaç tekrar olivin-ojit bazalt ve 4 numaralı taş ocağından elde edilen kayaç ise andezit olarak tespit edilmiştir.
- Agregaların kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde, volkanik kayaçların ana element oksit yüzdelерinin %43.5 ile %57.2 arasında bir değişim gösterdiği saptanmıştır. Özellikle, en yüksek SiO₂ yüzdesinin TO4 örneğinde, en düşük ise TO3 örneğinde olduğu görülmüştür. K₂O miktarı ise %0.805 ile %1.93 arasında değişmekte olup, en yüksek yüzdeye TO2, en düşük yüzdeye ise TO3 örneği sahiptir. Kayaçlar jeokimyasal olarak Le Maitre vd. (2002) tarafından belirtilen Toplam Alkali-Silis (TAS) sınıflandırma diyagramına göre incelenmiş; TO1 örneği bazalt alanında, TO₂ bazaltik andezit alanında, TO3 tefrit (ol < %10) alanında ve TO4 ise

andezit alanında yer almıştır. Mineralojik olarak olivin-ojit bazalt olan TO3 örneğinin jeokimyasal olarak tefrit alanında yer alması, örneklerin alındığı bölgede kayaçların alterasyon sonucu kimyasal olarak değişmiş olabileceğine işaret etmektedir. İncelenen örneklerden TO3 ve TO1'in alkali, TO2 ve TO4'ün ise sub-alkali karaktere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tüm volkanik kayaç örneklerinin SiO_2 'ye karşı K_2O diyagramında (Le Maitre vd., 2002) yüksek-K jeokimyasal karaktere sahip olduğu tespit edilmiştir.

- Yapılan değerlendirmeler sonucunda, taş ocaklarından temin edilen tüm agrega örneklerinin fiziksel özelliklerinin, hem yoğun gradasyonlu asfalt betonu (YAB) hem de Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarının aşınma tabakası için öngörülen Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) limitlerini genel olarak sağladığı tespit edilmiştir.
- Agrega örnekleri arasında parçalanma direnci (Los Angeles aşınma) değerleri açısından farklılıklar gözlemlenmiştir. En yüksek kayıp (%18.36) TO3 ocağına aitken, en düşük kayıp değeri (%15.64) TO1 ocağında belirlenmiştir. TO3 ocağındaki yüksek kayıp değerinin, bu kayaçtaki 1 mm'den büyük dane boyutlarının varlığı ve ince-orta-iri daneli (heterojen) doku yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu farklılıklara rağmen, tüm değerler hem AB hem de TMA aşınma tabakaları için KTŞ limitleri içerisinde kalmıştır.
- Örneklerin hava tesirlerine karşı dayanımı (don kaybı) değerlendirildiğinde, en az dayanıklı yani don kaybı en yüksek olan agrega %10.4 ortalama ile TO4 ocağına, en dayanıklı olan ise %0.40 ortalama ile TO1 ocağına aittir. TO4 ocağının hava tesirlerine karşı dayanıklılık kaybının yüksek olması, mineralojik yapısında amfibol ve biyotit gibi sulu ferromagnezyen (mafik) minerallerin bulunmasından ileri gelebileceği düşünülmüştür. Bütün bu değerler, her iki karışım türü için (AB ve TMA) KTŞ limitlerini karşılamıştır.
- Metilen mavisi deney sonuçları, agrega içerisindeki kirlilik oranını (zararlı kil varlığı) göstermektedir. Bu değerlendirmeye göre kirlilik oranı en yüksek olan ocak 1.25 değeri ile TO3'tür, bu da TO3 agregaları içerisinde zararlı kilin diğer ocaklara göre daha fazla olduğunu göstermektedir. En düşük kirlilik oranı ise 0.25 değeri ile TO2'ye aittir. Tüm sonuçlar, hem AB hem de TMA aşınma tabakaları için KTŞ limitleri dâhilinde yer almaktadır.
- Yassılık indeksi sonuçları incelendiğinde, en yüksek değer %22.92 ile TO1 ocağına aittir. Bu değer, BS 812 deney standardına göre şartname limitini sağlasa da, TS EN

933-3 deney standardına göre limitten %7.92 oranında daha yüksektir. Bu durumun, kayacın daha sert karakterde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük yassılık indeksi değeri ise %4.89 ile TO4 ocağına aittir. TO1 ocağı haricindeki diğer tüm ocakların yassılık indeksi değerleri, hem AB hem de TMA aşınma tabakaları için KTŞ limitlerini sağlamaktadır.

- Agregaların cilalanma değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek değer (%53.5) TO3 ocağına, en düşük değer (%51.9) ise TO4 ocağına aittir. Bu değerlerin tamamı, her iki karışım türü (AB ve TMA) için KTŞ limitlerini sağlamaktadır.
- Agregaların su emme oranları hem kaba hem de ince fraksiyonlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir: Kaba Agregası Su Emme Oranları: En yüksek su emme oranı %1.09 ile TO4 ocağına, en düşük oran ise %0.15 ile TO2 ocağına ait bulunmuştur. İnce Agregası Su Emme Oranları: En yüksek su emme oranı %1.82 ile yine TO4 ocağına, en düşük oran ise %0.91 ile TO1 ocağına aittir. Her iki fraksiyona ait tüm su emme değerleri, hem AB hem de TMA aşınma tabakaları için Karayolu Teknik Şartnamesi limitlerini sağlamaktadır.
- Tüm taş ocaklarından (TO) temin edilen agregalar kullanılarak hazırlanan Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu (AB) Tip-1 aşınma tabakası dizaynı sonucunda, karışımın boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı ve agregalar arası boşluk oranı (V.M.A) değerlerinin Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) limitlerini sağladığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, aynı ocaklardan elde edilen agregalarla tasarlanan Taş Mastik Asfalt (TMA) Tip-1 aşınma tabakası dizaynı sonucunda da, karışımın hava boşlukları ve agregalar arası boşluk oranı (V.M.A) değerlerinin KTŞ limitlerine uygun olduğu tespit edilmiştir. Marshall tasarımı hesaplamaları neticesinde, AB ve TMA örnekleri için gerekli olan Optimum Bitüm Oranları (OBO) belirlenmiştir. AB örnekleri için OBO değerleri, TO1, TO2, TO3 ve TO4 ocakları için sırasıyla %5.5, %5.4, %5.35 ve %5.35 olarak saptanmıştır. TMA örneklerinin tümü için ise OBO değeri %6.45 olarak belirlenmiştir. TMA Tip-1 aşınma tabakası için gerçekleştirilen beher metodu ile bitüm süzülme deneyi (drain down) sonucunda, bitüm akmasını önlemek için gerekli olan optimum elyaf oranları hesaplanmıştır. Bu oranlar, TO1, TO2, TO3 ve TO4 ocakları için sırasıyla %0.210, %0.213, %0.193 ve %0.183 olarak belirlenmiştir. Hesaplanan bu elyaf miktarlarının, TMA karışımlarında bitüm süzülmesini önleme açısından uygun olduğu ve Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) limitlerini sağladığı görülmüştür.

- İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) deneyi sonuçları, AB karışımları için taş ocakları bazında değerlendirildiğinde, en yüksek direncin 2572.61 kPa değeriyle TO1 ocağına ait olduğu, en düşük direncin ise 2401.75 kPa değeriyle TO4 ocağına ait olduğu görülmüştür. Tüm ocakların sıralaması (en yüksekten en düşüğe) TO1, TO3, TO2 ve TO4 şeklinde gerçekleşmiş olup, değerler sırasıyla 2572.61, 2500.47, 2418.37 ve 2401.75 kPa'dır. Aynı kıyaslama TMA karışımları için yapıldığında, en yüksek İÇM değeri 2777.42 kPa ile yine TO1 ocağına aitken, en düşük direnç değeri 2658.82 kPa ile yine TO4 ocağında belirlenmiştir. Tüm ocakların sıralaması (en yüksekten en düşüğe) TO1, TO3, TO2 ve TO4 şeklinde olmuş ve değerler sırasıyla 2777.42, 2734.28, 2660.20 ve 2658.82 kPa olarak kaydedilmiştir. Her iki karışım türü (AB ve TMA) karşılaştırıldığında, TMA karışımlarının İÇM değerlerinin, YAB karışımlarına kıyasla daha yüksek bir çatlama direnci sergilediği açıkça görülmüştür. Hem AB hem de TMA karışımlarında TO4 ocağının sürekli olarak en düşük direnci sergilemesi, bu agregaların cam içermesi ve porfirik dokuya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun aksine, TO1 ocağının her iki karışım türünde de en yüksek direnci göstermesi, agregaların daha yavaş soğuma hızıyla oluşan ve danelerin sıkı bir şekilde kenetlenmiş olduğu intersertal doku yapısına sahip olmasına bağlanmaktadır.
- Modifiye Lottman deneyi sonucunda elde edilen İndirekt Çekme Mukavemeti Oranı (İÇMO) yüzdeleri, taş ocaklarına göre Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu (AB) ve Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımları için sırasıyla şu şekilde hesaplanmıştır: TO1 için %75.03 ve %76.15; TO2 için %71.67 ve %73.01; TO3 için %75.95 ve %77.72; ve TO4 için %71.22 ve %72.38. İÇMO değerlerinin, her iki karışım türü için de yüksekten düşüğe doğru TO3, TO1, TO2 ve TO4 şeklinde sıralandığı görülmüştür. Bu sıralamanın, agregaların kimyasal içeriği ile güçlü bir korelasyon gösterdiği belirlenmiştir: SiO_2 ya da $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ yüzdeleri düşükten yükseğe doğru sıralandığında, İÇMO değerleri ile aynı sıralama ortaya çıkmıştır. Bu bulgu, SiO_2 veya $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ içeriğinin artmasının soyulma eğilimini artırarak agreganın asfalta karşı daha zayıf bir adezyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ veya sadece $\text{CaO} + \text{MgO}$ içeriği yüksekten düşüğe doğru sıralandığında yine İÇMO değerleriyle aynı sıralamanın olduğu tespit edilmiştir. Bu ilişki, bazik oksitlerin (CaO ve MgO) ve Fe_2O_3 içeriğinin artmasının agreganın

asfalta karşı daha güçlü bir adezyon performansı sergilediğini ve su hasarı direncini artırdığını kanıtlamaktadır.

