



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DEKİ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) TASARIM
SÜRECİNİN GÜNCEL YAKLAŞIMLAR ÇERÇEVESİNDE
DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

AHMET ÇALIŞKAN

DANIŞMAN

PROF. DR. ALTAN ÇETİN

BARTIN - 2025



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TÜRKİYE'DEKİ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) TASARIM SÜRECİNİN
GÜNCEL YAKLAŞIMLAR ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE
İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet ÇALIŞKAN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN-2025

KABUL VE ONAY

Ahmet ÇALIŞKAN tarafından hazırlanan “TÜRKİYE’DEKİ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) TASARIM SÜRECİNİN GÜNCEL YAKLAŞIMLAR ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ” başlıklı bu çalışma, 28.08.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer CEYLAN

Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Altan ÇETİN danışmanlığında hazırlamış olduğum “TÜRKİYE’DEKİ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) TASARIM SÜRECİNİN GÜNCEL YAKLAŞIMLAR ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

28.08.2025

Ahmet ÇALIŞKAN

ÖN SÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi birikimiyle yolumu aydınlatan, her adımda desteğini hissettiren, yönlendirmeleriyle çalışmamın bilimsel niteliğini geliştiren kıymetli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Altan ÇETİN'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Bilimsel düşünceyi önceleyen yaklaşımı ve sabırlı tutumu sayesinde, bu süreci daha verimli ve anlamlı bir şekilde tamamlamam mümkün olmuştur.

Ayrıca, çalışmamın saha boyutunda yürüttüğüm araştırmalarda desteğini esirgemeyen, Karayolları Genel Müdürlüğü'ndeki görüşmelerimde katkı sağlayan değerli meslektaşım Sayın Ulviye ZİYA'ya teşekkürü bir borç bilirim. Kendisiyle yaptığımız görüşmeler, çalışmamın pratik altyapısını güçlendirmiş ve daha gerçekçi sonuçlara ulaşmamı sağlamıştır.

Bu sürecin yalnızca akademik bir çaba değil, aynı zamanda kişisel bir dayanıklılık sınavı olduğunu da ifade etmeliyim. Bu nedenle, en yoğun ve zorlu dönemlerde manevi desteğini esirgemeyen aileme, yakın dostlarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim. Onlarla yaptığım sohbetler, fikir alışverişleri ve paylaştığımız anlar, bu çalışmanın görünmeyen ancak en değerli yapı taşlarını oluşturmuştur.

Bu tez, yalnızca bir akademik sorumluluğun değil, aynı zamanda çevremdeki insanların katkı ve desteğiyle örülen bir emeğin ürünüdür. Tüm katkı sunanlara şükranla...

Ahmet ÇALIŞKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TÜRKİYE’DEKİ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) TASARIM SÜRECİNİN GÜNCEL YAKLAŞIMLAR ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

Ahmet ÇALIŞKAN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altan ÇETİN

Bartın- 2025, sayfa: 243

Ülkemizde ve dünyada en yaygın ulaşım türü olan karayolu ulaşımı, artan nüfus ve ulaşım talebiyle sürekli genişlemektedir. Ancak, karayolu kaplamalarında yaygın olarak kullanılan ampirik Marshall yöntemi ile tasarlanan kaplamaların, özellikle yüksek trafik yükleri altında kalıcı deformasyon ve çatlama gibi performans sorunlarını yeterince karşılayamadığı görülmektedir. Bu durum, performans esaslı karışım tasarım yöntemlerine duyulan ihtiyacı ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın amacı, mevcut performans esaslı yaklaşımları ve özellikle dengeli karışım tasarımında kullanılan performans testlerini inceleyerek, ülkemiz koşullarına uygun temel performans testlerini içeren alternatif bir tasarım yöntemi önermektir.

Bu kapsamda, öncelikle literatürde yer alan performans testleri ve bunların karışım tasarımındaki yeri araştırılmış, farklı ülkelerdeki uygulamalar incelenmiştir. Daha sonra, Superpave ve dengeli karışım tasarımı kapsamında kullanılan cihazlar ve testler (örneğin tekerlek izi, çatlama ve nem hasarı deneyleri) teknik açıdan değerlendirilmiş ve mevcut Türkiye uygulamaları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Karayolları Teknik Şartnamesi’nde yer alan güncel düzenlemeler, Avrupa standartları ile olan uyum çalışmaları ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel incelemeler değerlendirilmiştir.

Çalışma sonucunda, ülkemizde halen yaygın olarak kullanılan Marshall yönteminin performans sorunlarını çözmede yetersiz kaldığı, ancak seçilmiş bazı temel performans testlerinin tasarım sürecine entegre edilmesi halinde daha güvenilir ve uzun ömürlü kaplamaların elde edilebileceği belirlenmiştir. Özellikle Hamburg Tekerlek İzi Testi, Yarı Dairesel Eğilme Testi (SCB) ve Çekme Dayanım Oranı (TSR) gibi deneylerin, BSK tasarımında pratik ve uygulanabilir bir çözüm sunduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın çıktıları, Türkiye’de BSK tasarımında performans esaslı yaklaşımlara geçiş sürecine katkı sağlayacak, ilgili otoriteler için şartname revizyonlarına ışık tutacak ve akademik çalışmalara metodolojik bir temel sunacaktır. Böylece, daha ekonomik, uzun ömürlü ve güvenilir yol üstyapılarının tasarımına yönelik önemli bir adım atılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt Karışım Tasarım Yöntemleri, Performansa Dayalı Tasarım yöntemleri, Superpave Yöntemi, Dengeli Karışım Tasarımı, Basit Performans Testleri

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EVALUATION OF THE HOT MIX ASPHALT (HMA) DESIGN PROCESS IN TURKEY WITHIN THE FRAMEWORK OF CONTEMPORARY APPROACHES AND IMPROVEMENT RECOMMENDATIONS

Ahmet ÇALIŞKAN

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Altan ÇETİN

Bartın- 2025, pp: 243

Road transport, the most common mode of transport in our country and around the world, is constantly expanding due to increasing population and transport demand. However, it has been observed that pavements designed using the empirical Marshall method, which is widely used in road pavements, cannot adequately address performance issues such as permanent deformation and cracking, especially under high traffic loads. This situation has highlighted the need for performance-based mix design methods.

The aim of this study is to propose an alternative design method that includes basic performance tests suitable for our country's conditions by examining existing performance-based approaches and, in particular, the performance tests used in balanced mix design.

In this context, performance tests found in the literature and their place in mixture design were first researched, and applications in different countries were examined. Subsequently, the equipment and tests used in Superpave and balanced mixture design (e.g., wheel track, cracking, and moisture damage tests) were technically evaluated and compared with current Turkish applications. Furthermore, the current regulations in the Highway Technical Specifications, the harmonisation efforts with European standards, and the experimental studies conducted in the laboratory environment were evaluated.

The study concluded that the Marshall method, which is still widely used in our country, is insufficient in solving performance problems, but that more reliable and durable pavements can be obtained if selected basic performance tests are integrated into the design process. In particular, experiments such as the Hamburg Wheel Mark Test, SCB (Semi-Circular Bending Test) and TSR (Tensile Strength Ratio) were found to offer a practical and applicable solution in BSK design.

The outputs of this study will contribute to the transition to performance-based approaches in BSK design in Turkey, shed light on specification revisions for relevant authorities, and provide a methodological basis for academic studies. Thus, it is aimed to take an important step towards the design of more economical, durable, and reliable road pavements.

Keywords: Asphalt Mix Design Methods, Performance Based Design methods, Superpave Method, Balanced Mix Design, Simple Performance Tests

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
TABLolar DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. ASFALT KAPLAMA VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK).....	3
2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarının Hacimsel Özellikleri.....	5
2.1.1 Karışım yoğunluğu.....	7
2.1.2 Hava boşlukları.....	7
2.1.3 Agregalar arası boşluklar.....	8
2.1.4 Asfaltla dolu boşluklar.....	8
2.1.5 Bitüm içeriği.....	9
2.2 Bitümlü Bağlayıcı Yapısı ve Davranışı.....	10
2.3 Mineral Agrega Yapısı ve Davranışı.....	14
2.4 Bitümlü Sıcak Karışım Davranışı.....	15
2.5 BSK Kaplamalarından Beklenen Performans Özellikleri.....	16
2.5.1 Kalıcı Deformasyona Karşı Direnç.....	16
2.5.2 Yorulma Çatlaması.....	18
2.5.3 Düşük Sıcaklık Çatlaması.....	19
2.5.4 Neme Karşı Dayanıklılık.....	20
2.5.5 Durabilite.....	21
2.5.6 Kayma-Sürtünme Direnci.....	21
2.5.7. İşlenebilirlik.....	21
3. BİTÜMLÜ KARIŞIM TASARIM METODLARI.....	23
3.1 Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Yöntemlerinin Gelişimi.....	23
3.2 Hubbard-Field Metodu.....	43
3.3 Smith Üç Eksenli (Triaxial) Tasarım Yöntemi.....	44

3.4 Texas Döner Sıkıştırıcısı (Texas Gyrotory Compactor-TGC).....	48
3.5 Hveem Karışım Tasarım Yöntemi	50
3.5.1 CKE Yöntemi ile Optimum Bitüm İçeriğinin Tahmini	52
3.5.2 Test Numunesi Hazırlanması.....	53
3.5.4 Şişme Testi.....	57
3.5.5 Yoğunluk ve Boşluk Analizi.....	58
3.6 Marshall Tasarım Metodu	61
3.6.1. Agrega Seçimi.....	62
3.6.2 Bağlayıcı Seçimi	67
3.6.3 Numunelerin Hazırlanması.....	69
3.6.5 Stabilitate ve Akış Testi	76
3.7 Superpave Tasarım Yöntemi	80
3.7.1 Düzey 1 Karışım Tasarım Aşaması.....	83
3.7.2 Düzey 2 ve Düzey 3 Karışım Tasarım Aşamaları	108
3.8 Dengeli Karışım Tasarım Yöntemi (Balanced Mix Design-BMD).....	117
3.8.1 BMD Yaklaşımları.....	119
3.8.2 Performans Testleri İçin Numune Hazırlaması.....	127
3.8.3 BMD ile Kullanılabilen Performans Testleri	129
3.8.4 BMD İle Geleneksel Hacimsel Yöntemleri Arasındaki Farklar.....	136
3.8.5 BMD'nin Karayolu Yöneticileri için Uygulama Yöntemleri.....	137
3.8.6 BMD'nin Mevcut Uygulamaları.....	138
3.8.7 BMD Yönteminin Sürdürülebilirliği.....	141
4. BMD YÖNTEMİNDE KULLANILAN PERFORMANS TESTLERİ	143
4.1 Çatlama Direnci ile İlişkili Deneyler	143
4.1.1 Disk Şekilli Kompakt Çekme Testi (Disc-Shaped Compact Tension Test-DCT).....	143
4.1.2 Illinois Esneklik Endeks Testi (Illinois Flexibility Index Test - I-FIT). 146	
4.1.3 Dolaylı Çekme Sünme Uyumluluğu ve Dayanım Testi (Indirect Tensile-IDT Creep Compliance and Strength Test).....	150
4.1.4 Bindirme Tabakası Testi (Overlay Test - OT)	153
4.1.5 Doğrudan Çekme Döngüsel Yorulma Testi (Direct Tension Cyclic Fatigue Test-DTCFT)	157
4.1.6 N_{Flex} Faktörü.....	159
4.1.7 Kiriş Eğilme Yorulma Testi (Flexural Bending Beam Fatigue Test).....	162

4.1.8 Yarı Dairesel Eğilme Testi (Louisiana Yöntemi) (Semi-Circular Bending Test - SCB).....	165
4.1.9 Dolaylı Çekme Asfalt Çatlama Testi (Indirect Tensile Asphalt Cracking Test-IDEAL-CT)	167
4.2 Tekerlek İzi Direnci ile İlişkili Deneyler.....	169
4.2.1 Hamburg Tekerlek İzi Testi (Hamburg Wheel-Tracking Test – HWTT)	169
4.2.2 Asfalt Kaplama Analizörü (Asphalt Pavement Analyzer - APA)	171
4.2.3 Yüksek Sıcaklıkta Dolaylı Çekme Testi (High Temperature Indirect Tension-HT-IDT)	173
4.2.4 Dolaylı Çekme Asfalt Tabakası Tekerlek İzi Test Cihazı- Hızlı Kayma Tekerlek İzi Testi (Indirect Tensile Asphalt Layer Rutting Tester -Rapid Shear Rutting - IDEAL-RT)	175
4.2.5 Akma Sayısı Testi (Flow Number - FN Test)	177
4.2.6 Gerilme Taramalı Tekerlek İzi Testi (Stress Sweep Rutting-SSR).....	179
4.3 Nem Hasarı Direnci ile İlişkili Deneyler	180
4.3.1 Çekme Dayanım Oranı (Tensile Strength Ratio – TSR).....	180
4.4 Aşınma Kaybı ile İlişkili Deneyler.....	182
4.4.1 Cantabro Testi	182
5. TÜRKİYE’DE UYGULANAN BSK TASARIM YAKLAŞIMLARI.....	184
5.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarla İlgili Avrupa Standartları Uyum Çalışmaları	186
5.1.1. Agrega ve Bitüm Gereklilikleri	187
5.1.2. Karışım Tipleri ve Tasarım Yöntemleri	187
5.1.3. Üretim ve Kalite Kontrol Sistematiği	188
5.1.4. Uygulamada Karşılaşılan Uyumlaştırma Gereklilikleri	188
5.1.5. Genel Değerlendirme ve Uyum Durumu	189
5.2 BMD Yönteminde Kullanılan Basit Performans Testleri ile EN Standard Test Yöntemlerinin Karşılaştırılması	189
5.3 Superpave Bitüm Sınıflandırma Sistemi ile İlgili Çalışmalar	191
5.3.1 BSK Kaplamalı Yollar için Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları.....	195
5.3.2 Sıcaklık Verilerinin Analiz Edilmesi.....	196
5.3.3 Bitümlü Bağlayıcıların Performans Sınıflarının Belirlenmesi	197
5.3.4 Bölgelere Göre Bitüm Sınıfının Seçimi	201

5.4 Karayolları Teknik Şartnamesindeki Bitümlü Sıcak Karışımlar İle İlgili Değişimlerin Değerlendirmeleri.....	203
5.4.1 Bitümlü Bağlayıcılar (Kısım 412).....	203
5.4.2 Bitümlü Temel (Kısım 406).....	204
5.4.3 Asfalt Betonu Binder ve Aşınma Tabakası (Kısım 407).....	207
5.4.4 Taş Mastik Asfalt-TMA (Kısım 408)	210
6. TÜRKİYE’DEKİ BSK TASARIM SÜRECİNİN DÜNYADAKİ GELİŞMELER ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ....	216
6.1 BSK Tasarım Süreçleri ve Revizyon Gereklilikleri.....	217
6.1.1 Numune Hazırlama	218
6.1.2 Hacim Analizleri	218
6.1.3 Bitümlü Bağlayıcı.....	219
6.1.4 Agrega	219
6.1.5 Performans Kriterleri	220
6.1.6 Trafik Miktarı.....	221
6.2 BMD Yöntemi Kapsamındaki Değerlendirmeler	223
6.3 Performans Esaslı Tasarım Yaklaşımlarının Uygulama Altyapısı ve Kurumsal Hazırlık Açısından Değerlendirilmesi.....	226
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	229
KAYNAKLAR.....	234
ÖZGEÇMİŞ	243

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: BSK kaplama imalat aşamaları a) asfalt üretim tesisi (plant) b) taşıma aşaması c) finişer ile serilme aşaması d) sıkıştırma aşaması	4
2.2: Esnek üstyapı enkesitinde yer alan BSK tabakalar	5
2.3: Sıkıştırılmış BSK karışımındaki hacimsel gösterimi	6
2.4: Sıkıştırılmış bitüm-agrega karışımındaki boşluk tanımları	7
2.5: Bitüm filmi ve hava boşlukları.....	8
2.6: Sıkıştırılmış bitümlü karışımın kesiti	9
2.7: Stabilite(kalıcı deformasyona karşı direnç) çatlakları.....	10
2.8: Bitümlü sıcak karışımda stabilite-durabilite ilişkisi.....	11
2.9: Timsah sırtı çatlaklar	12
2.10: Asfalt kaplamada terleme veya kuma.....	13
2.11: Taşıt tekerleğinin hareketi ile birim kaplama elemanı üzerinde oluşan gerilmeler	15
2.12: Taşıt hareketi ile asfalt kaplamada meydana gelen gerilmeler	16
2.13: BSK kaplama içerisinde tekerlek izi oluşumu.....	17
2.14: Yetersiz alt tabakalara bağlı oluşan tekerlek izi.....	18
2.15: Düşük sıcaklık çatlaması.....	20
3.1: Pat-kâğıt testi.....	25
3.2: Avrupa performans test örnekleri: (a) Kısıtlanmış Numunede Çekme Gerilmesi Testi (Tensile Stress Restrained Specimen Test -TSRST) (b) Üç Eksenli Tekrarlı Basınç Testi (Triaxial Cyclic Compression Test-TCCT).....	32
3.3: (a) LCPC tekerlek izi test cihazı, (b) Trapezoidal sertlik ve yorulma test cihazı	33
3.4: Duriez testi: (a) çift pistonlu sıkıştırma, (b) vakum doygunluk süreci ve (c) kopma testi	33
3.5: Fransız asfalt karışım tasarımının seviyesi.....	34
3.6: Geçici veya standart spesifikasyon geliştiren Ulaştırma Departmanlarının ABD haritası.....	37
3.7: Hubbard-Field'e göre stabilite test ekipmanı.....	44
3.8: Smith üç eksenli test hücresi ve yükleme sistemi	46
3.9: Asfalt betonunun üç eksenli test değerlendirmeleri	46
3.10: Kohezyon ve sürtünme değerlerinin elde edildiği üç eksenli test eğrisinin bir	

örneği	48
3.11: Texas döner sıkıştırıcı	49
3.12: Karışımın kaba aktarılması ve ardından çubuk yardımıyla karıştırılması.....	53
3.13: Hveem test numunelerinin hazırlaması için California Yoğurma Kompaktörü	54
3.14: Hveem stabilometre cihazı ve şematik taslağı	55
3.15: Kohezyometre cihazı.....	57
3.16: Şişme testi	58
3.17: Gradasyon eğrisi.....	64
3.18: (a) Laboratuvar mikseri, (b) Mala veya spatula yardımıyla numune karıştırma işlemi ve (c) Sıkıştırma öncesi karışımın sıcaklığı ölçümü	71
3.19: Marshall numunesinin sıkıştırılma aşaması	72
3.20: Stabilitate ve akış test cihazı	77
3.21: Marshall stabilite testinde akma değerinin belirlenmesi	78
3.22: Yüzde ilişkileri veren Marshall tasarım grafikleri örnekleri.....	79
3.23: Superpave karışım tasarım sisteminin genel akış şeması.....	82
3.24: Bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlağı gelişimi üzerindeki göreceli etkisi.....	84
3.25: Dönel ince film etüvü ve deney öncesi ve sonrasında şişelerin durumu.....	87
3.26: Basınçlı yaşlandırma deney cihazı	88
3.27: DSR deneyinin yapılış şekli ve bağlayıcıya uygulanan gerilme yönleri	89
3.28: Kayma gerilmesi ve deformasyonları kullanılarak faz açısının belirlenmesi	89
3.29: BBR deney cihazı ve numunenin yük-yer değiştirme şeması.....	91
3.30: Deney cihazı şeması ve yük altındaki grafikleri	92
3.31: 12,5 mm'lik nominal maksimum boyutlu agrega derecelendirmesi için Superpave kontrol noktaları ve kısıtlı bölge	94
3.32: Superpave döner sıkıştırıcısı şematik görüntüsü ve çalışma prensibi.....	99
3.33: SHRP döner sıkıştırıcı ile elde edilen tipik yoğunlaşma eğrisi.....	99
3.34: Güçlü ve zayıf agrega yapılarının farklı özelliklerini gösteren yoğunlaşma eğrileri	101
3.35: Sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımının hacimsel diyagramı	102
3.36: Agrega bitüm birleşimi gösterimi	102
3.37: Yüzde hava boşlukları, yüzde VMA, yüzde VFA ve yoğunluk ile yüzde asfalt içeriğinin grafikleri	107
3.38: Superpave Düzey 2 ve Düzey 3 karışım tasarımları için performansa dayalı test	

gereksinimleri.....	108
3.39: Superpave kesme testi	111
3.40: Kesme cihazı plaka yapıştırma bölümü	112
3.41: Kesme test cihazında test edilen kapalı numuneler için LVDT kurulumu	112
3.42: Hacimsel testin kavramsal görünümü	113
3.43: Tek eksenli gerilim testinin kavramsal görünümü	114
3.44: Dolaylı Çekme Testinin şematik görünümü.....	116
3.45: Dolaylı Çekme sünmesi ve mukavemet testleri için tipik numune ekipmanları.....	116
3.46: (a) Performans doğrulamalı hacimsel tasarım adımları	123
3.46: (b) Performans optimizasyonu ile hacimsel tasarım adımları.....	124
3.46: (c) Performansa göre değiştirilmiş hacimsel tasarım adımları.....	125
3.46: (d) Performans tasarımı adımları.....	126
4.1: DCT deney cihazı.....	144
4.2: Illinois esneklik endeksi testi	147
4.3: Yük-yer değiştirme eğrisi.....	149
4.4: IDT sünme uyumluluğu ve dayanım testi	151
4.5: Bindirme Tabakası test numunelerinin plakalar üzerine yerleştirilmesi.....	154
4.6: DTCFT testi	157
4.7: N_{Flex} faktörü testi	159
4.8: Kiriş eğilme yorulma test cihazı.....	163
4.9: Yarı dairesel eğilme testi.....	166
4.10: Dolaylı çekme asfalt çatlama testi (IDEAL-CT).....	168
4.11: IDEAL-CT yük-yer değiştirme eğrisi	169
4.12: Hamburg tekerlek izi testi	171
4.13: Asfalt kaplama analizörü.....	172
4.14: Yüksek sıcaklıkta dolaylı çekme testi	174
4.15: IDEAL-RT deney cihazı	176
4.16: Asfalt karışım performans test cihazı.....	177
4.17: SSR test numunesinin AMTP sistemine yerleştirilmesi	179
4.18: Dolaylı çekme dayanımı test cihazı	181
4.19: Los Angeles aşınma test cihazı	182
5.1: Bölgeler bazında BSK kaplamalı yollar için bitüm performans sınıfları (PG) haritası.....	202

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
3.1: Performansa dayalı gereksinimler için Avrupa test standartları	31
3.2: Fransız asfalt karışım tasarım seviyeleri	35
3.3: ABD'deki eyalet bazında BMD uygulamasına ilişkin durumun özeti.....	43
3.4: Tipik stabilometre kriterleri	56
3.5: Kullanılan elek açıklıkları	63
3.6: Marshall yöntemi tasarım kriterleri.....	68
3.7: Marshall tasarım yönteminin trafik dağılımına göre özellikleri.....	80
3.8: Düzey 2 ve Düzey 3 karışım tasarım yöntemlerinin karşılaştırması.....	83
3.9: Yüksek performanslı asfalt kaplama bağlayıcı deneyleri	85
3.10: Elek Boyutları	93
3.11: Kaba agrega açışallığı önerileri.....	95
3.12: İnce agrega açışallığı önerileri	95
3.13: Kum eşdeğeri için sınır değerler	96
3.14: Los Angeles aşınma limitlerinin önerilen sınır değerleri	97
3.15: Tasarım sıkıştırma ($N_{\text{tasarım}}$) trafik ortalaması	100
3.16: Superpave VMA gereksinimleri.....	105
3.17: Superpave VFA gereksinimleri.....	106
3.18: BMD yaklaşımlarının hacimsel ve performans gereksinimleri, esneklik ve yenilik potansiyelinin özeti	127
3.19: Dengeli Karışım Tasarımı için önerilen performans testleri(Devam ediyor)	131
3.20: BMD için stabilite/çukurlaşma performansı testlerine örnekler	133
3.21: BMD için dayanıklılık/çatlama performansı testlerinden örnekler.....	134
3.22: BMD için nem hasarı/soyulma performans testlerinden örnekler	133
3.23: BMD ve geleneksel yöntemlerdeki adımlar.....	136
3.24: BMD'nin uygulanması için 7 potansiyel görev.....	138
3.25: Farklı Ulaştırma Departmanlarının kullandıkları performans testleri ve kriterleri.....	141
5.1: BMD ve EN Standartlarının Karşılaştırması.....	190
5.2: Superpave Performans Sınıfı Bitümlü Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO M320).....	194
5.3: Bitüm Sınıfı Seçim Tablosu	198
5.4: Polimer Modifiye Bitüm (PMB) Teknik Şartnamesi	200

5.5: Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri (TS EN 12591).....	205
5.6: Kaba Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	209
5.7: Asfalt Betonu Dizayn Kriterleri	212
5.8: Kaba Agreganın Özellikleri(TMA).....	214
5.9: TMA Dizayn Kriterleri.....	215
6.1: Superpave sisteminde trafiğe bağlı sınıflandırma	222
6.2: Superpave tasarımında uygulanacak sıkıştırma sayıları.....	222



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

sn	: saniye
dk	: dakika
m	: metre
mm	: milimetre
cm	: santimetre
µm	: mikrometre
g	: gram
kg	: kilogram
m ²	: metrekare
m ³	: metreküp
°C	: Santigrat derece
°F	: Fahrenheit derece
Pa	: pascal
MPa	: megapascal
"	: inç
psi	: pound cinsinden ağırlık
C	: kohezyon
Φ	: sürtünme açısı
kN	: kilonewton
ml	: mililitre
pen	: bitümün penetrasyon aralığı
lb	: pound veya libre

KISALTMALAR

BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
HMA	: Sıcak Karışım Asfalt
AC	: Asfalt Betonu
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
PMT	: Plentmiks Temel
SHRP	: Stratejik Karayolu Araştırma Programı
PG	: Performans Sınıflandırması

CBR	: Kaliforniya Taşıma Gücü (California Bearing Ratio)
ASTM	: Amerikan Malzeme ve Test Derneği
ASSTHO	: Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Resmi Yetkilileri Derneği
VMA	: Mineral Agregadaki Boşluklar
VFA	: Asfaltla Doldurulmuş Boşluklar
CEN	: Avrupa Standardizasyon Komitesi
VTM	: Karışımdaki Toplam Hava Boşluk Oranı
TCCT	: Üç Eksenli Döngüsel Sıkıştırma Testi (Triaxial Cyclic Compression Test)
UCCT	: Tek Eksenli Döngüsel Sıkıştırma Testi (Uniaxial Cyclic Compression Test)
TSRST	: Gerilme Stresine Dayanıklı Numune Testi (Tensile Stress Restrained Specimen Test)
UTST	: Tek Eksenli Çekme Dayanımı Testi (Uniaxial Tensile Strength Test)
RTFO	: Döner İnce Film Deneyi
2PB-TR	: Trapez Şekilli Numune Üzerinde İki Noktalı Eğilme Testi (Two-Point Bending Test on Trapezoidal Specimen)
2PB-PR	: Prizmatik Numune Üzerinde İki Noktalı Eğilme Testi (Two-Point Bending Test on Prismatic Specimen)
3PB	: Üç Noktalı Eğilme Testi (Three-Point Bending Test)
4PB	: Dört Noktalı Eğilme Testi (Four-Point Bending Test)
CIDT	: Dairesel Dolaylı Çekme Testi (Circular Indirect Tensile Test)
ITSR	: Dolaylı Çekme Dayanımı Oranı
LCPC	: Merkez Köprü ve Yol Laboratuvarı (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)
IDT	: Dolaylı Çekme Dayanımı
FHWA	: Federal Karayolu İdaresi
RTFOT	: Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi
PAV	: Basınçlı Oksidasyon Deneyi
DSR	: Dinamik Kesme Deneyi
RV	: Dönel Viskozite Deneyi
BBR	: Eğilme Deneyi
CKE	: Santrifüj Gazyağı Eşdeğeri
ESAL	: Eşdeğer Standart Dingil Yüğü
SHA	: Eyalet Karayolu Kurumu

ABD	: Amerika Birleşik Devleti
BMD	: Dengeli Karışım Tasarım Yöntemi
RAP	: Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama
İKF	: İşyeri Karışım Formülü
OBC	: Optimum Bağlayıcı İçeriği
LAS	: Sıvı Soyulma Önleyici
DCT	: Disk Şekilli Kompakt Çekme Testi
I-FIT	: Illinois Esneklik Endeksi Testi
SCB	: Düşük Sıcaklıkta Yarı Dairesel Eğilme Testi
OT	: Bindirme Tabakası Testi
DTCFT	: Doğrudan Çekme Döngüsel Yorulma Testi
IDEAL-CT	: Dolaylı Çekme Asfalt Çatlama Testi
HWTT	: Hamburg Tekerlek İzi Testi
APA	: Asfalt Kaplama Analizörü
HT-IDT	: Yüksek Sıcaklıkta Dolaylı Çekme Testi
IDEAL-RT	: Hızlı Kayma Tekerlek İzi Testi
FN	: Akma Sayısı Testi
SSR	: Gerilme Taramalı Tekerlek İzi Testi
TSR	: Çekme Dayanım Oranı
ITCT	: Dolaylı Çekme Çatlama Testi
PMB	: Polimer Modifiye Bitüm
TMA	: Taş Mastik Asfalt
CE	: Avrupa Normlarına Uygunluk Beyanı
TS	: Türk Standartları
EN	: Avrupa Normu
PSV	: Cilalı Taş Değeri
FPC	: Fabrika Üretim Kontrolü
ÜYS	: Üstyapı Yönetim Sistemi
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
İÇM	: İndirekt Çekme Mukavemeti
CMOD	: Çatlak Ağız Açıklığı Deplasmanı
UIUC	: Urbana-Champaign'daki Illinois Üniversitesi
FI	: Esneklik Endeksi

ICT	: Illinois Ulaşım Merkezi
RSI	: Tekerlek İzi Deformasyon Endeksi
TGC	: Teksas Döner Sıkıştırıcı
SGC	: Superpave Döner Sıkıştırıcı
PMD	: Performansa Dayalı Tasarım
NCAT	: Ulusal Asfalt Teknoloji Komitesi
VDOT	: Virginia Ulaştırma Bakanlığı
NJDOT	: New Jersey Ulaştırma Bakanlığı
MnDOT	: Minnesota Ulaştırma Bakanlığı
ALDOT	: Alabama Ulaştırma Departmanı
AL-CT	: Alabama Çatlama Testi
Caltrans	: California Ulaştırma Departmanı
IDOT	: Illinois Ulaştırma Departmanı
VTrans	: Vermont Ulaştırma Ajansı
LaDOTD	: Louisiana Ulaştırma ve Kalkınma Departmanı
MoDOT	: Missouri Ulaştırma Departmanı
ODOT	: Oklahoma Ulaştırma Departmanı
TDOT	: Tennessee Ulaştırma Departmanı
TxDOT	: Teksas Ulaştırma Departmanı
GDOT	: Georgia Ulaştırma Bakanlığı
vd.	: ve diğerleri
vb.	: ve benzeri

1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada en yaygın ulaşım türü olan karayolu ulaşımı, artan nüfus ve ulaşım talebiyle her geçen gün daha geniş bir kullanım ağına sahip olmaktadır. Bu durum, karayolu üstyapılarının planlanan hizmet ömrü boyunca bozulmadan kullanılabilmesi için daha gelişmiş yapısal ve tasarım yöntemlerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Esnek üstyapılarda en kritik tabaka olan asfalt kaplamalar, yalnızca yapısal dayanım açısından değil, aynı zamanda işlevsel performans açısından da önemli rol oynamaktadır. Ancak ampirik yöntemlerle tasarlanan asfalt karışımlarının beklenen performansı sağlayamaması ve artan trafik yükleri altında erken bozulmalara uğraması, performans esaslı tasarım yaklaşımlarına yönelimi gerekli kılmıştır.

Bu doğrultuda, dünyada farklı performans esaslı karışım tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında özellikle Superpave yöntemi, kaplamaların kalıcı deformasyon, yorulma çatlaması ve düşük sıcaklık davranışlarını dikkate alması açısından öne çıkmaktadır. Nitekim ABD’de Superpave sisteminin yaygın olarak uygulanmasına yönelik kapsamlı saha ve laboratuvar çalışmaları yürütülmüş, yöntemin avantajları kadar maliyet ve uygulama zorlukları da ortaya konmuştur. Benzer şekilde Avrupa’da Fransa, Almanya ve İngiltere’de performansa dayalı testlerin karışım tasarımına entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş, özellikle tekerlek izi ve çatlama deneylerinin şartnamelere dahil edildiği görülmüştür. Türkiye’de ise Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından Superpave yaklaşımının benimsenmesine yönelik girişimler yapılmış, ancak 2023 yılında yayımlanan Karayolları Teknik Şartnamesi’nde (KTŞ) halen ampirik bir yöntem olan Marshall metodunun geçerliliğini sürdürdüğü görülmektedir.

Literatürdeki bu gelişmeler, önemli bir boşluğa işaret etmektedir. Dünyada farklı performans esaslı yaklaşımlar geliştirilmiş olsa da, ülkemiz koşullarında bu yöntemlerin doğrudan uygulanabilirliği tartışmalıdır. Superpave sistemi kapsamındaki deneylerin yüksek maliyeti ve laboratuvar altyapısı gereksinimleri, Türkiye’de pratikte sınırlı düzeyde uygulanmasına yol açmıştır. Buna karşın, son yıllarda öne çıkan basit/temel performans testlerinin (örneğin Hamburg Tekerlek İzi Testi, SCB, TSR) daha kolay uygulanabilir, ekonomik ve ülke koşullarına uygun bir çözüm sunabileceği literatürde de vurgulanmaktadır. Ancak bu testlerin hangi tasarım aşamalarında kullanılabileceği ve ulusal şartnamelere nasıl entegre edileceği

henüz netleşmemiştir.

Bu çalışmanın amacı, mevcut performans testlerini ve bunların karışım tasarımındaki yerini inceleyerek, Türkiye şartlarına uygun, uygulanabilir ve ekonomik bir yöntem önerisinde bulunmaktır. Bu kapsamda, literatürdeki farklı uygulamalar karşılaştırılmış, geliştirilmekte olan test cihazları ve yöntemler analiz edilmiştir. Ayrıca ülkemizdeki mevcut BSK tasarım süreçleri, Avrupa ve ABD'deki gelişmeler ışığında değerlendirilmiş ve uygun performans testlerinin adaptasyonu için öneriler geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, Marshall yönteminin sınırlılıklarını aşacak, BSK tasarımında ve kontrol aşamalarında kullanılabilecek alternatif bir performans esaslı yaklaşım ortaya konulması hedeflenmektedir.



2. ASFALT KAPLAMA VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK)

Asfalt kaplamalar, dünyada yaygın olarak kullanılan bir kaplama türüdür. Asfalt, caddelerden otoyollara, otoparklardan liman tesislerine, çatı kaplamalarından havaalanı pistlerine kadar akla gelebilecek birçok uygulamada kullanılmaktadır. Trafik, iklim, mevcut malzemeler ve kaplama yapısına bağlı olarak, seçilen karışım türü ve karışım tasarım kriterleri farklı olacaktır. Başarılı bir karışım tasarımı, adımların arkasındaki temel teorinin anlaşılmasını ve kriterlerin sağlayıp sağlamadığını takip etmeyi gerektirir. Ayrıca, laboratuvar tekniklerinde uygun eğitim sahibi olmayı ve laboratuvar testlerinin sonuçlarını etkili bir şekilde yorumlamayı içerir. Günümüz trafik koşullarının gereksinimlerini karşılamak ve asfalt kaplamaların optimum performansını sağlamak için asfalt kaplama karışımlarının tasarımı en güncel şekilde yapılmalıdır.

Agrega ve bitümlü bağlayıcı karışımını tanımlayan "asfalt" terimi farklı şekillerde ifade edilebilmektedir. Ülkemizde ilgili otoriteler bu kavramı teknik olarak Bitümlü Sıcak Karışım olarak telaffuz ederken Avrupa'da asfalt, ABD'de Sıcak Karışım Asfaltı (Hot Mix Asphalt-HMA) veya Asfalt Betonu (Asphalt Concrete-AC) olarak kullanılmaktadır. Avrupa'da "bitüm" terimi, ABD'de asfalt, asfalt çimentosu veya asfalt bağlayıcı ile eş anlamlıdır (Asphalt Institute, 2014).

Türkiye'de ilk asfalt uygulamaları Fransızlardan alınan destek ile penetrasyon makadam kaplama adıyla Osmanlı döneminde başlamıştır. Bu, düşük trafik hacimli yollarda stabilize kaplamaların bitümle ıslah edilmesi sonucu elde edilen esnek bir kaplamadır. 1945'te Türkiye'de karayolu ağının planlı ve programlı geliştirilmesi için ABD'den Marshall Planı kapsamında destek alınmıştır. ABD'den sağlanan Marshall yardımıyla 1948'de makineli yol yapımına başlanılmıştır. 1950'de KGM'nin kuruluşu ile birlikte yıllar içerisinde road-mix ve üzerine sathi kaplama yapımı yaygınlaşmıştır. BSK yapımına ise 1956-1957 yıllarında başlanılmıştır (URL-1, 2014).

BSK, agrega ve asfalt bağlayıcının homojen bir şekilde karıştırılıp kaplandığı bir karışımdır. Agregaların kurutulması ve asfalt bağlayıcısının yeterli akışkanlığa ulaşarak düzgün bir karışım ve işlenebilirlik sağlaması için, hem agregaların hem de asfaltın karıştırılmadan önce ısıtılması gerekmektedir—bu yüzden "sıcak karışım" terimi kullanılır.

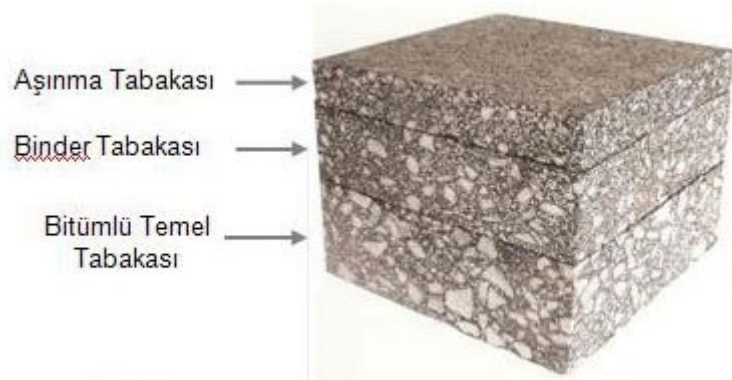
Sıcak karışım asfalt kaplama karışımları, her biri belirli tasarım ve inşaat kullanımına uygun özelliklere sahip, geniş bir agrega kombinasyonundan üretilir. Kullanılan asfalt bağlayıcının miktarı ve kalitesinin yanı sıra, karışımın ana özellikleri, iri agrega, ince agrega ve mineral filler'in göreceli miktarlarıyla belirlenir. İstenilen kaplama karışımını üretmek için tüm bileşenlerin (agregalar ve asfalt bağlayıcı) ısıtıldığı, orantılandırıldığı ve karıştırıldığı bir karıştırma tesisinde (plant) birleştirilir (Şekil 2.1a). Plantteki üretim tamamlandıktan sonra, sıcak karışım, şantiye sahasındaki yol kesitine taşınır (Şekil 2.1b) ve kaplama serim makinesiyle (finişer) ön sıkıştırılmış bir tabaka halinde düzgün ve eşit bir yüzey oluşturacak şekilde serilir (Şekil 2.1c). Serilen kaplama karışımı belirli bir sıcaklıkta, silindirlerle daha fazla sıkıştırılarak düzgün, iyi konsolide edilmiş bir asfalt kaplama tabakası elde edilir (Şekil 2.1d).



Şekil 2.1 : BSK kaplama imalat aşamaları a) asfalt üretim tesisi (plant) b) taşıma aşaması c) finişer ile serilme aşaması d) sıkıştırma aşaması

Trafik yüklerine doğrudan maruz kalan esnek üstyapı genellikle aşınma, binder ve bitümlü temel olmak üzere farklı agrega kombinasyonu ve karışım oranlarına sahip üç tip asfalt

tabakasını kapsayabilir (Şekil 2.2). Yol tipine, trafiğine, çevre ve iklim şartlarına bağlı olarak uygulanacak asfalt tabakalarının özellikleri ve kalınlıkları farklılık gösterir.



Şekil 2.2: Esnek üstyapı enkesitinde yer alan BSK tabakalar

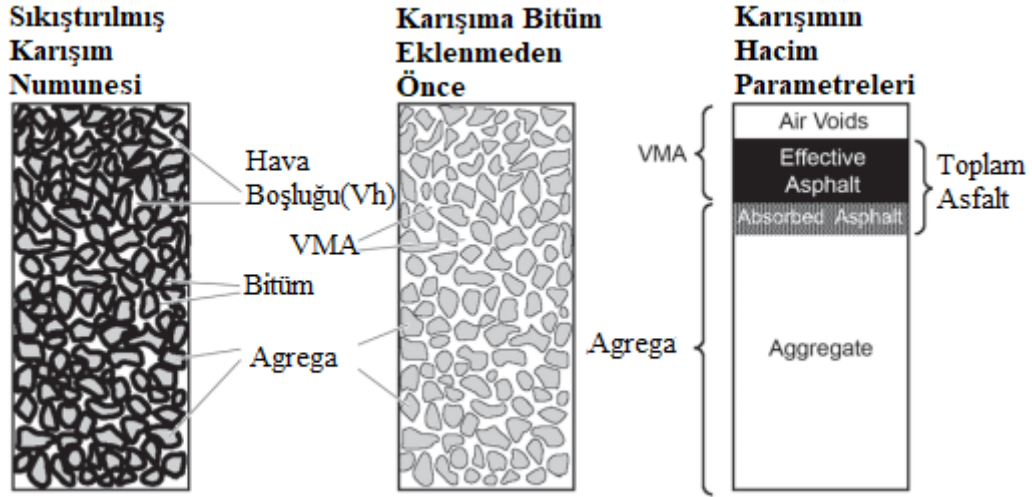
Aşınma tabakası, esnek üstyapının 4-5 cm'lik en üst yüzey tabakasıdır. Bu sebeple, güvenlik ve konfor için yeterli kayma-sürtünme katsayısına ve düzgünlüğe sahip olması gerekir. Hem trafik yüküne hem de çevreden gelebilecek dış etkenlere karşı dayanıklıdır. Bununla beraber, trafik yüklerinin oluşturduğu deformasyonlar karşı yeterli esnekliğe sahiptir. Binder tabakası, genellikle 6-8 cm'lik kalınlıkta uygulanan aşınma tabakası ile birlikte yüksek taşıma kapasitesi ve geçirimsizliğe sahip olan kaplama tabakasıdır. Aşınma ile temel tabakaları arasında yer alan binder tabakası, gerekli stabilite ve dayanıklılığı sağlar. Bu tabaka, ağır ve tekrarlı trafik yüklerinin oluşturacağı e maruz kalan kalıcı deformasyonları (tekerlek izi) önleyecek şekilde tasarlanır.

Bitümlü temel tabakası, trafik hacmi yüksek yollarda granüler temel tabakası ile birlikte taban zemininin aşırı gerilme ve deformasyonlara maruz kalmasını önlemek amacıyla tasarlanır. Trafik yoğunluğuna bağlı olarak 8-18 cm kalığında uygulanan bitümlü temel tabakası genellikle bağlayıcısız granüler temel veya plentmiks temel (PMT) üzerine inşaa edilir.

2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarının Hacimsel Özellikleri

Bitümlü sıcak karışımın hacimsel özellikleri, bitümlü bağlayıcı ve agrega bileşenlerinin diğer bileşenlerle olan ilişkisi olarak tanımlanmaktadır. Bileşenlerin kütlesi ve özgül ağırlığı, karışımdaki her bir bileşenin hacimlerini belirlemek için kullanılmaktadır. Sıkıştırılmış

bitümlü karışımın hacimsel özellikleri: hava boşlukları (V_h), agregalar arası boşluklar (Voids in the Mineral Aggregate-VMA), asfaltla dolu boşluklar (Voids Filled with Asphalt -VFA) ve bitümlü bağlayıcı içeriği (P_{be}) karışımın olası performansı ile doğrudan ilişkilidir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Sıkıştırılmış BSK karışımındaki hacimsel gösterimi

Marshall, Hveem veya Superpave karışım tasarım yöntemlerinin temeli hacimsel özelliklere dayanmaktadır. Marshall yönteminde, stabilize yoğunluk, hava boşlukları (V_h), ve VFA optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi için temel kriterlerdir. Superpave yönteminde ise, agregada fraksiyonları, laboratuvar sıkıştırma gerekliliklerine dayanarak gelecekteki trafik seviyelerine dayanabilen bir agregada iskeleti geliştirmek için bir dizi test ile birleştirilir. Kabul edilebilir bir agregada gradasyonu belirlendikten sonra, tasarım sıkıştırma aşaması ile %4 hava boşluğu üreten bir bitüm içeriği belirlenir.

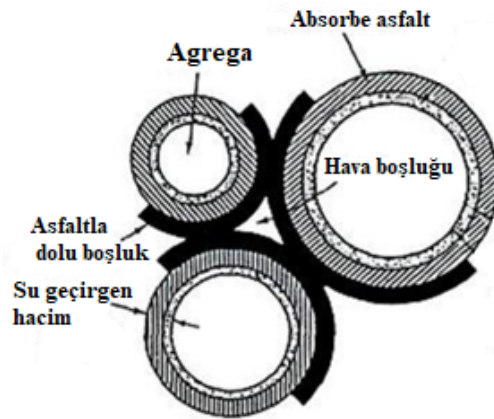
Laboratuvarda gerçekleştirilen bitümlü sıcak karışım tasarımları, asfalt kaplama yapısındaki olası performansını belirlemek için farklı analizler içermektedir. Sıkışmış bitümlü karışımlar üzerinde gerçekleştirilen “hacimsel analizler” dünyada uygulanan karışım tasarım metodolojilerinin ortak adımını oluşturmaktadır. Hacimsel analizler, sıkışmış bitümlü karışımın yukarıda belirtilen hacimsel özelliklerine ve bu özelliklerin karışım davranışı üzerindeki muhtemel etkisine odaklanmaktadır.

2.1.1 Karışım yoğunluğu

Asfalt karışım yoğunluğu, birim hacim başına karışımın kütlesi olarak tanımlanır. Asfalt kaplamanın tasarımı ve inşası sırasında tipik olarak iki farklı karışım yoğunluk kavramı söz konusudur: karışım yoğunluğu ve maksimum yoğunluk. BSK tasarımı aşamasında, laboratuvarında sıkıştırılmış numunelerin tasarım hava boşluğu içeriğini hesaplamak için her iki değere de ihtiyaç vardır. Karışım yoğunluğu arazide inşaa edilen sıkıştırılmış kaplamalardan alınan karot numuneleri üzerinde veya hasarsız test yöntemleri ile belirlenir. Sahadaki asfalt kaplamanın sıkışma yüzdesini belirlemek için, yerinde (sahada sıkıştırılmış) belirlenen kaplama yoğunluğu laboratuvarında elde edilen karışımın maksimum yoğunluğuyla karşılaştırılır. Sahadaki hava boşluğu yüzdesi asfalt kaplamadan beklenen performans ölçütleri açısından önemlidir. Karışım yoğunluğu ve hava boşluğu içeriği doğrudan ilişkilidir.

2.1.2 Hava boşlukları

Asfalt kaplamanın dayanıklılığı, BSK kaplamanın hava boşluğu içeriğinin bir fonksiyonudur. Şekil 2.4'te gösterilen hava boşlukları ne kadar az olursa karışım o kadar az geçirgen olur. Çok yüksek bir hava boşluğu içeriği, kaplamaya hava ve suyun girmesine izin veren geçiş yolları sağlar. Çok yüksek hava boşluğu içeriği kalıcı deformasyonlara ve tekerlek izi oluşumuna neden olabilir.



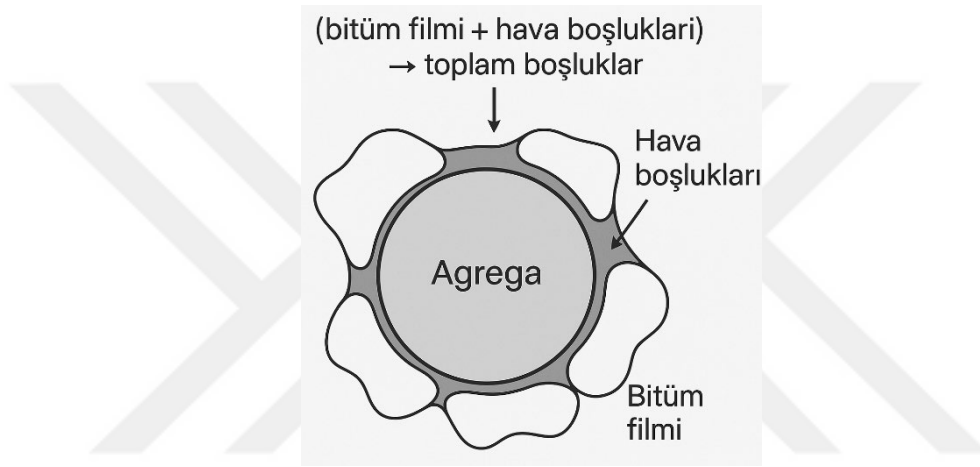
Şekil 2.4: Sıkıştırılmış bitüm-agrega karışımındaki boşluk tanımları

Trafik altında ilave sıkıştırmaya ve sıcaklık artışlarından dolayı bir miktar asfalt genişlemesine izin vermek için sıkıştırılmış BSK'da belirli bir yüzde hava boşluğu gereklidir. Genel olarak laboratuvarında sıkıştırılmış bir BSK numunesindeki tasarım hava boşluğu seviyesi %4'tür.

Özel kullanımlar için daha düşük veya daha yüksek tasarım hava boşluğu içeriği belirtilebilir. Saha uygulamaları genellikle yoğun dereceli karışımlar için kaplama sıkıştırmasının geçirgenliği en aza indirmek amacıyla %8'den daha az bir hava boşluğu içeriğine sahip olması gerekir.

2.1.3 Agregalar arası boşluklar

Karışım tasarımlarının tipik olarak %4 hava boşluğunu hedeflediği göz önüne alındığında, sıkışmış karışımda VMA, dayanıklı bir asfalt kaplamada optimum bitümlü bağlayıcı oranını elde etmek için yeterli düzeyde olmalıdır. Agregalar arası boşluklar Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Bitüm filmi ve hava boşlukları

Minimum VMA değerlerinin altındaki asfalt karışımlar, ince bitümlü bağlayıcı film kalınlığına sahip olacak ve düşük dayanıklılığa sahip bir BSK kaplaması oluşacaktır. Bu nedenle, VMA'yı düşürerek asfalt içeriğini azaltmak aslında verimsizdir ve kaplama kalitesine zarar vermektedir.

2.1.4 Asfaltla dolu boşluklar

VFA, VMA'nın optimum bağlayıcı içeren boşluk yüzdesidir (Şekil 2.4). Karışımda uygun asfalt film kalınlığını sağlamak için VFA yüzdesi önemlidir.

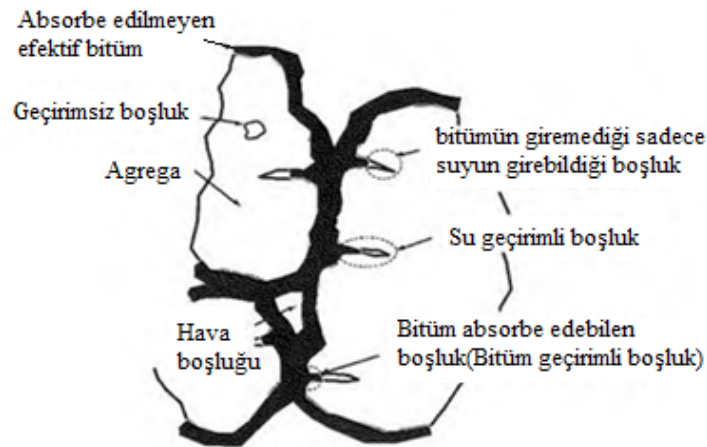
VFA çok düşükse karışımın dayanıklılığı zayıf olacaktır veya çok yüksekse karışım kararsız olabilir. Kabul edilebilir VFA aralığı trafik seviyesine bağlı olarak değişir. Daha yüksek trafik, daha düşük bir VFA gerektirir. Çünkü karışımın dayanımı ve stabilitesi daha büyük bir

endişe kaynağıdır. Daha düşük trafik hacminde, BSK'nın durabilitesini iyileştirmek için daha yüksek bir VFA aralığına izin verilebilir. Ancak çok yüksek bir VFA'da, BSK kaplamanın hassasiyeti artacağından kismaya neden olabilir.

2.1.5 Bitüm içeriği

Bir karışımın optimum bitüm içeriği büyük ölçüde gradasyon ve bitüm emme yüzdesi gibi agrega özelliklerine bağlıdır. Agrega gradasyonu doğrudan optimum bitüm içeriğiyle ilgilidir. Agrega gradasyonu ne kadar ince olursa, agreganın toplam yüzey alanı o kadar büyük olacak ve parçacıkları eşit şekilde kaplamak için gerekli olan bitümlü bağlayıcı miktarı da o kadar fazla olacaktır. Bunun aksine, daha kaba karışımlar daha az toplam agrega yüzey alanına sahiptir ve daha az bitüm gerektirir.

Asfalt karışım teknolojisinde bitüm içeriğinin ifade edilmesinde iki terim kullanılır: toplam bitüm içeriği ve etkin bitüm içeriği. Toplam bitüm içeriği, istenilen karışım kalitesini elde etmek için karışıma eklenmesi gereken bitüm miktarıdır. Etkin bitüm içeriği, agrega tarafından emilmeyen asfalt hacmine bağlıdır; agrega yüzeyleri üzerinde etkin bir şekilde bağlayıcı bir film oluşturan bitüm tabakasıdır. Agrega absorpsiyonu, optimum asfalt içeriğinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Çünkü agrega danelerini kaplayacak yeterli kalınlıkta bir bitüm film tabakası oluşturulmasında, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi agrega yüzeyindeki boşluklar tarafından absorbe edilecek bitüm miktarı dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.6: Sıkıştırılmış bitümlü karışımın kesiti

2.2 Bitümlü Bağlayıcı Yapısı ve Davranışı

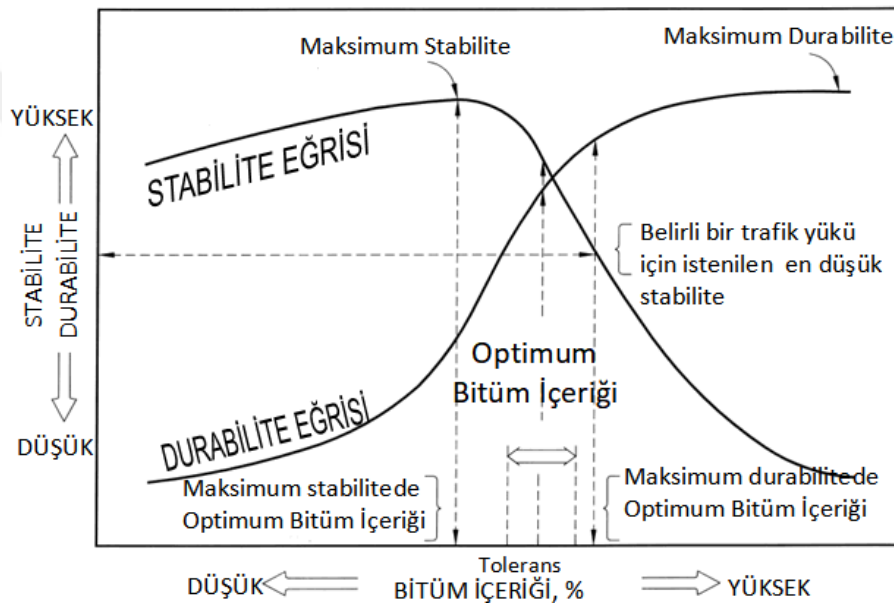
Ham petrolün rafineride damıtılması ile elde edilen hidrokarbonlu, yapışkan ve su geçirimsiz ürünlere genel olarak bitüm denilmektedir. Termoplastik (ısınınca kıvamının değişmesi), dayanıklı, güçlü yapışma özelliğine sahip ve oldukça geçirimsiz olması nedeniyle bitüm, esnek karışım tipi kaplamalar ile sathi kaplama tabakalarında kullanılan ideal bir hidrolik bağlayıcıdır. Normal şartlar altında katı veya yarı katı olan ve akıcı hale gelebilmesi için ısıtılması gereken bitüm, bitümlü kaplamalarda doğrudan ya da sıvı petrol bitümleri (katbekler) veya bitüm emülsiyonları gibi daha düşük ısılarda işlenebilir formlarında kullanılabilmektedir. Bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik (yük altında zamanla şekil değiştirme) özellikleri, kullanım oranı ve sıcaklığı (yapışma için gerekli olan viskozite sıcaklığından farklı sıcaklıklar) kaplama performansını etkileyen en önemli faktörlerdir. Bitümlü karışım kaplamanın hem dizayn aşamasında hem de sonrasında sağlaması gereken performans özellikleri ile bunlara etki eden faktörler şu şekildedir: Stabilite, durabilite, esneklik, işlenebilirlik, geçirimsizlik, yorulmaya ve kaymaya karşı direnç.

Stabilite terimi mukavemet ile yakından ilgili olup bitümlü sıcak karışımlardan imal edilen kaplamalarda oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak adlandırılır. Yani bitümlü sıcak karışımın stabilitesi ne kadar düşük olursa trafik yükleri altında oluşabilecek deformasyon da o kadar fazla olacaktır. Ancak çok düşük stabilite ne kadar istenmez ise çok yüksek stabilite de o kadar zararlıdır. Çünkü çok yüksek stabiliteli (çok sert, rijit veya gevrek) bitümlü karışımlar gerilmelere maruz kaldığında esnek davranış gösteremeyip, Şekil 2.7’de görülen kaplamada çatlakların oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.7: Stabilite(kalıcı deformasyona karşı direnç) çatlakları

Bitümlü karışımın durabilitesi; karışımındaki bitümün özelliklerinin değişmesi (yaşlanması, oksidasyona uğraması vs.) agreganın kırılıp parçalanması, bitümün agregaya yüzeyinden soyulması gibi faktörlere karşı koyabilme kabiliyetidir. Bu faktörler yapım şartlarının, iklim, çevre ve trafik durumlarının ayrı ayrı veya hepsinin birden etkisi sonucunda ortaya çıkar. Bu etkiler; bitümün özelliklerinin değişmesi (yaşlanma-sertleşme), agregada danelerinin kırılması ve ufalanması ve bitümün agregaya yüzeyinden soyulmasıdır. Durabilite genel olarak, Şekil 2.8'deki grafikte de görüldüğü gibi bitüm içeriğinin artması, rijitlik, yüksek soyulma direnci ve iyi sıkışma ile artış gösterir. Bu şartlar sağlandığında geçirimsizlik artacak, geçirimsiz karışımın içine daha az hava ve su gireceğinden durabilite artacaktır.



Şekil 2.8: Bitümlü sıcak karışımında stabilite-durabilite ilişkisi

Bitümlü sıcak karışımların esnekliği, zeminin ve temel tabakasının uzun dönemli oturma durumunda bu çökmelere uyum sağlayabilme yeteneğidir. Bitüm yüzdesi ve agregada gradasyonu esnekliği etkileyen faktörlerdir. Yüksek bitüm yüzdesine sahip karışımlar daha esnek olabilmektedir. Ancak bu durumda da stabilite düşebilmektedir. Esnekliğe etki eden diğer faktörler; dolgu oranı (bitüm ve filler tarafından ne derece doldurulduğunu), sıcaklığa karşı duyarlılık ve kaplama kalınlığıdır.

İşlenebilirlik, karışımın karıştırılması ve sıkıştırılmasındaki kolaylık olarak ifade edilebilir. Agregada özellikleri ve karışım gradasyonu gibi karışım dizaynı parametreleri değiştirilerek işlenebilirlik geliştirilebilir. Bununla beraber karışımların işlenebilirliği arttıkça, genellikle

kalıcı deformasyon yapmaya yatkınlığı da artar. Kaplamanın kullanım amacına yönelik uygun dengenin sağlanmasına dikkat edilmelidir. Yüksek oranda kaba agrega, çok iri dane boyutu, düşük bitüm muhtevası içeren ya da düşük sıcaklığa (yüksek bitümlü bağlayıcı viskozitesi) sahip karışımlar, işlenebilirlik bakımından ayrışma eğiliminde olup, sıkıştırılmaları zordur.

Yorulmaya karşı direnç, trafik yükleri altında oluşan ve tekrarlanan gerilimlere karşı dirençtir. Karışımdaki boşluk yüzdesi ve karışım viskozitesi yorulmaya karşı direnç üzerinde çok etkilidir. Yetersiz yorulma direnci Şekil 2.9'da görüldüğü üzere kaplamada timsah sırtı tarzı çatlakları ortaya çıkarır. Bu tür çatlaklarla kaplamanın ömrünü tamamladığı veya kaplama kalınlığının yeterli olmadığı ya da karışım için gerekli olan bitümden daha az bir bitüm yüzdesi kullanıldığı veyahut da yetersiz sıkıştırmaya bağlı yüksek hava boşluğu nedeniyle bitümün yaşlanmış olduğu durumlarda karşılaşılmaktadır.



Şekil 2.9: Timsah sırtı çatlaklar

Geçirimsizlik, bitümlü karışım kaplamanın kendi bünyesine ve alt tabakalara hava veya su geçişine direnci olarak tanımlanabilir. Geçirimsizlik, karışımdaki hava boşluğu yüzdesi ile ilişkilidir. Karışım dizaynında yüksek boşluk yüzdesi seçimi veya karışımdaki düşük bitüm yüzdesi ya da sıkıştırma yetersizliği gibi nedenlerle oluşan yüksek hava boşluğu karışımın geçirimsizliğini düşüren faktörlerdir.

Kaymaya karşı direnç (kayma-sürtünme direnci), bitümlü kaplamanın en yoğun yağışlı dönemler de dahil her hava koşulunda taşıtların kabul edilebilir bir mesafede durabilmesi için sağlaması gereken yeterli bir sürtünme direncidir. Kaplamadaki yüksek kaymay-sürtünme direnci; sert ve pürüzlü agreganın kullanılması ve karışım gradasyonunda orta boyuttaki malzeme miktarının arttırılmasıyla sağlanabilmektedir. Bitüm yüzdesi fazla olan yoğun

gradasyonlu karışımlarda sıcaklık ve trafiğin etkisiyle kaplamada oluşabilecek kusmadan dolayı kayma-sürtünme direnci daha düşüktür. İyi bir kayma-sürtünme direnci için kaplama yüzeyinin pürüzlü olmasının yanında agregaların da cilalanmaya karşı direnci yüksek olmalıdır. Bu durum Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10: Asfalt kaplamada terleme veya kuma

Bitümlü bağlayıcı davranışı açısından üç önemli özellikten bahsedilebilir: sıcaklık duyarlılığı, visko-elastisite ve yaşlanma özellikleri. Sıcak karışımın üretilmesi sırasında oluşan hızlı yaşlanma ve servis koşullarında oluşan yavaş yaşlanma nedenleriyle de bitümlü bağlayıcıların davranışı, yani performansı, önemli ölçüde değişebilmektedir. Bu durum yaşlanma konusunun önemini ortaya koymakta ve reolojik yapının yaşlanma davranışına olan etkisinin incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Bitümün yaşlanması hem uygulama hem de servis koşullarında, bitümün sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesiyle sonuçlanacaktır. Bununla beraber, bitümlü bağlayıcılar ek olarak oksidasyon nedeniyle yaşlanmakta; oksidasyonla oluşan değişme ise, bitümün özelliklerine bağlı olarak bazı bitümlerde daha hızlı ve daha fazla sertleşme şeklinde kendini gösterebilmektedir. Oksidasyon iki aşamada ortaya çıkmaktadır. Birinci aşamada karıştırma-serme süresince bağlayıcının maruz kaldığı yüksek sıcaklıktan ve ısıtılan agreganın geniş yüzey alanından dolayı, oksidasyon hızlı bir şekilde oluşmakta olup, bitümün sertleşmesi daha çok bazı uçucu bileşenlerin bitümün bünyesinden ayrılmasıyla ortaya çıkmaktadır. İkinci aşamada ise oksidasyon, kaplamanın servis ömrü boyunca zamanla havadaki oksijenle etkileşmesi ve bağlayıcının bu oksijenle oluşturduğu tepkime nedeniyle oluşmaktadır. Bu süreç, oksidasyonun yavaş ve uzun süreli olarak gerçekleştiği esas sertleşme süreci olarak bilinmektedir. Kaplama bünyesindeki bitümlü

bağlayıcının servis ömrü boyunca ısının, havanın ve çevresel koşulların etkisinde oksidasyonu sonucu zamanla gerçekleşen bu değişim yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırılmaktadır. Yaşlanma sertleşmesine uğrayan bitüm daha düşük penetrasyon ve daha yüksek viskozite değerine sahip olmaktadır. Sonuçta, bitümlü bağlayıcının serleşerek daha kırılgan hale gelmesi ve agrega ile adezyonunun azalması nedeniyle bitümlü kaplama tabakaları bozulabilmektedir (URL-2, 2019).

Bitümlü bağlayıcı hem viskoz hem de elastik özellikleri aynı anda gösterdiği için visko-elastik bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda, asfalt çimentosu neredeyse tamamen viskoz bir akışkan gibi davranır. Çok düşük sıcaklıklarda, asfalt bağlayıcı çoğunlukla elastik bir katı gibi davranır, yüklendiğinde ve yük boşaltıldığında orijinal şekline geri döner. Çoğu kaplama sistemlerinde bulunan ara sıcaklıklarda, asfalt çimentosunun hem viskoz bir akışkan hem de elastik bir katı özelliklere sahip olduğu görülür.

2.3 Mineral Agrega Yapısı ve Davranışı

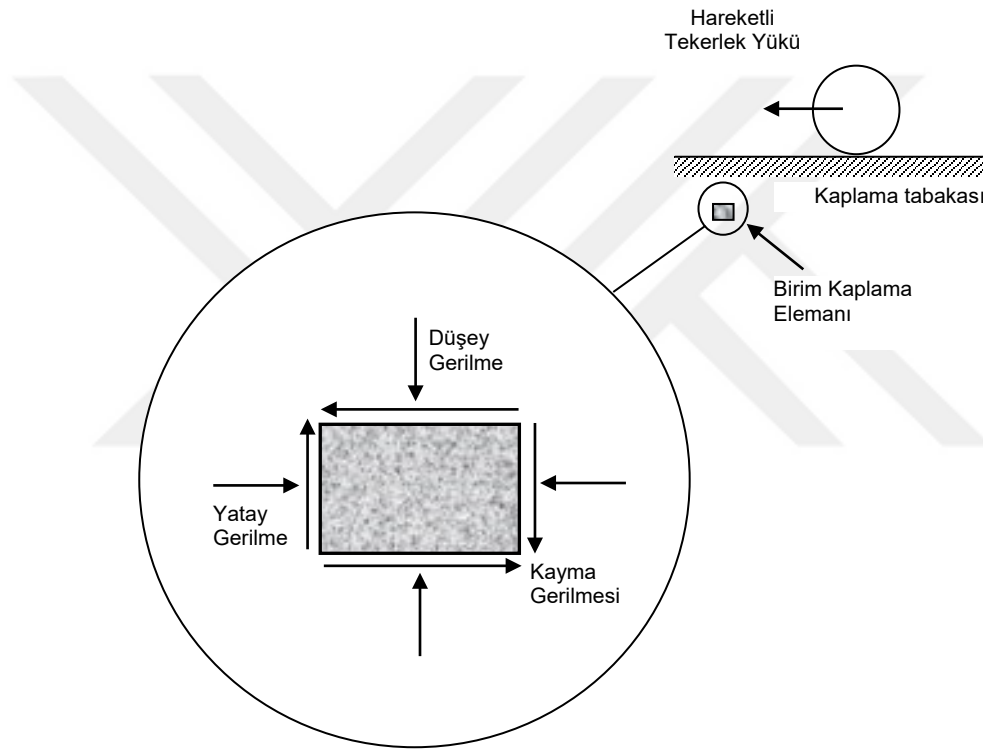
Karışımın ağırlıkça %90-95'ini, hacimce %75-85'ini oluşturan mineral agregalar, kaplamanın yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde önemli rol oynarlar. Agregalar genel olarak dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak elde edilir. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agregalar, püskürük, tortul ve metamorfik olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalarıdır. Kaplamalarda kullanılacak agregaların, trafiğin tekrarlı statik ve dinamik yüklerine karşı koyabilmesi, bitümle iyi bir aderans sağlaması ve farklı hava şartlarına karşı koyabilme özelliğine sahip olması gerekir.

Agrega malzemesi, kaba, ince ve mineral filler içeren en az üç ayrı dane grubunun belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir. Bitümlü karışımda %40-50 oranında kullanılan iri agrega, karışımın mekanik direncini arttıran bir iskelet oluşturur ve karışımın deformasyon direncinde önemli bir rol oynar. Karışımdaki ince agrega, iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar. Mineral filler olarak taş tozu, sönmüş kireç, mermer tozu, çimento, uçucu kül veya benzeri mineral malzemeler kullanılır. Filler, agreganın çok küçük yüzdesini oluşturmaya karşın, karışımdaki boşlukları doldurmaya yardımcı olarak agrega tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlar ve daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar. Kaplamalarda yoğun gradasyonlu bir

agrega karışımının kullanılması, kaplamanın stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik, kayma direnci, geçirgenlik, işlenebilirlik özellikleri ve hizmet süresince istenen performansı sağlayabilmesi bakımından oldukça önemlidir.

2.4 Bitümlü Sıcak Karışım Davranışı

Bir tekerlek yükü bir kaplamaya uygulandığında, BSK'nın birim elemanı üzerinde oluşan gerilmeler, yatay ve düşey doğrultuda oluşan basınç gerilmeleri, asfalt tabakası içindeki kayma gerilmeleridir (Şekil 2.11 ve 2.12).

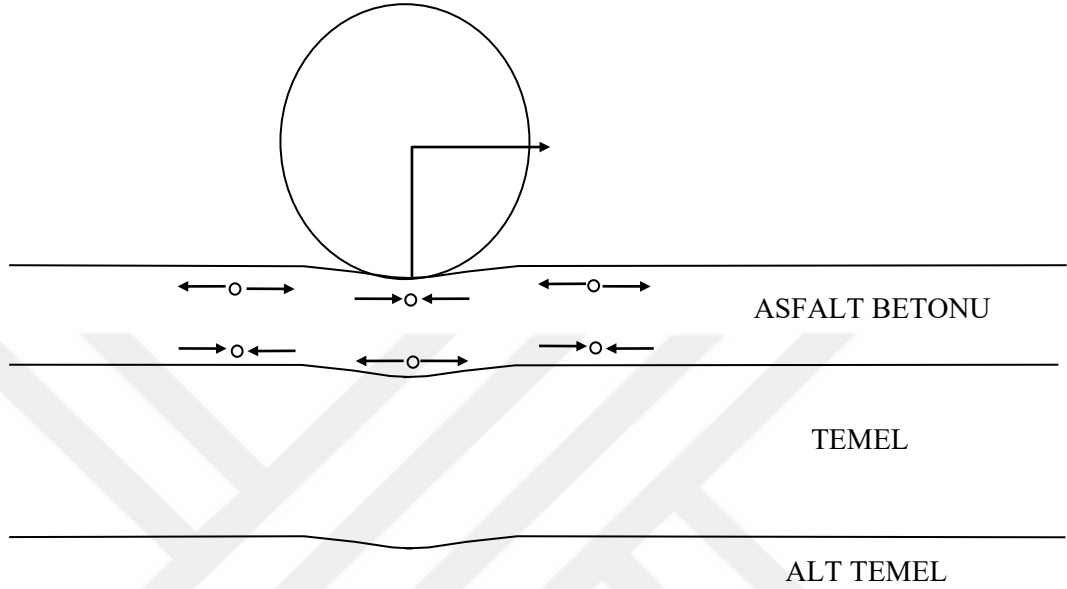


Şekil 2.11: Taşıt tekerleğinin hareketi ile birim kaplama elemanı üzerinde oluşan gerilmeler

BSK kaplama içinde kalıcı deformasyonu önlemek için basınç ve kayma gerilmelerine karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca, çatlak oluşumunu önlemek için asfalt tabakasının tabanındaki çekme gerilmelerine karşı yeterli dayanıma sahip olmalıdır. Aksi durumda uygulanan tekrarlı trafik yükleri yorulma çatlaklarına neden olacaktır. Asfalt karışımı ayrıca, hızla azalan sıcaklıklardan veya çok düşük sıcaklıklardan kaynaklanan büzülme gerilmelerine karşı da direnç göstermelidir.

Asfalt karışım davranışını asfalt çimentosunun ve mineral agreganın birlikte hareket etmesi

olarak düşünebiliriz. Asfalt karışımı davranışının iyi bir şekilde anlaşılmasında dikkate almamız gereken unsurlar, asfalt kaplamada oluşan kalıcı deformasyon, yorulma çatlaması ve düşük sıcaklık çatlaması gibi bozulma tipleridir. Bunlar, aynı zamanda karışım tasarımında dikkate alınan performans özellikleridir (Asphalt Institute, 2014).



Şekil 2.12: Taşıt hareketi ile asfalt kaplamada meydana gelen gerilmeler

2.5 BSK Kaplamalarından Beklenen Performans Özellikleri

2.5.1 Kalıcı Deformasyona Karşı Direnç

Kaplamanın üzerine tekrarlı yüklerin uygulanması sonucu küçük miktarlarda geri dönüşü olmayan deformasyonun birikmesiyle tekerlek izi (veya kalıcı deformasyon) meydana gelir. Bu deformasyonun odak noktası ve iki temel nedeni alttemel zayıflığı ve yetersiz asfalt karışım stabilitesidir. Kalıcı deformasyon alt temel, temel ve bitümlü sıcak karışım tabakasındaki problemlerden kaynaklanmasına rağmen genellikle kayma gerilmesinin olduğu asfalt kaplama tabakasında meydana gelmektedir. BSK'da oluşan kalıcı deformasyon, trafik altında BSK'nın konsolidasyonu veya yanal hareketinden kaynaklanır. Tekerlek yükleri altında BSK tabakalar içinde oluşan kayma (yanal hareket) genellikle kaplamanın 100 mm'lik kısmında meydana gelir. Yol üstyapsında oluşan kalıcı deformasyonlar genellikle tekrarlanan dingil yükleri ile birlikte gelişmekte ve tipik olarak kaplamada oluşan tekerlek izleri Şekil 2.13'teki gibi tekerlek hareket yörüngelerindeki boyuna çökmeler olarak ortaya çıkmaktadır.

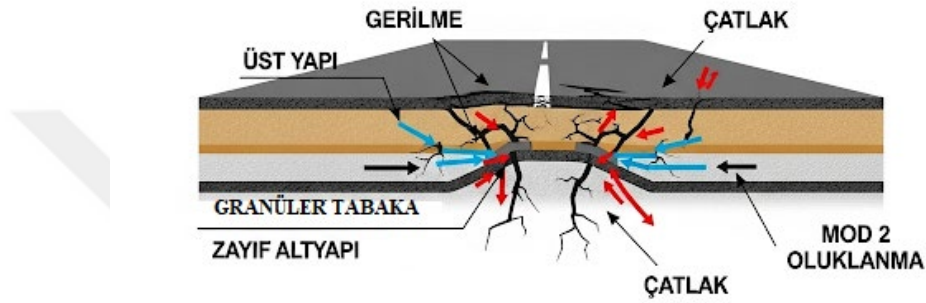
Kararsız bir bitümlü sıcak karışım durumunda, deformasyon asfalt tabakası ile sınırlıdır ve tekerlek izi kenarında bir kabarmaya neden olur. Bu durum, tekerlek izinin bir asfalt tasarım sorunu olduğunu göstermektedir. Tekerlek izi oluşumu, kalıcı deformasyonun en yaygın biçimidir. Kalıcı deformasyona karşı direnç, trafik altında sıkışmaya ve tekerlek izine oluşumuna karşı kararlı bir BSK kaplamanın tasarlanması ve inşa edilmesiyle sağlanır.



Şekil 2.13: BSK kaplama içerisinde tekerlek izi oluşumu

Kalıcı deformasyona karşı direnç, öncelikle agreg a daneleri tarafından sağlanan iç sürtünmeye ve daha az ölçüde asfalt bağlayıcı tarafından sağlanan kohezyona bağlıdır. Agreg a parçacıkları arasındaki sürtünme, hem ince hem de kaba agreg anın şekli ve yüzey dokusu ile agreg a gradasyonunun karakteristik özellikleriyle ilişkilidir. Kohezyon, asfalt bağlayıcının bağlama yeteneği ve sertlik özelliklerinden kaynaklanır. Bir karışım daki parçacıkların trafik tarafından uygulanan kuvvetlerle birbirlerinin üzerinden hareket etmesini önleyen uygun agreg a sürtünme ve bitümlü bağlayıcı kohezyon derecesi, karışımın stabilitesini artırır. Kırılmış ve köşeli agreg a daneleri ve daha pürüzlü yüzey dokusunun karışımın stabilitesini artıracak ı bilinmektedir. Kohezyon, asfalt bağlayıcının sertliğı arttıkça veya kaplama sıcaklığı azaldıkça artar (Brown vd., 2001).

Kalıcı deformasyon, asfalt tabakası yerine temel veya alttemel tabakalardan kaynaklanabilir (Şekil 2.14). Bu genellikle, yol üstyapısı ve yük koşulları için gereken malzeme ve yapım kalitesi sağlanamaması nedeniyle oluşur. Daha sert kaplama malzemeleri, bu tür tekerlek izini azaltabilir, ancak daha önemlisi temel veya alttemel dayanımını iyileştirmektir.



Şekil 2.14: Yetersiz alt tabakalara bağlı oluşan tekerlek izi

2.5.2 Yorulma Çatlaması

Yorulma direnci, kaplamanın tekerlek yükleri altında tekrarlayan deformasyona karşı gösterdiği dayanımdır. Yorulma kırılması sonucu, oluşan yorulma çatlakları genellikle ileri aşamada timsah sırtı çatlak halini alırlar. Yorulma çatlaması genellikle yetersiz kaplama kalınlığı ile ilgili olmasına rağmen, hava boşlukları ve asfalt bağlayıcı özellikleri yoruma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. BSK tasarımı veya sıkışmanın yetersizliği nedeniyle kaplamadaki hava boşluklarının yüzdesi arttıkça, kaplamanın yorulma mukavemeti önemli derecede azalır.

Araştırmalar ve uygulamalar, modifiye edilmiş bir asfalt bağlayıcı kullanımının BSK karışımının yorulma direncini önemli ölçüde artırabileceğini gösterilmiştir. Kaplamanın kalınlığı ve mukavemet özellikleri ile alt tabakanın gösterdiği performans yorulma çatlamlarının önlenmesinde büyük öneme sahip olacaktır. Kalın ve iyi kaplamalar, ince veya kötü hazırlanmış kaplamalara göre trafik yükü altında daha az deformasyona uğrayacaktır. Bu nedenle, daha uzun yorulma ömürlerine sahip olacaklardır. Sürdürülebilir bir kaplama

tasarımı için, dayanıklılık sınırı (malzemenin yorulma gerilme seviyesi) önemlidir (Asphalt Institute, 2014).

Son yıllarda yapılan araştırmalarda yorulma çatlaklarının kaplamanın ortasından başlayıp aşağıya doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Genel olarak, ince BSK kaplamalarında, yorulma çatlamasının bu tabakanın alt kısmında başladığı ve kalın BSK kaplamalarda ise yorulma çatlamasının orta derinlikte başlayıp tabakanın üst kısımlarına devam ettiği düşünülmektedir. Yorulma çatlamasının önlemesi için yapılması gerekenler arasında; ağır trafik yükleri hesaba katılarak daha kalın ve kısmen esnek yapıda asfalt kaplamaların tasarlanması, bitümün yaşlanmasının azaltılması için önlem alınması, kaplama tabakalarının sudan korunması için yeterli alttemel drenajının yapılması, nemin bozucu etkilerini önlemek için katkıları kullanılması ve modifiye bitüm kullanılması belirtilebilir.

Asfalt karışımların kararlılığı açısından tamamen esnek yapıda tasarımı uygun değildir. BSK, asfalt tabakasının tabanında maruz kaldığı çekme gerilmesine dayanabilecek yeterli çekme dayanımına sahip olmalı ve tekrarlayan yük uygulamalarına çatlamadan dayanabilecek seviyede esnek yapıda olmalıdır. Bu nedenle BSK'nın yorulma çatlamasını önlemek için elastik bir malzeme gibi davranacak şekilde tasarlanmalıdır. BSK'nın çekme davranışı asfalt çimentosundan önemli düzeyde etkilendiğinden, bu açıdan tasarımda sert bitümlere nazaran daha yumuşak yapıda bitümlü bağlayıcı seçilmesi uygun olacaktır (Brown vd., 2001).

2.5.3 Düşük Sıcaklık Çatlaması

Düşük sıcaklık çatlaması, kaplama yüzeyindeki sıcaklığın düşmesiyle BSK kaplama tabakasında meydana gelen termal gerilmelerin asfalt karışımının maksimum çekme dayanımını aşması sonucunda meydana gelmektedir. Bunlar, Şekil 2.15'te görüldüğü gibi yol eksenine dik ve çoğunlukla eşit aralıklı enine çatlaklardır. Bu çatlaklar kaplama yüzeyinde başlar ve aşağıya doğru ilerler.

Kaplamanın soğuma hızı, yoğunluğu ve asfalt bağlayıcının sertliği düşük sıcaklık çatlağının şiddetini etkileyen ana faktörlerdir. Düşük sıcaklıktaki çatlama, karışımda yorulma sonucunda zayıflayan kaplama tabakasında tek bir soğuma durumunda veya tekrarlayan soğuk sıcaklık döngülerinin sonucu oluşabilir. Genel olarak bu sorunun çözümü doğru bağlayıcı seçimidir. Yüksek derecede emici agregaların veya yüksek toz içeriğine sahip agregaların kullanılması,

düşük sıcaklıktaki çatlamayı arttırabilir (Brown vd., 2001).



Şekil 2.15: Düşük sıcaklık çatlaması

2.5.4 Neme Karşı Dayanıklılık

Diğer temel bir performans sorunuda “soyulma” olarak adlandırılan nem hasarıyla ilişkilidir. Bu genellikle, suyun kaplamadaki boşluklara itilmesi ve boşluklardan çekilmesi nedeniyle bir ovalama etkisine neden olan tekrarlanan trafik yüklemeleriyle birlikte oluşan hasarın sonucudur. Soyulma, asfalt ile agrega arasına su veya su buharının girmesini ve böylece agrega ile asfalt bağlayıcı arasındaki aderansın kopmasını içerir. Bu, agreganın asfalt kaplamadan sökülmesine ve kaplamada çatlak ve çukur gibi bozulmaların baş göstermesine sebep olacaktır.

Soyulmaya karşı en iyi önlem, karışımda yeterli miktarda bağlayıcı bulunması ve yeterli sıkıştırma sağlanarak geçirimsiz bir yüzey oluşturulmasıdır. Kaplama hasarları suyun etkisiyle soyulmaya maruz kalan kaplamanın trafik altındaki yapısal bozulması ile hızlanır. Kaplama içindeki soyulma etkisi aşırı hale gelirse, tekrarlanan yükleme sonucunda ciddi kaplama deformasyonu ve hasar meydana gelecektir. Yol üst yapısının trafik altında bozulması genellikle aşamalı olarak meydana gelir. İlk aşama, kaplama yüzeyinin ince parçacıkların ayrılması olacaktır. Bu durumu, timsah şeklinde çatlamlar ve çukurlar ya da tekerlek hatlarındaki

kaplamanın geniş tekerlek izleri takip eder. Karışım tasarımında, soyulma önleyici katkı maddeleri ile işlem görmeleri şartıyla neme duyarlı agregalar kullanılmasına dikkat edilmelidir (Brown vd., 2001).

2.5.5 Durabilite

Bir asfalt kaplamanın durabilitesi bitümün yaşlanması, agreganın parçalanması ve bitümlü bağlayıcının agregadan ayrışması gibi faktörlere direnme yeteneğidir. Bu faktörler hava koşulları, trafik veya ikisinin birleşiminden kaynaklanır. Genel olarak bir karışımın durabilitesi üç yöntemle artırılabilir:

- Karışımın yoğun dereceli neme karşı dayanıklı agregalar kullanılarak tasarlanması,
- Agregada üzerindeki bitümlü bağlayıcı kalınlığının (bitüm film kalınlığı) maksimuma çıkarılması ve
- Karışımın geçirimsiz olacak şekilde sıkıştırılması.

Karışımındaki bitümlü bağlayıcı miktarı, agreganın emme özellikleri ve agregada gradasyonu ile ilgilidir. Kalın bitüm filmleri ince filmler kadar hızlı yaşlanmaz ve sertleşmez. Ayrıca artan bağlayıcı miktarı, kaplamadaki birbirine bağlı hava boşluklarının daha büyük bir yüzdesini etkili bir şekilde kaplayarak su ve havanın karışıma nüfuz etmesini zorlaştırır. Fakat sıcak havalarda asfaltın genişlemesine izin vermek için kaplamanın belirli bir oranda hava boşluğu içermesi zorunludur (Brown vd., 2001).

2.5.6 Kayma-Sürtünme Direnci

Kayma-sürtünme direnci, asfalt kaplama yüzeyinin, özellikle ıslak koşullarda, taşıt lastiklerinin kaymasını en aza indirme ve yeterli fren mesafelerini sağlama yeteneğidir. İyi bir kayma-sürtünme direnci için, lastik yüzeyinin kaplama üzerindeki su tabakası geçip agregada daneleri ile temasını sürdürebilmesi ve gerekir. Agregaların pürüzlü bir yüzeye sahip olmasının yanı sıra trafik altında cilalanmaya (pürüzlülüğünü kaybetmesi) karşı dayanıklı olması gerekir. Kalkerli agregalar (kireç taşları), silisli agregalardan (kuvars) daha kolay cilalanır. Tekerlek izi oluşumu veya sızdırma eğilimi gösteren kararsız asfalt karışımlar, ciddi kayma direnci sorunlarına neden olabilir.