- Tekrarlı sünme deneyi sonucunda elde edilen veriler, asfalt karışımlarının kalıcı deformasyon direncini ortaya koymaktadır. Bu deneyde sünme eğrilerinin altında kalan toplam alanlar (br^2) kıyaslanmış ve bu alanın düşüklüğü yüksek dirence işaret etmektedir. Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu (AB) karışımlarında, en yüksek deformasyonu (en dirençsizi) $8339.3 br^2$ ile TO2 ocağı, en düşük deformasyonu (en dirençlisi) ise $7029.6 br^2$ ile TO1 ocağı göstermiştir. AB karışımlarında dirençsizden dirençliye doğru sıralama $TO2 > TO4 > TO3 > TO1$ şeklinde gerçekleşmiştir. Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarında ise en yüksek deformasyon $7158.6 br^2$ ile TO4 ocağına, en düşük deformasyon $6551.4 br^2$ ile yine TO1 ocağına aittir; sıralama ise $TO4 > TO2 > TO3 > TO1$ şeklindedir. Yapılan karşılaştırmalar, tüm ocaklarda TMA karışımlarının YAB karışımlarına göre daha dirençli olduğunu göstermiştir; bu direnç artışı, TO4 ocağında %10.81 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Hem YAB hem de TMA karışımlarında TO4 ocağı agregalarının en düşük deformasyon direncini göstermesi, agregaların cam fazı içermesi ve porfirik doku özellikleri sergilemesiyle ilişkilendirilmiştir. Buna karşılık, TO1 ocağı agregalarının en yüksek dayanımı sergilemesi, kayacın daha yavaş bir soğuma hızında kristallenmesi sonucu oluşan ve danelerin sıkı bir şekilde kenetlenmesini sağlayan intersertal doku yapısıyla ilişkilendirilmektedir.
- Yarım Daire Eğilme (SCB) deneyi ile karışımların düşük sıcaklık çatlama direnci değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum kırılma yüklerinin ortalamaları, hem Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu (AB) hem de Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımları için $TO1 > TO3 > TO2 > TO4$ şeklinde sıralanmıştır. Esneklik İndeksi (FI) değerlerinde ise AB karışımları için sıralama $TO2 > TO4 > TO1 > TO3$ iken, TMA karışımları için $TO2 > TO3 > TO1 > TO4$ olarak belirlenmiştir. TMA karışımlarının FI değerleri, TO1, TO2 ve TO3 ocaklarında YAB karışımlarına göre sırasıyla %91.01, %13.60 ve %174.86 oranlarında daha yüksek bulunmuştur; ancak TO4 ocağında TMA değeri, YAB değerinden %24.60 daha düşüktür. Çatlama Direnci İndeksi (CRI) değerleri YAB için $TO1 > TO3 > TO4 > TO2$, TMA için ise $TO1 > TO3 > TO2 > TO4$ sıralamasına sahiptir. CRI değerleri, TO1 ve TO3 ocaklarında TMA karışımlarında sırasıyla %56.0 ve %37.43 oranlarında daha yüksek çıkarken; TO2 ve TO4 ocaklarında TMA değerleri, YAB değerlerinden sırasıyla %0.38 ve

%5.14 daha düşük bulunmuştur. CRI'nın daha yüksek değerleri, karışımın daha esnek olduğunu ve çatlamaya karşı daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Mineralojik yapı ile düşük sıcaklık performansı arasındaki ilişki incelendiğinde, TO2 ve TO4 ocaklarına ait agregaların nispeten düşük direnç değerleri sergilemesi, bu kayaların cam fazı içermesi, porfirik doku ve yer yer glomeroporfirik doku özellikleri sergilemesiyle ilişkilendirilmektedir. Özellikle glomeroporfirik doku, minerallerin toplu halde bulunmasından dolayı yer yer heterojen mineral dağılımına ve zayıf zonlara yol açarak performansı düşürmektedir. Buna karşılık, TO1 ocağı agregalarının sürekli olarak en yüksek direnci sergilemesi, kayacın daha yavaş bir soğuma hızında kristallenmiş olması ve danelerin sıkı bir biçimde kenetlenmiş olduğu intersertal dokuya sahip bulunmasıyla açıklanmaktadır.

- Baziklik oranı ile İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) arasındaki ilişki incelenmiştir. Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu (AB) karışımları için R^2 değeri 0.7874 (pozitif eğilim) olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, bu iki değişken arasında güçlü bir pozitif ilişki bulunduğunu göstermektedir. Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımları için ise R^2 değeri 0.7308 (pozitif eğilim) olup, ilişkinin yine güçlü olduğunu ortaya koymuştur.
- Baziklik oranı ile Su Hasarı Direnci İndeksi (İÇMO) arasındaki korelasyon, daha da dikkat çekicidir. AB karışımları için R^2 değeri 0.9993 (pozitif eğilim) olarak belirlenmiştir. Bu, iki değişken arasında neredeyse mükemmel bir pozitif ilişki bulunduğunu göstermektedir. TMA karışımları için de R^2 değeri 0.9917 (pozitif eğilim) olup, oldukça yüksektir ve baziklik oranının İÇMO değerleri üzerindeki etkisini çok büyük ölçüde (%99.17) açıkladığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, agrega bazikliğinin, asfalt karışımlarının su hasarına karşı direncini belirleyen kritik kimyasal faktör olduğunu göstermektedir.
- Agrega kimyasal bileşenleri ile asfalt karışımlarının mekanik performansı arasındaki istatistiksel ilişkiler, regresyon analizleri (R^2) ile detaylıca incelenmiştir. Baziklik Oranının Performansa Etkisi Baziklik oranı ile kalıcı deformasyon (sünme eğrileri altında kalan alan) arasındaki ilişki, her iki karışım türü (AB ve TMA) için orta düzeyde ve negatif eğilimli olarak gözlemlenmiştir. Kırılma enerjisi ile baziklik oranı arasındaki ilişkide ise belirgin bir farklılık mevcuttur; AB karışımları için R^2 değeri 0.3492 (negatif eğilim) iken, TMA karışımları için bu değer 0.8155 (pozitif eğilim) ile güçlü bir korelasyonu işaret etmiştir. Esneklik İndeksi (FI) ve Çatlama Direnci İndeksi (CRI) ile baziklik oranı arasındaki ilişkiler de karışım türüne göre önemli

ölçüde farklılık göstermiştir: FI için AB'da $R^2 = 0.9578$ (negatif eğilim) ve TMA'da $R^2 = 0.2172$ (pozitif eğilim); CRI için ise AB'da $R^2 = 0.3773$ (negatif eğilim) ve TMA'da $R^2 = 0.7681$ (pozitif eğilim) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, baziklik oranının etkisinin özellikle TMA karışımlarının çatlama performansında (CRI ve Kırılma Enerjisi) önemli bir pozitif rol oynadığını göstermektedir.

- Agregaların reaktiflik değeri ile İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) değerleri arasında her iki karışım türü için de orta-yüksek düzeyde (pozitif eğilim) bir ilişki bulunmuştur. Bu reaktiflik değeri, Su Hasarı Direnci İndeksi (İÇMO) ile arasındaki ilişkinin ise her iki karışım türü için de son derece güçlü ve pozitif eğilimli olduğunu kanıtlamıştır. Bu güçlü pozitif korelasyon, agreganın reaktifliğinin, karışımın suya karşı hassasiyetini belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile reaktiflik arasındaki ilişki her iki karışım türü için orta düzeyde ve negatif eğilimli bulunmuştur. Kırılma enerjisi, FI ve CRI değerlerinin reaktiflik ile olan ilişkileri ise, karışım türüne bağlı olarak belirgin farklılıklar göstermiştir.
- Kayaçların silis içeriklerine göre yapılan sınıflandırmada, ilk yaklaşıma göre TO1, TO2, TO3 ve TO4 sırasıyla bazik, ortaç, ultrabazik ve ortaç karakterli olarak tanımlanırken; ikinci sınıflandırmaya göre bazik, bazik, bazik ve ortaç karakterli olarak tanımlanmıştır. Kimyasal performans korelasyonlarında, İÇM değerleri ile silis doygunluğu arasında her iki karışım türü için de orta-yüksek düzeyde (negatif eğilim) bir ilişki saptanmıştır. İÇMO değerleri ile silis doygunluğu arasındaki ilişki ise her iki karışım türü için de oldukça güçlü ve negatif eğilimli olarak belirlenmiştir. Bu güçlü negatif korelasyon, silis doygunluğunun artışının su hasarı direncini düşürdüğünü kesinleştirmektedir. Sünme eğrileri altında kalan alanlar ile silis doygunluğu arasındaki ilişki ise her iki karışım türü için orta düzeyde ve pozitif eğilimli bulunmuştur. Kırılma enerjisi, FI ve CRI değerlerinin silis doygunluğu ile olan ilişkilerinde de, karışım türleri arasında belirgin farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmaların sonuçları bütüncül olarak değerlendirildiğinde, elde edilen bulguların birbiriyle tutarlı ve birbirini destekler nitelikte olduğu görülmüştür. Bu tez, sıcak asfalt karışımlarının nihai performansının, yalnızca yaygın olarak ölçülen fiziksel ve mekanik özelliklerle değil; aynı zamanda agregaların mineralojik-petrografik özellikleri ve

kimyasal bileşimleri (özellikle baziklik ve silis doygunluğu) tarafından da önemli ölçüde etkilendiğini kesin olarak ortaya koymuştur. Bu durum, agrega seçim süreçlerinde yalnızca standart testlere değil, aynı zamanda detaylı mineralojik, petrografik ve kimyasal karakterizasyon çalışmalarına da öncelik verilmesinin kritik bir gereklilik olduğunu açıkça göstermektedir.

Elde edilen bulgular, genel bir performans üstünlüğü açısından, Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarının Yoğun Gradasyonlu Asfalt Betonu (AB) karışımlarına nazaran daha iyi mekanik direnç sergilediğini göstermiştir. Karşılaştırmalı performans analizlerinde, alkali karakterli kayalardan elde edilen TO1 ocağına ait agregalar her iki karışım türünde de sürekli olarak en iyi performansı göstermiş; bunun aksine, cam fazı ve porfirik doku içeren TO4 ocağına ait agregalar ise diğer ocaklara kıyasla en zayıf performansı sergilemiştir. Ayrıca, agrega kimyası açısından, alkali karakterli agregaların hem AB hem de TMA karışımlarında performansı artırıcı bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır. Sonuçlar, yerel agrega ocaklarının performans esaslı yöntemlerle değerlendirilmesinin, hem malzeme seçiminin doğruluğu hem de sürdürülebilir malzeme yönetimi açısından büyük öneme sahip olduğunu doğrulamıştır.

Bu tez çalışması temel alınarak, asfalt ve yol yapımı teknolojileri alanında bundan sonra yapılması planlanan araştırmalarda aşağıdaki önerilerin dikkate alınması tavsiye edilir:

- Farklı Bitüm Tiplerinin İncelenmesi: Deneysel çalışmalar, Kırıkkale Tüpraş Rafinerisi'nden elde edilen 50/70 penetrasyon dereceli bitümle gerçekleştirilmiştir. İleride yapılması planlanan çalışmalarda, bitüm derecesinin performans üzerindeki etkisinin ortaya konulabilmesi için farklı penetrasyon derecelerine sahip bitümler kullanılmalıdır. Ayrıca, bitüm kimyasındaki değişikliklerin etkisini görebilmek amacıyla farklı rafinerilerden elde edilen bitümlerin araştırılması da önerilir.
- Katkı Maddesi Etkilerinin Değerlendirilmesi: Çalışmada agrega kaynağı etkilerinin saf haliyle anlaşılması için herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Katkı maddelerinin agrega-bitüm arasındaki uyumu artırdığı göz önünde bulundurularak, ilerideki çalışmalarda çeşitli amin türü ve sönmüş kireç türü katkıların denenmesi önerilir. Bunun yanı sıra, polimerlerle birlikte kullanılarak performans artırılmasına yönelik detaylı araştırmalar yapılabilir.
- Coğrafi Kapsamın Genişletilmesi: Çalışma, Erzurum ve Ağrı illeri çevresindeki bazalt ocaklarından temin edilen agregalarla sınırlandırılmıştır. Farklı bölgelerden elde edilecek, farklı mineralojik-petrografik ve kimyasal özelliklere sahip agregalar

incelenerek, agregâ kaynağının performans farklılıkları üzerindeki etkileşim mekanizmalarının daha iyi anlaşılması hedeflenmelidir.

- Kırılma Mekanizmalarının İncelenmesi: Agregaların özellikle kırılma özelliklerine odaklanılarak, agregâ kökeni (minerolojik yapı) ile asfalt karışımındaki kırılma şekli arasındaki mekanizmaların derinlemesine araştırılması hedeflenmektedir.
- Agregâ-Bitüm Yapışma Değerlendirmesi: Çalışmanın devamında, daha hızlı ve güvenli bir yöntem olarak agregâ-bitüm yapışmasını esas alan değerlendirmelerle tezin derinleştirilmesi için araştırmalara başlanması planlanmaktadır.
- Bölgesel Agregâ Bankalarının Oluşturulması: Bölgesel yol yapımı ve sürdürülebilir malzeme yönetimi açısından, çalışmanın devamı olarak performansa dayalı verilerle desteklenen bölgesel agregâ bankalarının oluşturulması hedeflenmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abu El-Maaty Behiry, A. E. (2016). Optimisation of Hot Mix Asphalt Performance Based on Aggregate Selection. *International Journal of Pavement Engineering*. 17(10), 924-940.
- Abut, Y. & Karaşahin, M. (2017). *Bitümlü Sıcak Karışımların Kırılma Davranışının İncelenmesi*. 7. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Ankara.
- Adomako, S., Engelsen, C. J., Thorstensen, R. T. & Barbieri, D. M. (2021). Review of the Relationship between Aggregates Geology and Los Angeles and Micro-Deval Tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 1963-1980.
- Adwar, N., N. & Albayati, A. H. (2024). Enhancing Moisture Damage Resistance in Asphalt Concrete: the Role of Mix Variables, Hydrated Lime and Nanomaterials. *Infrastructures*, 9, 173.
- Ahmad, A. (2024). *Comparative Study on Low Temperature Performance of Stone Matrix Asphalt and Dense Graded Hot Mix Asphalt*. Atılım University, the Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master of Science, Ankara.
- Ahmed, M. A. & Attia, M. I. E. (2013). Impact of Aggregate Gradation and Type on Hot Mix Asphalt Rutting in Egypt. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3(4), 2249-2258.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M. & Yılmaz, M. (2007). Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1-2), 112-126.
- Airey, G. (2024, Mayıs 01). Adhesion and Moisture Damage Characterisation of Asphalt Mixtures: https://www.ugr.es/~labic/docs/Adhesion_Dec2011_Granada.pdf adresinden alınmıştır.
- Airey, G. D. & Choi, Y. K. (2011). State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 355-372.
- Akacem, M., Moulay, O. H., Abdeldjalil, M., Abbou, M. Djaafari, D., Bennacer, L. & Belaidi, K. (2024). Effect of Adding Dune Sand to Bituminous Concrete Intended for Wearing Courses. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), 1-17.
- Akarsh, P. K., Ganesh, G. O., Marathe, S. & Rai R. (2022). *Incorporation of Sugarcane Bagasse Ash to Investigate the Mechanical Behavior of Stone Mastic Asphalt*. *Construction and Building Materials*, 353, 129089.

- Akbulut, H., Gürer, C. & Çetin, S. (2011). Use of Volcanic Aggregates in Asphalt Pavement Mixes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 164(TR2), 111-123.
- Akshitha, B. N., Balreddy, M. S. & Sunil, S. (2022). *Laboratory Investigation of Stone Mastic Asphalt Using Reclaimed Asphalt Pavement*. *Proceedings*, 60, Kısım 1, 668-678.
- Aksoy, A. (2002). *Bitüm Reolojik Yapısının Bitümün Yaşlanmasına ve Kaplamanın Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi*, Uluslararası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi, Ankara.
- Aksoy, A., İskender, E., Oruç, Ş. & Özen, H. (2012). SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması. *İMO Teknik Dergi*, 23(113), 5967-5986.
- Akpolat, M. (2014). *Ilık Karışım Katkısının Bitüm ve Taş Mastik Asfalt Kaplamaya Etkisinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Al-Haddad, A. H. A. (2023). *Measurement of Asphalt-Aggregate Adhesive Bond Strength Using A Direct Technique*. AIP Conference Proceedings, The Fourth International Conference on Civil and Environmental Engineering Technologies, 11-12 May 2022, 2775, 1, Kufa, Iraq.
- Al-Kheetan, M. J., Azim, T., Byzyka, J., Ghaffar S. H. & Rahman, M. M. (2022). *Performance of Magnetite-Based Stone Mastic Asphalt (SMA) as A Superior Surface Course Material*. *Construction and Building Materials*, 322, 126463.
- Al-Mosawe, H., Thom, N., Airey, G. & Al-Bayati, A. (2015). Effect of Aggregate Gradation on The Stiffness of Asphalt Mixtures. *The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology (PEAT)*, 16(2), 39-49.
- Altan, F. (2018). *Taş Mastik Asfaltta Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması ve Doğal Agrega ile Karşılaştırılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Aluç, S. & Ahıskalı, A. (2023). *Kauçuk Katkılı Modifiye Bitüm Kullanılarak Mastik Asfalt Uygulaması*. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 6(1), 95-107.
- Ameli, A., Babagoli, R., Norouzi, N., Jalali, F. & Mamaghani, F. P. (2020a). *Laboratory Evaluation of the Effect of Coal Waste Ash (CWA) and Rice Husk Ash (RHA) on Performance of Asphalt Mastics and Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixture*. *Construction and Building Materials*, 236, 117557.
- Ameli, A., Nasr, D., Babagoli, R., Pakshir, A. H., Norouzi, N. & Davoudinezhad, S. (2020b). *Laboratory Evaluation of Rheological Behavior of Binder and Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures Containing Zycotherm Nanotechnology, Sasobit, and Rheofalt Warm Mixture Additives*. *Construction and Building Materials*, 262, 120757.

- Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M. & Molayem, M. (2017). *Evaluation the Effects of Nanoclay on Permanent Deformation Behavior of Stone Mastic Asphalt Mixtures*. Construction and Building Materials, 156, 107-113.
- Anastasio, S., Hoff, I. & Thodesen, C. (2013). *Effect of Aggregate Mineralogy on Permanent Deformation*. Proceedings Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 2, 657-665, Trondheim, Norway.
- Andrzejuk, W., Barnat-Hunek, D. & Góra, J. (2019). Physical Properties of Mineral and Recycled Aggregates Used to Mineral-Asphalt Mixtures. *Materials*, 12(20), 3437.
- Arslan, F. (2014). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda İstanbul Çevresindeki Cebeci-Dolamitli Kireçtaşı, Gölcük-Kumtaşı ve Karatepe-Bazaltlı Kullanımının İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Aslan, D. (2019). *Diyarbakır Yöresinde Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bazalt, Kalker, Dere Malzemelerinin Karakteristik Özelliklerinin Karşılaştırılması*. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Aslan, M. (2018). *Mastik Asfalt Üretiminde Pomza, Perlit ve Ahlat Taşı Agregasının Kullanılabilirliği*. Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Aslan, M. & Bakis, A. (2020). *Usability of Pumice, Ignimbrite and Perlite in Stone Mastic Asphalt*. European Journal of Science and Technology, 18, 743-754.
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. Seventh Edition, Asphalt Institute, USA.
- Asphalt Institute & Eurobitume. (2015). *The Bitumen Industry – A Global Perspective Production, Chemistry, Use, Specification and Occupational Exposure*. Third Edition, USA.
- Atar, E. & Kopar, İ. (2020). *Tortum Çayı Havzası'nın (Erzurum-Artvin-KD Türkiye) Potansiyel Jeosit Destinasyonları ve Bunların Jeoturizm Açısından Kaynak Değer Analizi*. Salih Birinci, Çağlar Kıvanç Kaymaz ve Yusuf Kızılkın (Ed.), Coğrafi Perspektifle Dağ ve Dağlık Alanlar (Sürdürülebilirlik-Yönetim-Örnek Alan İncelemeleri), Birinci Baskı, 101-131, Kriter Yayınevi, İstanbul.
- Ayyıldız, D., Aksoy, A. & İskender, E. (2021). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda SBS/Nanokil/Bitüm Nano-Kompozitler Oranının Araştırılması*. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36(4), 1847-1861.
- Babagoli, R., Hasaninia, M. & Namazi, N. M. (2015). *Laboratory Evaluation of the Effect of Gilsonite on the Performance of Stone Matrix Asphalt Mixtures*. Road Materials and Pavement Design, 16(4), 889-906.

- Bahia, H., Velasquez, R. & Moraes R. (2012). 9. *Understanding Adhesion and Cohesion of Asphalt-Aggregate Systems Using the Bitumen Bond Test and the Sessile Drop Method*. Proceedings of the 5th Eurasphalt and Eurobitume Congress.
- Bahramian, A. (2012). Evaluating Surface Energy Components of Asphalt Binders Using Wilhelmy Plate and Sessile Drop Techniques, *Royal Institute of Technology (KTH) Department of Civil and Architectural Engineering Division of Highway and Railway Engineering*, Stockholm, Sweden.
- Baygus, E. (2024, Nisan 15). Kimyasal Türler Arası Etkileşimler: <https://www.ecrinbaygus.com.tr/tr/gfl-kimya-proje-odevi/kimyasal-turler-arasi-etkilesimler.html> adresinden alınmıştır.
- Behzad, N. J. (2023). *Atık Plastik Piroliz ile Yapılan Taş Mastik Asfalt ve Asfalt Betonun İşlenebilirliği*. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Bhasin, A. (2006). *Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion due to Water*. Texas A&M University, Institute of Technology, Doctor of Philosophy, Texas.
- Bostancıoğlu, M. (2012). *Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler ile Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Bozdemir, M. G. (2023). *Bor Esaslı Kolofan Reçineli Yeni Bir Katkı Maddesi Sentezlenerek Asfaltın Modifiye Edilmesi ve Karışım Performansının Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Brondani, C., Faccin, C., Kraemer, K.W., Boeira, F.D., Specht, L.P. & Nummer, A.V. (2022). *Asphalt Aggregate Adhesion: Study of the Influence of the Morphological, Chemical and Mineralogical Properties of Different Aggregates from Southern Brazil*. Asphalt Aggregate Adhesion: Study of the Influence of the Morphological, Chemical and Mineralogical Properties of Different Aggregates from Southern Brazil. In: Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S. (eds) Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. ISBM 2020. RILEM Bookseries, vol 27.
- Busang, S. & Maina, J. (2022). Influence of Aggregates Properties on Microstructural Properties and Mechanical Performance of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 318, 126002.
- Cala, A. & Caro, S. (2022). Predictive Quantitative Model for Assessing The Asphalt-Aggregate Adhesion Quality Based on Aggregate Chemistry. *Road Materials and Pavement Design*, 23, 7, 1523-1543.
- Cala, A., Caro, S., Lleras, M. & Rojas-Agramonte, Y. (2019). *Impact of The Chemical Composition of Aggregates on The Adhesion Quality and Durability of Asphalt-Aggregate Systems*. *Construction and Building Materials*, 216, 661-672.

- Cala, A., Caro, S. & Rojas-Agramonte, Y. (2020). *Aggregate properties affecting adhesive quality in asphalt mixtures*. *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction II*, 1. Baskı, 16-19.
- Cala Pérez, A. F. (2017). *Influence of the Minerology in the Adhesion Quality between Asphalt Binders and Mineral Aggregates*. Universidad de los Andes Department of Civil and Environmental Engineering, Bogota.
- Cao, W., Liu, S. & Feng, Z. (2013). *Comparison of Performance of Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Basalt and Limestone Aggregates*. *Construction and Building Materials*, 41, 474-479.
- Caro, S., Airey, G., Masad, E. & Hernandez, J. (2025, Nisan 06). Addressing Moisture Damage in Asphalt Concrete: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/webinars/241016.pdf> adresinden alınmıştır.
- Cetin, A., Evirgen, B., Karslıoğlu, A. & Tuncan, A. (2021). *The Effect of Basalt Fiber on the Performance of Stone Mastic Asphalt*. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), 299-308.
- Cevrim, K. & İskender, E. (2023). Investigation of the Usability of Aggregates Produced from Sea Shell in SMA Pavements with Different Addition Methods. *Road Materials and Pavement Design*, 24(8), 2090-2103.
- Chegenizadeh, A., Peters, B. & Nikraz, H. (2021a). *Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt Containing High-Density Polyethylene: An Australian Case*. *Case Studies in Contrustion Materials*, 15, e00631.
- Chegenizadeh, A., Tokoni, L., Nikraz, H. & Dadras, E. (2021b). *Effect of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) on Stone Mastic Asphalt (SMA) Behaviour*. *Construction and Building Materials*, 272, 121628.
- Chelovian, A. & Shafabakhsh, G. (2017). *Laboratory Evaluation of Nano Al₂O₃ Effect on Dynamic Performance of Stone Mastic Asphalt*. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2), 131-138.
- Chen, Z., Wu, S., Wen, J., Zhao, M., Yi, M. & Wan, J. (2015). Utilization of Gneiss Coarse Aggregate and Steel Slag Fine Aggregate in Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 93, 911-918.
- Cheng, Z., Kong, F., Duan, C. & Wang, T. (2023). *Temperature-Dependent Voids and Their Impact on SMA Surface Course Permeability*. *Construction and Building Materials*, 406, 113463.
- Chissama, K. S. S. & Picado-Santos, L. G. (2021). *Assessment of Crumb Rubber Stone Mastic Asphalt Potential to Be Used in Angola*. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00598.