2.5.7. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, bir kaplama karışımının yerleştirilip sıkıştırılma kolaylığı olarak tanımlanır. Karışım tasarım parametrelerinden, agregası ve bitüm derecelendirmesi işlenebilirliği iyileştirebilir. Fakat daha işlenebilir karışımlar genellikle kalıcı deformasyona daha yatkındır. Kaplamanın kullanım amacına uygun bir denge sağlamak için dikkatli olunması gerekir. Yüksek rijitlikli karışımlar (yüksek yüzde kaba agregası ve düşük penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı içeriğine sahip karışımlar) taşıma sırasında ayrışma eğilimi gösterir ve sıkıştırılması zor olabilir. İşlenebilir bir karışım elde etmek amacıyla karışımın tekerlek izi direncinden ödün verilmemesine dikkat edilmelidir. Çok yüksek bitüm içeriği aynı zamanda işlenebilirliği de etkileyerek karışımın yapışkan hale gelmesine neden olabilir.

Çok kolay işlenebilen karışımlara yumuşak karışımlar denir. Yumuşak karışımlar düzgün bir şekilde yerleştirilip sıkıştırılmayacak bir kıvama sahiptir. Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirlik sorunlarını aşağıdaki sebeplerden kaynaklanabilir.

- Mineral agregası içeriğinin eksikliği veya fazlalığı,
- Aşırı büyüklükte agregası kullanımı,
- Pürüzsüz, yuvarlak agregası parçacıkları ve
- Karışımındaki nem oranı

Karışımın sıcaklığı asfaltın viskozitesini etkilediğinden dolayı çok düşük bir sıcaklık karışımı işlenilemez hale getirir ve çok yüksek bir sıcaklık da karışımın hassaslaşmasına neden olacaktır. Bitümlü bağlayıcı kalitesi ve karışımındaki asfalt yüzdesi işlenebilirliği etkilemektedir (Asphalt Institute, 2014).

3. BİTÜMLÜ KARIŞIM TASARIM METODLARI

"Karışım tasarımı" (mix-design) terimi, bir karışımın bileşimini, şartname gereklilikleri ve uygulama projesinde istenen performans doğrultusunda tanımlamayı mümkün kılan araştırma ve laboratuvar faaliyetlerinin tümünü ifade eder. Karışımın bileşen oranı, "reçete" olarak da bilinen bu oran, üretim ve inşaat teknolojileri, malzeme özellikleri ve büyüklüklerin belirlenmesine yönelik test prosedürleri hakkında derin bir bilgi gerektiren bir dizi karmaşık faaliyetin nihai sonucudur. Özel Teknik Şartname, yapı projesi ile karışım tasarımı arasında bir bağlantı halkası olarak işlev görür, çünkü yapının gerçekleştirilmesi için gerekli olan malzemeler bu şartnamede uygun parametreler ve kabul aralıkları aracılığıyla belirlenir ve seçilen doğruluk düzeyine göre performansa uyarlanır. Tasarımcının becerisi, şartnameyi müdahale türüne, trafiğe, iklim koşullarına ve çevresel şartlara uyarlayarak yol projesinin gereksinimlerini yorumlama yeteneğinde yatar.

Asfalt karışımlarının üretimden önce tasarlanması, kaplama karışımının karıştırma, taşıma, serme sırasında ve yaşam döngüsü boyunca davranışını tahmin etmemizi sağlar. Deneme serilerinin laboratuvar testleri, umut verici bir formülasyon bulunup bilgi tabanımıza eklenene kadar hızlı ve küçük ölçekte başarısız olmamıza olanak tanır. Yaygın çevrede kullanılan bir malzeme olan asfalt ve asfalt kaplama sistemlerinin özelliklerine ve karakteristiklerine ilişkin anlayışımız zaman içinde gelişmiştir. Kplama karışımlarını tasarlamak için kullandığımız modern yöntemler, bilgi birikimimiz arttıkça ve olgunlaştıkça zamana bağlı olarak sürekli gelişmiştir.

Karışım tasarımı yöntemleri, her adımın nasıl ve niçin olduğu konusunda farklılık gösterir. Bu bölüm, BSK tasarım yöntemlerinin gelişimi ve dünyada kabul görmüş başlıca karışım tasarım yöntemlerine genel bir bakış niteliğindedir. Bu yöntemler, yukarıda belirtildiği gibi malzeme (bitüm ve agrega) seçimi, asfalt karışım numunelerinin hazırlanması, sıkışmış karışım numunelerinin yoğunluk ve hacim analizleri, karışım performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler ve optimum bitüm miktarının belirlenme süreçleri kapsamlı şekilde ele alınacaktır.

3.1 Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Yöntemlerinin Gelişimi

Tarihçiler asfaltın yol yapımında kullanımının MÖ 650'ye, Kral Nabopolassar'ın sarayına

yakın Babil'e kadar uzandığını ileri sürmektedir. İnka uygarlığı, 1500'lerde Peru'da yolları döşemek için kompozit bir malzeme olarak asfaltı kullanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ilk asfalt kaplamalar, Newark, New Jersey'de (1870) ve Washington, D.C.'de (1876), Pennsylvania Bulvarı'nda yapılmıştır.

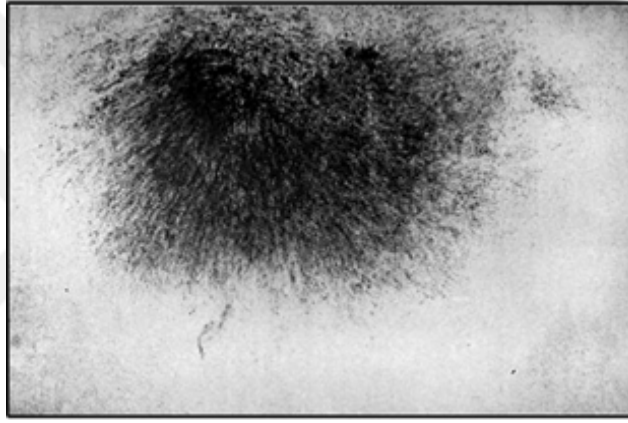
1890 yılında, sanayi çağının zirve döneminde, girişimci Amzi L. Barber, Barber Asphalt Paving Company'nin kurulmasıyla birlikte yol altyapısı sektöründe önemli bir dönüm noktasına imza attı. Bitümlü karışımı, yol yapımında çok yönlü ve ekonomik bir kaynak olarak gören Barber, 1883 yılında Barber Asphalt Company'yi kurdu. Dayanıklılık ve maliyet etkinliğini sağlayacak en uygun karışım bileşimini bulmak için çeşitli formüller üzerinde denemeler yaptı. Barber Şirketi, Trinidad'dan bitümlü bağlayıcı, temiz kum ve dolgu malzemesinden oluşan bir karışım olan tabaka asfaltı adı verilen bir ürün imal etmiştir. Bu yenilikçi tarif, %12-15 bitümlü bağlayıcı, %70-83 kum ve %5-15 kireç taşı dolgusu içeren ve belirli oranlarda dikkatle dengelenmiş bir karışımdan oluşuyordu. Bu karışım, geleneksel yol yapım yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde daha düşük maliyetle dayanıklı ve güvenilir yollar sunarak büyük bir başarıya ulaşmıştır.

Barber'in aksine, Warren Brothers Şirketi'nden Frederick Warren, 3 inç (7,62 cm) boyutunda agregalarla (HMA'ya daha çok benzeyen) karışımlar üretmiştir. Warren bu karışıma "bitulithic" adını verdi ve patentlerini 1901 ve 1903 yıllarında aldı. "Bitulithic", minimum boşluklarla yüksek stabiliteye sahip bir karışım üretmek için yoğun bir şekilde derecelendirilmiş büyük taş agregalar içermektedir.

19. yüzyılın son birkaç yılında, kaplama karışımlarının tasarlanmasıyla ilgili daha modern kavramlar, malzeme mühendisleri ve deneyimli zanaatkarlar tarafından öncelikle ampirik kanıtlara dayalı olarak ileri sürülen bilgiler, fikirler ve tarifler çerçevesinde gelişmiştir. Fakat, o dönemde kantitatif veya performansa dayalı laboratuvar testleri henüz kullanıma başlanmamıştı. Clifford Richardson, 1913'te ilk niteliksel testlerden birini geliştirmiştir. "Pat-kâğıt testi", bir numunenin kâğıt üzerinde bıraktığı lekeye göre asfalt içeriğinin Şekil 3.1'de görüldüğü üzere görsel bir tahminini sağlamaktadır (URL-3, 2023).

Alanındaki bilgi birikimi ve karışım tasarım yöntemlerini iyileştirme konusundaki çabaları, Clifford Richardson'ı sektörde önemli bir isim haline getirdi. Onun geliştirdiği karışım,

hammaddelerin seçimi konusunda daha özel kriterler getirerek, agregaların boyutuna ve dayanıklı karışımlar elde etmek için bunların kombinasyonuna dikkat çekiyordu. Bu formülasyon, %100'ü 10 numaralı elek (açıklığı 2 mm olan elek) ve %15'i 200 numaralı elek (açıklığı 0,075 mm olan elek) ile geçen bir kum karışımı ile %9 ila %14 arasında değişen bitüm oranını ve karışımın ana taşıyıcı yapısını oluşturan daha büyük agregaları içeriyordu. Bileşenlerin seçimindeki bu titizlik, bitümlü kaplamaların kalitesini ve performansını artırarak sektörde yeni standartlar belirledi. Clifford Richardson'ın yöntemi, yoğun ve iyi sıkıştırılmış bir karışım elde etmek amacıyla agregaların gradasyonuna göre seçimi ve kombinasyonuna odaklanıyordu. Günümüzde daha modern yöntemlerle aşılmış olsa da temel prensipleri hala geçerliliğini korumakta ve bitümlü karışım tasarım uygulamalarını etkilemektedir.



Şekil 3.1: Pat-kâğıt testi

Asfalt Enstitüsü'nden Prevost Hubbard ve Frederick Field, genellikle ince karışımlar için bir karışım tasarım prosedürü geliştirdiler. Tekerlek yükleri etkisiyle kaplama yüzeyinde meydana gelen ve asfalt kaplamanın yatay yönde itilmesiyle oluşan deformasyon türü olan *shoving* (dalgalanma/tümsek oluşumu) problemine dayanarak, bu duruma karşı dirençli kaplamaların deneyimlerinden yola çıkarak bir minimum Hubbard-Field stabilite değeri belirlediler. Bu yöntem 1920'lerde geliştirildi ve 1950'lerin sonlarına kadar yaygın olarak kullanılmıştır. 1950'lerde kullanılan diğer karışım tasarım yöntemleri Smith Triaxial yöntemi ve Texas Gyrotory yöntemidir.

1930'larda, California Karayolları Bölümü'nde malzeme ve araştırma mühendisi olan Francis Hveem, bir karışım tasarım prosedürü geliştirmiş ve bir yoğurma makinesi kullanımını tanıtmıştır. Hveem, çelik ve pnömatik lastikli silindirlerle sıkıştırılan saha üretimi

karışımlarının daha iyi temsil edilmesinin gerekliliğini vurgulamıştır. Ayrıca, karışımın performansını değerlendirmek için mekanik bir teste ihtiyaç olduğunu fark etmiştir. Bu ihtiyaç, karışımın (genellikle agrega yapısı) trafik altında maruz kaldığı kayma kuvvetlerine karşı direncini değerlendirmek için kullanılan Hveem Stabilometresi'nin geliştirilmesinin önünü açmıştır.

Marshall Karışım Tasarım prosedürü, Mississippi Karayolu Departmanı'ndan Bruce Marshall tarafından 1930'larda geliştirildi. Bu yöntem, laboratuvar sıkıştırmasının, trafik etkisini temsil eden bir yoğunluk üretmesinin gerekliliği ve en yüksek yoğunluğu üreten bitüm içeriğini seçilmesine dayanmaktadır. Aynı zamanda, sıkıştırılmış karışımın stabilitesi ve akması belirlenerek minimal kabul edilebilir seviyelerin karşılandığından emin olunmaktadır. İkinci Dünya Savaşındaki, uzak bölgelerde pist inşası ihtiyacı basit, taşınabilir laboratuvar ekipmanları kullanan bir karışım tasarım prosedürü gerektiriyordu. ABD Ordusu Mühendislik Kolordusu, yeni uçakların tekerlek yüklerini ve lastik basınçlarını destekleyecek kaplamaları tasarlamak için Marshall yöntemini uyarlamıştır.

1950'lerin başlarında, Ulusal Karayolu Sistemi'nin başlatılması ile eyalet karayolu departmanlarının yüksek hacimli yolların inşasını genişletmesi gerekli görülmüştür. 1987'den 1993'e kadar, çalışmalar Stratejik Karayolu Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program-SHRP) tarafından yürütülmüştür. 1990'ların başlarında Superpave'nin tanıtılmasından önce, devlet karayolu ajanslarının yaklaşık %75'i Marshall Karışım Tasarım prosedürünü kullanıyordu. SHRP'nin amacı, artan trafik etkisini ele almak için ulusal karayolu altyapısının nasıl tasarlandığı ve inşa edildiği konusunda önemli iyileştirmeler sağlayacak performans odaklı teknoloji ve özellikler geliştirmektir. Bu araştırmanın sonucunda, bağlayıcılar için Performans Derecelendirme (Performans Grade-PG) sistemi ve Superpave adı verilen yeni bir karışım tasarım sistemi ortaya çıkmıştır. İlk Superpave teknolojisi ile tasarlanan projeler, 1990'ların başlarında inşa edilmiş ve bu prosedür hızla ABD ve Kanada'da karışım tasarımı için standart prosedür haline gelmiştir (Asphalt Institute, 2014).

Superpave karışım tasarım yönteminde, numunelerin optimum bağlayıcı içeriğini belirlemek amacıyla hacimsel ölçümler yapan döner kompaktör kullanılmaktadır. Tasarlanan karışımın uygunluğunu doğrulamak için nem direnci testleri ve bazı durumlarda performans testleri de

uygulanmaktadır. Superpave karışım tasarım sistemi, hacimsel bazlı asfalt karışım tasarımı gerçekleştirmek için malzeme seçimine yönelik güçlü bir temel sunmaktadır. Ancak, tasarlanan karışımın sahada gerçekten beklenen performansı gösterip göstermeyeceğini ortaya koyan test prosedürlerinin yetersizliği, sistemin önemli bir eksikliği olarak değerlendirilmektedir. Genellikle üstyapı tasarımıyla doğrudan ilişkilendirilmeyen bir diğer önemli konu ise, bu asfalt karışımlarının üretimi sırasında uygulanan kalite kontrol yöntemleridir. Laboratuvar ortamında hazırlanan karışımlarla, asfalt plenti gibi sahada hazırlanan karışımlar arasında belirgin farklılıklar olduğu iyi bilinmektedir. Bu nedenle, karışımın tasarlandığı şekilde performans göstermesini sağlamak adına, iyi yapılandırılmış bir performansa dayalı sistemin mutlaka etkili bir kalite kontrol süreci içermesi gerekmektedir.

Superpave metodolojisinin tekerlek izi oluşumunu azaltabilmesine rağmen, Marshall karışım tasarımına kıyasla daha düşük bağlayıcı içeriğine sahip olması, uzun vadeli dayanıklılık endişelerini beraberinde getirmiştir. Ayrıca, bu yöntem büyük ölçüde asfalt karışımının hacimsel özelliklerine dayanmaya devam etmiştir. Başlangıçta Superpave karışım tasarım prosedürünün bir parçası olarak performans testlerini hacimsel karışım tasarımıyla birleştirmek amaçlanmışsa da, performans testleri tam olarak uygulanmamıştır. Bu nedenle, asfalt endüstrisinde, hacimsel kriterleri karşılayabilen ancak sahada zayıf performans sergileyen asfalt karışımlarını elemek için tasarım sürecinde kullanılabilecek performans testlerine olan ihtiyaç artmıştır.

Bu doğrultuda, Dengeli Karışım Tasarımı (Balanced Mix Design-BMD), asfalt karışımlarını tasarlamak için en yeni ve umut vadeden yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, tekerlek izi ve çatlama gibi en yaygın bozulmalar için geleneksel hacimsel tasarımın bazı yönlerini performans test kriterleriyle değiştirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada kavşak uygulamaları için farklı agrega gradasyonlarına sahip asfalt karışımlarının performansını değerlendirmek amacıyla BMD benimsenmiştir (Costa, 2021).

Tropikal iklim bölgelerinde asfalt karışım tasarımı, özellikle tasarım trafiğini önemli ölçüde aşan yüksek düzeyde trafik yüküne maruz kalan yollar için önemli zorluklar içermektedir. Bu bölgelerde gerçekleştirilen karışım tasarımı çalışmalarında temel amaç, kalıcı deformasyona karşı yüksek direnç gösteren asfalt karışımlarının elde edilmesidir. Tropikal ülkelerde yaygın olarak kullanılmaya devam eden Marshall karışım tasarımı yöntemi, saha sıkıştırma

koşullarını yeterince temsil edememesi ve kalıcı deformasyona eğilimli karışımlar üretmesi nedeniyle yetersiz bir metodoloji olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, Marshall yöntemi esas alınarak geliştirilen genişletilmiş tasarım prosedürlerinin, kalıcı deformasyona karşı dirençli asfalt karışımlarının elde edilmesinde güvenilir bir çözüm sunup sunamayacağını inceleyen çok sayıda deneysel çalışma yürütülmektedir. Ayrıca, Marshall yöntemiyle tasarlanan karışımlar; ikincil sıkıştırma davranışı ve kalıcı deformasyon potansiyeli açısından, modern bir yaklaşım olan Superpave karışım tasarımı yöntemiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir (Varma vd., 2019).

Irak'ta, çoğu karayolu asfalt karışımları ile hazırlanmış ve genellikle 20 yıllık bir tasarım ömrü öngörülmüştür. Ancak, bu yollardan istenilen performans elde edilememekteve tasarım ömrü öngörülenin aksine daha kısa sürelerde tamamlamaktadır. Özellikle şiddetli sıcaklıklara ve yoğun trafik yüklemelerine maruz kalan yolların kullanım ömründe ciddi azalmalar meydana gelmektedir. Esnek bir kaplamanın daha iyi performans gösterebilmesi için ana faktör, karışım tasarımı esnasında belirlenen bitüm-agrega nitelikleri ve miktarları olarak kabul edilmektedir. Bunun için şimdiye kadar kullanılan en yaygın yöntemler olan Hveem ve Marshall yöntemleridir. Ancak, yapılan çalışmalar neticesinde Superpave adı altında yeni bir yöntem geliştirildiği ve bu yöntemin diğer adı geçen yöntemlerden daha iyi performansa sahip olduğu düşünülmektedir. Literatürde Superpave'in yüksek yükler ve şiddetli sıcaklık değişimlerine maruz kalma açısından Marshall'a göre daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır. Fakat, iki yöntem arasındaki ana farkları karşılaştırarak karışım tasarımında ana farkların açıklanmasına çalışılmaktadır. Bu adaptasyon süreci çalışmaların olumlu sonuçlanması beklenmektedir (Omar vd., 2021).

Benzer bir çalışma Katar'da yapılmış, asfalt karışımları klasik hacimsel yaklaşımın yanı sıra temel mekanik parametrelerin değerlendirilmesiyle tasarlanabilir olması araştırılmıştır. Kalıcı deformasyon riskini en aza indirmek için, karışımların hazırlanması esnasında agregaların seçilmesi ve optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi için yola çıkılmıştır. Böyle bir yaklaşım, karışım tasarım sistemlerinin asfalt karışımlarının gerçek kalıcı deformasyon potansiyelinin değerlendirilmesine odaklanan performansa dayalı testleri içerecek şekilde geliştirilmesini gerektirmektedir. Katar Devleti'nin belirlediği gereksinimlere uygun olarak tasarlanmış çeşitli testlerin farklı koşullarda asfalt karışımlarının gerçek potansiyelini sergileyeceği, çalışmalar sonucunda açıkça gözler önüne serilmiştir (Sebaaly vd., 2022).

Gelişmekte olan ülkeler, karmaşıklığı nedeniyle Superpave sistemine geçmekte hala zorlanmaktadır; çünkü bu yöntemin uygulanması için önemli ölçüde bilgi ve deneyime ihtiyaç duyulur. Geliştirilen bölgesel Superpave uygulama çerçevesiyle, bilgi ve deneyim eksikliğine sahip ülkelerde Superpave'in uygulanmasına yönelik beklenen zorlukları ele almayı ve bunları hafifletmeyi amaçlanmaktadır. Bu çerçevede, Mısır'da yapılan benzer çalışmalar, sıcak ve kurak iklimin egemen olduğu gelişmekte olan ülkelerdeki Superpave'in uygulanabilirliğini nispeten doğrulamıştır. Çevre ve iklim etkisi, performans ve malzeme özelliklerini dikkate alarak, bölgede gerekli iyileştirmeler yapılmış, Superpave gibi daha güvenilir tasarım yaklaşımlarına geçişin önemi ve uygulamanın gerekliliği vurgulanmıştır (Khedr ve Saudy, 2023).

Benzer iklime sahip Umman'da, Marshall karışım tasarımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalıcı deformasyona karşı direncin yetersiz olması ve sahadaki yöntemden farklı bir prensipte uygulanan laboratuvar sıkıştırma işlemi sonucu boşlukların oluşma bu yöntemin eksiklikleri olarak vurgulanmaktadır. Marshall yöntemi ile tasarlanan asfalt karışımlarının genel performansı nasıl etkilendiğini inceleyen çeşitli çalışmalar, yük ve çevresel sorunları dikkate alan yeni yaklaşımlar geliştirmeyi amaçlamaktadır. Sonuç olarak, bitümlü bağlayıcıları değerlendirmek ve karışımları analiz etmek için teknikler geliştirilmiştir. Asfalt malzemelerini belirleme, test etme ve tasarlama konusunda yeni bir yöntem olan Superpave burada öne çıkmaktadır. Bu, asfalt kaplama bileşenlerini tanımlamak, asfalt karışımlarını geliştirmek, analiz etmek ve asfalt kaplama performansını tahmin etmek için geliştirilmiş bir yaklaşımdır. Yapılan çalışmalar sonucunda Superpave karışımları, Marshall karışımlarının performans açısından geride bırakmıştır. Sonuç olarak, Umman'da Superpave tasarım yaklaşımına öncelik verilmesi, son zamanlarda inşa edilen yollarla ilişkilendirilen bazı sorunların çözülmesine yardımcı olabileceği düşünülmektedir (Al Kaaf ve Ibeabuchi, 2023).

Avrupa perspektifinde esnek yol kaplamalarının optimizasyonu için son araştırma çabaları, hem sıcak karışım asfaltı için performansa dayalı test yöntemlerinin kurulumu ve uygulanması hem de bunların geçerli performans tahmin modellerine uygulanmasına odaklanmıştır. Performans ilişkili veya ampirik testler (örneğin, tekerlek izi, Marshall testleri), performansı öngören temel mühendislik özellikleriyle uyum sağlayan malzeme karakteristiklerini hesaba katmışlardır, performansa dayalı testler ise performansı öngören

temel mühendislik özelliklerini tanımlar ve birincil performans tahmin ilişkilerinde kullanırlar.

2007'ye kadar, tüm Avrupa Birliği içindeki Avrupa Standardizasyon Komitesi (Comité Européen de Normalisation-CEN) üye ülkelerinde yol asfalt malzemelerinin tasarımı ve test edilmesi için yeni uyumlu Avrupa Standartları (European Norm-EN) tanıtılmıştır. Genel olarak, bu EN standartlarında, ampirik karışım tasarım yaklaşımı ile yeni olan temel, performansa dayalı yaklaşım arasında karşılaştırmalı ayrımı yapılmıştır. Her iki yaklaşım da iyi performans gösteren, yapısal olarak optimize edilmiş kaplamaları gerçekleştirmeyi amaçlasa da performansa dayalı yaklaşımın önemli bir avantajı, laboratuvar değerlendirmelerine dayanmasıdır. Bu nedenle, Avrupa standartları çerçevesinde mevcut olan ve bitümlü malzemelerin etkili mekanik karakteristiklerini ele alan performansa dayalı test yöntemlerine odaklanmaktadır ve bu yöntemlerin Avrupa HMA şartnameleri çerçevesinde ulusal gerekliliklere dahil edilebileceği konusuna değinmektedir. Avrupa HMA test standardı serisi EN 12697-xx'de temel performans HMA özellikleri Tablo 3.1'de özetlendiği gibi farklı performans testleri ile ele alınmaktadır. Yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi davranışını tanımlamak için sınırlama basınçları olan veya olmayan tekrarlı eksenel yük testleri (Triaxial Cyclic Compression Test-TCCT veya Uniaxial Cyclic Compression Test-UCCT) (Şekil 3.2b) belirtilmiştir. Düşük sıcaklık davranışı, Çekme Gerilimi Sınırlandırılmış Numune Testi (Tensile Stress Restrained Specimen Test-TSRST) (Şekil 3.2a) ve Tek Eksenli Çekme Dayanımı Testi (Uniaxial Tensile Strength Test-UTST) ile belirlenmektedir. Asfalt karışımlarının rijitliğini ve yorulmasını karakterize etmek için Avrupa standartlarında eğilme testleri ve doğrudan ve dolaylı çekme testleri dahil olmak üzere farklı testler tanımlanmıştır. Ancak belirli bir test cihazı türü tercih edilmemiştir. Ayrıca, Avrupa HMA şartnamesi EN 13108-1, bu performansa dayalı HMA özellikleri için ulusal şartnamelere temel HMA gereklilikleri olarak eklenebilecek farklı kategoriler sunmaktadır (Blab, 2013).

Tablo 3.1: Performansa dayalı gereksinimler için Avrupa test standartları

Test Standardı	Rijitlik	Malzeme Yorgunluğu	Düşük Sıcaklık Performansı	Kalıcı Deformasyon
Aşınma	x	(x)	x	x
Binder	x	(x)	x	x
Temel	x	x	(x)	(x)
Test Prosedürü	– Trapezoidal Numune üzerinde İki Nokta Eğilme Testi (Two-Point Bending Test on Trapezoidal Specimen – 2PB-TR) — Prizmatik Numune İki Nokta Eğilme Testi (Two-Point Bending Test on Prismatic Specimen – 2PB-PR) —Üç Nokta Eğilme Testi (Three-Point Bending Test – 3PB) —Dört Nokta Eğilme Testi (Four-Point Bending Test – 4PB) —Dairesel Dolaylı Çekme Testi (Circular Indirect Tensile Test – CIDT) —Doğrudan Çekme-Basınç Testi (Direct Tension Compression Test – DCT)	—Nokta Eğilme testi (4PB) —Dairesel dolaylı çekme testi (CIDT)	—Sıcaklık Stresi Kısıtlanmış Numune Testi (TSRST) —Tek Eksenli Gerilme Testi (UTST) — Tek Eksenli Dairesel Gerilme Testi (UCTST).	—Üç Eksenli Dairesel Basınç Testi (TCCT), —Tek Eksenli Dairesel Basınç Testi (UCCT).
EN standardı	EN 12697-26	EN 12697-24	EN 12697-46	EN 12697-25

Not: x...performans özelliği zorunlu, (x)...ek performans özelliği

Avrupa’da asfalt karışım tasarımında genellikle Marshall yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, karışımın stabilitesi ve akma değerine göre tasarlanmasını sağlar ve Avrupa standardı olan EN 13108-1’de detaylı şekilde tanımlanmıştır. Standartta, stabilite/akma oranının yanı sıra asfalt karışımının hacimsel özellikleri de belirlenmiştir. Fransa ise farklı bir yaklaşım benimseyerek Gyratory yöntemine dayalı bir sistem kullanmaktadır. Ancak, Avrupa’da asfalt karışım tasarımı yalnızca Marshall veya Gyratory yöntemiyle sınırlı kalmamaktadır. Bu yöntemler asfalt karışımının temel mühendislik özelliklerini ve performansa yönelik

davranışlarını tam olarak değerlendiremediğinden, tasarım sürecini destekleyici ek testlerin uygulanması gerekmektedir. Bu testler, özellikle suya duyarlılık ve kalıcı deformasyona karşı direnç gibi performansla ilişkili parametrelerin değerlendirilmesinde önem taşımaktadır.



(a)



(b)

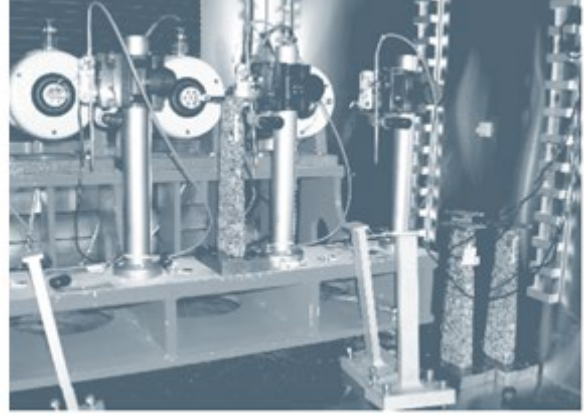
Şekil 3.2: Avrupa performans test örnekleri: (a) Kısıtlanmış Numunede Çekme Gerilmesi Testi (Tensile Stress Restrained Specimen Test -TSRST) (b) Üç Eksenli Tekrarlı Basınç Testi (Triaxial Cyclic Compression Test-TCCT)

Su duyarlılığı genellikle dolaylı çekme dayanımı oranı (Indirect Tensile Strength Ratio - ITSR) ile değerlendirilirken; kalıcı deformasyon direnci ise Hamburg Tekerlek İzi Testi (Hamburg Wheel-Tracking Test-HWTT) ya da Tekerlek İzi Testi (Wheel-Track Test) ile belirlenmektedir.

Fransa'da, Gyratory kompaktörle yapılan karışım tasarımı; su duyarlılığı için Duriez testi (Şekil 3.4), kalıcı deformasyon direnci için LCPC tekerlek izi testi (LCPC Wheel Tracking Test – LCPC WTT)(Şekil 3.3a), rijitlik tayini ve yorulma direnci için ise iki noktalı trapezoidal kirişi eğme testleri(Şekil 3.3b) ile desteklenmektedir. LCPC, Fransa'daki "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées" kurumunun kısaltmasıdır. Birleşik Krallık'ta da benzer şekilde, karışımların suya karşı hassasiyeti, tekerlek izi oluşumu, rijitlik ve yorulma direnci gibi performans özelliklerini değerlendiren tamamlayıcı testler kullanılmaktadır.

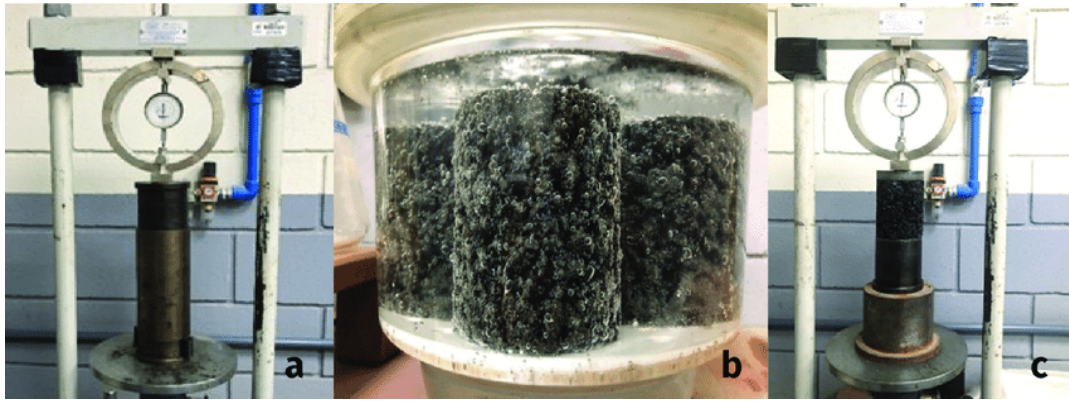


(a)



(b)

Şekil 3.3: (a) LCPC tekerlek izi test cihazı, (b) Trapezoidal sertlik ve yorulma test cihazı

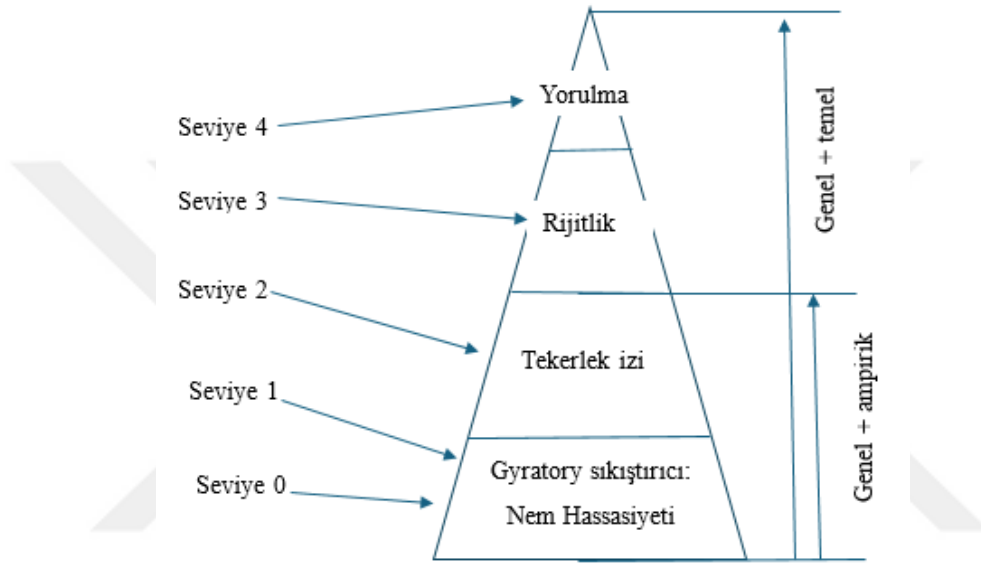


Şekil 3.4: Duriez testi: (a) çift pistonlu sıkıştırma, (b) vakum doygunluk süreci ve (c) kopma testi

Avrupa'daki asfalt karışım tasarım sürecinde, hem numune hazırlanmasında hem de karışımın mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde çeşitli testler kullanılmaktadır. Bu testlerin nihai amacı, optimum bitüm içeriğinin belirlenmesidir. Tasarımda en çok kullanılan ekipmanlardan biri Marshall cihazıdır. Bu cihaz, Marshall kompaktörüyle sıkıştırılmış numunelerin stabilite ve akma değerlerini ölçmeye yarar. EN 12697-34 standardında, Marshall testinin uygulanış prosedürü ve sonuçların yorumlanması ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Alternatif olarak kullanılan diğer yöntem ise Gyrotory kayma testidir. Bu yöntemde, numune bir döner kompaktörde sıkıştırılır ve numunenin yüksekliği izlenerek hava boşluk oranı ile ilişkilendirilir. Test sırasında sabit bir eksenel kuvvet uygulanır ve numune, eksene hafif eğimli bir açıyla döndürülerek kayma etkisi oluşturulur.

Fransa’da uygulanan asfalt karışımı tasarımı yöntemi; kullanım amacına, asfalt karışım türüne ve trafik hacmine göre seviyelere ayrılmıştır. Bu seviyeler, en basit düzey olan Seviye 0’dan başlayarak en kapsamlı analizleri içeren Seviye 4’e kadar uzanır. Her bir üst seviye, alt seviyelerdeki test ve gereklilikleri de kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sistematik yaklaşım, Avrupa standardı EN 13108-1 ile uyumlu olup, asfalt karışım tasarımında hem ampirik hem de temel mühendislik yaklaşımlarını birlikte içermektedir. Şekil 3.5’te ise Fransız asfalt tasarım seviyelerinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.5: Fransız asfalt karışım tasarımının seviyesi

Seviye 0, sadece gradasyon ve bağlayıcı miktarı gibi temel bilgilerle yapılan tanımlayıcı bir tasarımdır ve herhangi bir laboratuvar testi içermez. Bu düzey yalnızca trafiksiz alanlarda kullanılan asfalt karışımları için uygundur. Seviye 1’de ise, asfalt karışımının kompaksiyon özellikleri ve suya karşı dayanıklılığı değerlendirilir. Bu seviyede, Gyratory kompaktör testi ile karışımın boşluk yapısı analiz edilirken, Duriez testi ile su etkisindeki dayanıklılığı belirlenir. Bu seviye genellikle düşük trafikli yollar için yeterli kabul edilmektedir.

Seviye 2, Seviye 1’de yer alan hacimsel ve suya dayanıklılık testlerinin yanında, asfalt karışımının kalıcı deformasyona karşı direncini belirleyen tekerlek izi testi ile genişletilir. Bu seviye, orta düzeyde trafik alan yollar için önerilmektedir. Seviye 3’te ise, karışıma ait rijitlik modülü testleri eklenmektedir. Bu, asfalt karışımının elastik özelliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir ve genellikle yüksek trafikli ana yollar ve otoyolların yapısal tasarımında gereklidir. Bu seviye ile birlikte, tasarımda temel mühendislik yaklaşımı devreye girmektedir.

En kapsamlı seviye olan Seviye 4'te, karışımın yorgunluğa karşı dayanımı da test edilir. Bu seviye, Seviye 3 dahil tüm testlerin yanında, 1 milyon yükleme çevrimine karşılık gelen çekme gerinimi gibi parametrelerle asfaltın yorulma davranışını analiz eder. Bu tür analizler, yüksek trafikli yolların taşıyıcı tabakalarında kullanılması planlanan asfalt karışımları için zorunludur. Bu seviyede yapılan testler, asfalt kaplamanın uzun vadeli performansını belirlemek adına oldukça önemlidir (Pereira ve Pais, 2017).

Tüm bu seviyeler, asfalt karışımlarının trafik koşulları ve iklim gibi çevresel faktörlere göre uyarlanmasına olanak tanır. EN 13108-1 standardına göre Seviye 0, Seviye 1 ve Seviye 2, “genel + ampirik” yaklaşımı temsil ederken; Seviye 3 ve Seviye 4, “genel + temel” mühendislik yaklaşımını ifade eder. Bu yapı sayesinde, yol mühendisleri ve tasarımcılar, ihtiyaç duyulan performans seviyesine göre uygun test ve tasarım yöntemlerini seçerek daha güvenilir ve uzun ömürlü asfalt kaplamalar geliştirebilmektedir. Tablo 3.2’de Fransız asfalt kaplama tasarım seviyeleri kapsam ve uygulama alanına göre açıklanmış olarak verilmiştir.

Tablo 3.2: Fransız asfalt karışım tasarım seviyeleri

Tasarım Seviyesi	Kapsam	Uygulama Alanı
Seviye 0	Gradasyon ve bağlayıcı oranı (test yok)	Trafik almayan alanlar
Seviye 1	Hacimsel tasarım, suya dayanıklılık	Düşük trafikli yollar
Seviye 2	Kalıcı deformasyon	Orta trafik hacmi
Seviye 3	Rijitlik modülü tayini	Yüksek trafik hacmi, otoyollar
Seviye 4	Yorulma dayanımı analizi	Yoğun yüklü yollar, ana arterler

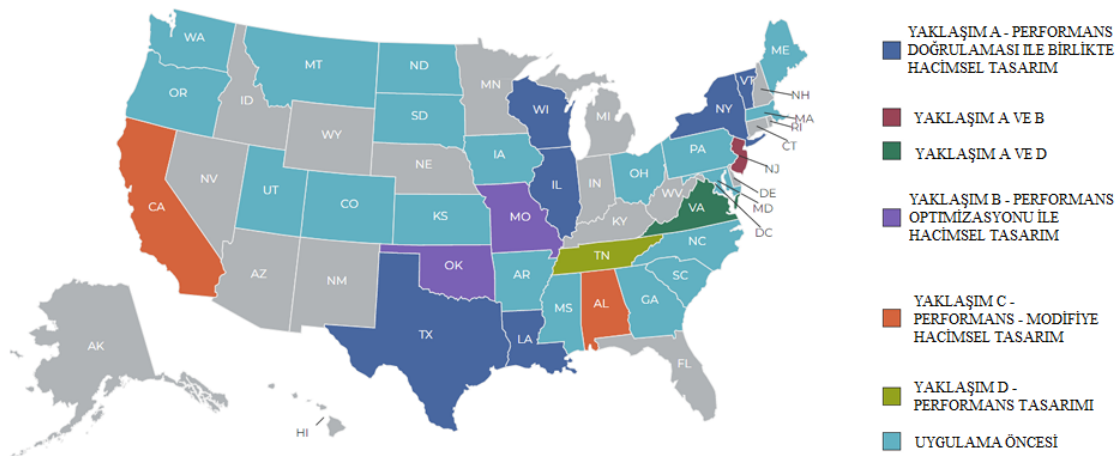
Çin’de çoğu yüksek kaliteli olan asfalt kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Çin geniş bir yüzey alanına sahiptir ve iklim bölgeden bölgeye büyük farklılıklar göstermektedir. Bu durum ülkede uygulanan asfalt kaplamaların dengeli bir performansa sahip olmasını gerektirmektedir (Zhao vd., 2022). Asfalt kaplamanın dayanıklılığını çeşitli faktörler etkilemektedir Asfalt kaplamaların performansını etkileyen iklim faktörleri arasında yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık, nem, yorulma ve yaşlanma yer alır. Asfalt kaplamalar, yüksek sıcaklıktaki trafik yükleri altında tekerlek izi, orta sıcaklıklardaki yorulma çatlakları ve düşük sıcaklıkta enine çatlaklarının oluşumlarına eğilimlidir ve bunların hepsi ciddi sorun teşkil etmektedir (Dong vd., 2023). Asfalt kaplamaların servis koşullarına ilişkin yerinde yapılan

incelemeler, tekerlek izi oluşumu yanı sıra diğer çatlamlarında giderek en ciddi sorunlardan biri haline geldiğini göstermektedir. Bunun en temel nedeninin, geçmişte tasarlanan kaplama karışımının dengesiz performansı olduğu düşünülmektedir. Bu sorunu çözmek için yapılan çalışmalar, performans dengesi yaklaşımına dayalı olarak asfalt kaplama tasarımı için yeni bir yöntem önermektedir. Deneysel olarak yapılan çalışmalar, geleneksel Marshall tasarım yöntemiyle karşılaştırıldığında, yeni karışım tasarım yöntemi ile üretilen asfalt karışımının yüksek sıcaklık stabilitesinin bir miktar azaldığını, ancak düşük sıcaklık performansının, karışım stabilitesinin ve yorulma ömrünün önemli ölçüde arttığını göstermektedir (Xu vd., 2021).