- Cho, D. W., Kim, K. & Lee, M. J. (2010). *Chemical model to explain asphalt binder and asphalt-aggregate interface behaviors*. Canadian Journal of Civil Engineering, 37(1), L09-163.
- Choi, Y. K. (2005). *Development of the Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS) Test for High Modulus Base Materials*. University of Nottingham, School of Civil Engineering, Degree of Doctor of Philosophy, Nottingham.
- Choudhary, D. (2024, Nisan 15). Types of Intermolecular Forces: https://www.mlsu.ac.in/econtents/963_TYPES%20OF%20INTERMOLECULAR%20FORCES.pdf adresinden alınmıştır.
- Cihlářová, D., Fencl, I., Cápayová, S. & Pospíšil, P. (2018). Use of Adhesion Promoters in Asphalts Mixtures. *Slavak Journal of Civil Engineering*, 26(1), 19-24.
- Ciont, N., Iliescu, M., Blażejowski, K. & Wójcik-Wiśniewska, M. (2017). *Researching the Effects of Different Aggregates and Bitumen Types on Asphalt Mixtures*. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, June.
- Coleri, E., Kumar, V., Obaid, I. A., Chitnis, V. & Newton, Z. A. (2023). Implementation of Laboratory Conditioning and Testing Protocol to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. *Final Report*, Oregon Department of Transportation Research Section, Salem.
- Cooley Jr., L. A., Huner, M. S. & James, R. H. (2002). Micro-Deval Testing of Aggregates in the Southeast. *NCAT Report 02-09 National Center for Asphalt Technology (NCAT)*, Auburn.
- Cooley Jr., L. A., Kandhal, P. S., Buchanan, M. S., Fee, F. & Epps, A. (2000). Loaded Wheel Testers in the United States: State of the Practice. *NCAT Report 00-04 National Center for Asphalt Technology (NCAT)*, Auburn.
- Copeland, A. R. (2007). Influence of Moisture on Bond Strength of Asphalt-Aggregate Systems. Faculty of the Graduate School of Vanderbilt University, the Degree of Doctor of Philosophy, Nashville, Tennessee.
- Cross, S. A., Shitta, H. & Workie, A. (2013). Evaluation of the Hamburg Rut Tester and Moisture Induced Stress Tester (MIST) for Field Control of Hot Mix Asphalt (HMA) in Oklahoma. *Final Report-FHWA-OK-13-01 Oklahoma State University Civil & Environmental Engineering*, Oklahoma.
- Cui, B., Gu, X., Wang, H. & Hu, D. (2021). *Numerical and Experimental Evaluation of Adhesion Properties of Asphalt-Aggregate Interfaces Using Molecular Dynamics Simulation and Atomic Force Microscopy*. Road Materials and Pavement Design, 23(7), 1-21.
- Cui, P., Xiao, Y., Yan, B., Li, M. & Wu, S. (2018). Morphological Characteristics of Aggregates and Their Influence on The Performance of Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 186, 303-312.

- Cui, S., Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J. & Taylor, A. C. (2014). *Durability of Asphalt Mixtures: Effect of Aggregate Type and Adhesion Promoters*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 54, 100-111.
- Çetin, A. (2008). *Bitümlü Sıcak Karışımların Deformasyon Direncinin Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi ile İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Çevrim, K. (2021). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Deniz Kabuğunun Gradasyon ve Katılma Yöntemi Açısından Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Çubuk, M. (2007). *Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Dalhat, M. A. (2024). Modeling and Prediction of Surface Free Energy of Pavement Materials Based on A Single Probe Liquid Using Artificial Neural Network. *Surfaces and Interfaces*, 46, 104107.
- DeCarlo, C., Dave, E. V., Sias, J. E., Airey, G. & Mallick, R. (2019). Comparative Evaluation of Moisture Susceptibility Test Methods for Routine Usage in Asphalt Mixture Design. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1):20180908.
- Demirkaya, Ö. (2016). *Karbon Fiberlerin Asfalt Karışımlarda Kullanımının Araştırılması*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Deniz, M. T. (2002). *Numune Yüksekliği ve Sıkıştırma Enerjisinin Marshall Stabilitesi ile Dolaylı Çekme Modülüne Etkisi*. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Department of Transportation. (2002). Method of Test for Film Stripping. *State of California-Business, Transportation and Housing Agency*, April, California.
- Department of Transportation Engineering Service Center. (2000). *Method of Test for Moisture Vapor Susceptibility of Bituminous Mixtures*. State of California-Business, Transportation and Housing Agency, Sacramento.
- Derun, Z. & Luo, R. (2019). Using the Surface Free Energy (SFE) Method to Investigate the Effects of Additives on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 95, 102437.
- Düzağaç, S. (2019). *Elektriksel İletken Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Gradasyonun İletkenlik Üzerine Olan Etkisinin Araştırılması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Eker, A. N. (2019). *Bazalt ve Gabroların Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agregat olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi*. Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, Batman.

- Emtiaz, M., Imtiyaz, M. N., Majumder, M., Idris, I. I., Mazumder, R. & Rahaman, M. M. (2023). A Compherensive Literature Review on Polymer-Modified Asphalt Binder. *CivilEng*, 4, 901-932.
- Eraslan, N. (2023). Asfalt Beton Malzemelerin Karma Mod (I-II) Kırılma Özelliklerinin Araştırılması. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 36-46.
- Erdoğan, H. (2023). *Atık Beton Asfalt Agregasının Sathi Kaplama Performansının Değerlendirilmesi*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisanüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik.
- Erkan, Y. (2011). *Kayaç Oluşturan Önemli Minnerallerin Mikroskopta İncelenmeleri*. Ankara: T.M.M.O.B. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 42, Afşaroğlu Matbaası.
- Erkan, Y. (2013). *Magmatik Petrografi*. Ankara: T.M.M.O.B. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 93.
- Erkuş, Y. (2017). *Grafit Katkısının Bitüm ve Taş Mastik Asfalt Kaplamaya Etkisinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Erkuş, Y., Kök, B. H. & Yılmaz, M. (2021). Doğal Asfalt ve SBS Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33(1), 81-90.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2013*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2013-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2014*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2014-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2015*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2015-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2016*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2016-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2017*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2017-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2018*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2018-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2019*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2019-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2020*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2020-view> adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2021*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2021-view> adresinden alınmıştır.

- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2022*: https://eapa.org/asphalt-in-figures-2022-view_adresinden alınmıştır.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). *Asphalt in Figures 2023*: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2023-view> adresinden alınmıştır.
- European Committee for Standardization. (2012). *Bituminous mixtures - Test methods - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen*. EN 12697-11. Brussels: CEN-CENELEC Management Centre.
- Evirgen, B., Çetin, A., Karşlıoğlu, A. & Tuncan, A. (2021). *An evaluation of the usability of glass and polypropylene fibers in SMA mixtures*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 318-328.
- Fang, M., Park, D., Singuranayo, J. L., Chen, H. & Li, Y. (2018). Aggregate Gradation Theory, Design and Its Impact on Asphalt Pavement Performance: A Review. *International Journal of pavement Engineering*, 20(12), 1-17.
- Feng, P., Wang, H., Ding, H., Xiao, J. & Hassan, M. (2020). *Effects of Surface Texture and Its Mineral Composition on Interfacial Behaviour Between Asphalt Binder and Coarse Aggregate*. Construction and Building Materials, 262, 120869.
- Fernandes, S., Silva, H. M. R. D. & Oliveira, J. R. M. (2019). *Mechanical, Surface and Environmental Evaluation of Stone Mastic Asphalt Mixtures with Advanced Asphalt Binders Using Waste Materials*. Road Materials and Pavement Design, 20(2), 316-333.
- Fordyce, D. & O'Donnell, E. (1994). *1. Bituminous Pavement Materials: Their Composition and Specification*. Bituminous Mixtures in Road Construction. Editör: Hunter, R. N. Basım Yeri: Thomas Telford, London.
- Gan, X., Zhang, W., Li, J., Tang, H. & Zhong, P. (2022). Influence of Aggregate and Asphalt Type on the Bond Strength between Asphalt and Aggregates and Its Self-Healing Properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(05), DOI:10.1155/2022/1353102.
- Geçkil, T. (2008). *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Gezer, B. B. (2009). *Mersin İli Çelebili Köyü İçmeler Mevkiinde Yüzeyleyen Kireçtaşlarının Beton ve Asfalt Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Ghabchi, R., Singh, D., Zaman, M. & Tian, Q. (2013). Application of Asphalt-Aggregates Interfacial Energies to Evaluate Moisture-Induced Damage of Warm Mix Asphalt. *Social and Behavioral Sciences*, 104, 29-38.

- Ghuzlan, K. A., Al-Mistarehi, B. & Al-Momani, A. S. (2020). Rutting Performance of Asphalt Mixtures with Gradations Designed Using Bailey and Conventional Superpave Methods. *Construction and Building Materials*, 261, 119941.
- Girdap, E. (2017). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda SBS ile Birlikte Pr Plast S Katkısının Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z. & Khadem, M. (2012). Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 440-449.
- Golsefid, S. S. & Sahaf, S. A. (2023). *Optimization of Stone Matrix Asphalt Mixture Design Based on Fracture Mechanics Approach*. *Engineering Fracture Mechanics*, 279, 109026.
- Görgülü, M. (2018). *Değişik Tipteki Agregalar ve Bağlayıcının Sıcak Karışım Asfaltın Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Elâzığ.
- Grenfell, J. R. A., Ahmad, N., Liu, Y., Apeagyei, A. K., Airey, G. D. & Large, D. (2014). Application of Surface Free Energy Techniques to Evaluate Bitumen-Aggregate Bonding Strength and Bituminous Mixture Moisture Sensitivity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 167(CM4), 214-226.
- Grönniger, J., Wistuba, M. P. & Renken, P. (2010). Adhesion in Bitumen-Aggregate-Systems. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), 881-898.
- Guo, F., Pei, J., Zhang, J., Xue, B., Sun, G. & Li, R. (2020). *Study on the adhesion property between asphalt binder and aggregate: A state-of-the-art review*. *Construction and Building Materials*, 256, 119474.
- Guo, M., Yin, X., Du, X. & Tan, Y. (2023). *Effect of aging, testing temperature and relative humidity on adhesion between asphalt binder and mineral aggregate*. *Construction and Building Materials*, 363, 129775.
- Gültekin, M., Nayır, N., Ziya, U., Çalışkan, K. K., Öztürk, A., Tutan, S. N. ve Komut, M. (2021). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- Güngör, A. G., Orhan, F., Kaşak, S. & Çubuk, M. K. (2009). *Diatomit'in Taş Mastik Asfalt Karışımında Kullanılması*. 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 18-19 Kasım, Ankara.
- Gürbüz, H. E. (2018). *Nanokil Kullanılarak Asfalt Bağlayıcı Özelliklerinin İyileştirilmesi*. Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt.

- Gürer, C. & Elmacı, A. (2019). *Karbon Siyahı Katkılı Bitümlerin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Elektriksel İletkenlik Özelliklerine Olan Etkisinin Araştırılması*. Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH), 1(2), 65-74.
- Gürer, C. & Karaşahin, M. (2014). Sathi Kaplama Agregalarının Adezyon Özelliklerinin Araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(2), 1-11.
- Gürer, C., Korkmaz, B. E., Yarcı, Ş. & Rahmany, M. B. (2019). *Sıcak Agregası ile Sathi Kaplama Uygulamasının Araştırılması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 401-409.
- Hafeez, I., Kamal, M. A. & Mirza, M. W. (2015). *An Experimental Study to Select Aggregate Gradation for Stone Mastic Asphalt*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 38(1), 1-8.
- Hainin, M. R., Reshi, W. F. & Niroumand, H. (2012). The Importance of Stone Mastic Asphalt in Construction. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 49-56.
- Hasan, E. A., Hadi Abed, Y. H. & Al-Haddad, A. H. A. (2021). *Improved Adhesion Bond between Asphalt-Aggregate as Indicator to Reduced Moisture Damage*. Journal of Physics Conference Series, IICESAT Conference, Iraq, 012059.
- Hassan, H. M. Z., Wu, K., Huang, W., Chen, S., Zhang, Q., Xie, J. & Cai, X. (2021). Study on The Influence of Aggregate Strength and Shape on The Performance of Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 294, 123599.
- Hefer, A. & Little, D. (2005a). Adhesion in the Bitumen-Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesion Bond. Texas Transportation Institute, Texas.
- Hefer, A. & Little, D. (2005b). *Towards Quantification of Adhesion and Water Stripping in Bituminous Materials Using Modern Surface Energy Theory*. Proceedings of the 24th South African Transport Conference (SATC2005), Pretoria, 115-124.
- Hefer, A., Little, D. N. & Lytton, R. L. (2005). *A Synthesis of Theories and Mechanisms of Bitumen-Aggregate Adhesion Including Recent Advances in Quantifying the Effects of Water*, Conference: Association of Asphalt Paving Technologists, 74, California.
- Hefer, A. W. (2004). *Adhesion in Bitumen-Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond*. Texas A&M University, Doctor of Philosophy, Texas.
- Honório de Assis, S. R., Oliveira de Queiroz, B., Araújo, C. C., Nunes, K. K. F., Almeida de Melo, R. & Christiane de F. Lopes Lucena, L. (2017). Evaluation of Limestone Crushed Dust Aggregates in Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 148, 659-665.
- Hossain, Z & Roy, S. (2018). Impacts of Moisture of Asphalt Properties. *Final Research Report*, Transportation Consortium of South-Central States (Tran-SET), Louisiana.

- Huang, B., Xiao, R. & Polaczyk, P. (2022). Mitigating Stripping in Asphalt Mixtures. *Research Final Report from The University of Tennessee*, Nashville.
- Huang, G., Zhang, J., Wang, Z., Guo, F., Li, Y., Wang, L., He, Y., Xu, Z. & Huang, X. (2023). *Evaluation of Asphalt-Aggregate Adhesive Property and Its Correlation with The Interaction Behavior*. *Construction and Building Materials*, 374, 100909.
- Huang, Q., Qian, Z., Hu, J. & Zheng, D. (2020). *Evaluation of Stone Mastic Asphalt Containing Ceramic Waste Aggregate for Cooling Asphalt Pavement*. *Materials*, 13(13), 103390.
- Hugener, M., Beltzung, F. & Angst, C. (2012). Affinity between Bitumen and Aggregates: Improvement of The EN Static Test Method. 5th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Haziran, İstanbul.
- Hunter, E. R. & Ksaibati, K. (2002). Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes. *MPC-02-138 Tech Report Department Civil and Architectural Engineering University of Wyoming*, Laramie.
- İnce, M. (2024). *Termik Santral Taban Cüruflarının Sıcak Asfalt Betonu Özelliklerine Etkisi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- İSFALT. (2001). *Asfalt ve Uygulamaları*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A. Ş., İstanbul.
- İskender, C., İskender, E., Aksoy, A. & Şengül, C. E. (2021). Effect of Glass Cullet Size and Hydrated Lime-Nanoclay Additives on the Mechanical Properties of Glassphalt Concrete. *Sustainability*, 13, 13284.
- İskender, E. (2013). Rutting Evaluation of Stone Mastic Asphalt for Basalt and Basalt-Limestone Aggregate Combinations. *Composites Part B: Engineering*, 54, 255-264
- İskender, E., Aksoy, A., Sayin, A. & Erdöl, B. (2016). *Effects of Aggregate-Additive Combinations and Gradation Properties for Asphalt Mixture Stripping*. E&E Congress, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1-3 June, Prague.
- İskender, E., Sayın, A., Aksoy, A. & İskender C. (2020). Evaluation of the Effect of Glass Granule Size on Water Damage PErformance of Asphalt Mixtures. *Teknik Dergi*, 31(6), 10399-10411.
- İskender, E., Seymen, A. & Aksoy, A. (2022). Asfalt Kaplamalarda Tabaka Kalınlığının Etkisinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 61-73.
- İskender, E. & Aksoy, A. (2021). Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Teknik Dergi*, 32(3), 10885-10906.

- İzol, E. & Sarıışık, A. (2022). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Mermer Tozu Kullanımının Dayanıma Etkisinin Araştırılması*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 1-11.
- Jakarni, F. M. (2012). Adhesion of Asphalt Mixtures. University of Nottingham, the Degree of Doctor of Philosophy, Nottingham.
- Jiang, Y., Zhang, Y., Xue, J., Deng, C. & Tian, T. (2020). Performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures Fabricated by Different Compaction Methods. *Applied Science*, 10(7), 10072523.
- Jiao, B., Pan, B., Liu, F., Yin, P. & Li, Z. (2023). *Evaluating the Interfacial Properties between Crumb Rubber Modified Asphalt and Aggregates Using Molecular Dynamics Simulation Methods*. *Construction and Building Materials*, 400, 132809.
- Jennings, B. & Wirtjes, R. (2019). *Hot-Mix Asphalt vs. Warm-Mix Asphalt*. Illinois Asphalt Pavement Association Scholarship, Illinois. https://www.il-asphalt.org/files/3715/4896/1293/Ryne_Wirtjes_2018_SIUE.pdf adresinden alınmıştır.
- Ji, X., Sun, E., Zou, H., Hou, Y. & Chen, B. (2020). *Study on The Multiscale Adhesive Properties Between Asphalt and Aggregate*. *Construction and Building Materials*, 249, 118693.
- Júnior, J. L. O. L., Babadopulos, L. F. A. L. & Soares, J. B. (2019). Moisture-Induced Damage Resistance, Stiffness and Fatigue Life of Asphalt Mixtures with Different Aggregate-Binder Adhesion Properties. *Construction and Building Materials*, 216, 166-175.
- Kabadayı, E. (2019). *Üleksitin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Kaçaroglu, G. (2019). *Cocamide Diethanolamide Kimyasalının Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Kamboozia, N., Saed, S. A. & Rad, S. M. (2021). *Rheological Behavior of Asphalt Binders and Fatigue Resistance of SMA Mixtures Modified With Nano-Silica Containing RAP Materials under The Effect of Mixture Conditioning*. *Construction and Building Materials*, 303, 124433.
- Kandhal, P. S. & Cooley Jr., L. A. (2003). Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. *Report 508 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*, Washington.
- Kane, M. & Edmondson, V. (2020). Long-Term Skid Resistance of Asphalt Surfacing and Aggregates' Mineralogical Composition: Generalisation to Pavements Made of Different Aggregate Types. *Wear*, 454-455, 203339.

- Karadağ, Ö. (2019). *Cocamide Diethanolamide ile Modifiye Edilmiş Bitüm Kullanılarak Hazırlanan Numunelerin Temel Mühendislik Özelliklerinin Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yardımıyla İncelenmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Karadağ, Ö. & Saltan, M. (2021). Bitümlü Bağlayıcı ve Agregaların Arasındaki Adezyon Üzerine Cocamide Diethanolamide Kimyasalının Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27 (3), 312-317.
- Karakuş, A. (2011). *Investigating on Possible Use of Diyarbakir Basalt Waste in Stone Mastic Asphalt*. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3502-3507.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler)*. Ankara.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2023). *Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler)*. Ankara.
- Kasil, H. B. (2024). *Farklı Malzeme Bileşenleri ile Tasarlanan Taş Mastik Asfalt Aşınma Karışımının Çatlak Performansının Araştırılması*. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Kasil, H. B. & Çodur, M. Y. (2023). *Taş Mastik Asfaltlarda Agrega ve Bitümlü Bağlayıcıların Süzülme Yüzdesine Etkisinin Araştırılması*. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13(2), 1055-1066.
- Kaşak, S. (2007). *Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomit'in Uygulanabilirliğinin Araştırılması*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaya, M. (2011). *Türkiye Coğrafi Bölgeleri için Bitümlü Bağlayıcıların Performans Derecelerinin Belirlenmesi ve SBS Katkılı Gözlem Yolu Yapılması*. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
- K-C, B., Khorasani, A. & Ghazanfari, E. (2022). Evaluation of Stripping potential Tests for Bituminous Concrete. *Vermont Agency of Transportation Final Report 2022-04*.
- Keskin, İ. & Dönmez, M. (2013). *1:100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları No: 176 Ağrı-İ49 Paftası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Keskin, İ. & Sümengen, M. (2013). *Karaköse-İ49 Paftası Jeoloji Haritası*, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Koc, M. & Bulut, R. (2014). Assesment of a Sessile Drop Device and a New Tesing Approach Measuring Contact Angles on Aggregates and Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(3), 391-398.