Karayipler'de, çoğu laboratuvar sadece hacimsel Marshall karışım tasarım metodolojisini kullanmaktadır. Yol tasarımcıları, mühendisler, danışmanlar ve yükleniciler, hacimsel tasarım karışım seçim sürecinin birçok kusurunu ve yetersizliğini vurgulamaktadır. Genel kanaat, asfalt kaplamalarda hizmet performansını ve yaygın hasarları ele alan bir süreç geliştirme ihtiyacı olmasıdır. Performansa Dayalı Karışım Tasarımı (Performance-Based Mixture Design-PMD), performans testlerini hacimsel parametrelerle birlikte karışım tasarım sürecine entegre edilerek, asfalt kaplama hasarlarını değerlendirmek için hacimsel karışım tasarım tekniğine pratik bir alternatif olarak kullanılmıştır. Araştırma, vaka çalışmaları ve deneysel çalışma yoluyla nitel ve nicel verilerin toplanması ve entegrasyonu ile devam etmektedir. İki kontrol ve iki PMD karışım tasarlanmış ve hem hacimsel hem de performans özellikleri incelenmiştir. Bu özellikler arasında kalıcı deformasyon, yorulma çatlama, dayanıklılık ve nem duyarlılığı yer almaktadır. PMD çerçevesi, kalıcı deformasyon, stabilite modülü, yorulma çatlama ve kabul edilebilir bir çekme mukavemet oranı için performans testi kriterlerinin geliştirilmesi ışığını yakmıştır. Karayip bölgesi için PMD çerçevesinin geliştirilmesi ve uygulanması, bölgede sürdürülebilir asfalt kaplamalarının elde edilmesi için önemli bir adımı temsil edebilir. En iyi uygulama çözümlerini içeren bu çerçevenin, asfalt karışımlarının performansını etkileyen değişkenler hakkında farkındalığı artırması beklenmektedir (Leon vd., 2023).

Şekil 3.6'da BMD üzerine, geçici veya standart spesifikasyon geliştiren Eyalet Karayolu İdaresi (State Highway Administration-SHA) ABD haritasını sunmaktadır. Bu veriler, Mayıs 2020'de Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi (National Asphalt Technology Center-NCAT) tarafından gerçekleştirilen SHA'lar ve asfalt yol endüstrisi anketinden toplanmıştır.

Tanımlanan 11 BMD eyaleti arasında, Illinois, Louisiana, New Jersey, Texas ve Vermont Yaklaşım A'yı, Performans Doğrulmalı Hacimsel Tasarım'ı kullanmaktadır. California, Missouri ve Oklahoma şu anda Yaklaşım C'yi, Performans Modifiye Hacimsel Tasarım kullanmaktadır. Alabama ve Tennessee Yaklaşım D, Performans Tasarımını tercih etmekte; Virginia ise hem Yaklaşım A'yı hem de Yaklaşım D'yi kullanmaktadır. Henüz hiçbir eyalet Yaklaşım B, Performans Optimizasyonlu Hacimsel Tasarım ile ilerlememiştir.



New Jersey Ulaştırma Bakanlığı (New Jersey Department of Transportation -NJDOT) tarafından belirlenen "özel" asfalt karışımları için performansa dayalı karışım tasarımının ve kalite kontrolünün uygulanmasını hâlihazırda kullanmaktadır. NJDOT, belirli kaplama uygulamaları için farklı karışım türleri kullanır, dolayısıyla farklı karışım uygulamaları için farklı test prosedürleri ve performans kriterleri oluşturulmuştur. NJDOT tarafından kullanılan tüm "özel" asfalt karışımları için, karışımın performans gereksinimlerini karşıladığından ve üretilen asfalt karışımının uygun olduğundan emin olmak için karışım tasarımı, test süreç ve proje üretimi sırasında üretilen karışım üzerinde performansa dayalı testler de gerçekleştirilmektedir (Bennert vd., 2011).

Virginia Ulaştırma Bakanlığı (Virginia Department of Transportation-VDOT), BMD'yi uygulama sürecindedir. VDOT, yüzey karışımlarının tasarımı ve üretimi için iki farklı BMD yaklaşımına izin vermektedir. İlk BMD yaklaşımı "Performans + Hacimsel" kriterlerine dayanmaktadır, burada karışım tasarımının mevcut hacimsel ve performans test

gereksinimlerini karşılaması gerekmektedir. Bu, Hacimsel Tasarım ile Performans Doğrulama yaklaşımına karşılık gelir. İkinci BMD yaklaşımı, karışım tasarımının yalnızca karışım performans test sonuçlarına dayandığı "Yalnızca Performans" kriterlerini kullanarak yapılmasını gerektirir ve agrega gradasyonu, yeni bağlayıcı sınıfı ve hacimsel özellikler üzerinde herhangi bir gerekliliği yoktur. Bu yaklaşım esasen Performans Tasarımı yaklaşımıdır (Diefenderfer ve Bowers, 2019). VDOT, birçok kuruluş gibi karayolu ağını daha sürdürülebilir, daha uzun ömürlü ve daha ekonomik hale getirmek amacıyla asfalt karışımlarının dayanıklılığını artırmanın yollarını aramaktadır. BMD yöntemi, performans kriterlerinin karışım tasarımı ve kabulüne dahil edilmesi yoluyla bu sorunu çözmeye odaklıdır. VDOT, asfalt karışımı performansını iyileştirmek amacıyla BMD yönteminin uygulanmasını taahhüt etmiştir. Sonuçlara göre Asfalt Kaplama Analizatörü (Asphalt Pavement Analyzer-APA) tekerlek izi testi, Dolaylı Çekme Dayanımı (Indirect Tensile Strength-Certified Technician- IDT-CT) ve Cantabro testi BMD'de sürekli kullanıma uygun bulunmuştur. Her üç test için mevcut eşik kriterleri, ilave karışım testlerine göre makul bulunmuştur. Çalışmalarda, APA tekerlek izi testi ve IDT-CT sonuçlarının sırasıyla temel tekerlek izi ve çatlama testlerinin yanı sıra mekanik-ampirik kaplama tasarımı simülasyonlarından elde edilen performans tahminleriyle ve testin tam güvencesi için saha performansıyla karşılaştırılması ve ilişkilendirilmesi önerilir ve eşik değerleri uygundur (Habbouche vd., 2022).

Minnesota Ulaştırma Bakanlığı (Minnesota Department of Transportation - MnDOT), BMD yaklaşımının kullanımı da dâhil olmak üzere asfalt karışım performansını değerlendirmek için hacimsel karışım tasarım sürecinin bir parçası olarak performans testlerini uygulamaya koymaya başlamıştır. Bu yaklaşım, yalnızca hacimsel karışım tasarımı yaklaşımının kullanılmasıyla karşılaştırıldığında, asfalt karışımının dayanıklılığını ve stabilitesini geliştirmeyi ve asfalt karışımı tasarım gerekliliklerini saha performansıyla daha iyi ilişkilendirmeyi amaçlamaktadır. BMD yaklaşımı saha performansıyla ilgilidir çünkü tekerlek izi, yorulma ve termal çatlama gibi sorunlarla ilişkilendirilen standartlaştırılmış performans testlerine dayanmaktadır (Al-Khayat vd., 2021).

Arkansas'ta kullanılan mevcut asfalt karışım tasarım prosedürü, genellikle Superpave prosedürü yani AASHTO M323 ve AASHTO R35'e dayanmaktadır. Bu tasarım sistemi, bileşen özelliklerine (bitümlü bağlayıcı-agregaların kalitesi) ve hacimsel özelliklere dayanır.

Başlangıçta, Superpave'in performansa dayalı testleri dâhil edilmesi amaçlanmıştır, ancak bu testler uygulanabilir olmamıştır. Sonuç olarak, AASHTO M323 ve AASHTO R35'te açıklanan Superpave süreci sadece hacimsel özelliklere dayanmaktadır. Arkansas, Superpave'deki hacimsel tasarım sistemini laboratuvar performans testi ile destekleyen birçok eyaletten biridir. Arkansas'taki karışım tasarımını hacimsel bir temelden ziyade performansa dayalı bir temele kaydırmak için mevcut APA tekerlek izi testi ile birlikte kullanılmak üzere bir çatlama testi geliştirmeyi, uyarlamayı ve uygulamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, mevcut yöntemin nem hasarına karşı direncini tahmin etme etkinliğini yeniden değerlendirmek ve uygun alternatif yöntemler uyarlamak için bir girişimde bulunulmaya çalışılmaktadır (Hall vd., 2022).

Alabama Ulaştırma Departmanı (Alabama Department of Transportation -ALDOT), 2020'de yerel yollar için özel bir yöntem olan BMD'yi geliştirmiştir. Böylelikle, asfalt kuruluşlarını karışım tasarımı onayının öncelikle karışım performansına dayandığı performans tasarımı yaklaşımını takip ederek Superpave karışımları tasarlamasına olanak tanınmıştır. Kullanılan karışım performans testleri, nem ve çatlama direncinin değerlendirilmesi için sırasıyla ALDOT 458'e göre Yüksek Sıcaklıkta Dolaylı Çekme Testi(High-Temperature Indirect Tensile Test – HT-IDT) ve ALDOT 459'a göre Alabama Çatlama Testi (Alabama Certified Technician -AL-CT)'dir. Her iki test de önceden 135°C'de dört saatlik kısa süreli koşullandırmadan geçirilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedir.

California Ulaştırma Departmanı (California Department of Transportation - Caltrans), BMD'yi uygulayan ilk altı SHA'dan biridir. Caltrans şu anda uzun ömürlü asfalt kaplama karışımlarının tasarımı.(yani, minimum bakım gerektiren ve 40 yıl veya daha uzun süre dayanan asfalt kaplamalar için) için performansı değiştirilmiş hacimsel tasarım yaklaşımını uygulamaktadır, Burada karışım tasarımının performans testi gereksinimlerini karşılaması istenilir ve karışım hacmi ile ilgili minimum gereksinimler karşılanır.

Illinois Ulaştırma Departmanı (Illinois Department of Transportation-IDOT), BMD'yi uygulamaya 2016 yılında başlamıştır. Mevcutta yüksek trafik yükü altındaki asfalt karışımlar için hacimsel tasarımın performans doğrulaması yaklaşımını kullanmaktadır. Burada karışım tasarımının hem hacimsel hem de performans testi gereksinimlerini karşılaması istenmektedir. Kullanılan karışım performans testleri arasında -HWTT, Illinois Esneklik Endeksi Testi

(Illinois Fracture Indirect Tensile- I-FIT) ve dolaylı çekme dayanımı (Tensile Strength Ratio- TSR) testleri karışımın çukurlaşma, çatlamaya ve nem hasarına karşı direncini değerlendirmek için kullanılır. Karışım tasarım onayının yanı sıra, HWTT ve I-FIT testleri, üretim başlangıcında test şeridini temsil eden tesis üretim karışımları için gereklidir. Üretimin kabulü büyük ölçüde hacimsel karışım tasarım ölçümlerine dayanır, ancak IDOT üretim sırasında ek olarak HWTT testleri de gerektirebilir. Son birkaç yılda IDOT hem karışım tasarım onayı hem de üretim başlangıcı için HWTT ve I-FIT testleri ile 100'den fazla BMD saha projesini tamamlamıştır. IDOT şu anda, plentte üretilen karışımların ve finişerin arkasından numuneler alınıp her gün hem tekrar ısıtılmış hem de uzun süreli yaşlandırılmış tesis karışımları üzerinde I-FIT testleri yapıldığı bilinmektedir.

Louisiana Ulaştırma ve Kalkınma Departmanı (Louisiana Department of Transportation and Development - LaDOTD), BMD'yi 2015'in sonlarına doğru uygulamaya başlamıştır. LaDOTD'nin mevcut yönetmelikleri, yüzey ve bağlayıcı tabakalar dahil tüm asfalt karışımları için Hacimsel Tasarımın Performans Doğrulaması yaklaşımını gerektirmektedir. Karışım tasarımının hem hacimsel hem de performans testi gereksinimlerini karşılaması gereklidir. HWTT, LaDOTD tarafından gerçekleştirilirken, Yarı Dairesel Eğilme- Kritik Şekil Değiştirme Serbestliği (Semi-Circular Bend-Critical Strain Release - SCB-Jc) testi Louisiana Ulaştırma Araştırma Konseyi tarafından gerçekleştirilmektedir.

Missouri Ulaştırma Departmanı (Missouri Department of Transportation - MoDOT), 2019 yılında BMD kapsamında "Superpave Performans Testleri ve Artırılmış Yoğunluk" başlıklı özel bir çalışma prensibi geliştirmiştir. Bu özel prensip, Performansa Modifiye Edilmiş Hacimsel Tasarım) yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır. Bu yaklaşımda, özellikle yol yapısının ana taşıyıcı tabakası olarak görev yapan asfalt temel tabakasında kullanılan karışımlar için bazı geleneksel hacimsel gereklilikler gevşetilmiş veya tamamen kaldırılmıştır. Böylece, performansa dayalı değerlendirme esas alınarak daha esnek tasarım kriterleri benimsenmiştir.

Tekerlek izi ve çatlama direncinin değerlendirilmesi amacıyla sırasıyla HWTT ve I-FIT kullanılmaktadır. HWTT, AASHTO T 324 standardına uygun şekilde ve 50°C sıcaklıkta uygulanmaktadır. MoDOT tarafından BMD spesifikasyonlarını geliştirmek üzere, Missouri ve Orta Batı bölgesinde halen incelenmekte olan üç farklı çatlama testini (DCT, I-FIT ve

IDEAL) içeren yeni bir değerlendirme yaklaşımı benimsenmiştir (Buttlar vd., 2020).

Oklahoma Ulaştırma Departmanı (Oklahoma Department of Transportation-ODOT), BMD'nin uygulanması için 2017'de geçilmeye başlanılmıştır. ODOT Denge Karışım Tasarımı gereksinimleri ve Performans Modifiye Edilmiş Hacimsel Tasarım yaklaşımları kullanılır ve bu yaklaşımlar Superpave asfalt karışımlarının tasarımı ve üretimi için kullanılır. Ancak hacimsel gereksinimleri karşılamak zorunda değildir. Kullanılan karışım performans testleri, AASHTO T 324'e göre HWTT ve ASTM D 8225'e göre Illinois Eyalet Ulaştırma Departmanı Asfalt Beton Çekme (Illinois Department of Transportation Asphalt Concrete Tensile Test-IDEAL-CT) testleridir. Her iki test de sıkıştırmadan önce 135°C'de dört saat kısa süreli koşullandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilir (AASHTO R 30'a göre). ODOT, 2019 ve 2020 yıllarında dört BMD pilot projesini tamamlamıştır.

Tennessee Ulaştırma Departmanı (Tennessee Department of Transportation - TDOT), BMD uygulamasına geçme kararı almış ve 2020 yılında "Asfalt Karışımlarının Performansa Dayalı Karışım Tasarımı"na yönelik bir taslak hazırlamaya başlamıştır. Bu taslak, yüklenicilerin asfalt karışımlarını, geleneksel hacimsel gerekliliklere bağlı kalmadan, doğrudan performansa dayalı bir yaklaşımla tasarlamalarına olanak tanımaktadır.

Tasarım onayı sürecinde beklenen performans testleri HWTT (AASHTO T 324) ve IDEAL-CT testleri (ASTM D8225) olacaktır. HWTT testi 50°C'de gerçekleştirilirken, IDEAL-CT testi ise 135°C'de dört saatlik kısa süreli koşullandırma (AASHTO R 30) sonrasında kompakte edilen numuneler üzerinde uygulanacaktır. Ancak, HWTT için numune hazırlama (koşullandırma) prosedürü henüz kesinleşmemiştir.

Performans testlerinden beklenen kriterler, yolun sınıfına ve kullanım koşullarına göre farklılık gösterecektir. TDOT, BMD ile üretilen asfalt karışımlarının üretim kabul sürecine ilişkin nihai kararını henüz vermemiştir. İki alternatif üzerinde durulmaktadır: Birinci seçenek, üretim kabulünü bağlayıcı oranı ve agrega gradasyonu gibi karışım bileşenlerine dayandırmaktır. İkinci seçenek ise üretim kabulünü, hem hacimsel özellikler hem de performans testi sonuçlarına göre değerlendirmektir. Bu ikinci yöntemde, üretim sırasında karışımlar üzerinde düzenli olarak IDEAL-CT testine ek olarak, HWTT yerine geçebilecek rutin bir testin (örneğin, Dolaylı Çekme Testi veya Yüksek Sıcaklıkta Dolaylı Çekme Testi -

HT-IDT) uygulanması planlanmaktadır.

Tekras Ulaştırma Departmanı (Texas Department of Transportation - TxDOT), karışım performans testlerinin karışım tasarım onayında kullanılması için uzun bir geçmişe sahiptir ve BMD'yi uygulayan ilk 6 Ulaştırma Departmanı'ndan biridir. BDM yaklaşımı, tüm yüzey karışımlarının mevcut hacimsel gereksinimleri ve performans testi gereksinimlerini karşılamasını gerektirmektedir. TxDOT, 2019, 2020 ve 2021 yıllarında en son BMD standartlarını kullanarak 12 saha projesi inşa etmiştir. Her proje, bir hacimsel kontrol bölümü ve en az bir veya iki BMD bölümü içerecek şekilde birden fazla test bölümüne içermektedir. Ekim 2020 itibarıyla, TxDOT Atlanta, San Antonio ve Yoakum bölgelerinde dört adet projeyi tamamlamıştır.

Vermont Ulaştırma Ajansı (Vermont Agency of Transportation - VTrans), 2019 yılında BMD kapsamında, “Superpave Bitümlü Beton Kaplaması – Performansa Dayalı Tasarım Yöntemi” başlıklı özel bir teknik şartname geliştirmiştir. Bu şartname, özellikle "Superpave Type IVS" tipi asfalt karışımları için hazırlanmıştır. Type IVS, maksimum agrega boyutu 9.5 mm olan ve daha ince taneli yapısıyla ince tabakalar veya aşınma tabakaları için uygun olan Superpave sınıfı asfalt karışımlarını ifade eder. Bu zel şartnameye göre, karışım tasarımı hem geleneksel Superpave hacimsel gerekliliklerini hem de performans test kriterlerini karşılamalıdır. Son olarak VTrans, 2018 ve 2019'da 8 saha projesi ve 2020'de 2 pilot proje tamamlamıştır (Yin ve West, 2021).

Tablo 3.3'te, şekil 3.4'teki 11 eyalet için uygulanabilir karışım türü, seçilen tekerlek izi ve çatlama testleri ve üretim kabulü için performans testi kullanımı ek bilgilerini göstermektedir.

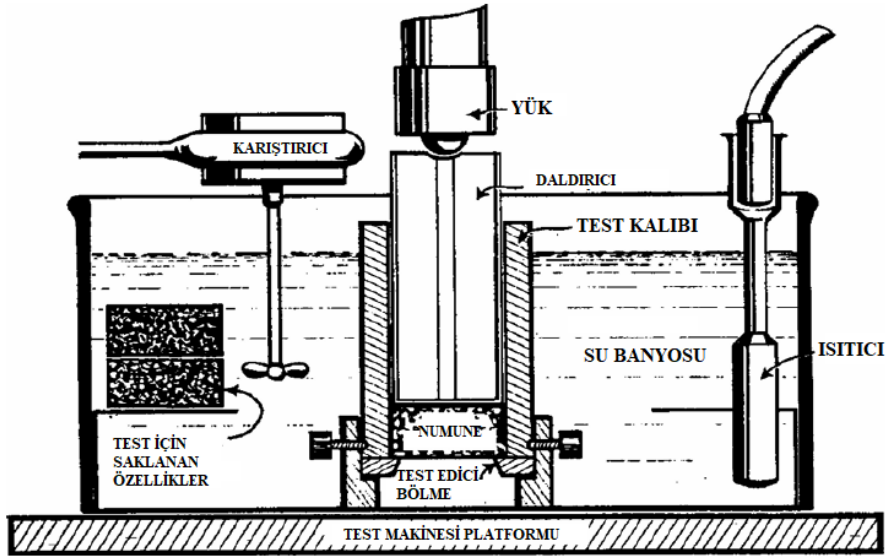
Tablo 3.3: ABD’deki eyalet bazında BMD uygulamasına ilişkin durumun özeti

BMD Yaklaşımları	Eyalet	Uygulanabilir Karışım Tipi	Tekerlek izi	Çatlama	Performans Testi Üretim Kabulü
Yaklaşım A	Illinois	Yüksek ESAL karışımları	HWTT	I-FIT	Evet
	Louisiana	Aşınma ve bağlayıcı madde karışımları	HWTT	SCB-Jc	Evet
	New Jersey	Özel karışımlar	NE	OT, BBF	Evet
	Teksas	Yüzey karışımları	HWTT	OT, IDEAL-CT	Evet
	Vermont	Superpave tipi karışımlar	HWTT	I-FIT	Evet
Yaklaşım A ve D	Virjina	Yüzey karışımları	NE	Cantabro, IDEAL-CT	Evet
Yaklaşım C	Kaliforniya	Uzun ömürlü kaplama karışımları	FN, HWTT	BBF, I-FIT	Evet
	Missouri	Ana hat kaplama karışımları	HWTT	I-FIT, IDEAL-CT	Evet
	Oklahoma	Superpave tipi karışımlar	HWTT	IDEAL-CT	Hayır
Yaklaşım D	Alabama	Superpave tipi karışımlar	HT-IDT	AL-CT	Evet
	Tennessee	Tüm karışımlar	HWTT	IDEAL-CT	Belirlenecek

3.2 Hubbard-Field Metodu

1920’lerde, yol kaplamalarının karışım tasarımında "Hubbard-Field Yöntemi" olarak bilinen yöntem ortaya çıkmıştır. Bu yöntemle ilgili bilgiler sınırlı ve belgelenmemiştir. Ayrıca, Charles Hubbard ve Frederick Field’in biyografileri de çok az bilinmektedir. Ancak, bu isimlerin bitümlü karışım çalışmalarında derinlemesine araştırmalar yaptıkları ve kaplamaların stabilitesine özel önem verdikleri bilinmektedir. Yöntemin aşağıdaki aşamalardan oluştuğu düşünülmektedir:

1. Hubbard-Field stabilite testi: Numunelerin stabilitesi ile ilgili verileri elde etmek için, üzerine yük uygulanan her bir numune, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi çapı 1,75 inç ($\approx 4,45$ cm) olan, numune çapından daha küçük bir açıklıktan geçirilerek numunenin deformasyona uğraması sağlanır. Maksimum yük kaydedilerek stabilite ölçümü yapılır.



Şekil 3.7: Hubbard-Field'e göre stabilite test ekipmanı

2. Numune hazırlığı: Farklı bağlayıcı içeriklerine sahip çok sayıda silindirik numune hazırlanır. Numuneler 2 inç ($\approx 50,8$ mm) çapında olup su banyosunda sıkıştırma sıcaklığına kadar ısıtılır.
3. Numunelerin sıkıştırılması: Her bir ısıtılmış numune test kalıbına yerleştirilir ve tekrar sıcak suya daldırılır, ardından numune, dakikada 2,4 inç ($\approx 60,96$ mm) hızında bir yük uygulanarak sıkıştırılır.
4. Ortalama stabilitenin hesaplanması: Tüm numuneler test edildikten sonra her bir bitüm oranı için ortalama stabilite hesaplanır.
5. Optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi: Ortalama stabilitenin bitüm içeriğine göre bir grafiği çizilerek, en uygun bağlayıcı miktarının ne olduğu belirlenir.

Hubbard-Field Yöntemi, yol kaplamalarının dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü artırmak için yeni yaklaşımlar sunarak karışım tasarımı alanında önemli bir adımı temsil etmiştir. Hubbard ve Field'in katkılarının, karışım tasarımının sonraki yöntemlerinin gelişimini etkilemiş olması mümkündür. Ancak bu konuda doğrudan belgeler ve tanıklıklar sınırlıdır. Bununla birlikte, yol kaplamalarının kalitesini artırma konusundaki çabaları, altyapı mühendisliği tarihinin önemli bir bölümü olarak kalmaya devam etmektedir.

3.3 Smith Üç Eksenli (Triaxial) Tasarım Yöntemi

Smith üç eksenli tasarım yönteminin en önemli avantajı, belirli bir karışımın ölçülen kayma

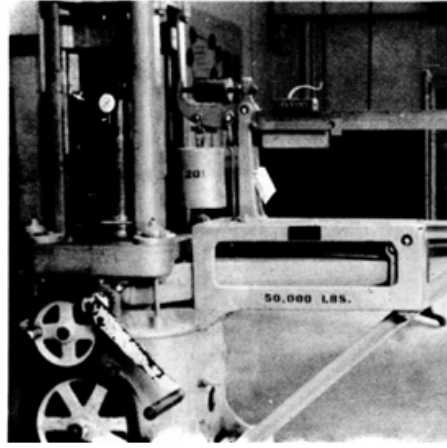
dayanımı parametrelerini tanımlamak için yalnızca bir numune kullanılmasıdır. Ayrıca, bitümlü karışımnumunesinin dayanması gereken en ağır basınç koşullarına maruz bırakıldığı statik yükleme, yüksek sıcaklıkta test yapmaya gerek kalmadan bağlayıcının viskoz direncini azaltır. Günümüzde, Smith triaxial yöntemi ağırlıklı olarak bir araştırma aracı olarak kullanılmaktadır.

Bitümlü karışımların değerlendirilmesinde triaxial test kullanırken karşılaşılan ana sorunlardan biri, yöntemin oldukça esnek olduğu, bu nedenle kabul edilebilir bir standart prosedür olmayışıdır. Hatta sonuçların tartışılmasında ortak bir terminoloji bile mevcut değildir. Bahsedilen her test prosedürünün kendine özgü yararları vardır ve her yöntemin, bitümlü karışımların tasarımı ve değerlendirilmesinde başarılı kullanım geçmişi bulunmaktadır. Ancak, bitümlü karışımların doğası gereği, hangi test yöntemi kullanılırsa kullanılsın dikkate alınması gereken çok sayıda değişkeni kapsayacak kabul edilebilir ve teorik olarak sağlam bir kırılma teorisi geliştirilmesi mümkün olmamıştır.

Triaxial test yönteminin avantajları (saha koşullarına benzer yükleme, sonuçların statik olarak belirlenmiş analiz yöntemi, deneyimle ilişkilendirilme geçmişi, belirli değişkenlerin kolayca ayarlanabilmesi vb.) göz önüne alındığında, bu yöntemin karışım tasarımında daha sağlam bir temel oluşturulması için daha kapsamlı araştırmalar yapılması oldukça muhtemel görünmektedir. Bitümlü karışımların, farklı yol yükleme koşullarında kayma direncini tanımlayacak bir prosedür oluşturulmasına ve test değişkenlerinin ayrılması ve değerlendirilmesine yönelik net bir ihtiyaç vardır (Goetz ve Schaub, 1959).

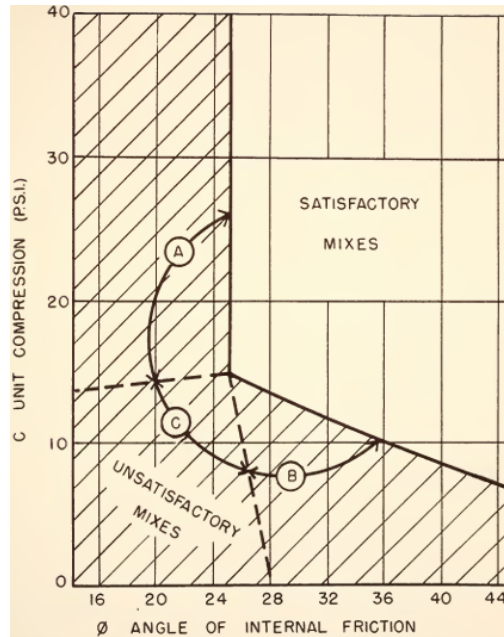
Bu test yönteminin avantajları şunlardır:

- Test, kayma dayanımı hesaplamalarında kullanılabilecek karşılaştırmalı içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri verir. Şekil 3.8’te görülen test sistemi nispeten basit ve ulaşılabilir.



Şekil 3.8: Smith üç eksenli test hücresi ve yükleme sistemi

Smith triaxial tasarım yönteminde, $75 \pm 2^\circ\text{F}$ (25°C) test sıcaklığında eksenel yük kademeli olarak uygulanır. Yük kademeleri arasındaki zaman aralığı değişiklik gösterebilir; her kademe, dikey deformasyon dakikada 0,001 inçten ($\approx 0,0254$ mm) az olana kadar sabit tutulur. Bu yük uygulama prosedürü, bağlayıcının viskoz direncini önemsiz bir seviyeye düşürme eğilimindedir. Her yük kademesi, çevreleyen sıvı basıncıyla dengeye ulaştığında, çevre sıvısında oluşan basınç, toplam eksenel basınca karşılık gelen yatay basınç olarak kaydedilir. Test, Şekil 3.9'da gösterilen P eğrisini çizmek için yeterli nokta elde edilene kadar devam eder. Aynı şekil kullanılarak belirtilen prosedürle "c" (kohezyon) ve " ϕ " (sürtünme açısı) değerlerini hesaplamak için işlemler yapılır.

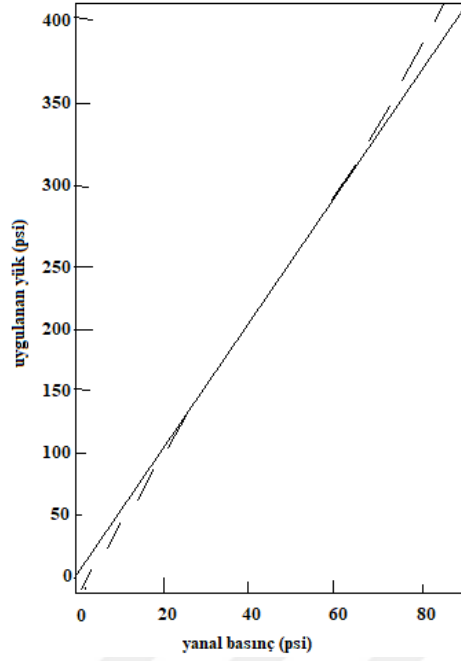


Şekil 3.9: Asfalt betonunun üç eksenli test değerlendirmeleri

Karışımı değerlendirmek için test verilerinin kullanımı, kayma dayanımı parametrelerinin uygun ve uygunsuz kombinasyonlarını gösteren bir tasarım grafiği ile yapılır. Şekil 3.9'daki grafik performansı yeterli olan karışımlara ait olan, geçmişte başarılı performans gösteren karışımların incelenmesi ile geliştirilmiştir. Grafikteki uygunsuz alanlar ise, "c" ve "φ" değerlerinin birinin veya her ikisinin yeterli büyüklükte olmadığı alt alanlara ayrılmıştır.

Bu yöntemin aşamaları ve kısa bir özeti aşağıda verilmiştir:

- Numune hazırlığı aşamasında, farklı elenmiş agrega fraksiyonları tartılarak belirlenen oranlarda birleştirilir. Her numune için toplam agrega miktarı sabit tutulurken, bitüm içeriği farklı oranlarda değiştirilir. Agregalar ve 85-100 penetrasyon derecesine sahip bitüm, yaklaşık 148 °C (300 °F) sıcaklığa kadar ısıtılır. Daha sonra karışım, mekanik bir karıştırıcıda 2 dakika boyunca homojen bir şekilde karıştırılır. Bu karıştırma süresi sabit tutulur.
- Hazırlanan karışım, 203,2 mm (8 inç) çapında ve 300 mm yüksekliğinde silindirik kalıplara yerleştirilir. Numuneler, yaklaşık eşit kalınlıkta altı katman halinde hazırlanır. Her katman, 500 psi (3,45 mPa) basınç altında sıkıştırılır. Bu işlem, Hveem stabilite testinde kullanılan sıkıştırma yöntemine benzer şekilde uygulanır. Triaxial numuneler, yaklaşık üç kat daha fazla kütleye sahip oldukları için toplamda 450 kez 500 psi basınç uygulanır. Sıkıştırma sırasında, numune sıcaklığının 115 °C'nin (240 °F) üzerinde kalması sağlanır. Bu amaçla, kalıplar ve sıkıştırma ayağı önceden ısıtılır. Sıkıştırma işleminin ardından numuneler soğutulur, kalıplardan çıkarılır ve özel tutucularda 48 saat boyunca kürlenmeye bırakılır.
- Kür işlemi tamamlanan numuneler, 25 ± 1 °C (77 ± 2 °F) sıcaklıkta üç eksenli basınç hücresine yerleştirilerek teste tabi tutulur. Bu deney, kapalı sistem içinde, dikey yüklerin kademeli olarak uygulandığı bir üç eksenli basınç testidir. Deney sırasında elde edilen dikey ve yatay gerilme değerleri kullanılarak bir gerilme-gerinim eğrisi (Şekil 3.10) oluşturulur. Bu eğriye çizilen teğet doğrultusunda içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri hesaplanır. Böylece, üç eksenli test aracılığıyla, bitümlü karışımın yük altındaki dayanım özelliklerine katkıda bulunan sürtünme ve kohezyon bileşenleri belirlenmiş olur (Tons ve Henault, 1962).



Şekil 3.10: Kohezyon ve sürtünme değerlerinin elde edildiği üç eksenli test eğrisinin bir örneği

3.4 Texas Döner Sıkıştırıcısı (Texas Gyrotory Compactor-TGC)

1940 ile 1960 arasındaki dönemde, malzemeler ve karışım tasarımı alanındaki gelişmeler, II. Dünya Savaşı ve asfalt malzemelerinin hızlı kullanım artışı ile şekillenmiştir. 1950'lerin sonlarına gelindiğinde, Bruce Marshall ve Francis Hveem'in karışım tasarımı yöntemleri en yaygın kullanılan yöntemler haline gelmiştir. Diğer prosedürler yerel düzeyde benimsenmiştir. Bunlar arasında Hubbard-Field yöntemi, Smith Triaxial Yöntemi ve Texas gyrotory yöntemi yer almaktadır. Her biri, kendine has numune sıkıştırma yöntemini kullanıyordu.

1939 yılında, Texas Karayolu Departmanı asfalt karışımlarının tasarımı ve kontrolü üzerine araştırmalara başladı. Önceki deneme-yanılma yöntemleri, karışımın görünüşüne ve hissine dayanıyordu. Laboratuvar sıkıştırma yöntemleri için aşağıdaki kriterler belirlenmiştir:

- Yöntem hem karışımın tasarımında hem de sahada kontrolüne uyumlu olmalıdır.
- Bitmiş kaplamada elde edilenle hemen hemen aynı yoğunluğu veya boşluk oranını elde etmelidir. Çünkü kaplamanın ömrü dikkate alındığında, yoğunluğun zamanla ve trafikle arttığı bilinmektedir. Bu nedenle herhangi bir sıkıştırma prosedürü ile elde

edilmesi gereken yoğunluk, yoldaki zaman içinde kaplama üzerinde elde edilecek yoğunluğa yakın olmalıdır.

- Agregalar, saha sıkıştırma yöntemleri altında bozulacağı için, sıkıştırma yönteminin üçüncü gereksinimi, saha koşullarında elde edilen agrega bozulmasını olabildiğince yakın bir şekilde taklit etmektir.

1946 yılında, Texas Karayolu Departmanı Texas döner presinin kullanımını standartlaştırarak, standartlar ve test yöntemlerinde yer aldı (Harman vd., 2002). Şekil 3.11’de, Texas döner sıkıştırıcısını göstermektedir.



Şekil 3.11: Texas döner sıkıştırıcı

Superpave HMA karışım tasarımı ve analiz protokollerinin kabulünden önce, Colorado Ulaştırma Departmanı, HMA karışımlarının optimum bitüm içeriğini belirlemek için TGC kullanıyordu. Bu karışımlar, nispeten düşük hava boşluğu seviyelerinde (%3 ile 4) tasarlanmış olmalarına rağmen oldukça iyi çatlama direnci göstermiştir. Veriler, daha yüksek bitüm içeriklerinin gerekliliğini desteklemiştir.

Superpave Döner Sıkıştırıcısı (Superpave Gyratory Compactor-SGC), TGC'nin temel mekanik prensiplerine dayanarak geliştirilmiş olsa da, iki cihaz arasında önemli farklar bulunmaktadır:

- SGC, 2 inç (1,5 inç nominal maksimum boyut)($\approx 50,8$ mm) kadar agrega parçalarını barındırabilen daha büyük numuneler üretir.

- Numune yüksekliğini ölçerek ve sıkıştırma süreci sırasında yoğunluğu tahmin ederek, karışımların işlenebilirliğini değerlendirebilir.
- SGC'deki yoğunluk ve dönme sayısı karşılaştırması, hava boşluğu seviyelerini hızla düşüren zayıf agrega yapılarını tespit etmeye yardımcı olabilir (yani, potansiyel olarak çatlama eğiliminde olan ve/veya hassas karışımlar).
- SGC, kullanıcı hatalarına daha yatkın olan TGC'ye göre daha az manuel müdahale gerektirir. Bu da optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi sırasında tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirliği olumlu etkileyebilir.
- SGC'nin dönme açısının ($1,25^\circ$) sabitlenmesi, TGC tarafından üretilen numunelere benzer numuneler üretebilmesini olağan dışı bırakmıştır. Çünkü SGC'nin daha düşük açısı, her dönmede numuneye daha az mekanik enerji iletilmesini sağlar. Farklı dönme açıları, agregaların yerleşim yönelimlerini, özellikle büyük agregaları farklı şekilde etkiler (Button vd., 2004).

3.5 Hveem Karışım Tasarım Yöntemi

Hveem yöntemi ile asfalt karışım tasarımı kavramları, 1930'larda Caltrans'ın eski Malzeme ve Araştırma Mühendisi Francis N. Hveem'in tarafından geliştirilmiştir. Hveem yöntemi, belirli özelliklerin iyileştirilmesi ve bazı özelliklerin eklenmesi ile yıllar içinde modifiye edilmiştir. Test prosedürleri ve uygulamaları, asfalt karayolu tasarımları üzerine yapılan kapsamlı araştırmalar ve çalışmalar neticesinde geliştirilmiştir.

1920'li yıllarda Kaliforniya Karayolları İdaresi, kırsal kesimlerde yaygın olarak "petrol karışımı" olarak adlandırılan bitümlü agrega karışımlarını kullanmaya başlamıştır. Bu karışım, bitüm ve agreganın ya bir karayolu şantiyesinde ya da üretim tesisinde bir araya getirilmesiyle oluşmakta, daha sonra yol üzerine serilerek trafik etkisiyle doğal olarak sıkışmaktadır.

Bu dönemde Francis N. Hveem, hem kendi gözlemleri hem de diğer araştırmacıların bulgularına dayanarak, karışıma eklenmesi gereken optimum bitüm miktarını belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, karışımdaki agregaların tonajı (toplam kütlesi) ve gradasyonuna göre tahmin edilebilen yüzey alanı üzerinden hareket etmektedir. Çünkü agrega yüzey alanı arttıkça, o yüzeyi kaplamak için gereken bitüm miktarı da artar. Ancak Hveem'in

alışmaları sadece bitüm miktarıyla sınırlı kalmamıştır. Araştırmalar sonucunda, bitüm içeriği uygun olsa bile bazı karışımların trafik yükü altında aşırı deformasyona uğradığı, bazılarının ise daha dayanıklı ve stabil kaldığı tespit edilmiştir. Bu farklılığın, agregaların yüzey dokusundan kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Sert ve camsı dokuya sahip agregalarla yapılan yollar, zamanla yüksek deformasyon göstermiştir. Buna karşılık, pürüzlü ve düzensiz yüzey dokusuna sahip agregalarla yapılan karışımların, yapısal olarak daha kararlı olduğu görülmüştür. Bu bulgulardan yola çıkan Hveem, asfalt karışımlarının dayanımını ölçmek amacıyla Hveem Stabilometresi adı verilen bir cihaz geliştirmiştir. Ancak laboratuvar ortamında bu cihazla hazırlanan sıkıştırılmış numunelerin, sahada trafik yüküyle sıkışan örneklerle aynı sonuçları vermediği fark edilmiştir. Bu nedenle, sahadaki sıkıştırma koşullarını laboratuvar ortamında daha iyi taklit edebilmek adına California Yoğurma Kompaktörü geliştirilmiştir. Bu cihaz sayesinde, sahada silindirlerin oluşturduğu sıkışma etkisine daha yakın kompaksiyon düzeyine ulaşılmış ve daha temsil edici sonuçlar elde edilmiştir.

Hveem karışım tasarım yöntemi, sıcak iklimlerin ve çöl alanlarının yaygın olduğu ülkelerde kullanılmaktadır. Bu yöntem özellikle tekerlek izine direnç gösteren karışım tasarımları için oldukça kullanışlıdır. Hveem'in karışım tasarım felsefesi, agrega tarafından absorbe edilen bitümü karşılamak ve agregaların yüzeyinde minimum bitüm film kalınlığını sağlayabilmek için gerekli optimum bitüm içeriğini belirlemeye dayanmaktadır. Hveem yöntemi, hazırlanmış bir karışım numunesindeki agrega yapısının stabilitesini Marshall yönteminden daha iyi test eder. Yapılan çalışmalarda Hveem yöntemiyle belirlenen optimum bağlayıcı içeriği, Marshall yöntemiyle belirlenen optimum içerikten daha düşük çıktığı görülmüştür. Marshall karışımlarıyla karşılaştırıldığında Hveem kaplamalarının daha düşük bitüm içeriğine sahip olduğu böylelikle yorulma çatlamasının büyük bir endişe kaynağı olacağı söylenebilir. Bu nedenle tasarım bitüm içeriği, izin verilen minimum stabilitenin altına düşmeden en yüksek dayanıklılığı sağlayan bitüm içeriği olarak seçilir. Başka bir deyişle, minimum stabilite gereklilikleri karşılanırken mümkün olduğu kadar çok bitümlü bağlayıcı kullanılmalıdır (URL-4, t.y.).

Hveem yöntemi test prosedürleri, Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Resmi Yetkilileri Derneği (American Association of State Highway and Transportation Officials-AASHTO) ve

Amerikan Malzeme ve Test Derneği (American Society for Testing and Materials-ASTM) tarafından standartlaştırılmıştır. Test prosedürleri, ASTM D1560 "Asfalt Karışımlarının Deformasyona ve Kohezyona Direncinin Hveem Cihazı ile Belirlenmesi" ve ASTM D1561 "California Kneading Compactor ile Asfalt Karışımı Test Örneklerinin Hazırlanması" belgelerinde bulunmaktadır.

Hveem karışım tasarımı, karışımın başlangıç bitüm gereksinimlerini tahmin etmek için agregalar üzerinde yüzey kapasitesi ve Santrifüj Gazyağı Eşdeğeri (Centrifuge Kerosine Equivalent-CKE) testi, stabilometre vekohezyometre testi, şişme testi ve sıkıştırılmış karışım tasarımı numuneleri üzerinde yoğunluk boşluk analizlerini içermektedir. Stabilometre testi, 60°C (140°F)'de sıkıştırılmış karışımın dikey yük altında yan kaymaya karşı direncini ölçen özel bir üç eksenli test hücresi kullanılarak gerçekleştirilir. Şişme testi ise oda sıcaklığında karışımın su etkisine karşı direncini belirlemek için yapılmaktadır.

3.5.1 CKE Yöntemi ile Optimum Bitüm İçeriğinin Tahmini

Hveem yönteminde karışım tasarımının ilk adımı, yaklaşık bitüm içeriğinin tahmin edilmesidir. Bu tahmin, geçmiş deneyimlere veya CKE testi gibi yöntemlere dayanarak yapılır. CKE testi, ince agregaların bitümlü bağlayıcıyı emme kapasitesini belirlemek amacıyla uygulanır. İnce agregaya önce tartılır, gaz yağı ile doyurulur ve ardından santrifüjlenerek tekrar tartılır. Elde edilen ağırlık farkı, bağlayıcının ne kadar emilebileceğini gösterir.