- Konak, N. & Sümengen, M. (2009a). *1:100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları No: 106 Kars-H48 Paftası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Konak, N. & Sümengen, M. (2009b). (2009). *Kars-H48 Paftası Jeoloji Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kong, D., Xiao, Y., Wu, S., Tang, N., Ling, J. & Wang, F. (2017). Comparative Evaluation of Designing Asphalt Treated Base Mixture with Composite Aggregate Types. *Construction and Building Materials*, 156, 819-827.
- Korayem, A. H., Ziari, H., Hajiloo, M., Abarghooie, M. & Karimi, P. (2020). *Laboratory Evaluation of Stone Mastic Asphalt Containing Amorphous Carbon Powder as Filler Material*. *Construction and Building Materials*, 243, 118280.
- Kordi, Z. & Shafabakhsh, G. (2017). *Evaluating Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt Modified with Nano Fe₂O₃*. *Construction and Building Materials*, 134, 530-539.
- Köfteci, S. (2017). Bitümlü Sıcak Karışımlardan Geri Dönüşüm Yolu ile Elde Edilen Agregaların Performanslarının Değerlendirilmesi: Deneysel Bir Çalışma. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 535-545.
- Kök, B. V. (2007). *Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Kök, B. V., Yılmaz, M. & Kuloğlu, N. (2012). Asfaltitin Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. *İMO Teknik Dergi*, Yazı:371, 5813-5826.
- Kök, B. V., Yılmaz, M. & Erkus, Y. (2017). *Effects of Graphite on Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt Pavement*. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8), 1013-1020.
- Körkaya, E. N. (2023). *Atık Plastik Piroliz ile Yapılan Taş Mastik Asfalt ve Asfalt Betonunun Hava Geçirgenliğinin Ölçülmesi*. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Köroğlu, A. (2023). *Farklı İçerikli Modifiye Bitüm ve Taş Mastik Asfalt Karışımların Özelliklerinin İncelenmesi*. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.
- Kumar, N. L. N. K. & Ravitheja, A. (2019). *Characteristics of Stone Matrix Asphalt by Using Natural Fibers as Additives*. *Materialstoday: Proceedings*, 19, Kısım 2, 397-402.
- Kultayev, B. (2014). *Çeşitli Mumların Asfalt Modifikasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

- Lamperti, R. (2011). Rheological and Energetic Characterization of Wax-Modified Asphalt Binders. Università Di Bologna, Corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Bologna.
- Lavasani, M., Namin, M. L. & Fartash, H. (2015). *Experimental Investigation on Mineral and Organic Fibers Effect on Resilient Modulus and Dynamic Creep of Stone Matrix Asphalt and Continuous Graded Mixtures in Three Temperature Levels*. Construction and Building Materials, 95, 232-242.
- Le Maitre, R. W. (Editor), Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P. A., Schmid, R., Sørensen, H. & Woolley, A. R. (2002). *Igneous Rocks A Classification and Glossary of Terms*. New York: Cambridge University Press.
- Li, J., Wang, Z. & Jia, M. (2021). *Comprehensive Analysis on Influences of Aggregate, Asphalt and Moisture on Interfacial Adhesion of Aggregate-Asphalt System*. Journal of Adhesion Science and Technology, 35, 6, 641-662.
- Lin, C. & Tongjing, W. (2018). *Effect of Fine Aggregate Angularity on Skid-Resistance of Asphalt Pavement Using Accelerated Pavement Testing*. Construction and Building Materials, 168, 41-46.
- Little, D. N. & Jones IV, D. R. (2003). Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Board National Seminar, s. 37-70. San Diego, California.
- Liu, Y., Apeagyei, A., Ahmad, N., Grenfell, J. & Airey, G., (2014). Examination of Moisture Sensitivity of Aggregate-Bitumen Bonding Strength Using Loose Asphalt Mixture and Physico-Chemical Surface Energy Property Tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(7), 657-670.
- Liu, Y., Cheng, X. & Yang, Z. (2019). Effect of Mixture Design Parameters of Stone Mastic Asphalt Pavement on Its Skid Resistance. *Applied Science*, 9(23), 9235171.
- Lu, D. X., Bui, H. H. & Saleh, M. (2021). Effects of Specimen Size and Loading Conditions on the Fracture Behaviour of Asphalt Concretes in the SCB Test. *Engineering Fracture Mechanics*, 242, 107452.
- Luo, L., Chu, L. & Fwa, T. F. (2020). *Molecular Dynamics Analysis of Moisture Effect on Asphalt-Aggregate Adhesion Considering Anisotropic Mineral Surfaces*. Applied Surface Science, 527, 146830.
- Luo, R., Zheng, S. -S., Zhang, D. -R, Tu, C. -Z. & Feng, G. -L. (2017). *Evaluation of Adhesion Property in Asphalt-Aggregate Systems Based on Surface Energy Theory*. China Journal of Highway and Transport, 30 (6), 209-214.
- Lv, Q., Huang, W., Zheng, M., Sadek, H., Zhang, Y. & Yan, C. (2020). Influence of Gradation on Asphalt Mix Rutting Resistance Measured by Hamburg Wheel Tracking Test. *Construction and Building Materials*, 238, 117674.

- Madencilik Türkiye, (2018). Madencilik Sektörünün Üretim Rekortmeni: Agreg. *Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 72, 78-86.
- Magnoni, M., Giustozzi, F., Toraldo, E. & Crispino, M. (2016). Evaluation of The Effect of Aggregates Mineralogy and Geometry on Asphalt Mixture Friction. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 6(3):223.
- Masson, J-F & Lacasse, M. A. (2000). *A Review of Adhesion Mechanisms at the Crack Sealant/Asphalt Concrete Interface*. 3rd International RILEM Symposium on Durability of Building and Contruction Sealents, Seneffe, Belgium, 259-270.
- Mei, A., Fusco, R., Moroni, M., Fiore, N., Fontinovo, G. & D'Andrea, A. (2021). Affinity between Bitumen and Aggregate in Hot Mix Asphalt by Hyperspectral Imaging and Digital Picture Analysis. *Coatings*, 11, 648.
- Meng, Y., Kong, W., Gou, C., Deng, S., Hu, Y., Chen, J. & Fan, L. (2023). A Review on Evaluation of Crack Resistance of Asphalt Mixture by Semi-Circular Bending Test. *Journal of Road Engineering*, 3, 87-97.
- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M. & Yusoff, N. I. Md. (2022). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 14863.
- Miller, C., Vasconcelos, K. L., Little, D. N. & Bhasin, A. (2011). Investigating Aspects of Aggregate Properties That Influence Asphalt Mixture Performance. *Texas A & M University, College Station and the University of Texas at Austin*, Research Report fot DTFH61-06-C-00021.
- Minnesota Asphalt Pavement Association (MAPA), (2014). *Asphalt Paving Design Guide*. Minnesota.
- Molenaar, A. A. A., Scarpas, A., Liu, X. & Erkens, S. M. J. G. (2002). Semi-Circular Bending Test; Simple But Useful?. *Asphalt Paving Technology*, 794-815, Colorado.
- Moraes, R., Velasquez, R. & Bahia, H. (2011). Measuring Effect of Moisture on Asphalt-Aggregate Bond with the Bitumen Bond Strength Test. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2209(1), 70-81.
- Mukhtar, N., Hasan, M. R. M., Osman, H., Zin, Z. M., Shariff, K. A., Yusoff, N. I. Md. & Sani, A. (2023). *Rheological and Physicochemical Characteristics of Asphalt Mastics Incorporating Lime Kiln Dust and Dolomite Powder as Sustainable Fillers*. *Journal of Road Engineering*, 3(1), 98-112.
- Nageswaran, P. D. C. (2016). Adhesion of Aggregate-Binder Systems. Delft University of Technology, Master of Science, Delft.

- Namlı, R. & Görgülü, M. (2021). Değişik Tipteki Agrega ve Bağlayıcının Sıcak Karışım Asfaltın Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32, 1054-1065.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (2018). *Special Report 223 Advances in the Design, Production, and Construction of Stone Matrix (Mastic) Asphalt*. 1st International Conference on Stone Matrix Asphalt, 5-7 November, Atlanta.
- Nomlala, B., Mthembu, Z., Mturi, G. & Hefer, A. (2022). *Bitumen-aggregate adhesion: A predictive study based on zeta potential analysis using the streaming potential technique*. In Proceedings of the 40th Annual Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa.
- Oral, H., Tutan, S. N. & Komut, M. (2017). *Kireçtaşı Agregalı TMA Aşınma Tabakalarının Performansının Değerlendirilmesi*. 7. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, 29-30 Kasım, Ankara.
- Orhan, F. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Oruç, Ş. (1997). *Torul Kalker Ocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Osmari, P. H., Arega, Z. & Bhasin, A. (2013). Wetting Characteristics of Asphalt Binders at Mixing Temperatures. Project 161220 & 600451-00062 Workability of Asphalt Binders at Mixing Temperatures for Hot and Warm Mix Asphalt, *Southwest Region University Transportation Center*, Austin, Texas.
- Öner, J. & Özdaş, F. (2022). *Taş Mastik Asfalt Karışımlarında Tekstil Atığı Kullanımının Araştırılması*. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(2), 522-533.
- Özdemir, A. M., Yalçın, E., Yılmaz, M. & Yılmaz, B. (2023). Farklı Çentik Derinliklerine Sahip Asfalt Karışımlarının Orta Sıcaklıklarda Kırılma Özelliklerinin İncelenmesi: Sonlu Elemanlar Yaklaşımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(6), 808-818.
- Paliukaitė, M., Vaitkus, A. & Zofka, A. (2014). *Evaluation of Bitumen Fractional Composition Depending on the Crude Oil Type and Production Technology*. The 9th International Conference “Environmental Engineering”, Section: Roads and Railways, Vilnius, Lithuania.
- Paliukaitė, M., Vorobjovas, V., Bulevičius, M. & Andrejevas, V. (2016). Evaluation of Different Test Methods for Bitumen Adhesion Properties. *Transportation Research Procedia*, 14, 724-731.

- Pasandín, A. M. R. & Pérez, I. P. (2014). *Effects of asphalt penetration grade and mineralogical composition on asphalt-aggregate bond*. *Petroleum Science and Technology*, 32(22):2730, 879175.
- Pasadín, A.R. & Pérez, I. (2015). The Influence of the Mineral Filler on the Adhesion between Aggregates and Bitumen. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 58, 53-58.
- Pasetto, M., Concheri, G., Pasquini, E, Baliello, A. & Giacomello, G. (2018). *Laboratory Investigation on Adhesion Properties and Water Susceptibility of Bitumen-Aggregate Systems*. *International Conferences on Traffic and Transport Engineering ICTTE*, Belgrad.
- Pei, J., Bi, Y., Zhang, J., Li, R. & Liu, G. (2016). Impacts of Aggregate Geometrical Features on The Rheological Properties of Asphalt Mixtures During Compaction and Service Stage. *Construction and Building Materials*, 126, 165-171.
- Petcu, C. & Răcănel, C. (2024). Studies on the Influence of the Type of Aggregates and the Type of Bitumen on the Performance of Airport Asphalt Mixtures. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 13(2), 1-16.
- Pinto, I., Ban, H. & Kim, Y. (2009). Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Mixtures in Nebraska—Phase II. *Nebraska Department of Roads Research Reports*, Lincoln.
- Pstrowska, K., Gunka, V., Sidun, I., Demchuk, Y., Vytrykush, N., Kulażyński, M. & Bratychak, M. (2022). Adhesion in Bitumen/Aggregate System: Adhesion Mechanism and Test Methods. *Coatings*, 12(12), 12121934.
- Rahman, Md. T. & Mohajerani, A. (2020). *Use of Bitumen Encapsulated Cigarette Butts in Stone Mastic Asphalt*. *Construction and Building Materials*, 261, 120530.
- Rahman, Md. T., Mohajerani, A. & Giustozzi, F. (2020). *Possible Use of Cigarette Butt Fiber Modified Bitumen in Stone Mastic Asphalt*. *Construction and Building Materials*, 263, 120134.
- Rahmany, M. B. (2019). Sathi Kaplamalarda Sıcak Agrega Kullanımının Adezyon Özelliklerine Olan Etkisinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar*.
- Rakesh, M. A. (2022). *Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Mineral Elyaf Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli*.
- Ramanathan, K., Stallings, R. L. & Newsome, J. R. (2012). *An Ultrasonic Technique for The Measurement of Adhesion of Asphalt to Aggregate*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 5(3), 181-190.
- Remišová, E. (2004). Theory and Measurement of Bitumen Binders Adhesion to Aggregate. *Communications-Scientific Letters of the University of Žilina*, 6(1), 58-63.