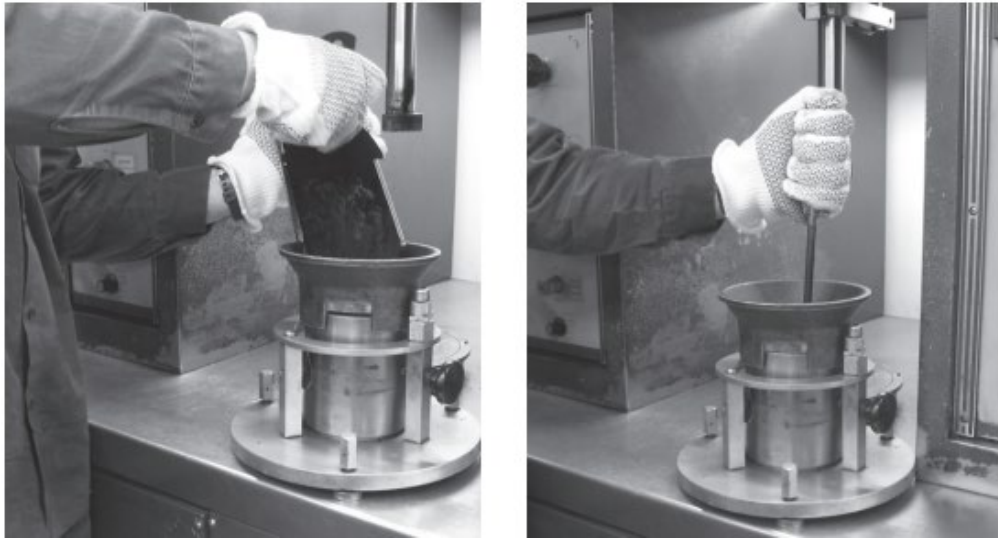
Benzer şekilde, iri agregaya için de yağ tutma kapasitesi belirlenir. Kaba agregaya gaz yağına batırıldıktan sonra fırınlanır ve ağırlık farkı hesaplanarak bağlayıcı emilim yeteneği tahmin edilir.

Her iki test sonucundan elde edilen değerler, belirli yüzey sabitleri (K_f , K_c ve K_m) aracılığıyla değerlendirilir. Bu sabitler yardımıyla agregaya karışımının bağlayıcı ihtiyacı tahmin edilir. Son olarak, bu değerler yüzey alanı ve özgül ağırlık gibi parametreler dikkate alınarak yaklaşık optimum bitüm içeriği hesaplanır. Bu işlem, kullanılan bitüm türünün özelliklerine göre gerekli düzeltmeler yapılarak tamamlanır.

3.5.2 Test Numunesi Hazırlanması

Hveem yöntemine göre bir asfalt karışımı tasarlarken, CKE prosedürü ile belirlenen yaklaşık tasarım bitüm içeriğinin altında ve üstünde 63,5 mm (2 ½ inç) yükseklik ve 101,6 mm (4 inç) çapında bir dizi stabilometre test numunesi hazırlanır. Numuneler, Kaliforniya yoğurma kompaktörü aracılığıyla AASHTO T 247 ve ASTM D 1561 standartları çerçevesinde hazırlanır.

Test numunelerinin hazırlanmasında, belirlenen gradasyona göre kuru agregalar ve bitüm ayrı ayrı uygun sıcaklıklarda ısıtılır. Daha sonra bitüm, ısıtılmış agregalarla homojen şekilde karıştırılır. Karışım, belirli bir süre fırında dinlendirilir ve ardından yeniden ısıtılarak sıkıştırma işlemi için hazır hale getirilir. Şekil 3.12’de bu işlemin görseli verilmiştir.



Şekil 3.12: Karışımın kaba aktarılması ve ardından çubuk yardımıyla karıştırılması

Hveem karışım tasarımında kullanılan test numuneleri, Şekil 3.13’te gösterilen Hveem Yoğurma Sıkıştırıcısı (California Yoğurma Kompaktörü) ile hazırlanır. Bu mekanik cihaz, örneği silindirik bir kalıpta yoğurma hareketiyle sıkıştırır. Kompaktörün çalışma prensibi, 101,6 mm (4 inç) çapındaki numunenin yüzeyine, yarım daire dilimi şeklindeki tokmak yüzeyiyle tekrarlı olarak basınç uygulamaktır. Bu hareket, numunenin farklı noktalarına belirli aralıklarla iz bırakarak yoğunlaştırıcı bir sıkıştırma etkisi oluşturur. Her sıkıştırma darbesi yaklaşık 0,4 saniye sürer ve numuneye hidrolik olarak çalışan tokmak ayağıyla 3,45 MPa (500 psi) basınç uygulanır.

Kompaktörün temel parametreleri şu şekildedir: Örnek boyutu 102 mm çapında ve yaklaşık 64 mm yüksekliğinde silindirik yapıdadır. Tokmak (tamper) ayağı, 20 cm² (yaklaşık 3,1 inç²) yüzey alanına sahip kalkan şeklindedir. Sıkıştırma işlemi sırasında numuneye 2,4–3,4 MPa (350–500 psi) aralığında basınç uygulanır ve her numuneye toplamda 150 darbe vurulur. Ayrıca, sıkıştırma öncesinde 1,7 MPa (250 psi) basınçla hazırlık darbeleri de uygulanarak numunenin homojenliğinin artırılması sağlanır (Asphalt Institute, 2014).

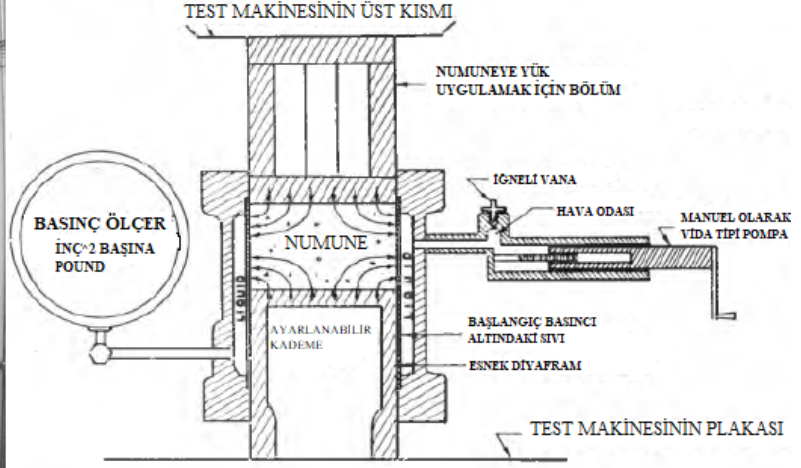


Şekil 3.13: Hveem test numunelerinin hazırlaması için California Yoğurma Kompaktörü

3.5.3 Stabilometre ve Koheziyometre testi

Hveem stabilometresi, Hveem karışım tasarım yöntemi için temel performans tahmin ölçüsünü sağlar. Şekil 3.14’te görülen stabilometre ve şematik taslağı, dikey bir yükün uygulanmasıyla geliştirilen yanal basıncı ölçerek sıkıştırılmış bir HMA numunesinin deformasyona karşı direncini ölçer. Bu yanal basınç iki yönüyle ele alınabilir. Öncelikle, sahadaki kaplamanın bir elemanı üzerindeki gerçekte mevcut olan yan sıkıştırmayı yansıtır ve böylelikle, test sistemini üç eksenli hale dönüştürür.

İkinci işlevi ise, numunenin stabilitesinin bir ölçüsünü sağlamaktır. Yani, numunenin dayanımı ne kadar düşükse, numunenin yanlara doğru deformasyonunun o kadar fazla olacağı; dolayısıyla, yan basıncın o kadar yüksek olacağı ön görülmektedir. Bu prensibi dayanımın bir göstergesi olarak kullanarak, deformasyon değerlerinin ölçülmesine gerek duyulmadan stabilite basitçe yan basıncın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir (Hannan ve Goetz, 1959).



Şekil 3.14: Hveem stabilometre cihazı ve şematik taslağı

Hveem Stabilometre, kapalı sistem üç eksenli bir test olan stabilometre, numunenin tepesine önceden belirlenmiş bir oranda artan bir yük uygular. Yük arttıkça yanıl basınç belirli aralıklarla okunur. Ortaya çıkan stabilometre değeri Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanır:

$$S = \frac{22.2}{\left[\frac{P_k \cdot D}{P_v - P_k} \right] - 0.222} \quad (1)$$

S= Stabilometri Değeri

P_v =Dikey basınç-Tipik olarak 2800 kPa (400psi)

P_k =kPa cinsinden P_v karşılık gelen yatay basınç

D = Numunenin 0,25 mm'lik birimler halinde yer değıştirmesi

Not= Numune yüksekliğı 64 mm değilse stabilometre değerinde düzeltme yapılır.

Stabilometre, uygulanan dik yük nedeniyle örneğın genişlemesinden kaynaklanan yan basıncı ölçer. Uygulanan birim sıkıştırma gerilimi (P_v) ile iletilen yatay basınç (P_k) arasındaki oran, malzemenin deformasyona karşı direnç yeteneğini belirleyen S-değerini hesaplamak için kullanılır. S-değeri 0 ile 100 arasında değışir; daha yüksek değerler daha yüksek direnç anlamına gelir. Hveem sıkıştırılmış asfalt karışım örnekleri için tipik S-değeri minimum 35'tir.

Bu denklemlle stabilometre değeri 0 ila 90 arasında değışebilir. Sıfır, yanıl basıncın dikey basınca (örneğin bir sıvı) eşit olduğı bir durumu temsil eder. Doksan, dikey basınç ne olursa

olsun (örneğin sıkıştırılmaz bir katı) yanal basıncın olmadığı bir durumu temsil eder. Tablo 3.4 tipik stabilometre kriterlerini göstermektedir.

Tablo 3.4: Tipik stabilometre kriterleri

Karıştırma Kriterleri	Hafif Trafik (ESAL<10 ⁴)	Orta Trafik (ESAL=10 ⁴ ila 10 ⁶ arası)	Yoğun Trafik (ESAL>10 ⁶)
Stabilometre Değeri	30	35	37
Hava Boşlukları	Yaklaşık %4		

Hveem yönteminde kullanılan stabilometre cihazı, test numunesine uygulanan dik yük altında oluşan yan basıncı ölçerek asfalt karışımının deformasyona karşı direncini değerlendirir. Bu direnç, uygulanan birim sıkıştırma geriliminin, iletilen yan basınca oranı olarak ifade edilir ve karışımın stabilitesi hakkında önemli bilgiler sunar.

Test öncesinde, laboratuvarında kompakt hale getirilen numuneler $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta birkaç saat ısıtılarak teste hazırlanır. Stabilometre cihazında çeşitli mekanik ve basınç ayarları yapıldıktan sonra, test örneği cihaza yerleştirilir. Cihaz, önceden belirlenmiş yükler (13,4, 22,3 ve 26,7 kN) altında uygulanan testler sırasında, oluşan yan basınçları manometre üzerinden kaydeder. Bu yüklemeler sonrasında örneğe düşürülen yüklerle birlikte sistem tekrar basınçlandırılır ve 690 kPa değerine kadar sabit bir hızla çevrilen pompa kolu ile deformasyon davranışı izlenir.

Testin sonunda stabilometre manometresi sıfırlanarak numune çıkarılır. Elde edilen sonuçlar, örneğin yüksekliğine göre gerekirse düzeltme faktörleri ile uyarlanır. Bu prosedür, asfalt karışımının stabilite özelliklerini değerlendirmek ve tasarım bitüm içeriği gibi parametreleri optimize etmek için temel bir adımdır.

Şekil 3.15'te gösterilen kohezyometre cihazı, daha önce stabilite testi uygulanmış bir HMA numunesi üzerinde, numune çapı boyunca kohezyon dayanımının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Test, HMA numunesinin trafik yükleri altında agregaların ayrılma davranışına karşı göstereceği direncin tahmin edilmesini hedeflemektedir.



Şekil 3.15: Kohezyometre cihazı

Uygulama yöntemi, numunenin ankastre kiriş şeklinde eğilerek kırılması esasına dayanır. Bu sayede, malzemenin iç yapışma kapasitesi ölçülmektedir. Ancak sıcak karışım asfaltların kohezyon özellikleri genellikle oldukça yüksek olduğundan, numuneler test sırasında çoğunlukla kırılmaya uğramadan testten geçmektedir. Bu durum, yöntemin performans ayırt ediciliğini azaltmakta ve testin uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır.

Yöntem, geçmişte yağlı asfalt karışımları için faydalı sonuçlar vermiştir; ancak HMA’larda yeterli ayırt ediciliği sağlayamaması nedeniyle zamanla kullanım dışı kalmış ve günümüzde nadiren tercih edilen bir test yöntemi haline gelmiştir.

3.5.4 Şişme Testi

Şişme testi (Şekil 3.16), asfalt karışımlarında kullanılan bağlayıcı ve agrega kombinasyonunun suya karşı duyarlılığını belirlemek amacıyla uygulanır. Bu test özellikle, nem etkisiyle hacimsel değişimlere uğrayarak yüzey deformasyonlarına yol açabilecek karışımların tespit edilmesinde kullanılır. Prosedür gereği, daha önce sıkıştırılmış numune oda sıcaklığında bir süre bekletildikten sonra alüminyum bir tavaya yerleştirilir. Üzerine perforasyonlu bir bronz disk konur ve şişme miktarını izlemek amacıyla bir tripod üzerine yerleştirilen hassas bir dial ölçer ile ölçüm yapılır. Numunenin üstüne 500 ml su ilave edilir ve hem dial ölçerden okuma alınır hem de su seviyesinin kalıba olan mesafesi kaydedilir. Numune bu şekilde 24 saat bekletildikten sonra ölçümler tekrarlanır.



Şekil 3.16: Şişme testi

Şişme miktarı, ilk ve son ölçüm değerleri arasındaki fark olarak doğrudan raporlanır. Aynı şekilde, su seviyesindeki değişim de geçirgenlik hakkında fikir verir. Bu test, özellikle suya maruz kalan yol üstyapılarında kullanılacak karışımların güvenilirliğini değerlendirmek açısından büyük önem taşır.

3.5.5 Yoğunluk ve Boşluk Analizi

Hacimsel analizler, stabilometre testlerinden sonra, oda sıcaklığına soğutulan numuneler üzerinde ASTM D1188 veya ASTM D2726 standartları doğrultusunda yapılmaktadır. Tipik olarak iki farklı yoğunluk ölçümü alınır:

- Sıkıştırılmış asfalt karışımının hacimsel özgül ağırlığı (G_{mb}).
- Teorik maksimum özgül ağırlık (G_{mm}).

Bu yoğunluklar daha sonra HMA'nın hacimsel parametrelerini hesaplamak için kullanılır.

Ölçülen boşluk ifadeleri genellikle şunlardır:

- Hava boşlukları (V_a), bazen toplam karışımdaki (VTM) boşluklar olarak ifade edilir.
- Mineral agregata (VMA) içindeki boşluklar
- Asfaltla doldurulmuş boşluklar (VFA)

Genellikle bu değerlerin yerel veya eyalet kriterlerine uygun olması gerekir.

- Sıkıştırılmış asfalt karışımının hacimsel özgül ağırlığı (G_{mb})

Hacimsel özgül ağırlık, belirtilen bir sıcaklıkta geçirgen bir malzemenin (hem geçirgen hem

de geçirimsiz boşluklar dahil) birim hacmindeki havadaki kütlenin, belirtilen bir sıcaklıkta eşit hacimdeki gazsız damıtılmış suyun havadaki (eşit yoğunluktaki) kütlesine oranı olarak ifade edilir. Bu değer, sıkıştırılmış karışımın birim hacmi başına ağırlığını belirlemek için kullanılır. G_{mb} 'yi mümkün olduğunca doğru bir şekilde ölçmek çok önemlidir. Ağırlık ölçümlerini hacimlere dönüştürmek için kullanıldığından, Eşitlik 2'de verilen G_{mb} 'deki küçük hatalar, tespit edilemeyecek önemli hacim hatalarına yansiyacaktır.

- Standart sıkıştırılmış özgül ağırlık testi:
- AASHTO T 166: Doymuş Yüzey Kuru Numuneler Kullanılarak Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sıkıştırılmış Özgül Ağırlığı

$$G_{mb} = \frac{W_d}{W_{SSD} - W_{sub}} \quad (2)$$

W_d : Kuru ağırlık

W_{SSD} : Doymuş yüzey kuru(SSD) ağırlık

W_{sub} : Suyu batırılmış ağırlık

- Bitümlü Kaplama Karışımlarının Teorik Maksimum Özgül Ağırlığı (G_{mm})

Belirli bir sıcaklıkta (genellikle 25 °C) boşluksuz ($V_a = 0$) HMA'nın belirli bir hacminin kütlesinin, aynı sıcaklıktaki gazsız damıtılmış suyun eşit hacimli kütlesine oranı. Ayrıca Rice Özgül Ağırlığı olarak da adlandırılır (test prosedürünü geliştiren James Rice'ın adıyla). G_{mm} 'nin suyun birim ağırlığıyla çarpılması Teorik Maksimum Yoğunluğu verir. Ortaya çıkan özgül ağırlık değeri Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanır:

- Teorik maksimum yoğunluğu testi:
- AASHTO T 209 ve ASTM D 2041: Bitümlü Kaplama Karışımlarının Teorik Maksimum Özgül Ağırlığı ve Yoğunluğu

$$G_{mm} = \frac{W_{agg} + W_b}{V_{eff} + V_b} \quad (3)$$

W_{agg} : Agreganın ağırlığı

W_b : Bitümlü bağlayıcı ağırlığı

V_{eff} : Agreganın etkin hacmi

V_b : Bitümlü bağlayıcı hacmi

- Hava Boşlukları (V_a)

Sıkıştırılmış bir kaplama karışımı boyunca kaplanmış agrega parçacıkları arasındaki küçük hava ceplerinin toplam hacmi, sıkıştırılmış kaplama karışımının hacimsel yüzdesi olarak ifade edilir. Bir karışımındaki hava boşluklarının miktarı son derece önemlidir ve kararlılık ve dayanıklılıkla yakından ilişkilidir. 12,5 mm (0,5 inç) nominal maksimum agrega boyutlarına sahip tipik yoğun dereceli karışımlar için yaklaşık %3'ün altındaki hava boşlukları kararsız bir karışımla sonuçlanırken yaklaşık %8'in üzerindeki hava boşlukları su geçirgen bir karışımla sonuçlanır. Ortaya çıkan hava boşluğu değeri Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanır:

$$V_a = 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \quad (4)$$

Sıkıştırılmış bir kaplama karışımının agrega parçacıkları arasındaki, hava boşluklarını ve etkili asfalt içeriğini içeren taneler arası boşluk hacmi, numunenin toplam hacminin yüzdesi olarak ifade edilir. VMA çok düşük olduğunda, karışımda tek tek agrega parçacıklarını yeterli şekilde kaplamak için yeterli asfalt bağlayıcı eklemek için yeterli alan olmaz. Ayrıca, düşük VMA'ya sahip karışımlar asfalt bağlayıcı içeriğindeki küçük değişikliklere karşı daha hassastır. Aşırı VMA, kabul edilemeyecek kadar düşük bir karışım kararlılığına neden olur. Genellikle, minimum bir VMA belirtilir. Ortaya çıkan taneler arası boşluk hacmi değeri Eşitlik 5 yardımıyla hesaplanır:

$$VMA = \left[1 - \frac{G_{mb} * (1 - P_b)}{G_{sb}} \right] * 100 \quad (5)$$

G_{sb} = Agreganın yığın özgül ağırlığı

P_b = Karışımın ağırlığına göre bitüm içeriği(yüzde)

- Asfaltla Dolu Boşluklar (VFA)

Mineral agregadaki asfalt bağlayıcı içeren boşlukların oranı, etkili asfalt içeriğinin hacmini temsil eder. Ayrıca, asfalt çimentosu ile doldurulan VMA hacminin yüzdesi olarak da tanımlanabilir. VFA, hava boşluklarıyla ters orantılıdır: hava boşlukları azaldıkça, VFA artar. Ortaya çıkan asfalt bağlayıcı içeren boşlukların oranı değeri Eşitlik 6 yardımıyla hesaplanır:

$$VFA = \frac{V_{be}}{V_{be}-V_v} * 100 \quad (6)$$

V_{be} = Efektif bitümlü bağlayıcı hacmi (URL-4, t.y).

3.6 Marshall Tasarım Metodu

Asfalt karışım tasarımında Marshall yöntemi, kaplama inşaatı için agrega ve asfalt malzemelerinin seçilmesi ve oranlanması amacıyla laboratuvarlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. Asfalt karışım tasarımına yönelik bu bütünsel yaklaşım, mineral agrega ve bağlayıcı malzemelerin seçimi için laboratuvar testlerini, deneme numunelerinin hazırlanmasını, hacimsel analizleri, sıkışmış asfalt karışımlarının stabilitesi ve akışı için yük testini içerir. Odak noktası, trafik yüklerinden minimum deformasyonla karışıma maksimum dayanım sağlayacak optimum bitüm içeriğinin belirlenmesidir. Uygun bir karışım, trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyona ve iklim koşullarından kaynaklanan hasarlara karşı direnç gösterecek ve yeterli kayma direncine sahip olacaktır.

Bu tasarım metodunun tarihçesine bakacak olursak; İkinci Dünya Savaşı sırasında, hızla gelişen askeri uçakların trafik ağırlığının ve basıncının artması uygun hava sahalarının hızlı bir şekilde inşa edilmesine ihtiyacı doğurdu. 1943 yılında ABD Ordusu Mühendisler Birliği, çeşitli asfalt karışım tasarımı yöntemlerini değerlendirmeye başladı. 1939'da Mississippi Karayolu Departmanında mühendis olan Bruce Marshall tarafından geliştirilen, aynı zamanda kendi adını taşıyan Marshall karışım tasarım yöntemi, en umut verici yöntem olarak görünmekteydi. Basit, hızlı ve etkili test sonuçları ve kolay ulaşılabilir test ekipmanlarına sahip olması Marshall yöntemi ön plana çıkmıştır. Basit süreci ve ekipmanlarının yaygın kullanımı nedeniyle bu yöntem, birçok eyaletin ulaştırma bakanlığı tarafından kullanılmaktadır. Halen dünyada en yaygın kullanılan üstyapı tasarım sistemidir (URL-5, 2019).

Marshall karışım tasarımıyla ilgili testler, birçok farklı ASTM ve AASHTO test yönteminde belirtilen prosedürlere ve birçok yerel ve bölgesel varyasyona sahiptir. Marshall test prosedürleri, ASTM ve AASHTO tarafından standartlaştırılmıştır:

- ASTM D6926: "Marshall Cihazı Kullanarak Bitümlü Karışımların Hazırlanması";
- ASTM D6927: "Bitümlü Karışımların Marshall Stabilite ve Akış Testi İçin Standart Test Yöntemi";
- AASHTO T 245: "Marshall Cihazı Kullanarak Bitümlü Karışımların Plastik Akışa Direnci."

Marshall karışım tasarımı 6 adımdan oluşmaktadır:

- Agregası seçimi
- Bağlayıcı seçimi
- Numunelerin hazırlanması
- Yoğunluk ve hava boşluğu değerlerinin bulunması
- Marshall stabilite ve akma değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarı tayini

3.6.1. Agregası Seçimi

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agregaların seçiminde, malzemenin üretilebilirliği, maliyeti ve kalitesi dikkate alınır. Agreganın uygun olup olmadığı maksimum dane boyutu ve gradasyonu gibi fiziksel özellikleri dikkate alınarak belirlenir. Agreganın dane şekli, işlenebilirliği, sıkışabilirliği ve stabiliteyi etkiler. Köşeli, kırılmış danelerin kullanımı tercih edilir. Bitümlü karışımlarda yük taşıma kapasitesini etkilerler. Çok pürüzlü yüzeylere sahip agregalar kayma gerilmelerine karşı yüksek direnç gösterirler. Bu, karışımda bitüm absorpsiyonunu ve yüzdesini etkiler. Karışım agregalarında, agrega-bitüm adezyonunu sağlamak için bir miktar gözeneklilik gerekir. Bitümlü kaplamada kullanılacak agregaları, kırılmaya, degradasyona (ince malzemeye dönüşme) su ve don etkisiyle ayrılmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Bitümlü kaplamalarda kullanılan agregalar bitüm ile kaplandıklarında, su etkisi ile soyulma (asfaltın agrega yüzeyinden ayrılması) göstermemelidir. Soyulma dayanımı düşük agregalar bitüme özel katkı maddeleri ilave edilerek kullanılabilir. Agregaların yukarıda belirtilen özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler, özet olarak aşağıda açıklanmaktadır.

- Elek Analizi Deneyi (ASTM C136, ASTM C117)

Deney, agreganın dane boyutu dağılımının bulunması amacıyla yapılır. Deney sonucu bulunan gradasyon, sınıflandırmada gradasyonun şartnameye uygunluğunun kontrolünde ve agrega karışım oranlarının hesabında kullanılır. Deney numunesi, agreganın maksimum dane boyutuna göre aşağıda verilen miktarlarda temsili olarak dörtleme metodu ya da bölgeç ile alınır ve $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklıktaki etüvde ya da havada kurutulur. Kurutulmuş numune tartıldıktan sonra No.200 elekten yıkanır (elek yıpranmasın diye üzerine No.80 ya da No.40 elek yerleştirilir). Yıkanan numune $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde kurutulur.

Malzemenin % 100'ün geçtiği eleklerden başlamak üzere Tablo 3.5'te boyutları verilen elek setindeki alt eleklerden ayrı ayrı elenir. Her elek üzerinde kalanlar toplu olarak tartılır. Tartımlar elek analizi formuna geçilir. Rutubeti giderilmiş numune ağırlığı kullanılarak her elek üzerinde kalan miktarların yüzdesi ve daha sonra % geçen miktarları hesaplanır.

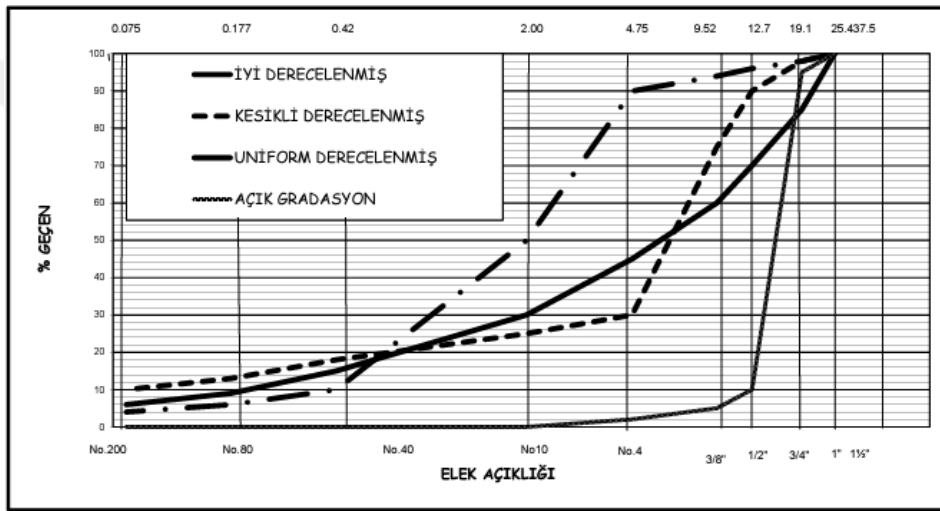
Tablo 3.5: Kullanılan elek açıklıkları

Elek Açıklığı	
mm	İnç
37,5	1 1/2
25,0	1
19,1	3/4
12,7	1/2
9,52	3/8
4,75	No.4
2,00	No.10
0,42	No.40
0,177	No.80
0,075	No.200

Agrega gruplarının yaş metoda göre elek analizinin yapıldıktan ve şantiye sonuçları ile karşılaştırılarak dizayn esas gradasyonların belirlenir. Agregası karışım oranlarının ve karışım gradasyonunun ilgili, şartname gradasyon limitleri içerisinde kalacak şekilde hesaplanır. Agregası özgül ağırlıkları ve briket agregası tartımı için gerekli hesaplar yapılır.

Karışım gradasyonunda hazırlanan agregalar üzerinde kaba ve ince özgül ağırlık deneyleri ile filler zahiri özgül ağırlık deneylerinin yapılır. Daha sonra uygun agrega seçilmeye başlanır.

Bitümlü sıcak karışım tabakalarının yapımında kullanılacak agrega en az üç ayrı dane grubunun (kaba, orta, ince) karışımından oluşmalıdır. Konkasörde, agrega gruplarının kırılmaları, agreganın kullanılacağı tabakanın gradasyonunu sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Üretilen agregalar ile uygun karışım gradasyonunun elde edilip edilmeyeceğini belirlemek için, üretime başlandığı günden, agrega karışım oranlarının hesabının yapılması gereklidir. Üç ya da daha fazla agrega grubunun istenilen şartname gradasyonunu verecek şekilde karıştırılması için gereken oranlar değişik metodlarla belirlenebilmektedir. Laboratuvarlar genellikle deneme-yanılma metodu doğru sonuçlara ulaşılmaktadır. Şekil 3.17’de gibi granülometri eğrisi oluşturulur.



Şekil 3.17: Gradasyon eğrisi

– Los Angeles Aşınma Deneyi (ASTM C131, AASHTO T96, TS EN 1097-2)

Los Angeles aşınma deneyi, darbelenme ve aşındırma etkisiyle agrega danelerinde oluşan aşınmanın bulunmasını sağlar. Bu deneyde dane boyutu 75 mm’den küçük olan iri agregaların Los Angeles aşınma makinesi ile aşınmaya karşı mukavemeti bulunur. Deneyde içi boş, iki ucu kapalı bir silindirik şeklinde olan makine içerisine agrega ile birlikte metal aşındırıcı küreler konularak, makine belirli bir hızla, belirli bir devirde çalıştırılır. Sonuçta, metal kürelerin üzerine düşmesi sonucu aşınan malzemenin deney başında alınan malzemeye göre ağırlıkça yüzdesi aşınma kaybı olarak verilir.

sırasında şantiyeye gelen her parti bitümlü bağlayıcı ile soyulma deneyi yapılmalı ve soyulma mukavemeti artırıcı katkı maddesi gerekip gerekmediği ve gerekli ise oranı doğru olarak belirlenmelidir.

- Özgül Ağırlık ve Absorbsiyon Deneyi(ASTM C127, TS EN 1097-6)

Agreganın özgül ağırlığı, o agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Danenin, hacim tanımlamasına bağlı olarak, üç farklı özgül ağırlık tanımı sözkonusudur:

- Zahiri Özgül Ağırlık (G_{sa}): Belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.
- Hacim Özgül Ağırlığı (G_{sb}): Belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.
- Efektif Özgül Ağırlık (G_{se}): Belirli bir sıcaklıkta agreganın asfalt geçirimli boşlukları hariç geçirimli ve geçirimsiz boşluklarının içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır. Sıkıştırılmış kaplamanın, hava boşluğu hesabında agreganın tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate alınarak bulunan, efektif özgül ağırlık kullanılır. Belirlenen karışım gradasyonuna uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde kaba agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlık, ince agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlık ile absorpsiyonu ve fillerin zahiri özgül ağırlığı deneylerle bulunur. Kaba, ince ve filler malzemenin özgül ağırlıkları kullanılarak, agreganın karışımının özgül ağırlıkları Eşitlik 7 yardımıyla hesaplanır:

$$V_{be} = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%İ}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (7)$$

G_{sb} = Agreganın karışımının hacim özgül ağırlığı

G_{sa} = Karışımının Zahiri özgül ağırlığı

$\%K, \%İ, \%F$ = Agregaların ağırlıkça yüzdeleri

G_{kb}, G_{ib} = Agregaların hacim özgül ağırlıkları

G_{ka}, G_{ia}, G_{fa} = Agregaların Zahiri özgül ağırlıkları

Agrega efektif özgül ağırlık ise iki şekilde belirlenir; birincisi agreganın özgül ağırlıklarından Eşitlik 8'deki hesaplara bulunur:

$$G_{ef} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \quad (8)$$

G_{ef} = Agreganın efektif özgül ağırlığı

İkincisi bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlık deneyi ile bulunur. Beklenen optimum bitüm yüzdesinden hazırlanan karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı (boşluksuz) deneyle belirlenir ve efektif özgül ağırlık Eşitlik 9 yardımıyla hesaplanır:

$$G_{ef} = \frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_t} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (9)$$

D_t = Karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı

W_a = Agreganın yüzdesi olarak bitüm miktarı

G_b = Bitüm özgül ağırlığı (Orhan, 2012).

3.6.2 Bağlayıcı Seçimi

Marshall Yöntemine göre asfalt karışım tasarımı yapılırken, karışımın bağlayıcı içeriğinin doğru belirlenmesi, hem performans hem de dayanıklılık açısından kritik bir adımdır. Optimum bağlayıcı içeriği, karışımın tüm fiziksel ve mekanik özelliklerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı ve hedeflenen boşluk değerlerini sağladığı noktada belirlenir. Bu amaçla, farklı bağlayıcı yüzdeleriyle hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları analiz edilerek değerlendirme yapılır. Asfalt Enstitüsü önerilerine göre, bağlayıcı içeriği genellikle %4 hava boşluğu değerine karşılık gelen noktada seçilir. Bu oran, hava boşluğu sınırlarının ortalamasını temsil eder ve asfalt kaplamaların dayanıklılığı açısından ideal kabul edilir. Ancak yalnızca hava boşluğu değil, karışımın stabilite, akma, VMA ve VFA gibi tüm

kriterleri de eş zamanlı olarak sağlıyor olması gereklidir.

Karışım, belirlenen bağlayıcı içeriğinde tüm tasarım kriterlerini sağlıyorsa, bu içerik "optimum bağlayıcı içeriği" olarak kabul edilir. Ancak bazı özellikler belirlenen limitler dışında kalıyorsa, tasarımda değişikliğe gidilmesi veya bağlayıcı oranında uyarılama yapılması gerekebilir. Özellikle ağır trafik koşullarında kullanılacak karışımlarda, bağlayıcının deformasyona karşı dayanıklı olması büyük önem taşır ve bu nedenle performansa yönelik modifiye bağlayıcıların tercih edilmesi önerilir. Bu kriterler, Tablo 3.6'da detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.6: Marshall yöntemi tasarım kriterleri

Kriter ¹	Hafif Trafik ³ ($< 10^4$ ESAL)		Orta Trafik ³ ($10^4 - 10^6$ ESAL)		Ağır Trafik ³ ($> 10^6$ ESAL)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Sıkıştırma (her uç için darbe sayısı)	35		50		75	
Stabilite ² , N (lb.)	≥ 3336 (750)		≥ 5338 (1200)		≥ 8006 (1800)	
Akma (Flow) ^{2,4,5} , 0.25 mm (0.01 in.)	8	18	8	16	8	14
Hava boşluk oranı (%) ⁶	3	5	3	5	3	5
Asfalt ile dolan boşluk oranı (VFA, %)	70	80	65	78	65	75
Notlar: 1. Bir asfalt kaplama karışımı tasarlanırken sadece stabilite değeri değil, tüm kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. 2. 60°C'de (140°F) test edildiğinde bu kriterleri karşılamayan sıcak karışım asfalt tabakaları, 38°C'de (100°F) test edildiğinde ve yüzeyin 100 mm (4 inç) veya daha altına yerleştirildiğinde kriterleri karşılıyorsa tatmin edicidir. Bu öneri yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nin büyük bölümünde geçerli olanlara benzer iklim koşullarına sahip bölgeler için geçerlidir. Daha aşırı iklim koşullarına sahip bölgelerde farklı bir düşük test sıcaklığı düşünülebilir. 3. Trafik sınıflandırmaları 20 yıllık Tasarım ESAL $< 10^4$ ile sonuçlanan Hafif Trafik koşulları 20 yıllık Tasarım ESAL 10^4 ile 10^6 arasında ile sonuçlanan Orta Trafik koşulları 20 yıllık Tasarım ESAL $> 10^6$ ile sonuçlanan Ağır Trafik koşulları 4. Akış değeri yükün azalmaya başladığı noktayı ifade eder. 5. Akış kriterleri temiz asfaltlar için belirlenmiştir. Polimer modifiyeli veya kauçuk modifiyeli bağlayıcılar kullanıldığında akış kriterleri genellikle aşılr. Bu nedenle, polimer modifiye veya kauçuk modifiye bağlayıcılar kullanıldığında akış kriterlerinin üst sınırından feragat edilmelidir. 6. Yüzde hava boşlukları yüzde 4 olarak hedeflenmelidir. Bu, diğer Marshall kriterlerini karşılamak için gerekirse biraz ayarlanabilir.						

3.6.3 Numunelerin Hazırlanması

Marshall yöntemi ile bir agreganın tasarım bitüm içeriğini belirlerken, test verisi eğrilerinin iyi sonuçlar göstermesi için farklı bitüm içerikleri için bir dizi test numunesi hazırlanır. Testler, bitüm içeriğinde %0,5'lik artışlarla planlanmalı ve beklenen tasarım değerinin en az iki üstünde ve en az iki altında bitüm içerikleri hazırlanır. Yeterli veri sağlamak için, seçilen her bir bitüm içeriği için en az üç test numunesi hazırlanmalıdır. Bu nedenle, beş farklı bitüm içeriği içeren bir Marshall karışım tasarımı genellikle en az 15 test numunesi gerektirecektir. Her bir test numunesi için genellikle yaklaşık 1,2 kg (2,7 lb) agregaya gerekecektir. Az miktarda atık hesaba katılarak, belirli bir karışım ve granülasyon için bir dizi test numunesi için minimum agregaya gereksinimi yaklaşık 23 kg (50 lb) olacaktır. Yaklaşık 4 litre (1 galon) asfalt çimentosu yeterli olacaktır. Marshall deneylerinde, deney briketleri hazırlanmasında TS 3270'in öngördüğü hususlardan hareket edilmektedir. Bitümlü karışımın tahmini bitüm oranı geçmişte yapılmış tasarım sonuçlarından edinilen deneyimlere dayanarak hazırlanmış olan Eşitlik 10'daki ampirik bağıntı ile belirlenebilir:

$$P = 0,035.a + 0,045.b + X.c + F \quad (10)$$

Burada;

P: Toplam bitümlü karışım ağırlığının %'si olarak tahmini bitüm oranı

a: Agreganın ağırlıkça 2 mm'lik elek üzerinde kalan kısmının %'si

b: Agreganın ağırlıkça 2 mm ile 0,075 mm'lik elekler arasında kalan kısmının %'si

c: Agreganın ağırlıkça 0,075 mm'lik elekten geçen kısmının %'si

(a,b,c değerleri tam sayıya yuvarlatılacaktır)

X: 0,20 (c ≤ 5 ise)

0,18 (c = 6 - 10 ise)

0,15 (c = 11 – 15 ise)

F: 0 - 2 arasında, agreganın su absorpsiyon %'sinin 1/3 olarak alınabilir.

Agregalar, sabit ağırlığa kadar 105 °C ile 110 °C arasında sıcaklıklarda kurutularak, fraksiyonlarına ayrılmış her bir grup malzemedan, bir önceki kısımda anlatılan hesap yöntemi ile malzeme gruplarının karışım oranlarına göre karışım gradasyona uygun tartılır. Benzer

şekilde kaba, ince ve mineral filler olmak üzere agrega özgül ağırlıkları ile gevşek bitümlü karışımın teorik maksimum özgül ağırlık tayinleri için de ikişer adet deney numuneleri hazırlanır. Normal Marshall dizaynında hazırlanacak Marshall briketlerinde agreganın maksimum dane boyutu 25 mm' den daha büyük olmamalıdır. Bu sebeple bitümlü temel gibi maksimum dane boyutu 25 mm' den büyük olan karışımların dizaynı esnasında sadece Marshall briketlerinin hazırlanmasında kullanılacak olan agregaların karışım gradasyonuna göre 25 mm elek üzerinden gelecek olan miktarı kadar ki kısmı 25 mm ile 19 mm arasındaki malzemeden alınarak ikame yapılmalıdır.

İdeal bir bitümlü karışım kaplamadan beklenen performansın yakalanabilmesi için agrega ve bitüm karışımının homojen bir şekilde karıştırılmış ve yeterince sıkıştırılmış olması gerekir. Homojen bir karıştırma ve yeterli sıkıştırma bitümlü bağlayıcının viskozitesine bağlıdır. Asfalt betonu numunelerinin hazırlanması ilk önce granülometrik şartlara uygun agrega karışımı hazırlanır. Hazırlanan agrega karışımı etüvde 185°C 'ye kadar ısıtılır. Bitüm 120°C'ye kadar ısıtılır. Isıtılmış malzeme etüvden alınarak yukarıda belirtilen en az 5 farklı oranda bitümle karıştırılarak karışım hazırlanır. Farklı bağlayıcı yüzdesine sahip karışımlardan üçer adet numune hazırlanır(deney aleti, çevresel şartlar ve operatörden kaynaklanacak hataların minimize edilmesi için). Hazırlanan farklı bağlayıcı yüzdesine sahip karışımlardan ısıtılmış kalıplara doldurulur.

Önceden belirlenmiş olan karıştırma sıcaklığında etüvde yeterince ısıtılmış olan her bir Marshall briketi agregası ile o briket için planlanmış bitüm içeriği oranı sağlayacak miktardaki bitümlü bağlayıcı ile yeterli ebatlardaki, malzemeyi soğutmadan ve segregasyona uğratmadan harmanlayabilecek uygun bir laboratuvar mikserinde 2 dakika süresince karıştırılmalıdır (Şekil 3.18a). Uygulamadaki gerçek durumları yansıtmamasını ve özellikle de yüksek absorpsiyonlu agregaların kullanımında bitümlü bağlayıcının agrega tarafından yeterince absorbe edilmesini teminen Marshall briketleri için hazırlanan bitümlü karışımların sıkıştırma öncesinde 2 saat süresince sıkıştırma sıcaklığında etüvde bırakılması Asfalt Enstitüsü tarafından tavsiye edilmektedir. Bekletme süresi tamamlandıktan sonra Marshall briketi karışımları sırasıyla sıkıştırılacağı kalıba (kalıp malzemenin yapışmasını önlemek için bitümü çözmeyecek evsafa uygun bir yağ ile yağlanmış alt taban plakası üzerine taban kesitinde filtre kâğıdı yerleştirilmiş olmalıdır) mala veya spatula yardımıyla segregasyon olmayacak şekilde yerleştirilir (Şekil 3.18b). Sıkıştırma öncesi karışımın sıcaklığı ölçülmeli

ve sıkıştırma ısısı limitlerinde olduğu teyit edilmelidir(Şekil 3.18c). Numune istenilen sıcaklıkta değilse asla sıkıştırılmamalı ve hiçbir durumda tekrar ısıtılarak kullanılmamalıdır.