- Sadeghnejad, M. & Shafabakhsh, G. (2017). *Use of Nano SiO₂ and Nano TiO₂ to Improve the Mechanical Behaviour of Stone Mastic Asphalt Mixtures*. Construction and Building Materials, 157, 965-974.
- Saedi, S. (2019). *Polimerik Katkıların (FRP, Viatop Premium ve SBS) Taş Mastik Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Sağlık, A. (2008). *Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı için Performans Sınırlarının Belirlenmesi*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Sağlık, A. & Güngör, A. G. (2008). *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*. Ankara: Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü.
- Salta, İ. (2010). *Bitümlü Karışımların Geri Dönüşüm Yöntemlerinin İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Sengül, C. E., Seref, O., Iskender, E. & Aksoy, A. (2013). *Evaluation of SBS Modified Stone Mastic Asphalt Pavement Performance*. Construction and Building Materials, 41, 777-783.
- Seren, I. S. (2015). *Elektrik Ark Fırını Cürufunun Yapay Agregalar Olarak Esnek Üstyapılarda Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakasında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Shafiei, A. & Namin, M. L. (2014). *Experimental Investigation on the Effect of Hydrated Lime on Mechanical Properties of SMA*. Construction and Building Materials, 70, 379-387.
- Sheng, N. J. (2019). *Assessment on the Performance of Asphalt Mixtures Prepared with Adhesion Promoters*. School of Civil Engineering Universiti Sains Malasia, the Degree of Bachelor of Engineering (Hons.) (Civil Engineering), Gelugor, Penang.
- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M. & Tandon, V. (2003). *Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements – A National Seminar*, February, San Diego, California, 77-110.
- Sönmez, İ. (2010). *Farklı kayaçlardan Üretilen Agregaların Sıcak Asfalt Karışımlarda Birlikte Kullanılabilirliği*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Sönmez, İ. & Yıldırım, S. A. (2013). *Kalsit Mineralinin SMA Karışımlarda Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı*. 23. Uluslararası Madencilik Kongresi, 16-19 Nisan, Antalya.

- Srikant, G., Kumar, R. & Vasudeva, R. (2018). *A Review on Warm Mix Asphalt*. Proceedings of National Conference: Advanced Structures, Materials and Methodology in Civil Engineering (ASMMCE-2018), 525-533, 03-04th November, Jaladar, Punjab.
- Sultani, K. A. (2021). *Polipropilen Pirolizi Kullanılarak Yapılan Taş Mastik Asfalt Karışımların Marshall Özellikleri*. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Sun, G., Niu, Z., Zhang, J., Tan, X., Jing, Y. & Chen, Z. (2022). *Impacts of Asphalt and Mineral Types on Interfacial Behaviors: A Molecular Dynamics Study*. Case Studies in Construction Materials, 17, e01581.
- Sümengen, M. (2011). *Tortum-H46 Paftası Jeoloji Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Šernas, O., Vorobjovas, V., Šneideraitienė L. & Vaitkus, A. (2016). *Evaluation of Asphalt Mix with Dolomite Aggregates for Wearing Layer*. Transportation Research Procedia, 14, 732-737.
- Škultecke, J., Vaitkus, A. & Šernas, O. (2023). *Laboratory Investigation on the Use of Wood Waste Fibres in SMA Mixtures*. Construction and Building Materials, 400, 132727.
- Şahin, B. (2021). *Taş Mastik Asfalt Kaplamalarda Selülozik Fiber Yerine Vermikülit Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yozgat Bozok Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Yozgat.
- Şanlıer, İ. (2018). *Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kapsamında Taş Mastik Asfalt (TMA) Uygulamaları, Performanslarının Karşılaştırılması ve Maliyet Analizi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Şanlıer, İ. & Pamuk, İ. (2017). *Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kapsamında Taş Mastik Asfalt (TMA) Uygulamaları ve Performanslarının Karşılaştırılması*. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 29-30 September, Baku.
- Şirin, N., İskender, E., Aksoy, A., Aslan, M. T. & İskender, C. (2022). *Asfalt Karışımların Termal İletkenliklerinin Değerlendirilmesi*. Niğde Ömer Halis Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(2), 348-355.
- Şinofoğlu, F. (2019). *Bor Mineralinin Bitüm Katkı Malzemesi Olarak Kullanılmasının Taş Mastik Asfaltların Mühendislik Özelliklerine Etkisi*. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, Rize.
- Taib, A., Jakarni, F., M., Rosli, M., F., Md Yusoff, N., I. & Abd Aziz, M. (2019). *Comparative Study of Moisture Damage Performance Test*. IOP Conference Series: Materials and Engineering, 512.
- Tan, Y. & Guo, M. (2013). *Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic*. Construction and Building Materials, 47, 254-260.

- Tan, Y., Zhang, H., Cao, D., Xia, L., Du, R., Shi, Z., Dong, R. & Wang, X. (2019). *Study on Cohesion and Adhesion of High-Viscosity Modified Asphalt*. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 394-402.
- Tarrer, A. R. & Wagh, V. (1991). SHRP-A/UIR-91-507 The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding, *Strategic Highway Research Program National Research Council*, Washington, D. C.
- Tayh, S. A & Alghrery, H. S. J. (2021). *Evaluation of The Effect of Gradation on Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt Mixtures*. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1105, 012136.
- T.C Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2019). *Karayolları Genel Müdürlüğü 2019-2023 Stratejik Planı*, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Temel, S. (2016). *Doğal Zeolit ve Sentetik Zeolitin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak Kullanımı*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Tessema, G. T. & Ponnurangam, P. (2019). Investigation the Effect of Aggregates on Hot Mix Asphalt (HMA) Performance-A Case Study. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(1), 31-40.
- Thomas, R. C., Houston, J. E., Crooks, R. M., Kim, T. & Michalske, T.A. (1995). Probing adhesion forces at the molecular scale. *Journal of the American Chemical Society*, 117, 3830-3834.
- Toprakcı, B. (2023). *Üstyapılarda Kullanılan Taş Mastik Asfalt Performansının Araştırılması*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Tran, N., Taylor, A., Timm, D., Robbins, M., Powell, B. & Dongre, R. (2010). Mix Design, Laboratory Performance Evaluation and Structural Pavement Analysis and Design. *NCAT Report 10-05 National Center for Asphalt Technology (NCAT)*, Auburn.
- Tran, N. T. & Takahashi, O. (2017). Effect of Aggregate Gradation on The Cracking Performance of Wearing Course Mixtures. *Construction and Building Materials*, 152, 520-528.
- T.S.E. (2010). Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri için Deneyler – Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi. *TS EN 1367-2*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- T.S.E. (2012). Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler – Bölüm 3: Tane Şekli Tayini – Yassılık İndeksi. *TS EN 933-3*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Twagirimana, E. (2014). Evaluation of Adhesion Properties in Bitumen-Aggregate Systems for Winter Surfacing Seals Using the Bitumen Bond Strength Test. Stellenbosch University, Faculty of Engineering, Degree of Master, Stellenbosch.

- Udaltsov, M. (2025). *Adhesion between Mineral Aggregate and Bitumen*. Tampere University, Faculty of Built Environment, Master's Thesis, Tampere.
- Uncu, D. (2017). *Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nanomalzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- URL-1. Karayolları Genel Müdürlüğü. (2025, Temmuz 19). Karayolları Ulaşım İstatistikleri (2024): <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Yayinlar/YayinPdf/KarayoluUlasimIstatistikleri2024.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-2, European Aggregates Association (UEPG). (2025, Temmuz 19). Figures: <https://www.aggregates-europe.eu/facts-figures/figures/> adresinden alınmıştır.
- URL-3. European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2025, Temmuz 19). Asphalt in Figures 2023. <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2023-view-online> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2025, Ocak 01). Asphalt Testing Laboratory Manual: https://www.qu.edu.qa/siteimages/static_file/qu/colleges/engineering/civil/document/s/lab%20manuals/asphalt_laboratory_manual.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2025, Temmuz 10). Mikro-Deval Cihazı EN: <https://www.utest.com.tr/tr/20394/Mikro-Deval-Cihazı-EN> adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2025, Temmuz 10). Made-in-China En1097-1 Steel Spheres 10mm Dia. Pack of 20 Kg for Materials: <https://cheerjazz.en.made-in-china.com/product/ByexXEAKMjWd/China-En1097-1-Steel-Spheres-10mm-Dia-Pack-of-20-Kg-for-Materials.html> adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2025, Temmuz 11). Aggegates Schedule a Consultation: <https://srt.co.za/aggregates/> adresinden alınmıştır.
- URL-8. (2025, Temmuz 11). Polished Stone Value (PSV): <https://www.vialab.fr/en/produits/home/road-lab-equipment/aggregate-and-soil/polished-stone-value-psv/> adresinden alınmıştır.
- URL-9. (2021, Kasım 22). BORAL Asphalt Stone Mastic Asphalt (SMA): https://www.boral.com.au/sites/default/files/media/field_document/15514_Boral_Stone_Mastic%20Asphalt.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-10. (2025, Temmuz 22). Asphalt Pavement History: <https://www.asphaltwa.com/welcome-asphalt-pavement-history/> adresinden alınmıştır.
- URL-11. (2025, Temmuz 22). Asfaltın Tarihçesi: https://www.asmud.org.tr/Asfalt_Tarihi.asp adresinden alınmıştır.

- URL-12. (2025, Temmuz 19). *Karayolu Ulaşım İstatistikleri*: <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Yayinlar/YayinPdf/KarayoluUlasimIstatistikleri2024.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-13, (2024, Mart 27). Science of Adhesion: <https://adhesives.org/adhesives-sealants/science-of-adhesion/> adresinden alınmıştır.
- URL-14, (2024, Ocak 01). Nouryon, Adhesion Promoters Technical Bulletin: <https://www.nouryon.com/globalassets/inriver/resources/brochure-asphalt-adhesion-promoters-global-en.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-15, (2024, Ocak 05). İstanbul Teknik Karayolları Asfalt Çözümleri: https://www.istanbulteknik.com/pdf/karayolu_asfalt.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-16, (2024, Nisan 15). Electronegativity: https://kccollege.ac.in/uploads/a0a749e2150269e576c25d429d9b0047Electronegetivity%20_Sem%20II_%20HP.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-17, (2024, Nisan 15). Kimyasal Etkileşimler: Zayıf Etkileşimler: <https://forum.turkmmo.com/konu/3802388-kimyasal-etkilesimler-zayif-etkilesimler/> adresinden alınmıştır.
- URL-18, (2024, Nisan 16). Intermolecular Forces – Definition, Types, Equations, Examples: <https://www.geeksforgeeks.org/intermolecular-forces-definition-types-equations-examples/> adresinden alınmıştır.
- URL-19. (2025, Şubat 12). Asfalt ve Yol Kalitesi Deneyleri Vialit Plaka (Yapışma) Test Ekipmanı: <https://www.utest.com.tr/tr/20445/Vialit-Plaka-Yapisma-Test-Ekipmani> adresinden alınmıştır.
- URL-20. (2025, Nisan 08). New Equipments: <https://www.uettaxila.edu.pk/TITE/newEquipments.htm> adresinden alınmıştır.
- URL-21. (2025, Nisan 08). Film Stripping Device: <https://heicoin.com/film-stripping-device/> adresinden alınmıştır.
- URL-22. (2025, Nisan 08). Indirect Tensile Strength Test: <https://smi-iran.com/en/index.php/design-and-testing-of-bituminous-mixtures-return/indirect-tensile-strength-test> adresinden alınmıştır.
- URL-23. (2025, Nisan, 12). ASTM D1075-07 Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures: <https://store.astm.org/d1075-07.html> adresinden alınmıştır.
- URL-24. (2025, Nisan 03). Hveem Stabilometer-ASTM Type: <https://ele.com/product/hveem-stabilometer-astm-type> adresinden alınmıştır.