(a)

(b)

(c)

Şekil 3.18: (a) Laboratuvar mikseri, (b) Mala veya spatula yardımıyla numune karıştırma işlemi ve (c) Sıkıştırma öncesi karışımın sıcaklığı ölçümü

Şekil 3.19’da görülen sıkıştırma aletinde 4,5 kg ağırlığındaki tokmak 45 cm yükseklikten numunenin her iki yüzüne 50 ila 75’er (karışımın maruz kalacağı trafiğe göre) defa düşürülerek numuneler sıkıştırılır. Manuel kullanılan tokmakların, mekanik tokmaklardan daha yüksek numune yoğunluğu sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun, manuel tokmakların hafif açılı olarak düşürülmesiyle otomatik tokmakların dikey hareketinden farklı olarak hafif bir yoğurma etkisi yarattığı teorisi ortaya atılmıştır. Asfalt Enstitüsü, karışım tasarımı ve saha doğrulaması için sadece mekanik tokmakların kullanılmasını önermektedir.

Tokmaktama işlemi biten numune kalıptan çıkarılarak soğumaya bırakılır. Kalıptan çıkartılan deney numunesi silindir şeklinde olup 100 mm çapında ve yaklaşık 64 mm yüksekliğindedir. Her numunenin üzerine ilgili numuneye ait etiket yerleştirilir, ağırlığı ve yüksekliği ölçülerek kaydedilir. Bu numuneler bir gece oda sıcaklığında bekletilerek dayanımlarını kazanmaları sağlanır. Kalıplarından çıkarılan sıkıştırılmış Marshall briketlerinin yükseklikleri, aralarındaki açı 120° olacak şekilde en az üç noktadan kumpasla ölçülür ve deney formuna yazılır.



Şekil 3.19: Marshall numunesinin sıkıştırılma aşaması

Genelde agreganın tartımlarının öncesinde bir Marshall briketi deneme numunesi hazırlanması istenir. Deneme numunesinde yükseklik limitlerinin altında kalınırsa Eşitlik 11’de hesaplandığı şekilde Marshall briketi agregalarının ağırlıkları revize edilmelidir.

$$\text{Revize edilen Marshall briketi agregası ağırlığı} = 63,5 * \frac{W_{deneme}}{h_{deneme}} \quad (11)$$

Burada;

W_{deneme} : Deneme briketindeki agregası ağırlığı

h_{deneme} : Deneme briketinin yüksekliği (mm)

3.6.4 Hacim Özgöl Ağırlık Tayini ve Boşluk Analizleri

Yükseklikleri ölçülen briket numunelerinin hacim özgöl ağırlığı (D_p) deneyi gerçekleştirilebilir. Hacimce su emme miktarı % 2’den küçük olan Marshall briketlerinin hacimce su emme oranı ASTM D 2726 deney standardına göre briketin doymuş yüzey kuru ağırlığı ile havadaki kuru ağırlığı arasındaki farkın, doymuş yüzey kuru ağırlığı ile sudaki ağırlığı arasındaki farka yüzdece oranı olarak hesaplanır. Test numunesinin kütleyle özgöl ağırlık testi, taze sıkıştırılmış numuneler oda sıcaklığına soğuduktan sonra yapılabilir. Su emme miktarı hacimce %2’den büyük olan numunelerin hacim özgöl ağırlıkları ise, ASTM

D1188 "Parafin Kaplı Numunelerle Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Hacim Özgöl Ağırlığı" standardına göre yapılır. Numunelerin ağırlıkları kullanılarak sıkıştırılmış numunelerin ağırlıkları Eşitlik 12 yardımıyla hesaplanır:

$$G_{mb} = \frac{A}{B-C} \quad (12)$$

Burada:

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

A = Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

B = Numunenin kuru yüzey doygun ağırlığı (g)

C = Sudaki numunenin ağırlığı (g)

- Teorik Maksimum Özgöl Ağırlıkların Tayini

Bitümlü karışımın içinde hiç hava boşluğu bulunmadığı varsayımıyla hesaplanan özgül ağırlıktır ve hacimsel tasarım parametrelerinin belirlenmesinde temel bir rol oynar. Bu değer, karışımda kullanılan agrega ve bitümün ayrı ayrı özgül ağırlıkları ile karışımdaki bitüm oranına bağlı olarak hesaplanır. Hesaplama, genellikle Eşitlik 13'deki bağıntı ile yapılır:

$$D_t = \frac{100+W_a}{\frac{100}{G_{eff}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (13)$$

Bu denklemde:

G_{eff} agrega karışımının efektif özgül ağırlığını,

G_b ise bitümün özgül ağırlığını temsil ederken,

W_a karışımdaki bitüm oranını ifade eder.

- Karışımın Maksimum Özgöl Ağırlığı

Maksimum özgül ağırlığı ASTM D2041/D2041M-11'a göre bulunmaktadır ve Eşitlik 14'deki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$G_{mm} = \frac{A}{(A-(B-C))} \quad (14)$$

Burada:

G_{mm} = Maksimum özgül ağırlık

A = Gevşek karışımın havadaki ağırlığı (g)

B = Su doldurulmuş piknometre ve gevşek karışımın ağırlığı (g)

C = Su dolu piknometrenin ağırlığı (g)

Belirli bir bitüm yüzdesi için G_{mm} değerinin bilinmesi, farklı oranlarda bitüm içeren karışımların maksimum özgül ağırlıklarının da bulunmasını sağlamaktadır. Agrega yığınının efektif özgül ağırlığı sabittir ve bitüm emme potansiyeli içeriğindeki bitüm yüzdesinden bağımsızdır. Agregaların efektif özgül ağırlığı, Eşitlik 15 yardımıyla hesaplanabilir:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (15)$$

Burada:

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Herhangi bir bitüm yüzdesi ile hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığı ise Eşitlik 16 yardımıyla hesaplanır:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (16)$$

Burada:

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

P_s = Karışımdaki agrega yüzdesi

G_{se} = Agregaların efektif özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

- Hava Boşlukları

Hava boşlukları sıkıştırılmış BSK içerisinde asfaltla kaplanmış agrega parçaları arasında oluşan küçük hava tanecikleri ya da hava kabarcıklarıdır. Asfalt kaplamanın durabilite özelliği, içeriğindeki hava boşluğuyla doğrudan ilişkilidir. Yüksek hava boşluğu oranı, servis süresince asfalt kaplamanın içerisine zararlı hava ve suyun girmesine sebep olur. Bunun yanı sıra, çok düşük olan hava boşluğu oranları ise, BSK içerisindeki bitümü sıkıştırarak yüzeye çıkıp “kabarma” yaratmasına sebep olur. Yoğunluk ile hava boşluğu doğrudan ilişkilidir. BSK’larda yoğunluk arttıkça, hava boşluğu oranı azalır. Teknik Şartnamelerde, kaplamaların yoğunluğunun, gerekli hava boşluğunu sağlayacak şekilde seçilmesi gerektiği belirtilmektedir. Karışımdaki toplam hava boşluğu oranı, Eşitlik 17 yardımıyla hesaplanır:

$$VTM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \quad (17)$$

Burada:

VTM = Karışımdaki toplam hava boşluğu oranı

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

- - Mineral Agregalar Arasındaki Boşluk Yüzdesi (VMA)

Mineral agregalar arasındaki boşluk, VMA, sıkıştırılmış karışımın agregalarının tanecikleri arasındaki boşluk alanı hacmidir. VMA, BSK’nın durabilitesini etkileyen en önemli tasarım parametrelerinden birisi olarak gösterilir. VMA, bitüm ve hava boşluğu ile dolu olan alanların tümünü kapsamaktadır ve karışımın toplam hacminin bir yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA, Eşitlik 18 yardımıyla hesaplanır:

$$VMA = 100 * \frac{G_{mb}}{1 - P_b} * G_{sb} \quad (18)$$

Burada:

VMA= Mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi

G_{sb} = Agrega karışımının özgül ağırlığı

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

P_b: Karışımdaki asfalt yüzdesi

- Bitüm İle Dolu Boşluk Yüzdesi(VFA)

Bitüm ile dolu boşluk yüzdesi, VFA, sıkıştırılmış karışımdaki agregat parçacıkları arasındaki bitümle dolu boşluğu temsil etmektedir. Başka bir deyişle, bitümle dolu boşluk yüzdesi olarak da söylenebilir. Karışım içerisindeki VFA ihtiyacının amacı, mineral agregalar arasındaki maksimum boşluğu ve buna bağlı olarak bitüm içeriğini sınırlamaktır. VFA yüzdesi Eşitlik 19 yardımıyla hesaplanır:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} * 100 \quad (19)$$

Burada:

VFA: Karışımdaki bitüm ile dolu boşluk (%)

VMA=Mineral agregalar arasındaki boşluk (%)

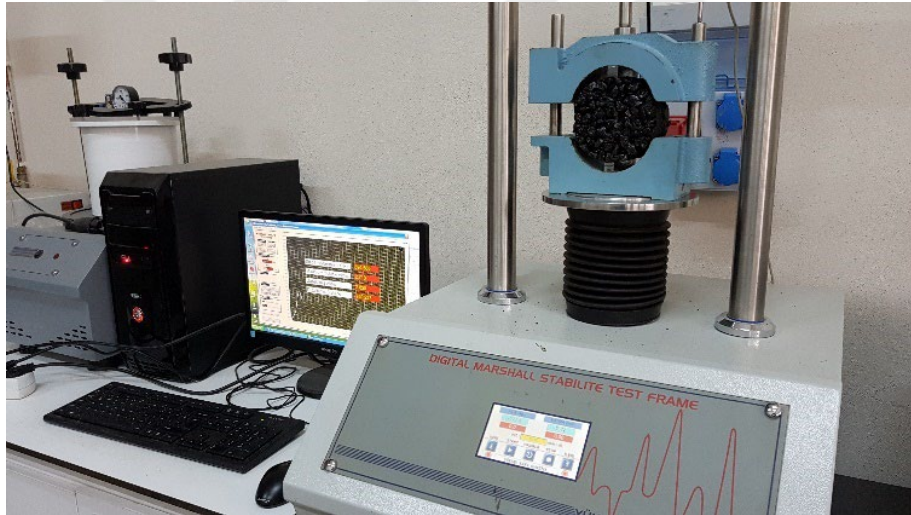
VTM = Toplam karışımın boşluk oranı (Kaya ve Topal, 2016).

3.6.5 Stabilite ve Akış Testi

Stabilite ve akış testi için gerekli olan Marshall Test Cihazı ASTM D6927'ye uygun bir sıkıştırma testi cihazıdır. Test numunelerine, 51 mm (2") iç yarıçapa sahip silindirik parçalardan oluşan test başlıkları aracılığıyla sabit bir yükleme hızı olan dakikada 51 mm (2") yük uygulamak üzere tasarlanmıştır. Cihazda iki dikey kılavuz direk bulunur. Test başlıkları yatay konumda kalacak ve test sırasında serbest dikey hareket sağlayacaktır. Uygulanan test yükünü belirlemek için kalibre edilmiş bir kanıt halkası, numune testi için kullanılan bir

Marshall stabilite test başlığı ve test sırasında maksimum yükteki deformasyon miktarını belirlemek için bir Marshall akış metre (veya otomatik kayıt cihazı) bulunur. Ayrıca, uygun yük ve deformasyon gösterge cihazlarına sahip bir evrensel test makinesi de Marshall test çerçevesi yerine kullanılabilir.

Marshall stabilite deneyi 101,6 mm (4") çapında ve 63,5 mm (2,5") yüksekliğindeki Marshall briket numuneleri için genelde yoğun gradasyonlu bitümlü karışımlarda standart bir deney prosedürüdür. Yüksekliği 63,5 mm'den farklı olan test briketleri için bulunan stabilite değerleri briket yüksekliklerine bağlı düzeltme faktörü ile çarpılmaktadır. ASTM D 6927 Asfalt Karışımların Marshall Stabilitesi ve Akışı için Standart Test Yöntemi deney standardına göre Şekil 3.20'de test cihazı ile dakikada 50 mm $\pm$ 5 mm sabit deplasman yapacak şekilde silindirik bir başlıkla briketlere sıkıştırma doğrultusuna dik yönde basınç kuvveti uygulanır.



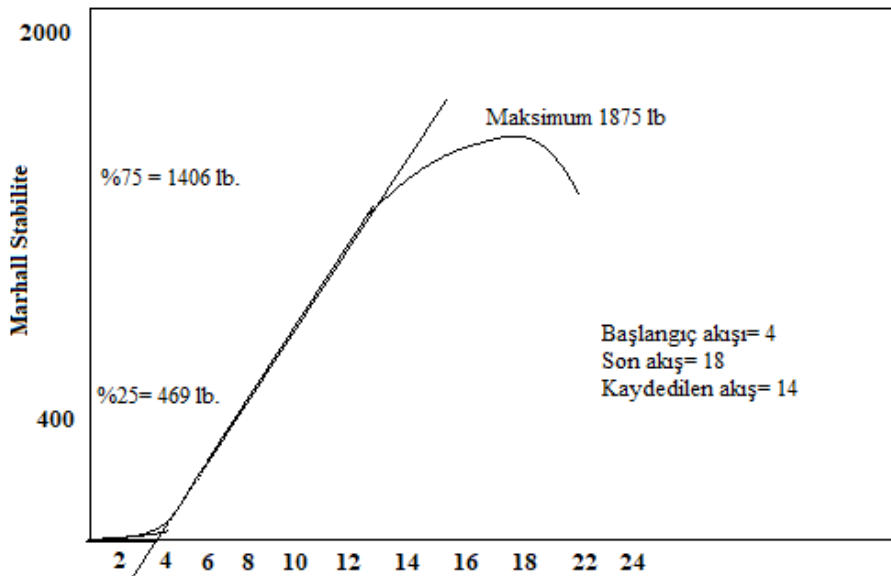
3.20: Stabilite ve akış test cihazı

Marshall stabilite deneyi öncesinde briket numuneleri, 60 °C $\pm$ 1 °C'de ya 30–40 dakika su banyosunda ya da 120–130 dakika etüvde bekletilir. Deney başlıkları temizlenerek 21,1–37,8 °C arasında ısıtılır. Numuneler sudan çıkarılıp havluyla kurulanır ve gecikmeden test cihazına yerleştirilerek ölçüm pozisyonuna getirilir. Otomatik cihaz yoksa, stabilite ve akma değerleri manuel olarak okunup forma kaydedilir. Numunenin sudan çıkarılmasıyla testin tamamlanması arasındaki süre 30 saniyeyi geçmemelidir. Ertesi gün, numuneler 60 °C'de 1 saat ısıtılıp sırayla cihaza yerleştirilir; maksimum yük ve deformasyon değeri okunarak Marshall stabilitesi tespit edilir. Bu değer, numunenin kırılmasını sağlayan maksimum yükü

ifade eder.

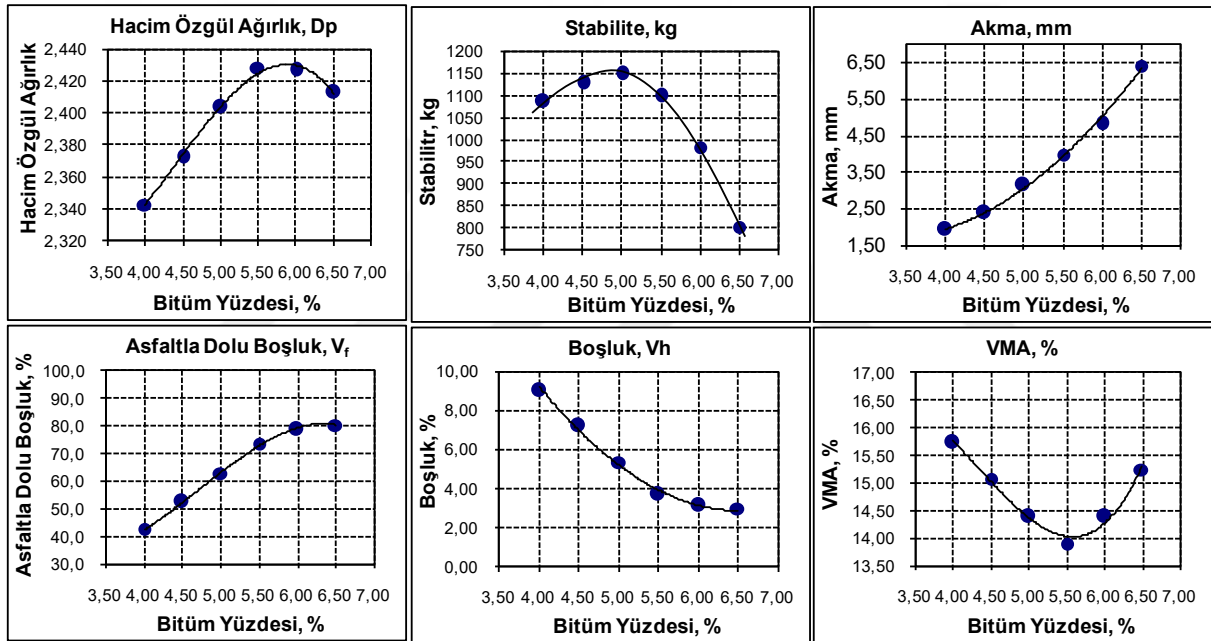
Akma değeri ise deney süresince numunede oluşmuş hem elastik hemde plastik deformasyonların toplam ölçümüdür. Asfalt Enstitüsü, Marshall stabilitesi deneyinde çizilen yük (düşey eksen)-yer değiştirme (yatay eksen) grafiği üzerinde lineer bölgeye teğet olması adına, maksimum yük değerinin % 25'i ile % 75'inin karşılık geldiği noktalardan çizilen doğrunun yatay eksenini kestiği yerdeki deformasyon ile maksimum yükün oluştuğu deformasyon arasındaki fark değeri, akma değeri olarak kabul etmektedir (Şekil 3.21). Eğer belirlenen optimum bağlayıcı içeriğindeki akış değeri belirlenen üst sınırın üzerinde ise, karışımın fazla plastik veya kararsız olduğu kabul edilir. Akış değeri alt sınırın altında ise, karışımın çok kırılgan olduğu düşünülür. Maksimum dane boyutu 37,5 mm ve üzerinde olan bitümlü karışımlar için stabilite ve akma deneyleri ASTM D 5581 Marshall Testi Kullanılarak Bitümlü Karışımların Plastik Akmaya Direnci için Standart Test Yöntemi deney standardına göre modifiye edilmiş Marshall metodu ve tokmağı ile hazırlanan 6" çapındaki Marshall briketleri üzerinde de yapılabilmektedir.

Akma değeri, test cihazından doğrudan alınırken, stabilite değeri, düzeltme faktörü ile düzeltilerek alınır. Akma değeri; stabilite ölçümü sırasında yüksüz ve maksimum yük arasında meydana gelen 0,25 mm (1/100'') cinsinden deformasyondur.



Şekil 3.21: Marshall stabilite testinde akma değerinin belirlenmesi

Analiz ve deney sonuçlarına bağlı olarak; Bitüm Yüzdesi – Pratik Özgül Ağırlık, Bitüm Yüzdesi – Stabilite, Bitüm Yüzdesi – Akma, Bitüm Yüzdesi – Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (V_f), Bitüm Yüzdesi – Hava Boşluğu Yüzdesi (V_h), Bitüm Yüzdesi – Agregalar Arası Boşluk (VMA) yüzdesi ilişkilerini veren grafikler çizilir. Asfalt betonu binder tabakası için örnek bir Marshall dizaynında kullanılan bitüm yüzdelere karşılık gelen D_p , VMA, V_h , VFA, Marshall stabilitesi ve akma grafikleri Şekil 3.22’ de verilmiştir. Bu grafiklerden, yoğunluk ve stabilite eğrilerinin maksimum değerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri, şartnamede belirtilen hava boşluğu yüzdesine (% 4) ve bitümle dolu boşluk yüzdesine (%80) karşılık gelen bitüm yüzdeleri toplanarak bunların aritmetik ortalamalarından optimum bitüm muhtevası bulunmaktadır (Kuloğlu, 2006).



Şekil 3.22: Yüzde ilişkileri veren Marshall tasarım grafikleri örnekleri

Asfalt kaplama karışımının optimum bağlayıcı içeriği, daha önce tartışılan tüm veriler dikkate alınarak seçilir. Asfalt Enstitüsü, tasarım karışımının, tasarım darbe sayısına kadar sıkıştırıldığında %4 hava boşluğu elde eden ve Tablo 3.6'daki diğer tüm kriterleri karşılayan bir karışım olması gerektiğini önerir. Tavsiye edilen tasarım kriterlerinden sapmalar, proje belgelerinde açıkça belirtilmeli ve asfalt karışımının planlanan kullanımına uygun olmalıdır. Karışım, durabiliteyi en üst düzeye çıkarmak için olabildiğince fazla bitümlü bağlayıcı içermeli, ancak aynı zamanda tasarlanan ömrü boyunca gereken stabiliteyi korumalıdır. Ancak, eğer tüm tasarım kriterleri karşılanmıyorsa, bazı ayarlamalar yapılması veya karışımın

yeniden tasarlanması gerekebilir. Eğer Asfalt Enstitüsü'nün önerilen tasarım kriterleri değiştirilirse, deneyimli tasarımcıların trafik türü ve yükleme, konum, malzemeler ve iklim bölgesi gibi proje değişkenlerini dikkatlice değerlendirmesi önerilir. Bulunan bu değer akma eğrisi üzerinde kontrol edilerek, buna karşılık gelen akma değerinin şartnameye uygun olup olmadığı kontrol edilmektedir. Marshall Tasarım Kriterleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7: Marshall tasarım yönteminin trafik dağılımına göre özellikleri

Özellikler	Hafif trafikli yollar (yüzey ve temel tabakasında)		Orta trafikli yollar (yüzey ve temel tabakasında)		Ağır trafikli yollar (Yüzey ve temel tabakasında)	
	min.	max	min.	max	min.	max
Numunenin her bir yüzeyine uyg. darbe sayısı	35	35	50	50	75	75
Stabilite kg (N)	333,6 (3336)	-	533,8 (5338)	-	800,6 (8006)	-
Akma (mm)	2	5	2	4,5	2	4
Boşluk (%)	3	5	3	5	3	5
VMA	13	-	13	-	13	-

3.7 Superpave Tasarım Yöntemi

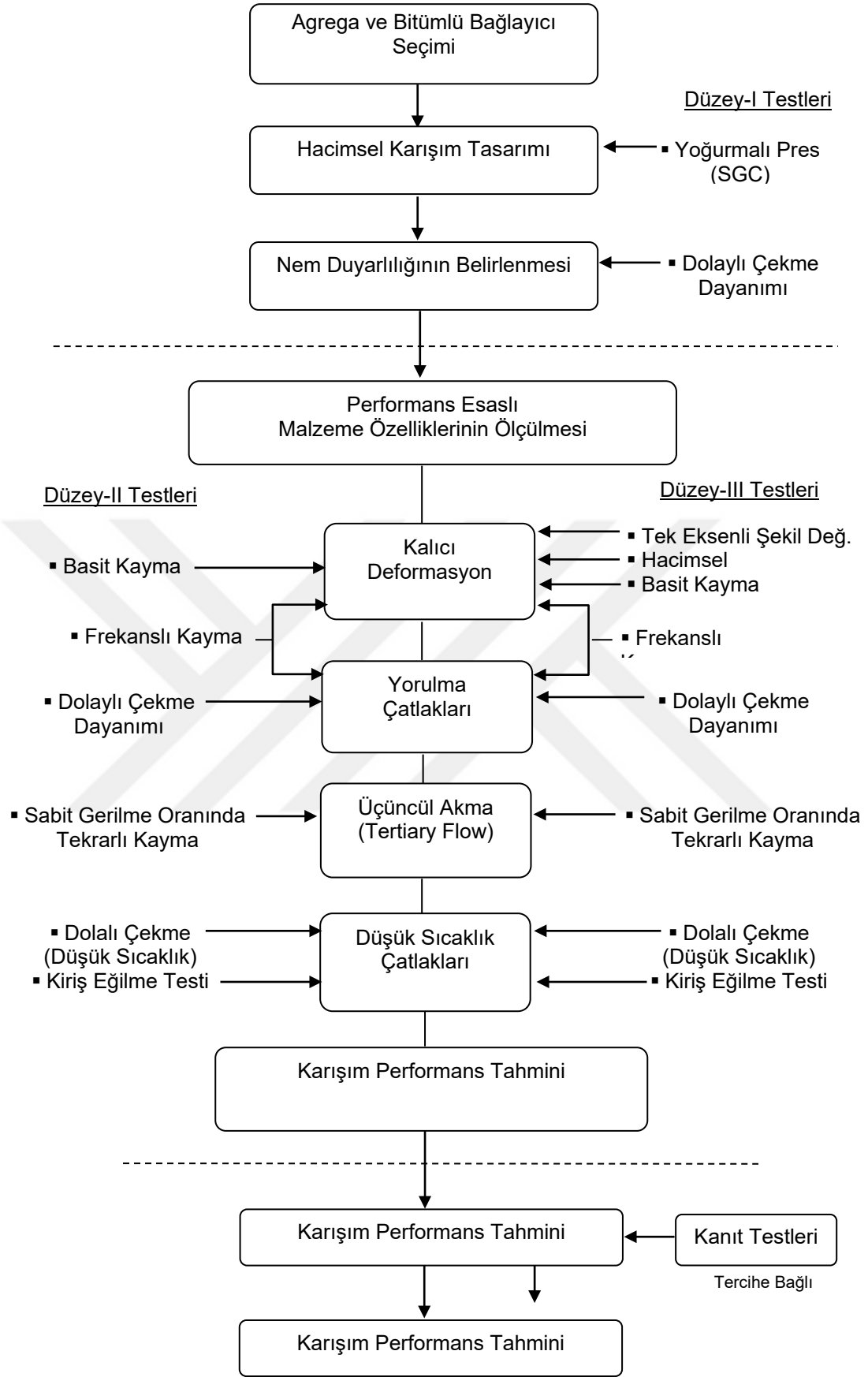
Superpave terimi, Üstün Performanslı Asfalt Kaplamaların (SUPERIOR PERFORMANCE ASPHALT PAVEMENTS) kısaltmasıdır. 1993 yılında Superpave yönteminin kullanılmaya başlanmasıyla ABD karayolu altyapı sektöründe önemli bir dönüm noktası yaşanmıştır. SHRP bir parçası olarak geliştirilen bu yöntem, karayolu kaplamalarının performansını, dayanıklılığını ve güvenliğini artırmayı amaçlayan asfalt karışım tasarımına yönelik yenilikçi bir yaklaşımı temsil etmektedir. SHRP, 1987 yılında 150 milyon dolar fonla kurulmuş ve ABD karayolu sisteminin ilerlemesi için uygulamalı araştırmalarda önemli bir rol oynamıştır. Dört temel alana odaklanan program (asfalt, beton yapılar, karayolu uygulamaları ve kaplama performansı) 100'den fazla yeni cihaz, test ve şartname üretmiştir. Önceki Hveem ve Marshall yöntemlerinin yerini almak üzere geliştirilen Superpave yöntemi, bitüm ve agrega seçimini karışım tasarım sürecine entegre ederken, trafik ve iklim gibi faktörleri de dikkate almaktadır. Superpave karışım tasarım yöntemi karışımın kullanılacağı bölgenin sıcaklık ve coğrafi koşullarına uygun performans sınıfı bitümlü bağlayıcının seçimi ile başlar. Kullanılacak agregaların fiziksel özelliklerinin şartnamesine uygunluğuna bakılır ve karışım gradasyonu, Superpave gradasyon limitleri içinde, yasaklanmış bölge ve maksimum yoğunluk çizgisi dikkate alınarak belirlenir. Üç farklı deneme karışımı gradasyonu ile ikişer numune

sıkıştırılarak ön tasarım çalışması yapılır. Bu çalışmanın sonucunda tasarım kriterlerine uygun olan karışım gradasyonu seçilerek tasarıma başlanır. Karışım tasarımının önemli bir özelliği Gyratory kompaktör gibi yenilikçi sıkıştırma cihazları kullanan Superpave, analiz testi ve performans tahmin modellerini birleştiren bir tasarım ve analiz sistemine dayanmaktadır. Şekil 3.23'te akış şeması verilen Superpave metodolojisi, tasarım trafiğine dayalı üç seviyeli karışım tasarımını içermekteydi, ancak performans testleri büyük ölçekte uygulanmamıştır (URL-6, 2019).

Superpave yaklaşımı, karışım için uygun karışım tasarım yöntemi ve teknolojisini tasarlamaktadır. Trafik ve tasarımın önemi esas alınarak üç tasarım düzeyi tanımlanmıştır. Düzey 1'de laboratuvar karışım tasarımı yalnızca hacimsel tasarımı içerir; bu, belirli hava boşluğu, mineral agregadaki boşluk ve asfaltla doldurulmuş boşluk kriterlerini karşılayan bir gradasyon ve bitümlü bağlayıcı içeriği seçmek için agregaları ve bitümlü bağlayıcıları değerlendirir. Düzey 2 ve Düzey 3'te ise, performansa dayalı testler yapılır ve zamanla bozulma tahminleri yapılır. Bu, karışım tasarımının kalıcı deformasyon, düşük sıcaklık çatlakları ve yorulma çatlakları gibi üç bozulmadan bir veya daha fazlasının optimize edilmesine olanak tanır. Karışım tasarımı tamamlandıktan sonra, karışım bir tesiste üretildiğinde malzeme özelliklerindeki değişiklikler nedeniyle modifikasyonlar gerekebilir. Bu modifikasyonlar yeniden test yapılmasını gerektirebilir veya gerektirmeyebilir.

Agregalar ve bağlayıcı, karışımın hizmet sırasında karşılaşacağı tasarım koşullarına özgü kriterlere göre seçilir. Potansiyel agregalar veya bitüm-agrega kombinasyonlarının uyumluluğu ve olası nem hassasiyetini taramak için opsiyonel testler mevcuttur.

Çoğu karışım tasarımının Düzey 1 ve Düzey 2 kullanması beklenirken, Düzey 3, çok ağır trafik yüklerini (10^7 ESAL'lerden fazla) taşıyacak olan veya kritik öneme sahip yolların karışım tasarımları için kullanılacaktır. Düzey 3 ayrıca karışımın gerçek trafiği ve çevresel koşulları temsil eden testlere tabi tutulmasını sağlayan isteğe bağlı bir kanıt test yöntemi içerir; bu da karışımın istenen seviyede performans gösterdiğini doğrular. Tasarım seviyesinin ve kanıt testinin kullanılmasının bir politika veya mühendislik tasarım kararı olduğu vurgulanmalıdır.



Şekil 3.23: Superpave karışım tasarım sisteminin genel akış şeması

Düzey 2 ve Düzey 3'ün karşılaştırmalı bir özeti, Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8: Düzey 2 ve Düzey 3 karışım tasarım yöntemlerinin karşılaştırması

	Kalıcı Deformasyon / Yorulma Çatlaması	Düşük Sıcaklık Çatlaması
Test Türleri	Düzey 3, daha fazla stres durumu dikkate alır ve iki ek test yöntemi gerektirir.	Düzey 2 ile arasında fark yoktur.
Test Sıcaklıkları	Düzey 3, 4 ile 40°C arasındaki sıcaklıkları dikkate alır.	Düzey 3, üç sıcaklığı dikkate alır.
	Düzey 2, yorgunluk kırılması için bir etkili sıcaklık ve kalıcı deformasyon için bir sıcaklık kullanır.	Düzey 2, yalnızca bir sıcaklıkta çekme dayanımını dikkate alır.
Performans Tahmini	Düzey 3, yılı mevsimlere böler.	Düzey 2, tüm yılı tek bir mevsim olarak dikkate alır.
	Düzey 2 ile arasında fark yoktur.	

3.7.1 Düzey 1 Karışım Tasarım Aşaması

Tasarım sürecinin ilk adımı, ajansın olağan prosedürü ile proje tasarım trafik seviyesini belirlemektir. Trafik, tasarım ömrü boyunca tasarım şeridinde beklenen ESAL olarak tanımlanır. Tasarım ESAL'leri herhangi bir kaynaktan elde edilen trafik bilgileri kullanılarak tahmin edilebilir veya ortalama yıllık günlük trafik kullanılarak hesaplanabilir. ESAL değeri Superpave tasarım sürecinde gerek malzeme seçimi gerekse karışım kriterlerinin belirlenme aşamalarında kullanılmaktadır.

Düzey 1 karışım tasarımı, hacimsel karışım tasarımı prensiplerine dayanır ve şu adımları içerir:

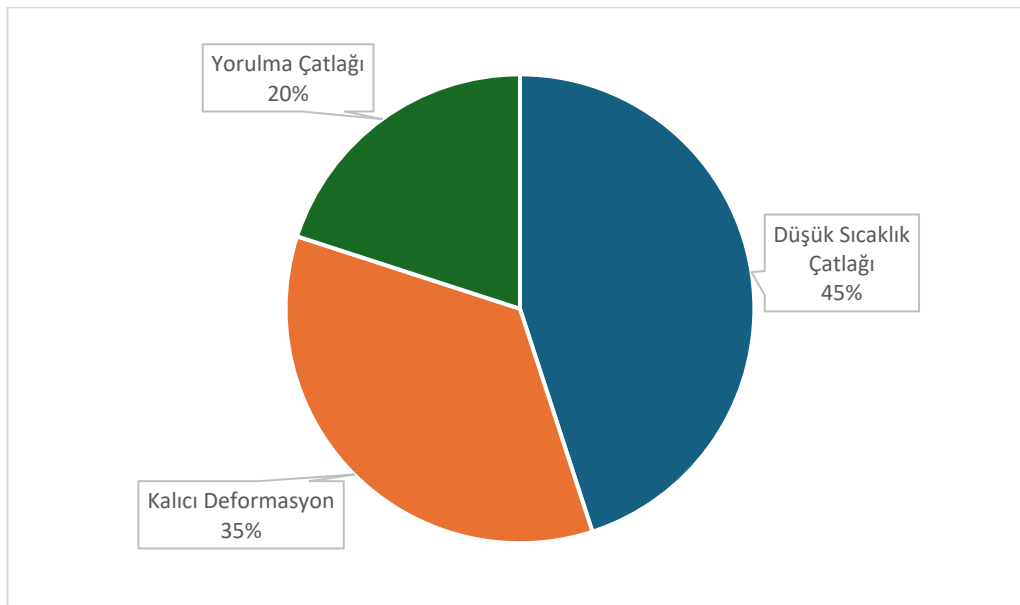
- Bitümlü bağlayıcı sınıfını seçmek
- Agrega seçmek
- Bitümlü bağlayıcı ve agreganın işlenebilirliğini ölçmek
- Tasarım agrega yapısını belirlemek
- Tasarım bitümlü bağlayıcı içeriğini belirlemek
- Neme karşı direnci kontrol etmek

3.7.1.1 Bitümlü Bağlayıcı Sınıfının Seçilmesi

Bitümlü bağlayıcı sınıfı, iki yöntemle göre seçilir. Gerekli bağlayıcı sınıfını seçmenin birincil yöntemi, tasarım yol sıcaklıklarına ve trafik yoğunluğuna dayalıdır. Yüksek ve düşük yol tasarım sıcaklıkları, Superpave yazılımında bulunan bilgiler kullanılarak hesaplanabilir veya doğrudan karışım tasarımcısı tarafından sağlanabilir. Yüksek hava sıcaklığı, yılın ortalama 7 günlük maksimum hava sıcaklığı, düşük hava sıcaklığı ise yılın minimum hava sıcaklığı olarak tanımlanır. İkincil yöntemde, karışım tasarımcısı projenin bulunduğu coğrafi bölgeyi belirler ve yolun hizmet ömrü veya tasarım ömrü boyunca beklenen trafik düzeyine göre gerekli bağlayıcı sınıfını seçer.

Yorulma çatlağı için, agrega özellikleri, karışım özellikleri ve yol yapısı daha önemlidir; kalıcı deformasyon için ise agrega ve bağlayıcı karışımının özellikleri baskındır. Bitümlü bağlayıcının önemli olmasına rağmen, kötü agregalar, kötü karışım özellikleri, yanlış imalat veya yetersiz yapısal tasarımı telafi edememektedir.

Şekil 3.24'te bağlayıcının çeşitli bozulma türlerine göre göreceli önemini göstermektedir. Görüldüğü üzere, bağlayıcı, düşük sıcaklık çatlamasında son derece önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.24: Bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlağı gelişimi üzerindeki göreceli etkisi

3.7.1.2 Performans Sınıflandırması (Performance Grade-PG)

Superpave yönteminde kaplamalar, sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmıştır. Bu nedenle bu tür kaplamalara “Performans Sınıfı (PG)” asfalt adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Sistemde, asfaltın tanımlanması için yapılan deneylerde asfalttan beklenen özellikler aynıdır. Ancak bu özelliklerin beklendiği sıcaklıklar farklılık gösterir. Yani, performans sınıfı asfaltlarda fiziksel özellikler sabit kalır ancak, bu özelliklerin elde edileceği sıcaklıklar asfaltın kullanılacağı yerdeki iklim şartlarına göre farklılık gösterir. Örneğin PG 64-22 olarak adlandırılan bir asfaltta; 64°C ve -22°C’lerde beklenen performans, PG 46-40 asfaltı için 46°C ve -40°C’lerde beklenir. PG simgesini takip eden rakamlar, kaplamanın hizmet vereceği yerdeki en yüksek ve en düşük hava sıcaklıkları ile ilgilidir. Ancak şartname, şekilde gösterilen sıcaklıklarla sınırlandırılmamıştır ve iki yöne doğru genişleyebilir. Gerek duyuldukça en yüksek ve en düşük sıcaklıklar altışar derecelik artışlarla uzatılabilir (Kaya ve Topal, 2016).

3.7.1.3 Performans Esaslı Bitüm Deneyleri

Tablo 3.9 ve bu deneylerin listesi, kullanım amaçları ve performansla ilişkisi gösterilmektedir.

Tablo 3.9: Yüksek performanslı asfalt kaplama bağlayıcı deneyleri

Deney	Kullanım Amacı	Performans Özelliği
Döner ince film deneyi (RTFO)	Bitümlü bağlayıcının oksidasyonunu (yaşlanmasını) karakteristiklerini belirlemek	Karışım üretimi (plentte) süresinde yaşlanma
Basınçlı oksidasyon deneyi (PAV)		Servis ömrü boyunca oluşan yaşlanma
Dinamik kesme deneyi (DSR)	Orta ve yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı özelliklerini ölçer.	Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi)
Dönel Viskozite deneyi (RV)	Yüksek sıcaklıklarda (karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları) bağlayıcının özelliklerini ölçer.	İşlenebilme ve Pompalanabilme
Eğilme deneyi (BBR)	Düşük sıcaklıklarda bağlayıcının özelliğini ölçer.	Yorulma Çatlakları
Doğrudan çekme deneyi (DTT)		Termal Çatlaklar

Bu deneyler bitümün; yaşlanma, işlenebilirlik, oluklanma, yorulma ve termal etkilere karşı performanslarının belirlendiği bir seri deneyler grubudur. Superpave yönteminde bağlayıcıları belirli sıcaklıklarda yapılan deneylerle sınıflandırmak ve arazi şartlarını yansıtmayan deneylerle bağlayıcıların kullanılabilirliğini belirlemek yerine uygulama bölgesinin iklimsel özellikleri ve coğrafi konumu dikkate alınmakta; belirlenen sıcaklık değerlerinde uygulanan

çeşitli deneylerle bağlayıcıların tekerlek izi, yorulma ve düşük ısı çatlaklarına karşı performansları belirlenmektedir (Öztürk, 2004).

- Döner İnce Film Deneyi (Rolling Thin Film Oven - RTFO)

Bitümlü bağlayıcılar iki değişik faktörden dolayı yaşlanırlar. Bunlardan biri bitümlü bağlayıcı içindeki hafif yağların buharlaşması, diğeri ise havadaki oksijen ile reaksiyon neticesinde oluşan oksidasyondur. Plentte ve serim esnasındaki harmanlama ve karıştırma işlemi sırasında, yüksek sıcaklık ve hava akışı olması nedenleriyle, her iki olay da meydana gelir ve bitümün yaşlanmasına katkıda bulunur. Superpave şartnamesi, bu olayı temsil eden döner ince film deneyini gerekli görür. Deneyin amacı, oksidasyon sonrasında buharlaşan kütle kaybını belirlemek ve daha sonra yapılacak diğer performans deneyleri için yaşlanmış numune elde etmektir.

Bu deneyde asfalt plentlerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın ortak etkisini değerlendirmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1'de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet cam şişe kullanılarak yapılmaktadır. Her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dk olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümün yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir. Ortaya çıkan kütle kaybı değeri Eşitlik 20 yardımıyla hesaplanır:

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100 \quad (20)$$

Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti, Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25: Dönel ince film etüvü ve deney öncesi ve sonrasında şişelerin durumu

RTFO deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numuneler üzerinde yaşlandırılmamış bağlayıcılara uygulanan bu deneyler tekrar uygulanarak meydana gelebilecek değişiklikleri tespit edilebilmektedir (Ahmedzade vd., 2008).

- Basınçlı Oksidasyon Deneyi (Pressure Aging Vessel - PAV):

Superpave bağlayıcı şartnamesi bitümlerin orta ve düşük sıcaklıklarda yorulma çatlakları ve termal çatlaklara karşı dayanımlarını belirlemek için bitümlerin uzun dönemli yaşlandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Uzun dönemde görülen böyle bir yaşlanma daha ziyade bitümün oksidasyonu nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu deneyde, uzun süreli yaşlanmayı temsil etmek üzere, numune kapları 10 adet numune kabı alabilen raflı numune taşıyıcıya yerleştirildikten sonra basınçlı yaşlandırma kabına alınarak 2070 kPa basınç altında bitümlü bağlayıcının belirlenen yüksek sıcaklık performansına bağlı olarak 90°C, 100°C veya 110°C’ de 20 saat süre ile yaşlandırılır. Bu şekilde bitümde uzun dönemde ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal değişiklikler temsil edilmektedir. Böylece kaplamanın inşaat ve hizmet sırasında karşılaşacağı çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olur. Bitümlü bağlayıcıların uzun vadeli oksidatif yaşlanmasını temsil etmesi için ısıtılmış, basınçlı hava kullanır. Şekil 3.26’da görülen PAV, kapalı bant ısıtıcılı paslanmaz çelik kabinle bütünleşmiş basınç ölçüm kontrolünden oluşur.