- URL-25. (2025, Nisan 06). Duriez Compression Test Sets: <https://www.utest.com.tr/en/23262/Duriez-Compression-Test-Sets> adresinden alınmıştır.
- URL- 26. (2025, Nisan 23). Technical Note Pendant Drop Measurements: <https://www.sanyo-si.com/wp-content/uploads/kruss-tn316-en.pdf> adresinden alınmıştır.
- Uzun, İ. (2011). *Andezitin Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Valdés-Vidal, G., Calabi, A. & Sanchez-Alonso, E. (2017). Evaluation of The Durability of Asphalt Mixtures Depending on The Physical Properties of Aggregates. *Revista de la Construcción*, 16(1), 92-103.
- Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Miró-Recasens, R. & Norambuena-Contreras, J. (2015). Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures with Different Aggregates Type. *Construction and Building Materials*, 101, Part 1, 474-481.
- Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Sanchez-Alonso, E. & Miró, R. (2019). Effect of Aggregate Type on The Fatigue Durability of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 224, 124-131.
- Valentin, J., Treibal, J., Nežerka, V., Valentová, T., Vacková, P. & Tichá, P. (2021). *A Comprehensive Study on Adhesion Between Modified Bituminous Binders and Mineral Aggregates*. *Construction and Building Materials*, 305, 124686.
- Vázquez, V. F., Terán, F., Luong, J. & Paje, S. E. (2019). *Functional Performance of Stone Mastic Asphalt Pavements in Spain: Acoustic Assessment*. *Coatings*, 9(2), 9020123.
- Wang, F., Xiao, Y., Chen, Z., Cui, P., Liu, J. & Wang, N. (2022). Morphological Characteristics of Mineral Filler and Their Influence on Active Adhesion between Aggregates and Bitumen. *Construction and Building Materials*, 323, 126520.
- Wasilewska, M., Malaszkiewicz, D. & Ignatuik, N. (2017). Evaluation of Different Mineral Filler Aggregates for Asphalt Mixtures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 245:022042.
- Watson, D. E. & Julian, G. (2018). *Effect of Flat and Elongated Aggregate on Stone Matrix Asphalt Performance*. 1st International Conference on Stone Matrix Asphalt, 5-7 November, Special Report 223 Advances in the Design, Production, and Construction of Stone Matrix (Mastic) Asphalt, Atlanta.
- Wei, J. & Zhang, Y. (2012). Application of Sessile Drop Method to Determine Surface Free Energy of Asphalt and Aggregate. *Journal of Testing and Evaluation*, 40(5):20120060.
- Whiteoak, D. (1990). *The Shell Bitumen Handbook*. Shell Bitumen, England.

- Wikipedia, (2024, Nisan 16). Dipol (Kimya): [https://tr.wikipedia.org/wiki/Dipol_\(kimya\)#:~:text=molek%C3%BClleri%20kal%C4%B1c%C4%B1%20dipold%C3%BCr.,%C4%B0nd%C3%BCklenme,Buna%20ind%C3%BCklenme%20denir.adresinden%20alınmıştır.](https://tr.wikipedia.org/wiki/Dipol_(kimya)#:~:text=molek%C3%BClleri%20kal%C4%B1c%C4%B1%20dipold%C3%BCr.,%C4%B0nd%C3%BCklenme,Buna%20ind%C3%BCklenme%20denir.adresinden%20alınmıştır.)
- Xia, C., Lv, S., You, L., Chen, D., Li, Y. & Zheng, J. (2019). Unified Strength Model of Asphalt Mixture under Various Loading Modes. *Materials*, 12 (6), 889.
- Xue, J., Jiang, Y., Zheng, Y. & Xiong, S. (2022). *Optimization Design and Verification Of SMA-13 Mixture Gradation Using Mortar Theory*. Construction and Building Materials, 225, 127478.
- Xu, J. –Y., Ma, B., Mao, W. –J., Si, W. & Wang, X. (2023). *Review of Interfacial Adhesion Between Asphalt and Aggregate Based on Molecular Dynamics*. Construction and Building Materials, 362, 129642.
- Yan, Y., Zhang, H., Bekoe, M., Allen, C., Zhou, J. & Roque, R. (2023). Effects of Asphalt Binder Type, Aggregate Type, and Gradation Characteristics on Fracture Properties and Performance of Asphalt Mixtures at Intermediate Temperatures. *Construction and Building Materials*, 409, 133801.
- Yan-zhu, W., Jing-tao, S., Xu-dong, W. & Guang, Y. (2020). *Research on Adhesive Properties between Asphalt and Aggregates at High Temperature*. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 14(3), 0000742.
- Yarahmadi, A. M., Shafabakhsh, G. & Asakereh, A. (2022). *Laboratory Investigation of the Effect of Nano CaCO₃ on Rutting and Fatigue of Stone Mastic Asphalt Mixtures*. Construction and Building Materials, 317, 126127.
- Yeşilçiçek, H. (2024). *Bor ve Tall Yapının Sentezlenmesiyle Elde Edilen Katkıyla Asfaltın Modifiye Edilmesi ve Kaplama Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yılmaz, A., & Sargın, ř. (2016). Water Effect on Deteriorations of Asphalt Pavements. *TOJSAT: The Online Journal of Science and Technology*, 2(1), 1-6.
- Yılmaz, B. (2016). *Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yılmaz, M. (2012). *Granitik Kayaçların Sıcak Asfalt Karışımlarında Agregat Olarak Kullanılabilirliği*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Yılmaz, H. & Yılmaz, A. (2016). Oltu-Balkaya Havzasının (KD Türkiye) Tektonik Konumu ve Geç Kretase Sonrası Jeolojik Evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 59(1), 1-26.

- Yin, Y., Chen, H., Kuang, D. & Song, L. (2017). *Effect of Chemical Composition of Aggregate on Interfacial Adhesion Property Between Aggregate and Asphalt*. Construction and Building Materials, 149, 231-237.
- Yu, X., Burnham, N. A. & Tao, M. (2015). Surface Microstructure of Bitumen Characterized by Atomic Force Microscopy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 218, 17-33.
- Yüknü, K., Öztürk, T. & Komut, M. (2021). *Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- Zeng, L., Zhang, H., Jiang, S., Huang, H., Xiong, B. & Yuan, H. (2025). Research on the Effect of Lithology of the Fine Aggregates on the Performance of Rubberized Asphalt Mixtures. *Frontiers in Materials*, 12:1495219.
- Zhang, J., Airey, G. D., Grenfell, J. & Apeagyei, A. K. (2016). Moisture Sensitivity Examination of Asphalt Mixtures Using Thermodynamic, Direct Adhesion Peel and Compacted Mixture Mechanical Tests. *Road Materials and Pavement Design*, 19(1), 120-138.
- Zhang, X., Wang, J., Zhou, X., Zhang, Z. & Chen, X. (2021). *Mechanical Properties of the Interfacial Bond between Asphalt-Binder and Aggregates under Different Aging Conditions*. Materials, 14(5):1221.
- Zhao, X., Sheng, Y., L V, H., Jia, H., Liu, Q., Ji, X., Xiong, R. & Meng, J. (2022). *Laboratory Investigation on Road Performances of Asphalt Mixtures Using Steel Slag and Granite as Aggregate*. Construction and Building Materials, 315, 125655.
- Zhou, L., Huang, W., Zhang, Y., Lv, Q., Yan, C. & Jiao, Y. (2020). *Evaluation of the Adhesion and Healing Properties of Modified Asphalt Binders*. Construction and Building Materials, 251, 119026.
- Zheng, C. F. & Zheng, S. (2012). *Factors of Adhesion Between Asphalt and Mineral Aggregates*. Applied Mechanics and Materials, 256-259, 1765-1768.

7. EKLER

EK-1: Marshall Dizaynı Düzeltme Faktörleri

Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü
51.0	1.435	55.0	1.265	59.0	1.130	63.0	1.013	67.0	0.918
51.1	1.432	55.1	1.262	59.1	1.127	63.1	1.011	67.1	0.915
51.2	1.428	55.2	1.259	59.2	1.124	63.2	1.008	67.2	0.913
51.3	1.425	55.3	1.256	59.3	1.120	63.3	1.006	67.3	0.911
51.4	1.421	55.4	1.253	59.4	1.117	63.4	1.003	67.4	0.908
51.5	1.418	55.5	1.250	59.5	1.114	63.5	1.000	67.5	0.906
51.6	1.414	55.6	1.247	59.6	1.110	63.6	0.998	67.6	0.904
51.7	1.411	55.7	1.243	59.7	1.107	63.7	0.995	67.7	0.901
51.8	1.407	55.8	1.239	59.8	1.104	63.8	0.992	67.8	0.899
51.9	1.404	55.9	1.235	59.9	1.100	63.9	0.990	67.9	0.897
52.0	1.400	56.0	1.231	60.0	1.097	64.0	0.988	68.0	0.894
52.1	1.397	56.1	1.228	60.1	1.094	64.1	0.985	68.1	0.892
52.2	1.393	56.2	1.224	60.2	1.090	64.2	0.982	68.2	0.890
52.3	1.390	56.3	1.220	60.3	1.088	64.3	0.980	68.3	0.888
52.4	1.382	56.4	1.216	60.4	1.085	64.4	0.978	68.4	0.886
52.5	1.375	56.5	1.214	60.5	1.082	64.5	0.975	68.5	0.885
52.6	1.368	56.6	1.210	60.6	1.079	64.6	0.972	68.6	0.883
52.7	1.359	56.7	1.206	60.7	1.076	64.7	0.970	68.7	0.881
52.8	1.351	56.8	1.202	60.8	1.073	64.8	0.967	68.8	0.879
52.9	1.344	56.9	1.198	60.9	1.070	64.9	0.965	68.9	0.877
53.0	1.337	57.0	1.194	61.0	1.067	65.0	0.962	69.0	0.875
53.1	1.328	57.1	1.190	61.1	1.064	65.1	0.960	69.1	0.874
53.2	1.320	57.2	1.187	61.2	1.062	65.2	0.957	69.2	0.872
53.3	1.317	57.3	1.184	61.3	1.059	65.3	0.955	69.3	0.870
53.4	1.314	57.4	1.181	61.4	1.056	65.4	0.953	69.4	0.868
53.5	1.311	57.5	1.178	61.5	1.053	65.5	0.951	69.5	0.866
53.6	1.308	57.6	1.175	61.6	1.050	65.6	0.949	69.6	0.864
53.7	1.305	57.7	1.172	61.7	1.047	65.7	0.947	69.7	0.862
53.8	1.302	57.8	1.169	61.8	1.044	65.8	0.945	69.8	0.860
53.9	1.299	57.9	1.164	61.9	1.040	65.9	0.943	69.9	0.858
54.0	1.296	58.0	1.161	62.0	1.038	66.0	0.940	70.0	0.856
54.1	1.293	58.1	1.158	62.1	1.036	66.1	0.938	70.1	0.854
54.2	1.290	58.2	1.155	62.2	1.033	66.2	0.936	70.2	0.852
54.3	1.286	58.3	1.152	62.3	1.031	66.3	0.934	70.3	0.850
54.4	1.283	58.4	1.149	62.4	1.028	66.4	0.932	70.4	0.849
54.5	1.280	58.5	1.146	62.5	1.026	66.5	0.930	70.5	0.847
54.6	1.277	58.6	1.143	62.6	1.023	66.6	0.927	70.6	0.845
54.7	1.274	58.7	1.140	62.7	1.021	66.7	0.925	70.7	0.843
54.8	1.271	58.8	1.137	62.8	1.018	66.8	0.922	70.8	0.841
54.9	1.268	58.9	1.133	62.9	1.016	66.9	0.920	70.9	0.839

ÖZGEÇMİŞ

Havanur Ebru GÜRBÜZ, ilköğrenimini ve lise etitimini Bayburt'ta tamamladı. 2009-2010 eğitim-öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü kazandı. Daha sonra Çift Anadal Programına kabul edildi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde de eğitime başladı. 2014 yılında Jeoloji Mühendisliği Bölümünü bölüm birinciliği ile bitirdi. 2015 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi (Atatürk Üniversitesi Ortak Program) Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı ve 2018 yılında tamamladı. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde doktora eğitime başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.