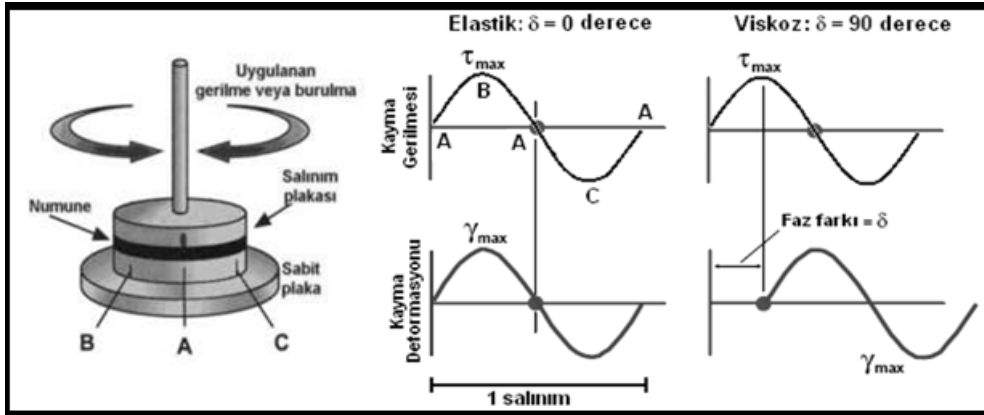
Şekil 3.26: Basıncı yaşlandırma deney cihazı

- Dinamik Kesme Deneyi (Dynamic Shear Rheometer - DSR):

Bu deney, bitümün sıcaklık ve yük altında yorulma ve tekerlek izine karşı direncini tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir. Deneyde asfalt numunesi biri hareketli (sağa sola salınım yapan) olmak üzere iki disk arasına yerleştirilir. Numunenin, hareketli disk tarafından uygulanan salınımların tekrarı ile oluşan burulma kuvvetine karşı mukavemeti bilgisayar yardımı ile hesaplanır. Bitümlü bağlayıcıları geniş bir sıcaklık aralığında yaş, sıcaklık ve mekanik kuvvetlerden kaynaklanan hasarlara karşı dirençlerine göre sınıflandırır. DSR'ler, modern Superpave karışım tasarımlarında kullanılan polimerle değiştirilmiş, PG bağlayıcıların karakterizasyonunda özellikle önemlidir.

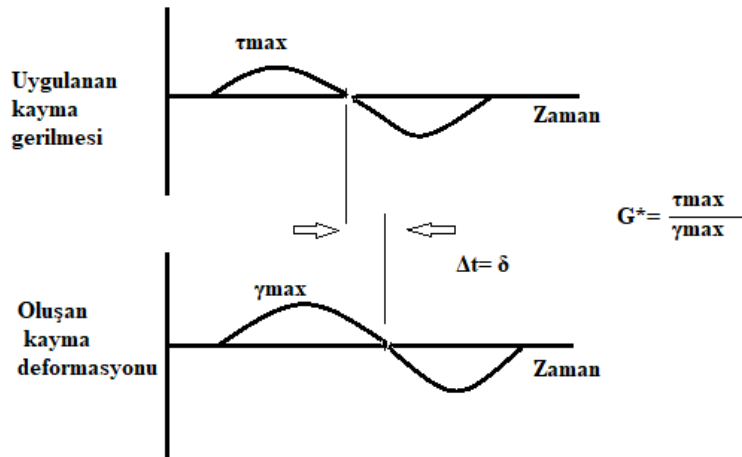
Bağlayıcıların tekerlek izi dayanım parametrelerinin belirlenmesinde işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken yorulma parametrelerinin belirlenmesinde PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. DSR deneyinde bağlayıcılar sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilmekte ve numuneye sinüsoidal gerilmeler uygulanmaktadır (Şekil 3.27). Deney süresince hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte, geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deneyde 10 devir yapılmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 10 radyan/saniye'dir (1,59 devir/saniye). Uygulanan kayma gerilmeleri ve oluşan kayma deformasyonları kullanılarak kompleks kayma modülü (G^*) ile faz açısı (δ) belirlenmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümün

gösterdiği toplam direncin göstergesidir.



Şekil 3.27: DSR deneyinin yapılış şekli ve bağlayıcıya uygulan gerilme yönleri

Faz açısı (δ) ise uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır (Şekil 3.28). Asfalt çimentosunun viskoelastik yapısından ötürü numuneye uygulanan gerilmeler ilk etapta numune tarafından karşılanmakta belirli bir süreden sonra kayma deformasyonları meydana gelmektedir.



Şekil 3.28: Kayma gerilmesi ve deformasyonları kullanarak faz açısının belirlenmesi

Uygulanan kayma gerilmesi, oluşan kayma deformasyonu ve faz açısı kullanılarak bağlayıcıların viskoelastik yapısı değerlendirilmektedir. Faz açısının 0° olması numunenin elastik davranış gösterdiğini, 90° olması ise viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellik gösterdiğinden normal şartlarda faz açısı 0 ile 90° arasında değişmektedir. Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir.

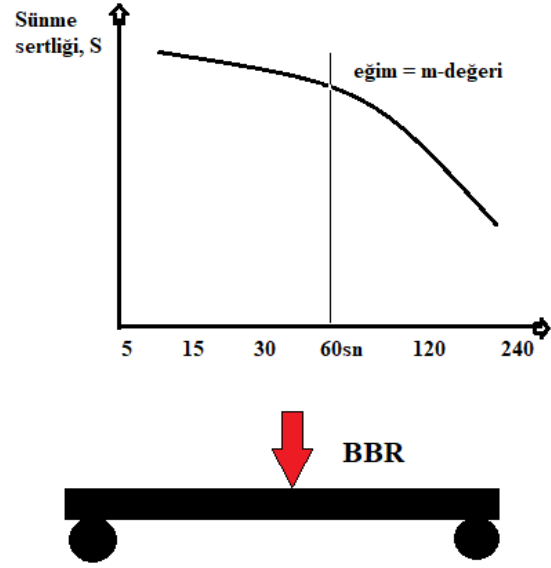
DSR deneyi gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Bitümlü bağlayıcının tekerlek izi dayanımı belirlemek amacıyla yapılan DSR deneyinin gerilme kontrollü yapılması halinde işlem görmemiş bağlayıcılara 120 Pa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılara ise 220 Pa(kg/m*s²) sabit gerilme uygulanmaktadır. Tekerlek izi dayanımı belirlemek amacıyla işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneylerinde 25 mm'lik plaklar ve 1 mm numune kalınlığı kullanılmaktadır. Deney sonucunda belirlenen kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri tespit edilmektedir. İşlem görmemiş bağlayıcılar için $G^*/\sin\delta$ değerinin minimum 1.000 Pa(kg/m*s²), RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise $G^*/\sin\delta$ değerinin minimum 2.200 Pa(kg/m*s²) olması gerekmektedir (Ahmedzade vd., 2008).

- Dönel Viskozite Deneyi (Rotational Viscometer- RV):

Dönel viskozite deneyi, bitümün sıcak karışım tesisinde, hangi derecede pompalanabilirlik ve işlenebilirliğe sahip olduğunun tespiti için akış karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır. Dönel viskozite; silindirik bir çubuğun sabit bir sıcaklıkta, bitüm numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenir. Bu deney, bitümün pompalanıp agrega ile karıştırılacak kıvamda olup olmadığını anlamak amacıyla, orijinal haldeki kaplamalara uygulanır. Ayrıca viskometre, karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının tahmininde kullanılan sıcaklık-viskozite tablosunun hazırlanmasında da önemli bir görev üstlenir.

- Eğilme Deneyi (Bending Beam Rheometer- BBR):

Asfalt kaplamaların düşük sıcaklıktaki termal çatlamasını tahmin etmek için bitümlü bağlayıcının ortam sıcaklığından -40°C'ye kadar eğilme akma sertliğini ölçer (Şekil 3.29). Diğer Superpave deneylerinde olduğu gibi bu deneyde de bitümlü bağlayıcının uygulanacağı bölgedeki tahmin edilen gerçek sıcaklık değerleri deney sıcaklığı olarak kullanılır. Özel kalıplar, TS EN 14771 standartlarıyla test için bağlayıcılardan küçük kırış numuneleri oluşturur ve sabit bir yük uygulandığında kırışın sapması kaydedilir.



Şekil 3.29: BBR deney cihazı ve numunenin yük-yer değiştirme şeması

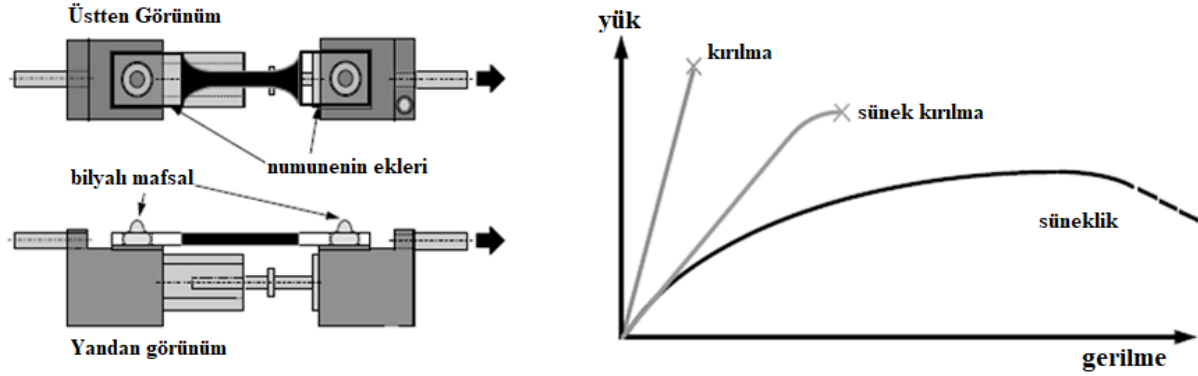
Bitüm, düşük sıcaklıklarda DSR ile alınacak sonuçlara güvenilmeyecek kadar sertleşir. Bu nedenle, bitümü düşük sıcaklıklarda gözlemlemek üzere SHRP tarafından eğilme reometresi geliştirilmiştir. Deney genellikle sıfırın altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve sabit yük uygulanan kiriş şeklindeki bitüm bir çubuğun, bu yük altında zaman içindeki sehimini izlenir. Deney sıcaklığı, bitümün servis durumundaki karşılaşılabilecek en düşük sıcaklığa göre değişir. Bu deneyde RTFO ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Böylece servis durumundaki veya karışım ve serme sırasındaki asfalt deneyde temsil edilmiş olur. Deney bilgisayar kontrollü yapılır ve yine bilgisayar tarafından anlık zaman-deformasyon ile zaman-sünme sertliği grafikleri çizilerek 60 sn sonundaki sünme sertliği “S” ve sünme oranı “m” hesaplanır. 60 saniye sonunda sünme sertliği $S(t) < 300 \text{ MPa}$ ve m-değeri > 0.300 olmalıdır.

- Doğrudan Çekme Deneyi (Direct Tension Tester DTT):

Yapılan araştırmalar, asfaltın düşük sıcaklıklardaki sertliği ile kopma anından önceki uzama oranı arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Kopma anından önceki uzaması nispeten fazla olan asfaltlar sünek (düktil), fazla uzamadan kopanlar ise gevrek (kırılgan) olarak nitelendirilirler (Şekil 3.30).

BBR deneyi ile ölçülen sertlik, asfaltın zayıflama anından önceki çekmeye karşı kapasitesini anlatabilmekte yeterli değildir. Örneğin, bazı asfaltlar yüksek sünme sertliğine sahip olsa bile

çok fazla miktarda çekilebilirler. Bu yüzden SHRP araştırmacıları, bu tür sert fakat duktıl asfaltlar için bir deney geliştirmişlerdir. Bu deneyde RTFO ya da PAV deneyleriyle yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Kemik formu verilmiş asfalt numunesi, düşük sıcaklıklarda iki ucundan zayıflama anına kadar çekilir.



Şekil 3.30: Deney cihazı şeması ve yük altındaki grafikleri

3.7.1.4 Agreganın Seçimi

Agrega seçiminde iklim, trafik, kayma direnci, neme duyarlılık, elde edilebilirlik, yerel deneyim ve maliyet gibi birçok faktör dikkate alınmalıdır. Superpave yönteminde bitümlü karışımlarda kullanılacak başlıca agreganın özellikleri agreganın elde edildiği kaynağa bağlı ve mutabakat özellikleri altında ele alınmaktadır.

– Agreganın Granülometrisi

Mutabakat Özellikleri	Kaynak Özellikleri
• Agreganın gradasyonu • Kaba agreganın açısıllığı • İnce agreganın açısıllığı • Kıl içeriği(Kum Eşdeğeri) • İnce uzun taneler	• Aşınmaya karşı direnç(T 96) • Sağlamlık (T 104) • Kıl Topakları ve Gevrek Parçacıklar (T 112)

Farklı kuruluşlar tarafından şu anda farklı elek boyutları kullanılmaktadır. Superpave karışım tasarım yöntemi, granülometri analizleri için AASHTO T27 standart eleklerinin kullanılmasını şart koşmaktadır.

Granülometri, bu belirlenmiş eleklerden geçen yüzdelere olarak ifade edilir. Belirtilen elekler haricinde farklı boyuttaki elekler, granülometriyi, maksimum agrega boyutu belirlemelerini ve karışımın hacimsel tasarımını etkilediğinden kullanılmamalıdır. Nominal maksimum elek boyutu, agreganın %10'undan fazlasını tutan ilk elek boyutundan bir boyut büyük olarak tanımlanır. Maksimum elek boyutu ise nominal maksimum boyuttan bir boyut daha büyük olarak tanımlanır. Karışımlar esasen nominal maksimum elek boyutuna göre belirlenir. Agreganın nominal maksimum boyutunun seçimi, tabaka kalınlığını ve karışımın yol yapısındaki derinliğini dikkate almalıdır. Genel bir kılavuz olarak, tabaka kalınlığı nominal maksimum boyutun 2,5 katı olmalı ve nominal maksimum boyut derinlikle artmalıdır. Elek boyutları Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10: Elek Boyutları

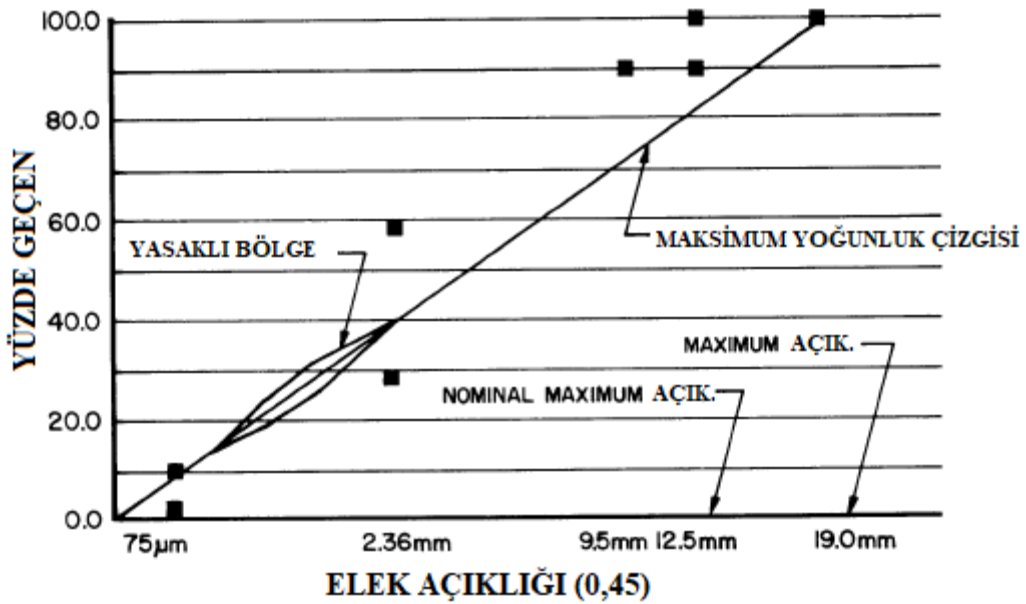
Elek Boyutu ve Tanımı	İnç karşılığı
63,0 mm	2 ½ in.
50,0 mm	2 in.
37,5 mm	1 ½ in.
25,0 mm	1 in.
19,0 mm	¾ in.
12,5 mm	½ in.
9,5 mm	3/8 in.
4,75 mm	#4
2,36 mm	#8
1,18 mm	#16
600 µm	#30
300 µm	#50
150 µm	#100
75 µm	#200

Agrega granülometrisi standartları, her nominal maksimum boyut için kontrol noktaları ve kısıtlı bir alan içerir. Şekil 3.31'de, 12,5 mm nominal maksimum boyut granülometrisinin 0,45 güç grafiği üzerine çizilmiş standartlarını göstermektedir. Minimum ve maksimum yüzdeleri kontrol eden sekiz granülometri kontrol noktası kullanılır; bunlar 75 µm (filler), 2,36 mm veya 4,75 mm (kum) ve nominal maksimum elek boyutunu geçerken maksimum elek boyutunu da tanımlar.

Şekil 3.31'de gölgeli alan olarak gösterilen kısıtlı alan, granülometrinin geçmemesi gereken

bir alanı temsil eder. Kısıtlı alanın iki amacı vardır. Granülometri eğrisinde 600 μm aralığında "tepe" oluşturan büyük miktarlarda doğal kumun dahil edilmesini sınırlamaktır. İkincisi ise maksimum yoğunluk çizgisine düşen granülometrileri engellemekte ve bu nedenle genellikle mineral agregada yetersiz boşluklar olmasına neden olmaktadır.

Agrega granülometrisi, sıkıştırma gereksinimlerini karşılayan ve mineral agregada yeterli boşluklar sağlayan bir agregada yapısı oluşturmak için seçilir. Mineral agregadaki boşluklar ve işlenebilirlik, esas olarak granülometri, köşelilik ve yüzey dokusu gibi agregada özelliklerinden etkilenir. Tasarımcı tarafından seçilen agregada stok yığınları kullanılarak bir karıştırma analizi yapılır ve karıştırma analizi sonuçları 0,45 güç granülometri analizi grafiklerine çizilir.



Şekil 3.31: 12,5 mm'lik nominal maksimum boyutlu agregada derecelendirmesi için Superpave kontrol noktaları ve kısıtlı bölge

– Kaba Agregada Açıklığı

Agreganın kırılmış yüzeyleri, 4,75 mm elek boyutundan daha büyük olan parçacıkların mekanik olarak kırılmış yüzeylerinin yüzdesi olarak tanımlanır. Agreganın kırılmış yüzeyleri, yol çökmesine neden olan kayma kuvvetlerine karşı direnç gösterecek yeterli bir agregada iskeleti sağlar. Kırılmış yüzey gereksinimi, trafik hacmine ve yol katmanına bağlıdır. Yüksek trafik hacimleri genellikle daha fazla kırılmış yüzey gerektirir. Üst yol tabakaları, özellikle yüzey tabakaları, alt tabakalardan daha fazla kırılmış yüzeye ihtiyaç duyar. ASTM D 5821, “Kaba Agregadaki Kırık Parçacıkların Yüzdesinin Belirlenmesi.” Standardı belirlenmiştir.

Yüksek trafik hacmine sahip yollarda kullanılacak karışımlar mühendislik özelliklerine göre değerlendirilir; bu nedenle kırılmış yüzeyler, Superpave karışım tasarım yönteminin hacimsel oranlama aşamasında bir kılavuz olarak kabul edilir. Trafik seviyesi ve yol yapısındaki konuma göre kırılmış yüzeylerin önerilen değerleri Tablo 3.11'de listelenmiştir.

Tablo 3.11: Kaba agreganın açısallığı önerileri

Trafik Seviyesi (ESAL'ler)	Yüzey Karışımları (< yüzeyden 100 mm)	Alt Karışımlar (> yüzeyden 100 mm)
$< 3 * 10^5$	55/-	-/-
$< 10^6$	65/-	-/-
$< 3 * 10^6$	75/-	-/-
$< 10^7$	85/80	65/-
$< 3 * 10^7$	95/90	80/75
$< 10^8$	100/100	95/90
$> 10^8$	100/100 ¹	100/100
Not: Kaba agreganın açısallığı, bir veya daha fazla kırık yüzeye sahip 4,75 mm elekte tutulan malzemenin ağırlıkça yüzdesidir. İkinci ve üçüncü sütunlardaki ilk sayı, bir yüzde kırılma yüzdesini, ikinci sayı iki yüzde kırılma yüzdesini belirtir, örneğin, 85/80, en az bir kırılmış yüze sahip parçacıkların yüzde 85'i ve en az iki kırılmış yüze sahip parçacıkların yüzde 80'idir.		

– İnce Agreganın Açısallığı

2,36 mm elek boyutundan geçen malzeme olarak tanımlanan ince agreganın, karışımın kalıcı deformasyona karşı direnç gösterebilmesi için yeterli iç sürtünmeye sahip olmalıdır. Yuvarlak doğal kumlar istenmeyen olarak kabul edilir. İnce agreganın köşeliliği, ASTM Standart Test Yöntemi C 1252, "İnce Agregaların Sıkıştırılmamış Boşluk İçeriği" kullanılarak ölçülmektedir. Önerilen değerler, trafik miktarına ve yol tabakasının bulunduğu derinliğe bağlıdır (Tablo 3.12).

Tablo 3.12: İnce agreganın açısallığı önerileri

Tasarım ESAL'ları	Yüzey Karışımları (< yüzeyden 100 mm)	Alt Karışımlar (> yüzeyden 100 mm)
$< 3 * 10^5$	-	-
$< 3 * 10^6$	40	-
$< 3 * 10^7$	45	40
$\geq 3 * 10^7$	45	45

– Agregada Kil İçeriği

Kil içeriği, 4,75 mm elekten daha ince olan agregada fraksiyonunda bulunan kil malzemesinin yüzdesidir. AASHTO T 176, “Kum Eşdeğeri Deneyi Kullanılarak Derecelendirilmiş Agregalarda ve Zeminlerde Plastik İncelikler” ile lr. Bu testte, bir ince agregada numunesi, içinde topaklaştırıcı bir çözelti bulunan dereceli bir silindire yerleştirilir ve agregada içinde bulunan ve agregayı kaplayan kil minerallerini gevşetmek için çalkalanır. Topaklaştırıcı zelti, kil malzemesini granüler agreganın üzerinde süspansiyon haline getirmeye zorlar. kelmeye izin veren bir sürenin ardından, askıdaki kil ve çökelmiş kumun silindir yüksekliği ölçülür. Kum eşdeğeri değeri, kumun kil yüksekliğine oranı olarak hesaplanır ve yüzde olarak ifade edilir. Tablo 3.13'te gösterildiği gibi kum eşdeğerinin sınırlayıcı değerleri önerilir.

Tablo 3.13: Kum eşdeğeri için sınır değerleri

Trafik (ESAL'ler)	Minimum Kum Eşdeğeri Seviyesi %
$< 3 * 10^6$	40
$< 10^7$	45
$> 10^7$	50

– Agreganın Yassı/İnce Uzun Parçaları

İnce, uzun agregaların düz kenarına yük uygulandığında dayanımı azalır. Ayrıca sıkıştırma sırasında ayrışma ve agreganın parçalanmasına da katkıda bulunabilirler. Uzun parçalar, maksimum boyut ile minimum boyut arasındaki oranın 5'ten fazla olmasıyla tanımlanır. ASTM Standart Test Yöntemi D4791, "Kaba Agregadaki Düz veya Uzun Parçalar," kullanılacak test yöntemidir. Uzun parçalar için önerilen sınırlar, 10^7 ESALs'ten daha yüksek trafik seviyeleri için ağırlıkça maksimum %10'dur.

– Agreganın Sertliği

Agreganın sertliği, Los Angeles Aşınma Testi ile ölçülen darbe etkisine karşı dayanıklılık olarak tanımlanır. Prosedür AASHTO T 96, “Los Angeles Makinesi Kullanılarak Küçük Boyutlu Kaba Agreganın Aşınmaya Karşı Direnci ”nde belirtilmiştir. Agreganın sertliği, ilgili kuruluş tarafından tanımlanır. Los Angeles aşınma testi için önerilen değerler, trafik seviyesi

ve yol yapısındaki konuma göre Tablo 3.14'te listelenmiştir.

Tablo 3.14: Los Angeles aşınma limitlerinin önerilen sınır değerleri

Trafik Seviyesi (ESAL'ler)	Los Angeles Aşınma Kaybı (Aşınma Kısım)	Los Angeles Aşınma Kaybı (Aşınmayan Kısım)
$< 10^6$	50	50
$< 10^7$	45	50
$< 10^8$	40	50
$\geq 10^8$	35	50

Bu test, iri agreganın taşıma, inşaat ve hizmet sırasında aşınmaya ve mekanik bozulmaya karşı direncini tahmin eder. Genellikle 2,36 mm'den büyük olan iri agreganın çelik küreler tarafından darbeye ve öğütülmeye maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Test sonucu, mekanik bozulmanın bir sonucu olarak test sırasında kaybedilen iri malzemenin ağırlıklı yüzdesi olan kayıp yüzdesidir. İzin verilen maksimum kayıp değerleri tipik olarak yaklaşık yüzde 35 ila 45 arasında değişir.

– Agreganın Sağlamlığı

Sağlamlık, sodyum veya magnezyum sülfat sağlamlık testi sırasında bir agreganın karışımındaki malzeme kaybının yüzdesidir. Prosedür AASHTO T 104, “Sodyum Sülfat veya Magnezyum Sülfat Kullanılarak Agreganın Sağlamlığı”nda belirtilmiştir. Bu test, agreganın hizmetteyken hava koşullarına karşı direncini tahmin eder. Hem iri hem de ince agreganın üzerinde gerçekleştirilebilir. Test, bir agreganın numunesinin dönüşümlü olarak doymuş sodyum veya magnezyum sülfat çözeltilerine tekrar tekrar daldırılması ve ardından fırında kurutulmasıyla gerçekleştirilir. Bir daldırma ve kurutma bir sağlamlık döngüsü olarak kabul edilir. Kurutma aşaması sırasında, tuzlar agreganın geçirgen boşluklarında çöker. Tekrar daldırıldığında tuz yeniden nemlenir ve donan suyun genleşme kuvvetlerini taklit eden iç genleşme kuvvetleri uygular. Test sonucu, gerekli sayıda döngü için çeşitli elek aralıkları üzerindeki toplam yüzde kayıptır. İzin verilen maksimum kayıp değerleri genellikle beş döngü için yaklaşık yüzde 10 ila 20 arasında değişir.

– Zararlı Maddeler

Zararlı malzemeler, harmanlanmış agregadaki şey, odun, mika ve kömür gibi kirleticilerin

ağırlık yüzdesi olarak tanımlanır. Bu özellik AASHTO T 112, “Agregalarda Kil Topakları ve Gevrek Parçacıklar” ile ölçülür. Hem kaba hem de ince agregada üzerinde gerçekleştirilebilir. Test, agregada boyutu fraksiyonlarının öngörülen elekler üzerinde ıslak elenmesi ile gerçekleştirilir. Islak eleme sonucunda kaybedilen malzemenin ağırlık yüzdesi, kil topaklarının ve gevrek parçacıkların yüzdesi olarak rapor edilir. Kil topaklarının ve ufalanabilir parçacıkların izin verilen maksimum yüzdesinin geniş bir aralıkta olduğu görülmektedir. Değerler, kirleticinin tam bileşimine bağlı olarak yüzde 0,2 gibi küçük bir orandan yüzde 10 gibi yüksek bir orana kadar değişmektedir (Bukowski vd., 2002).

3.7.1.5 Karışım Numunelerinin Hazırlanması

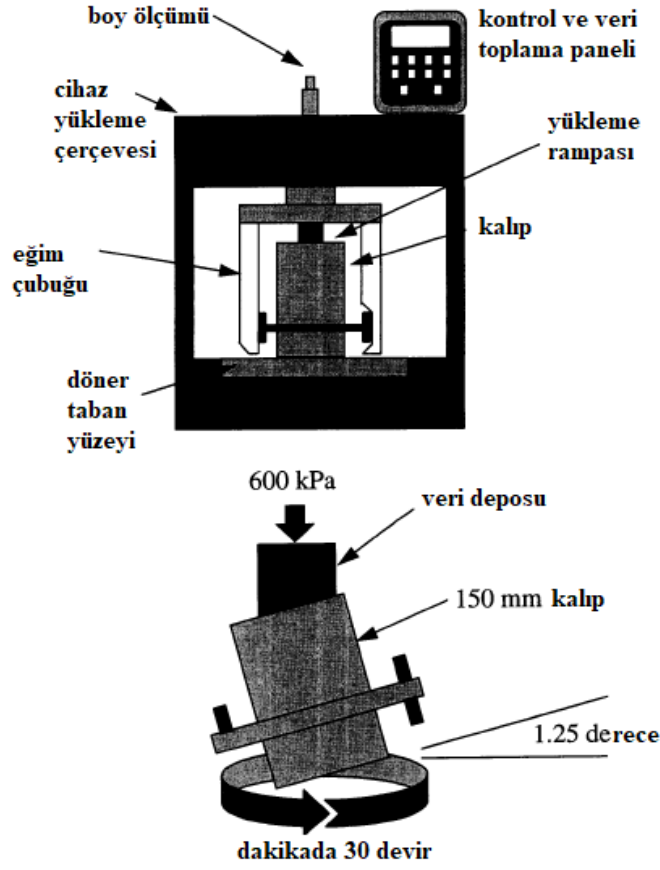
Tüm karışım tasarım sistemi, saha kontrolü dahil olmak üzere, Superpave döner sıkıştırıcıyı kullanmaya dayanmaktadır. Sıkıştırıcı, nispeten ucuz, taşınabilir ve minimum örnekler arası değişkenlikle hızlı bir şekilde örnekler oluşturabilen bir cihazdır. Sıkıştırılmış örneğin performans özellikleri, aynı bitüm agregada karışımı ile hazırlanmış sahadan alınan numunelerin performans özelliklerini temsil eder. Sıkıştırıcı ayrıca karışımın işlenebilirliğini değerlendirir, bu da trafik altındaki hava boşluğu içeriğinin tahminini (karışımın trafik altında esnekliğini) ve karışımdaki agreganın yapısına dair bilgiler verir. Yoğunluk, maksimum teorik özgül ağırlığın (AASHTO T209) yüzdesi olarak, ya sıkıştırma sayısına ya da sıkıştırma sayısının logaritmasına karşı çizilebilir. Bu süreç, karışımın işlenebilirliğini ve agregada yapısının değerlendirilmesine olanak tanır.

Superpave karışım tasarım prosedüründe üç sıkıştırma seviyesi belirtilmiştir:

- $N_{\text{başlangıç}}$: başlangıç sıkıştırma;
- $N_{\text{tasarım}}$: tasarım sıkıştırma;
- N_{maksimum} : maksimum sıkıştırma.

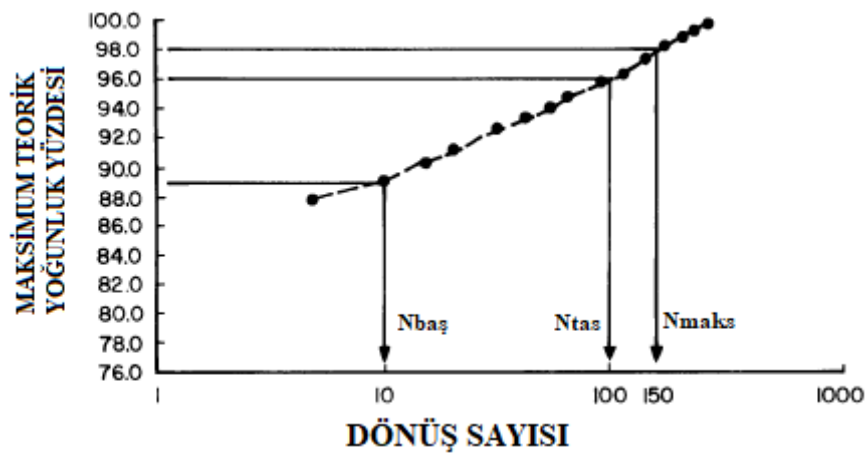
Şekil 3.32’de gösterilen Superpave döner sıkıştırıcısının özellikleri şunlardır:

- $1,25 + 0,02^\circ$ ’lik bir dönme açısı
- Dakikada 30 devir hızı
- Dönme sırasında 600 kPa’lık dikey basınç
- 150 x 150 mm boyutlarında numuneler üretebilme yeteneği



Şekil 3.32: Superpave döner sıkıştırıcısı şematik görüntüsü ve çalışma prensibi

Sıkıştırma süreci sırasında, numunenin göreceli yoğunluğu izlenir ve görüntülenir. Tipik sonuçlar Şekil 3.33'te gösterilmiştir.



Şekil 3.33: SHRP döner sıkıştırıcısı ile elde edilen tipik yoğunlaşma eğrisi

Sıkıştırma değerleri $N_{başlangıç}$ ve $N_{maksimum}$ karışımın işlenebilirliğini değerlendirmek için

kullanılırken, $N_{\text{tasarım}}$ bitüm içeriğini seçmek için kullanılır. Bu sıkıştırma değerlerine karşılık gelen yoğunluklar şunlardır:

- $C_{\text{başlangıç}}$
- $C_{\text{tasarım}}$
- C_{maksimum}

Bu yoğunluklar, maksimum teorik özgül ağırlığın (AASHTO T209) yüzdesi olarak ifade edilir. $N_{\text{tasarım}}$ değerleri, ortalama tasarım hava sıcaklığı ve ESAL'lara bağlıdır ve Tablo 3.15'te gösterildiği gibi 68 ile 172 arasında değişir. Tasarım yüksek hava sıcaklığı, Superpave yazılımındaki hava durumu verilerinden ve kullanıcı tanımlı güvenilirlikten elde edilebilir.

$N_{\text{başlangıç}}$ için sıkıştırma sayısı 7 ile 10 arasında değişir ve Eşitlik 21'deki denklemlerle hesaplanır:

$$\log N_{\text{baş}} = 0,45 * \log N_{\text{tas}} \quad (21)$$

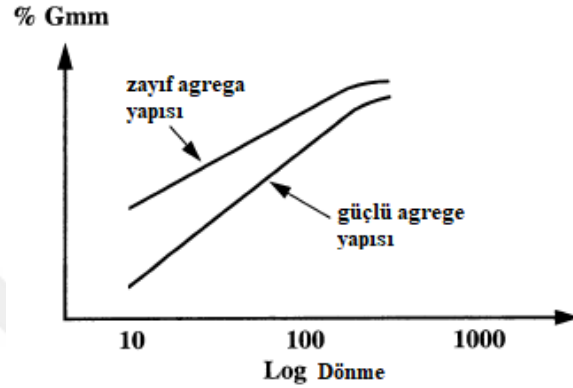
N_{maksimum} için sıkıştırma sayısı ise 104 ile 287 arasında değişir ve Eşitlik 22'deki denklemlerle göre hesaplanır:

$$\log N_{\text{maks}} = 1,10 * \log N_{\text{tas}} \quad (22)$$

Tablo 3.15: Tasarım sıkıştırma ($N_{\text{tasarım}}$) trafik ortalaması

Trafik (ESAL'ler)	Ortalama Tasarım Hava Sıcaklığı			
	<39	39-41	41-43	43-45
$< 3 \times 10^5$	68	74	78	82
$< 1 \times 10^6$	76	83	88	93
$< 3 \times 10^6$	86	95	100	105
$< 1 \times 10^7$	96	106	113	119
$< 3 \times 10^7$	109	121	128	135
$< 1 \times 10^8$	125	139	146	153
$> 1 \times 10^8$	143	158	165	172

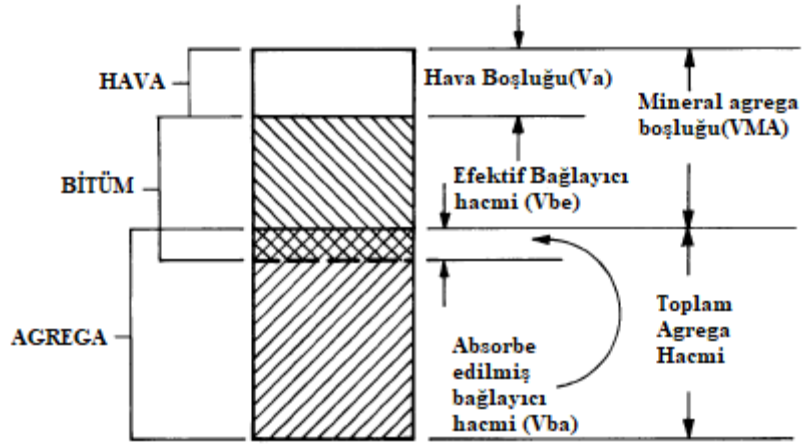
Aynı bitüm içeriğine sahip iki farklı agrega yapısının tipik sıkıştırma eğrileri Şekil 3.34'de gösterilmektedir. Göreceli olarak dik eğriler ve düşük $C_{baş}$ değerleri sergileyen karışımlar, iyi bir agrega yapısı veya içsel sıkıştırmaya karşı direnç geliştirmiş karışımları ifade eder. Daha dik eğriler, daha iyi agrega yapılandırmasını gösterir. Zayıf bir agrega yapısına sahip bir karışım için tasarım bitüm içeriği seçmek mümkün olsa da, bu tasarım daha kötü performansa, özellikle de kalıcı deformasyona karşı direncine neden olacaktır.



Şekil 3.34: Güçlü ve zayıf agrega yapılarının farklı özelliklerini gösteren yoğunlaşma eğrileri

3.7.1.6 Sıkıştırılmış Numunelerin Yoğunluk ve Hacimsel Analizleri

Asfalt karışım hacimsel özellikleri, diğer bir deyişle bitümlü bağlayıcı ve agrega bileşenlerinin hacimsel oranları, asfalt karışım davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, Superpave karışımlarının hacimsel özelliklerini dikkate almak için hacimsel bir karışım tasarım protokolü geliştirilmiştir. Sıkıştırılmış bir kaplama karışımının hacimsel özellikleri [hava boşlukları (V_a), mineral agregadaki boşluklar (VMA) ve asfaltla dolu boşluklar (VFA)] karışımın potansiyel kaplama hizmeti performansı hakkında bazı göstergeler sağlar. Tasarım asfalt karışımının seçimiyle ilgili bilinçli kararlar verebilmek için bu bölümde açıklanan tanımları ve analitik prosedürleri anlamak gerekir. Burada verilen bilgiler hem laboratuvarda sıkıştırılmış asfalt karışımları hem de sahada bir kaplamadan kesilmiş bozulmamış numuneler (karotlar/kirişler) için geçerlidir. Hacimsel özellikler, Şekil 3.35'te gösterilen hacim diyagramına göre tanımlanır.

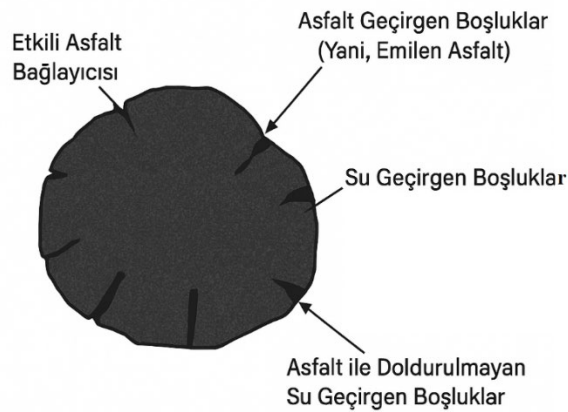


Şekil 3.35: Sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımının hacimsel diyagramı

Mineral agregat gözeneklidir ve değişken bir dereceye kadar su ve asfaltı emebilir. Ayrıca, suyun asfalt emilimine oranı her agregaya göre değişir. Agregat özgül ağırlığını ölçmek için kullanılan üç yöntem bu farklılıkları dikkate alır. Bu yöntemler hacimsel, görünür ve efektif özgül ağırlıkları verir.

- Agregat karışımının zahiri (G_{sa}) ve hacim özgül ağırlığı (G_{sb})

Geçirimli bir malzemenin (malzemeye normal olan geçirimli ve geçirimsiz boşluklar dahil) birim hacminin belirtilen sıcaklıktaki havadaki kütesinin, belirtilen sıcaklıktaki eşit hacimdeki gazsız damıtılmış suyun havadaki kütesine oranıdır. Hacim özgül ağırlığı (AASHTO T84 ve T85/KT-6) bir agregat numunesinin kuru kütlesi ve yığın hacmi ölçülerek belirlenir. Yığın hacmi, Şekil 3.36'da gösterildiği gibi katı agregat hacmi artı su tutan yüzey gözeneklerinin hacmini (yani, Yığın Hacmi = katı hacmi + su geçirgen gözenek hacmi) içerir.



Şekil 3.36: Agregat bitüm birleşimi gösterimi

Zahiri Özgöl Ağırlık(G_{sa}), belirli bir sıcaklıktaki geçirimsiz bir malzemenin birim hacminin havadaki kütesinin, belirli bir sıcaklıktaki eşit hacimdeki gazsız damıtılmış suyun havadaki kütesine oranı. Görünür özgül ağırlık (KT-6 kullanılarak da ölçülür) bir agreganın kuru kütle ve görünür hacmi ölçülerek belirlenir. Görünür hacim sadece katı agreganın hacmini içerir ve Şekil 3.36'da gösterildiği gibi herhangi bir yüzey gözeneklerinin hacmini içermez (yani, görünür hacim = katı agreganın partiküllerinin hacmi). Kaba, ince ve mineral fillerden oluşan agreganın zahiri ve hacim özgül ağırlık değerleri Eşitlik 23'teki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$G_{sa} = G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (23)$$

Burada;

G_{sa} : Agreganın zahiri özgül ağırlığı,

G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığı,

P_1, P_2, P_n : Her bir agreganın ağırlıkça yüzdesi (kaba, ince ve mineral filler),

G_1, G_2, G_n : Her bir agreganın hacim özgül ağırlığıdır (G_{sb} için hacim, G_{sa} için zahiri özgül ağırlığıdır).

– Agreganın efektif özgül ağırlığı (G_{se})

Yığın ve zahiri özgül ağırlık bağlamında, agreganın kuru kütle ve agreganın efektif hacmini içerir. Agreganın efektif hacmi, Şekil 3.35'te gösterildiği gibi katı agreganın hacmini ve su ile dolu ancak asfalt olmayan yüzey gözeneklerinin hacmini içerir. Etkin özgül ağırlık, (yığın özgül ağırlık + görünür özgül ağırlık)/2 formülüyle yaklaşık olarak hesaplanabilir veya AASHTO T209/KT-39 tarafından ölçülen bir asfaltlama karışımının maksimum özgül ağırlığı, G_{mm} , bilindiğinde, Eşitlik 24 yardımıyla hesaplanabilir:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (24)$$

G_{se} : Agreganın özgül ağırlığı,
 P_{mm} : Toplam gevşek karışımın ağırlıkça yüzdesi ($P_{mm} = 100$),
 G_{mm} : Asfalt karışımın (boşluksuz) maksimum özgül ağırlığı,
 P_b : Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm içeriği,
 G_b : Bitümün özgül ağırlığı.

Farklı asfalt içeriğindeki karışımların maksimum özgül ağırlığı (G_{mm}) değeri Eşitlik 25 yardımıyla hesaplanabilir:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (25)$$

P_s : Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agreganın içeriği.

– Agreganın bitüm absorpsiyonu (P_{ba})

Bitüm absorpsiyonu, karışımın toplam ağırlığının yüzdesi olarak değil, toplam agreganın ağırlığının yüzdesi olarak tarif edilir ve aşağıdaki bağıntı ile tayin edilir. Agreganın tarafından absorbe edilen bitüm, karışım performansı üzerinde bir etkiye sahip değildir ancak agreganın özgül ağırlığına bağlı olarak değişiklik gösterir. Eşitlik 26 yardımıyla hesaplanabilir:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b \quad (26)$$

P_{ba} : Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm.

– Asfalt karışımın efektif bitüm içeriği (P_{be})

Bir asfalt karışımın efektif bitüm içeriği (P_{be}), agreganın tarafından absorbe edilen bitüm miktarının toplam bitüm içeriğinden çıkarılmasıdır. Efektif bitüm içeriği (P_{be}), Eşitlik 27'deki bağıntı ile bulunur.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \quad (27)$$

P_{be}: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif bitüm içeriği.

- Sıkıştırılmış asfalt karışımındaki mineral agregadaki boşluk (VMA) yüzdesi

VMA yüzdesi, karışım ağırlığı ve agreg ağırlığının yüzdesi olarak Eşitlik 28 ile hesaplanmaktadır:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \quad (28)$$

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

G_{mb}: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (AASHTO T166/ASTM D1188-D2726).

Eğer karışım bileşimi toplam agreg ağırlığının yüzdesi olarak tespit edilmişse, Eşitlik 29 yardımıyla hesaplanabilir:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} * \frac{100}{100+P_b} * 100 \quad (29)$$

P_b: Toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm içeriği.

Superpave yönteminde, agreg a boyutuna bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğunda tavsiye edilen minimum VMA değerleri Tablo 3.16’da verilmiştir.

Tablo 3.16: Superpave VMA gereksinimleri

Nominal maksimum agreg a boyutu, mm	Minimum VMA, %
9,5	15,0
12,5	14,0
19	13,0
25	12,0
37,5	11,0

- Karışımındaki hava boşlukları (V_a) yüzdesi

Sıkıştırılmış asfalt karışımındaki hava boşlukları (V_a), asfalt ile kaplanmış agreg a taneleri arasında oluşan küçük hava boşluklarıdır ve bütün trafik düzeyleri için tavsiye edilen tasarım

V_a değeri %4'dür. Ortaya çıkan hava boşluğu değeri, Eşitlik 30 ile hesaplanabilir:

$$V_a = 100 * \left[\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right] \quad (30)$$

V_a : Sıkıştırılmış bir karışımda toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları.

– Karışımdaki asfaltla dolu boşluk (VFA) yüzdesi

VFA, agrega tarafından absorbe edilmiş bitüm hariç Eşitlik 31 bağıntı ile belirlenir:

$$VFA = 100 * \left[\frac{VMA - V_a}{VMA} \right] \quad (31)$$

VFA: VMA'nın yüzdesi olarak asfalt ile dolu boşluklar.

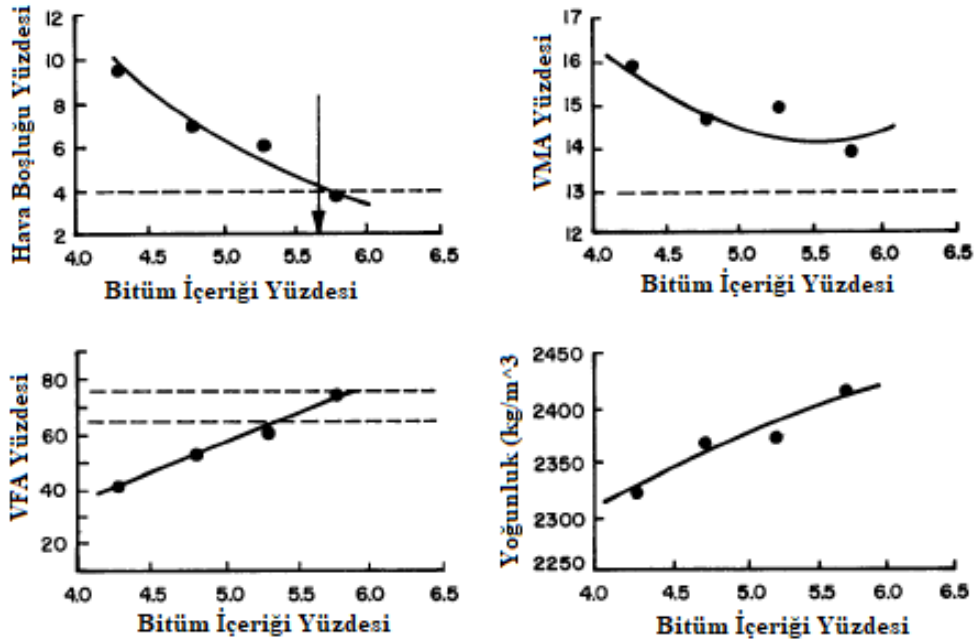
Trafik düzeyine bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğunda kabul edilebilir VFA değer aralığı Tablo 3.17'de verilmiştir (Hossain vd., 2020).

Tablo 3.17: Superpave VFA gereksinimleri

Trafik, milyon	Tasarım VFA, %
<0,3	70-80
0,3-3	65-78
3-10	65-75
10-30	65-75
≥ 30	65-75

3.7.1.7 Bitümlü Bağlayıcı İçeriğinin Belirlenmesi

Superpave yaklaşımı, bitümlü bağlayıcı içeriğini belirlemek için seçilen agrega yapısı ile farklı bitümlü bağlayıcı yüzdelelerini karıştırmayı ve bunun hava boşlukları, VMA ve VFA üzerindeki etkisini belirlemeyi içerir. Hacimsel özellikler, yani hava boşlukları, VMA, VFA ve yoğunluk, her örnek için $N_{\text{tasarım}}$ dönmesinde belirlenir. Hacimsel özelliklerin bağlayıcı içeriğine göre grafiklerinin çizimleri, Şekil 3.37'de gösterilen ve %4 hava boşluğu içeriğinde bitümlü bağlayıcı içeriği belirlenir. VMA ve VFA, spesifikasyon değerlerinin karşılandığını kontrol etmek için kontrol edilir.



Şekil 3.37: Yüzde hava boşlukları, yüzde VMA, yüzde VFA ve yoğunluk ile yüzde asfalt içeriğinin grafikleri

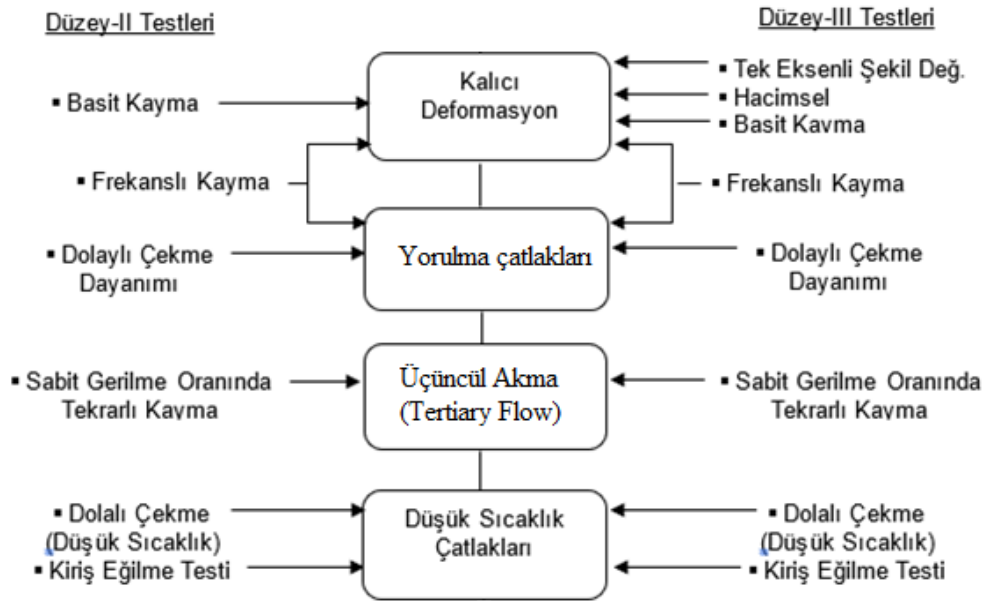
Deneyimler, VFA'nın hem yüksek kayma gerilimi altında karışım kararsızlığını hem de hızlandırılmış yaşlanmayı önleyecek sınırlar içinde olması gerektiğini göstermiştir. Düşük trafik hacimleri için kayma direnci ve yaşlanma özellikleri doğrudan ölçülmez; bu nedenle, VFA hacimsel tasarımda karşılanması gereken bir kriterdir. Hava boşlukları ve VMA'ya ek olarak VFA'nın standartları, VMA üzerinde etkili bir maksimum değer koyar ve düşük trafik hacmi koşulları için daha yüksek bitümlü bağlayıcı içeriklerine izin verir.

Düzey 1 karışım tasarımının birkaç sonucu mümkündür:

- Tüm kılavuzlar ve standart değerleri karşılanır. Tasarım bitüm içeriği ve tasarım agrega granülometrisi son karışım tasarımı olarak seçilir. Düzey 2 veya Düzey 3 karışım tasarımı yapılacaksa, Düzey 1 tasarımının sonuçları mekanik özelliklerin ölçümünde başlangıç noktası olarak kullanılır.
- Tüm kılavuzlar karşılanmamıştır, ancak karışım tasarımcısı son karışım kabul edilebilirliğini belirlemek için Düzey 2 veya 3 karışım tasarımı yapmaya karar verir.
- Bazı kılavuzlar ve gereklilikler karşılanmamıştır. Hacimsel tasarım tekrarlanır. Farklı agregalar veya aynı agrega stok yığınlarının başka bir karışımı gerekebilir.

3.7.2 Düzey 2 ve Düzey 3 Karışım Tasarım Aşamaları

Düzey 2 karışım tasarımının, tipik karayolu uygulamalarının en yaygın kullanılan Superpave tasarım türü olduğu bir gerçektir. Düzey 2 karışım tasarımı, tasarım şeması 10^6 'ile 10^7 arasında ESAL olan projelerde kullanılmalıdır. Şekil 3.38'de, Düzey-2 karışım tasarımı için gerekli performans testlerini göstermektedir.



Şekil 3.38: Superpave Düzey 2 ve Düzey 3 karışım tasarımları için performansa dayalı test gereksinimleri

Superpave Düzey 2 karışım tasarımı, hacimsel (Düzey 1) tasarımı kullanır ve bu tasarım kalıcı deformasyon, yorulma çatlaması ve düşük sıcaklık çatlaması açısından optimize eder. Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlamasını tahmin etmek için sabit yük oranında tekrarlanan kesme, sabit yükseklikte basit kesme, yükseklikte sabit frekanslı kayma ve dolaylı çekme test testleri yapılırken, düşük sıcaklık çatlamasını tahmin etmek için düşük sıcaklıkta dolaylı çekme ve dolaylı kayma test testleri kullanılır.

Kalıcı deformasyon tahminleri, iki testten elde edilen sonuçları gerektirir: frekanslı kayma ve basit kayma; her ikisi de kalıcı deformasyon için etkili bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Yorulma çatlağı tahminleri, üç test gerektirir: frekanslı kayma, basit kayma ve dolaylı çekme dayanımı; hepsi yorulma için etkili bir sıcaklıkta gerçekleştirilir.

Düşük sıcaklık çatlaması için yapılan tahminler, 0, -10 ve -20°C'de geçişli olarak çekme testlerine; -10°C'de yapılan dolaylı çekme dayanımı testine ve bitümlü bağlayıcı testlerinden elde edilen kırış eğilme testlerine dayanmaktadır. Kaplamada gerilme ve kırılma tahmin yapmak için kullanılır.

Superpave Düzey 3 karışım tasarımı, Düzey 2 karışım tasarım prosedürü ile benzer bir forma sahiptir, ancak daha kapsamlı bir performansa dayalı karışım özellikleri seti kullanılır ve yorulma çatlaması, kalıcı deformasyon ve düşük sıcaklık çatlaması için daha güvenilir tahminler sağlar. Düzey 3 tasarımlarında malzeme özelliklerinin karakterizasyonunu tamamlamak için, daha önce açıklanan Düzey-2 testleriyle birlikte iki ek test kullanılır (Şekil 3.38). Bunlar: tek eksenli gerilme (ek test) ve hacimsel gerilme durumu (ek test).

Hacimsel (gerilim altında hidrostatik durumu) test, tek eksenli gerilme testi ve basit kesme testi, agrega iskeletinin doğrusal olmayan elastik davranışını ölçmek için kullanılır ve karışımın kalıcı deformasyonu ile ilişkilidir. Agrega parçacıkları trafik yüklerine tepki olarak birbirleriyle temas halinde hareket ettikçe, agrega iskeletinin sertliği artar; bu da kaplamanın deformasyona karşı direncini artırır.

Düzey 3 karışım tasarımı için karışım performansı tahmini, temel olarak Düzey 2'dekiyle aynı şekilde yapılır. Düzey 2'den temel farklar şunlardır:

- Malzeme özelliği karakterizasyonu, doğrusal olmayan elastik davranış dahil olmak üzere daha eksiksizdir.
- Hava durumu verileri ve alt katman modülleri, yılın her biri belirli yol kaplaması sıcaklıklarına ve alt katman modüllerine sahip mevsimlere bölünmesiyle daha titiz bir şekilde değerlendirilir.

Üçüncül akma (sabit gerilim oranında tekrarlanan kesme testi) testinin kullanımı ve Düzey 2 tasarımındaki kaplamalar için sınırlamalar, Düzey 3 karışım tasarımına da uygulanır.

3.7.2.1 Performansa Dayalı Testler

Superpave karışım tasarım sistemine bir dizi performansa dayalı test içermektedir. Çoğunlukla, malzemenin çeşitli gerilimlere karşı tepkisini ölçmek için tahribatsız testler olarak düşünülebilirler. Önemli istisna, dolaylı çekme modunda kırılmada ölçülen çekme

dayanımı testidir.

– Yük Kaynaklı Testler

Superpave Kesme Test Cihazı: Superpave yazılımında kalıcı deformasyonu ve yorulma çatlamasını tahmin etmek için kullanılan malzeme modeli, doğrusal olmayan elastik, viskoelastik ve plastik karakterizasyonları içerir. Doğrusal olmayan elastik davranışta, esneklik modülü (elastik davranış), malzemedeki stres durumuna bağlıdır. Sıcak karışım asfaltta, esneklik modülünün doğrusal olmayanlığı karışımında bulunan agrega parçacıklarından kaynaklanır. Doğrusal olmayan elastik özellikleri ve plastik özellikleri ölçmek için üç test geliştirilmiştir:

- Hacimsel (hidrostatik gerilim durumu) testi;
- Tek eksenli gerinim testi ve
- Sabit yükseklikte basit kesme testi.

Çevre odası sıcaklığı kontrol eder ve numunenin hızla sınırlayıcı basınca maruz kalmasını sağlar. Reaksiyon çerçevesi son derece serttir, böylece çerçeve uyumluluğu olmadan hassas yer değiştirme ölçümleri yapılabilir. Kesme masası numuneleri tutar ve kesme yükleri uygulamak için çalıştırılabilir. Uygun bir hidrolik sistem, farklı test koşulları için numuneleri yüklemek için gereken kuvveti sağlar. Hidrolik bir pompa, her biri yaklaşık 32 kN kapasiteli iki aktüatörü çalıştırır. Dikey aktüatör, numuneleri test etmek için eksenel bir kuvvet uygular. Yatay aktüatör, numuneye kesme yükleri uygulayan kesme masasını çalıştırır.

Şekil 3.39, bu testleri gerçekleştirmek için geliştirilen çift eksenli kesme test cihazını göstermektedir.



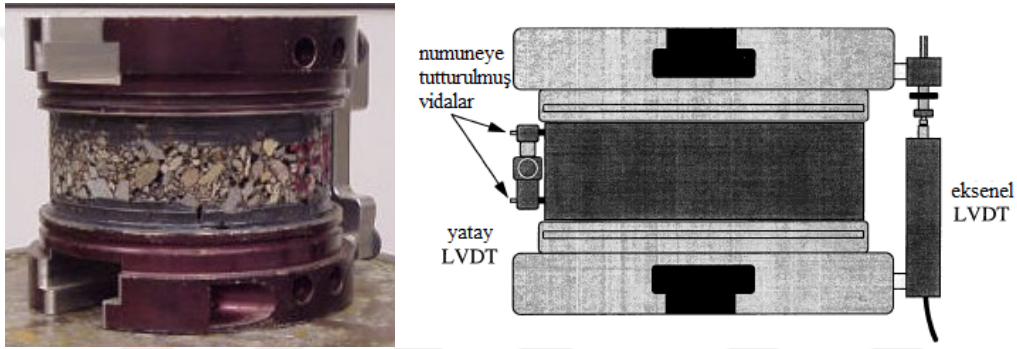
Şekil 3.39: Superpave kesme testi

Çevre kontrol ünitesinin, test odasının içindeki sıcaklığı ve hava basıncını sabit bir seviyede kontrol etmesi gerekir. Ünite, 1° ile 80°C arasında geniş bir aralıkta sıcaklık sağlayabilir. Hava basıncı ve oda içindeki basınç değişim hızı hassas bir şekilde kontrol edilir. Hava basıncı normalde saniyede 70 kPa'dan maksimum 840 kPa değerine kadar uygulanır. Bu, gerekli hızda test odasına boşaltılabilen ayrı depolama tanklarında basınçlı hava depolanarak elde edilir. Hava basıncı, hacimsel ve tek eksenli gerinim testi olmak üzere iki test için numune sınırlaması sağlar. Test, Düzey 2 tasarımlarında 63°C kadar yüksek bir etkili sıcaklıkta ve Düzey 3 tasarımlarında 4, 20 ve 40°C'de yapılır.

Numune hazırlamanın ilk adımı, test numunelerini 50 mm kalınlığa kadar kesmektir. Sınırlayıcı basınç gerektirmeyen dört test için numune iki plaka arasına yapıştırılır. Tutkal sertleşirken numuneyi plakalar arasında sıkıştırmak için bir yapıştırma cihazı (Şekil 3.40) kullanılır. Bu amaçla epoksi tipi bir yapıştırıcı kullanılır. Yapıştırma cihazı, plakaların paralel olmasını sağlamak için plakaları ve numuneyi sert bir şekilde tutar. Yapıştırıcı sertleştikten sonra, boşluk doldurucu bir çeşit hızlı yapıştırıcı kullanılarak numunenin yan tarafına dört vida yapıştırılır. Bu vidalar yatay Doğrusal değişken diferansiyel transdüserleri (Linear variable differential transducers-LVDT) tutan braketini yapıştırmak için kullanılır (Şekil 3.41).



Şekil 3.40: Kesme cihazı plaka yapıştırma bölümü



Şekil 3.41: Kesme test cihazında test edilen kapalı numuneler için LVDT kurulumu

Hacimsel ve tek eksenli gerilme testleri, protokollerinde sınırlama basıncını kullanır. Bu iki test sadece Düzey 3 karışım tasarımı için gerçekleştirilir. Düzey 2 ve 3 tasarımlarında sabit gerilme oranında tekrarlı kesme, sabit yükseklikte basit kesme ve sabit yükseklikte frekanslı kayma testleri kullanılır. Sabit yükseklikte tekrarlanan kesme testi, tekerlek izi derinliği tahmini için kullanılabilecek bağımsız bir testtir.

– Kayma Test Cihazı ile Gerçekleştirilen Testler

Aşağıdaki testler Superpave kayma testi cihazı kullanılarak gerçekleştirilir:

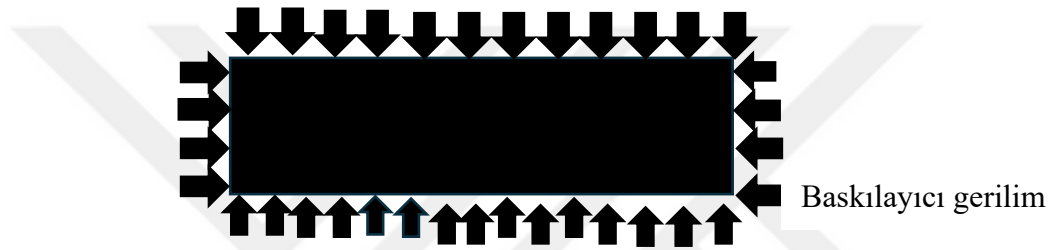
- Hacimsel test,
- Tek eksenli gerilme testi,
- Basit kesme testi,
- Frekanslı kayma testi,
- Sabit gerilme oranında tekrarlanan kesme testi, (tarama testi ile birlikte kullanılmaz)

- Superpave performans tahmin modelleri ve
- Tekrarlanan kesme testi (Superpave sisteminde kullanılmaz).

Sabit yükseklikte tekrarlanan kesme testi SHRP asfalt araştırma programı aracılığıyla geliştirilmiştir, ancak Superpave sisteminin bir parçası değildir. Tekerlek izi derinliğinin hızlı tahmini için kullanılabilir.

1. Hacimsel Test (Basınç altında Hidrostatik Durum)

Bu testte numune hidrostatik bir gerilme durumuna maruz bırakılır ve ilgili hacim değişikliği belirlenir. Şekil 3.42'de bu testin temel parametreleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.42: Hacimsel testin kavramsal görünümü

Hızlı bir sınırlama basıncı ($\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$) sabit bir oranda uygulanır. Üst ve alt plakalar numuneye sabitlenmediğinden, numune hem eksenel olarak hem de çevre veya çember olarak azalacaktır. Aşağıdaki yanıt değişkenleri ölçülür:

- $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$ = eksenel gerilmeler
- P_o = numunenin orijinal durumunda, mm
- P_c = eksenel gerilmeler altında numunenin parçalarının,
- $\Delta P = P_o - P_c$, mm
- r = numunenin yarıçapı,
- $\varepsilon = \Delta P / 2\pi r$

2. Tek Eksenli Gerilim Testi

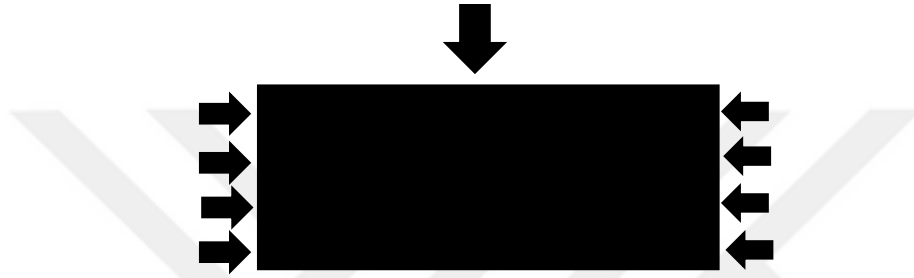
Bu testte, eksenel yük uygulanır ve numunenin sabit kalıcılığının sağlanması için gerekli olan yanıl basınç kaydedilir Sabit bir hızla bir yanıl basınç ($\sigma_{22} = \sigma_{33}$) uygulandı. Numune, konfinman basıncı nedeniyle doğru deforme olması, bu etkiyi dağıtımı ve sabit bir çevreyi

korumak için eksenel yük (σ_{11}) artırılır. Aşağıdaki tepki değişkenleri:

- σ_{11} = sabit çevreyi korumak için sürdürülebilir eksenel yük, kPa
- $\sigma_{22} = \sigma_{33}$ = yanal (sınırlandırma) basıncı, kPa
- Δ_v = numunenin dikey yer değiştirmesi, mm
- h = numunenin yüksekliği, mm
- $\varepsilon = \Delta_v / \text{saat}$

.

Şekil 3.43, bu testin ana verilerini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.43: Tek eksenli gerilim testinin kavramsal görünümü

3. Basit Kesme Testi

Bu testte, numuneyi sabit yükseklikte tutarken bir kayma gerilimi uygulanır ve karşılık gelen kayma gerilmesi ölçülür. Bir test numunesine kontrollü bir kesme gerilimi uygulanır. Numune kesildikçe genişler ve bu da yüksekliğini artırır. Numune yüksekliğini sabit tutmak için sürekli olarak eksenel bir gerilim uygulanır. Sabit bir gerilim hızında bir kesme gerilimi (σ_{22}) uygulanır. Numune yatay olarak yer değiştirirken veya deforme olurken sabit yükseklikte bir numuneyi korumak için değişken bir eksenel yük veya gerilim (σ_{11}) uygulanır.

Aşağıdaki tepki değişkenleri ölçülür:

- σ_{11} = sabit bir yüksekliği korumak için uygulanan değişken eksenel gerilim, kPa.
- σ_{22} = uygulanan kayma gerilimi, kPa.
- Δ_h = yatay yer değiştirme, mm.
- h = numunenin yüksekliği, mm.
- $\varepsilon = \Delta_v / 2h$

4. Frekanslı Kayma

Bu, kesme modunda bir frekans tarama testidir. Basit kesme testi düzeneği kullanılır, ancak yük bir dizi frekansta ve farklı sıcaklıklarda uygulanır. Bu sonuçlardan faz açısı (θ) ve kompleks modül (G'') ölçülür. Hiçbir sınırlayıcı basınç uygulanmaz. Kayma gerilimi küçük bir kayma gerilmesi sağlayacak şekilde ayarlanır ve sabit yüksekliği korumak için eksenel bir gerilim uygulanır. Aşağıdakiler ölçülür:

- σ_{11} = sabit bir yüksekliği korumak için uygulanan değişken eksenel gerilim, kPa.
- σ_{22} = uygulanan kayma gerilimi, kPa.
- θ = faz açısı, derece
- G'' = Karmaşık kayma modülü, kPa.

5. Dolaylı Çekme Test Cihazı

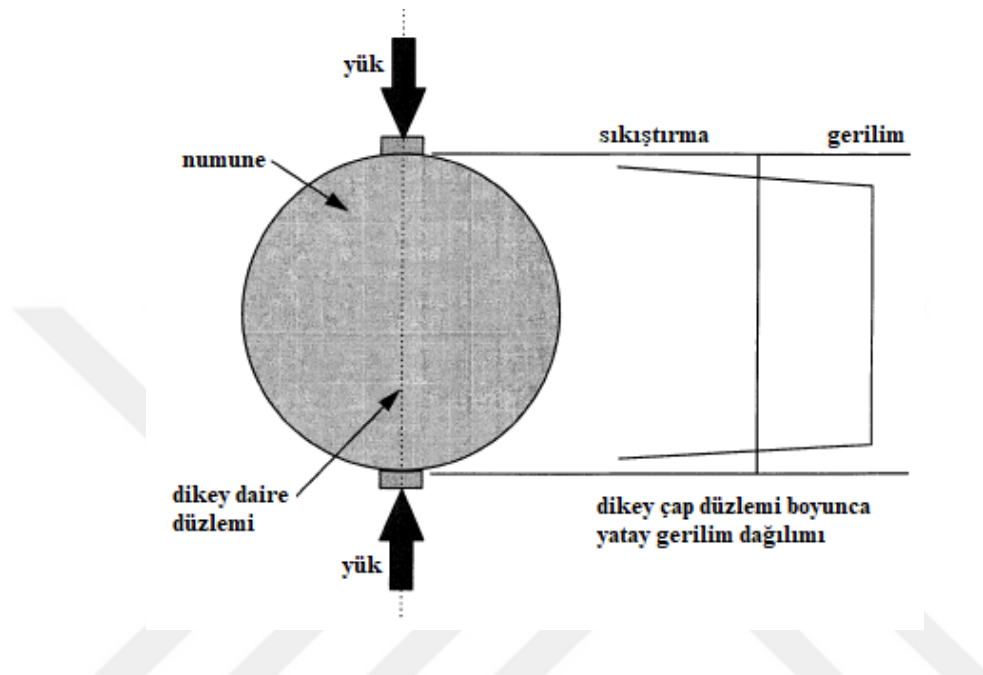
Dolaylı çekme testi, silindirik bir numunenin dikey çap eksenini boyunca bir sıkıştırma yükünün uygulanmasını içerir. Testin mekaniği, dikey çap düzlemi boyunca neredeyse tek tip bir çekme gerilimi durumu elde edilecek şekildedir. Bu test, karışım için yorulma çatlaması analiz verilerini elde etmek için kullanılır. Bu testte numune sabit bir deformasyon hızında (50 mm/dak) yüklenir. Numune, tepe yükü olan göçme anına kadar yüklenir. Test boyunca yük ve deformasyon özellikleri ölçülür.

Superpave yazılımında düşük sıcaklık çatlamasını tahmin etmek için kullanılan malzeme modeli doğrusal bir viskoelastik karakterizasyona dayanmaktadır. Düşük sıcaklıkta çatlama için kullanılan daha düşük test sıcaklıkları, kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaması için gereken modelden daha basit bir malzeme özelliği modelinin kullanılmasına izin verir. Gerekli malzeme özelliklerini elde etmek için iki test kullanılır. Testler şunlardır:

- Düşük sıcaklıkta çekme sünmesi
- Düşük sıcaklık çekme dayanımı

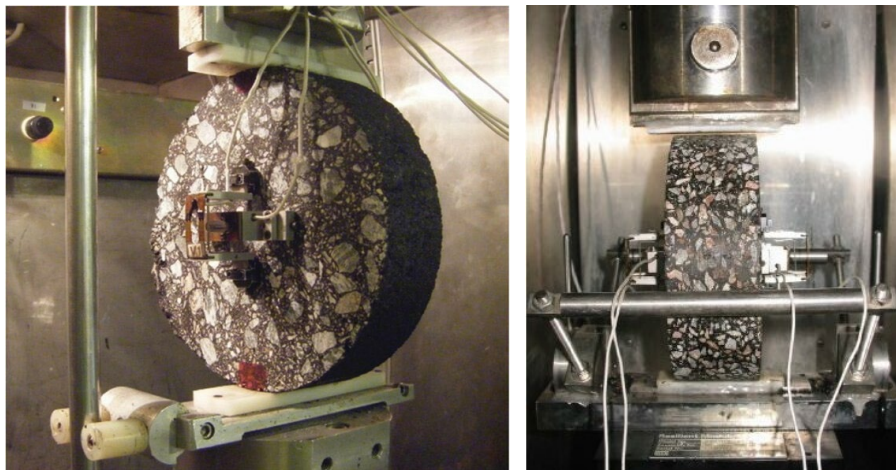
Bu testlerin her ikisi için de kullanılan ekipman IDT test cihazıdır. Test, orta ila düşük sıcaklıklarda dolaylı çekme yükleme tekniklerini kullanarak asfalt karışımlarının sünme uyumluluğunu ve mukavemetini ölçer.

Şekil 3.44’te dolaylı çekme testi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.44: Dolaylı Çekme Testinin şematik görünümü

Şekil 3.45, IDT testi için gereken ekipmanları göstermektedir.



Şekil 3.45: Dolaylı Çekme sünmesi ve mukavemet testleri için tipik numune ekipmanları

Testin ilk aşamasında, numune üzerine sabit büyüklükte statik bir sünme yükü yerleştirilir. Yükün büyüklüğü, testin sünme fazının tanımlanan süresi boyunca test numunesinde öngörülen düzeyde yatay mikro gerilim üretmelidir. Test boyunca numunenin her iki tarafında dikey ve yatay deformasyonlar ölçülür.

Sünme yükleme süresinin sonunda, numune ek yük uygulanarak göçme anına (tepe yükü) kadar yüklenir. Dikey ve yatay hareketler ve yük ölçülür. Ölçümler, yük tepe yükünden en az yüzde 10 daha az bir değere düşene kadar yapılır (Kennedy vd., 1994).

3.8 Dengeli Karışım Tasarım Yöntemi (Balanced Mix Design-BMD)

Tarihsel olarak, bitümlü karışım tasarım süreci esas olarak karışımların hacimsel özelliklerine odaklanmıştır. 1990'ların ortalarında Superpave karışım tasarım sürecinin tanıtılmasıyla birlikte, bu hacimsel prensiplere vurgu hem karışım tasarımında hem de üretim sürecinde kabul edilmiştir. Superpave karışım tasarım metodolojisinde, özellikle orta veya yoğun trafik taşıyan yol altyapıları için, bitümlü karışımların performanslarının bir dizi testle değerlendirilmesi önemli bir aşama olarak öne çıkmıştır. Ancak çeşitli faktörler nedeniyle bu performans testlerinin uygulanması zaman içinde sınırlı kalmıştır. Yıllar boyunca hem altyapı yönetim kurumları hem de bitümlü karışım endüstrisi, karışım tasarım sürecine entegre edilebilecek performans testlerine ilgi göstermiştir. Bu ilgi, hacimsel gereklilikleri karşılayan ancak sahada yapısal kusurlar nedeniyle daha düşük performans gösteren karışımların tespit edilmesi gereksiniminden ve aynı zamanda karışım tasarım sürecinde yenilikçi malzemelerin kullanılmasını kolaylaştırma isteğinden kaynaklanmıştır. ABD'deki çeşitli ulaşım departmanları, bitümlü karışımların dayanıklılığını artıracak çözümler arayarak yol ağını daha sürdürülebilir, dayanıklı ve ekonomik hale getirmeyi hedeflemiştir. BMD yöntemi, performans kriterlerini tasarım ve kabul sürecine entegre ederek bu zorlukların üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Sadece belirleyici standartlara dayanan yaklaşımlardan farklı olarak, BMD yöntemi, bitümlü karışımların değerlendirilmesi ve kabulü için özel olarak geliştirilmiş performans testlerinden faydalanır. BMD yöntemi, kademeli olarak sürece entegre edilebilecek farklı uygulama seviyeleri sunarak, hem kurumların hem de endüstrinin bu metodolojiye aşinalık kazanmasını sağlamaktadır.

Karışım tasarımında yeni sorunların ortaya çıkması ve sürekli yenilik arayışı, yeni ve yenilikçi çözümler geliştirme konusunda ana motivasyonları temsil etmektedir. Superpave karışım

tasarım sistemi, başlangıçta farklı trafik seviyeleri için üç düzeyde tasarlanmıştır. Düzey 1'in trafiğin az olduğu kaplamalarda kullanılması öngörülmüştür ve karışım tasarımı gereksinimleri öncelikle geleneksel hacimsel özelliklere dayanmaktadır. Düzey 2, orta düzeydeki trafik projelerinin çoğunluğu için kullanılacak ve hacimsel gereksinimlerin yanı sıra sınırlı sayıda karışım performans testini içermektedir. Düzey 3, yüksek trafikli kaplamalar için olacak ve hacimsel bazlı bir karışım tasarımıyla başlayacak ve bunu genişletilmiş bir dizi gelişmiş performans testi takip etmektedir. Bununla birlikte, SHRP tarafından önerilen karışım performans testleri, birkaç özel proje dışında hiçbir zaman uygulanmamıştır; bunun temel nedeni, bu testlerin, ABD'de her yıl kullanılan binlerce karışım tasarımı için rutin kullanım açısından pratik kabul edilmemesidir (Yin ve West, 2021). Özetle, hacimsel yöntemin ilk başarılarına rağmen, kaplamaların çatlaması ve parçalanmasıyla ilgili yeni sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu durum, yol altyapısı sektöründeki birçok kuruluşun, bitümlü karışım tasarımı için yeni yaklaşımlar aramasına neden olmuştur. Bu kapsamda, Eylül 2015'te Federal Karayolu İdaresi (Federal Highway Administration-FHWA) bünyesinde, BMD çalışma grubu kurulmuştur.

BMD, performans odaklı testlere dayandığı için bitümlü karışım tasarımı alanında önemli bir gelişmeyi temsil etmektedir. BMD, "karışımın yaşlanma, trafik, iklim ve kaplama yapısındaki konum gibi çeşitli bozulma türlerine karşı direncini değerlendiren uygun şekilde şartlandırılmış numuneler üzerinde performans testleri kullanan bir bitümlü karışım tasarımı yöntemi" olarak tanımlanmaktadır. BMD şu adımlardan oluşur:

- **Malzeme Seçimi:** Superpave yönteminde olduğu gibi, agrega ve bitümlü bağlayıcının seçimi büyük önem taşır. Bu uygulamada: Agregalar (çakıl taşı, kum ve dolgu malzemesi), uygun özelliklerle seçilir; çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla mümkünse geri dönüştürülmüş malzemeler, örneğin eski asfalt (Reclaimed Asphalt Pavement-RAP), kullanılabilir. Bitümlü bağlayıcı, iklim koşullarına ve performans gereksinimlerine göre seçilir. Katkı maddeleri (isteğe bağlı olarak polimerler, lifler, suya karşı direnç sağlayan katkıları gibi) de gerekirse kullanılabilir.
- **Performans Şartlarının Belirlenmesi:** Çalışma yapılacak alanın iklimi ve trafiği analiz edilerek karışım için gerekli performans gereksinimleri belirlenir. Bu gereksinimler şunlardır: Kalıcı deformasyona direnç, yorulmaya karşı direnç ve dayanıklılık.
- **Karışım Tasarımı:** Bu adımda, agregalar, bitüm ve katkı maddelerinin oranları belirlenerek karışım oluşturulur ve laboratuvar ortamında test numuneleri hazırlanır.

- **Mekanik Performans Değerlendirmesi:** Kalıcı deformasyona ve yorulmaya karşı dayanıklılığı ölçmek amacıyla hazırlanmış numuneler üzerinde performans testleri yapılır.
- **Dayanıklılık Performansı Değerlendirmesi:** Numuneler suya dayanıklılık ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan çatlamaya karşı test edilir.
- **Performansın Dengelenmesi:** Test sonuçlarına göre karışım dengelenir; malzeme oranları ayarlanarak optimum performans sağlanır.
- **Karışımın Onaylanması:** Karışımın sahada uygulanabilirliğini değerlendirmek için küçük ölçekli bir üretim yapılır ve sahada performansı izlenerek gerekirse karışımda ayarlamalar yapılır.
- **Dokümantasyon ve Onay:** Karışımın tüm test sonuçları, yapılan değişiklikler ve performans değerlendirmeleri raporlanarak nihai onay sürecinden geçirilir.

BMD, sürekli performans değerlendirmesi ve optimizasyon gerektiren iteratif bir süreçtir. Laboratuvarlar, malzeme üreticileri ve mühendisler arasındaki iş birliği tüm performans şartlarının karşılandığından emin olmak için hayati öneme sahiptir.

3.8.1 BMD Yaklaşımları

Performans testleri, bir karışımın yerel ortamdaki belirli bozulma türlerine nasıl dayanabileceğini güvenilir bir şekilde tahmin etmek için seçilmelidir. Test yöntemleri basit olmalı ve her laboratuvar tarafından kolaylıkla gerçekleştirilebilmelidir. BMD yöntemleri, geçmiş deneyimlere, malzeme maliyetlerine veya prosedür sınırlarına dayalı olarak malzeme oranlarını seçmek yerine, gerçeğe dayalı test sonuçlarını kullanarak hedeflenen yerel tehlike modları için karışımları optimize eder. Ancak bu performans testlerinin başarıyla tamamlanmasından sonra belirli bir karışımın işyeri karışım formülü (İKF) olarak kullanılabilirler.

Yaklaşım A'dan Yaklaşım D'ye kadar AASHTO PP 105-20'de tanımlanan dört BMD yaklaşımının tanımlaması ve grafiksel çizimleri sunulmaktadır. Bu yaklaşımlar arasındaki temel farklar, hacimsel kriterlerin karşılanmasındaki ısrar düzeyi ve performans kriterlerinin karşılanmasında yeniliklere izin verme potansiyeldir. Her bir yaklaşım aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

Yaklaşım A- Performans Doğrulamalı Hacimsel Tasarım: Bu yaklaşım, mevcut tüm hacimsel gereklilikleri karşılayan optimum bağlayıcı içeriğini (Optimum Bitumen Content-OBC) belirlemek için mevcut hacimsel karışım tasarım yöntemiyle başlar yani Superpave Hacimsel Tasarım Standart Uygulamasının hacimsel gereksinimlerini ve performans test kriterlerini karşılaması gerektiğini belirtir. Alternatif olarak, ajansın onayladığı mevcut bir karışım tasarımı kullanılabilir. OBC'deki karışım tasarımı daha sonra seçilen karışım tekerlek izi ve çatlama testleri ile test edilir. Tekerlek izi için HWTT, devlet kurumları tarafından benimsenen en yaygın performans testidir. Çatlama için birden fazla test kullanılabilir, bunlardan herhangi birinin seçimi belirli çatlak başlatma mekanizmasına ve ilgilenilen ortama bağlıdır. Karışım tasarımı tekerlek izi ve/veya çatlama testi kriterlerini sağlamazsa, karışım tasarımının tamamı farklı malzemeler (örneğin agregalar, bitümlü bağlayıcılar, geri dönüştürülmüş malzemeler ve katkı maddeleri) veya karışım oranları kullanılarak tüm hacimsel, tekerlek izi ve çatlama kriterleri karşılanıncaya kadar tekrarlanır. Tekerlek izi ve çatlama testlerini geçtikten sonra karışım tasarımı, seçilen nem hasarı testiyle değerlendirilir. Tasarım nem testi kriterini geçerse üretim için iş karışımı formülü oluşturulur. Aksi takdirde, sıvı soyulma önleyici (liquid anti-stripping-LAS) katkı maddeleri veya sönmüş kireç gibi soyulma önleyici maddelerin eklenmesi gerekir ve değiştirilmiş karışım, başarılı bir sonuç elde edilene kadar aynı nem hasarı testi kullanılarak yeniden değerlendirilir. Bir LAS katkı maddesinin kullanılması durumunda, aşırı dozaj oranlarının kullanılmasının bitümlü bağlayıcıyı yumuşatabileceği ve asfalt karışımlarının tekerlek izi oluşturma potansiyelini artırabileceği endişesi nedeniyle, uygunluk doğrulaması için değiştirilmiş karışım üzerinde tekerlek izi testinin tekrarlanması gerekli olabilir. Soyulma önleyici maddelerin eklenmesinin yanı sıra, bitümlü bağlayıcı kaynağının veya agrega tipinin değiştirilmesi de nem hasarı testi sonucunu iyileştirebilir. Ancak bu iyileştirici değişiklikler, karışımın tüm hacimsel ve performans kriterlerine uygunluğun sürdürülmesi için yeniden tasarlanmasını gerektireceğinden tercih edilmez.

Yaklaşım B- Performans Optimizasyonu ile Hacimsel Tasarım: Bu yaklaşım, Yaklaşım A'nın genişletilmiş versiyonudur. Aynı zamanda mevcut hacimsel gereksinimlerin tamamını karşılayan bir ön OBC'nin belirlenmesi için mevcut hacimsel karışım tasarım yöntemiyle (yani Superpave, Marshall veya Hveem) başlar. Alternatif olarak, ajansın onayladığı mevcut bir karışım tasarımı kullanılabilir. Karışım tasarımı daha sonra ön OBC'de seçilen karışım

tekerlek izi ve çatlama testleri ve ön OBC'yi parantez içine alan $\pm$ yüzde 0,3 ila 0,5 aralıklarla iki veya daha fazla ilave bağlayıcı içeriği ile test edilir. Daha sonra hem tekerlek izi hem de çatlama testi kriterlerini karşılayan bir bağlayıcı içeriği (mutlaka en düşük içerik olması gerekmez) nihai OBC olarak seçilir. Nihai (son) bağlayıcı içeriğinin bulunmadığı durumlarda, tüm karışım tasarım süreci hem tekerlek izi hem de çatlama kriterleri karşılanana kadar farklı karışım bileşenleri veya oranları (örneğin agregalar, bitümlü bağlayıcılar, geri dönüştürülmüş malzemeler ve katkı maddeleri) kullanılarak tekrarlanır. Nihai OBC seçildikten sonra karışım tasarımı, seçilen nem hasarı testiyle değerlendirilir. Tasarım nem testi kriterini geçerse üretim için iş karışımı formülü oluşturulur. Aksi takdirde, LAS katkı maddeleri veya sönmüş kireç gibi soyulma önleyici maddelerin eklenmesi gerekir ve değiştirilmiş karışım, kriter karşılanana kadar aynı nem hasarı testi kullanılarak yeniden değerlendirilir. Performans doğrulama amacıyla değiştirilmiş karışım üzerinde ek tekerlek izi ve çatlama testleri de yapılabilir.

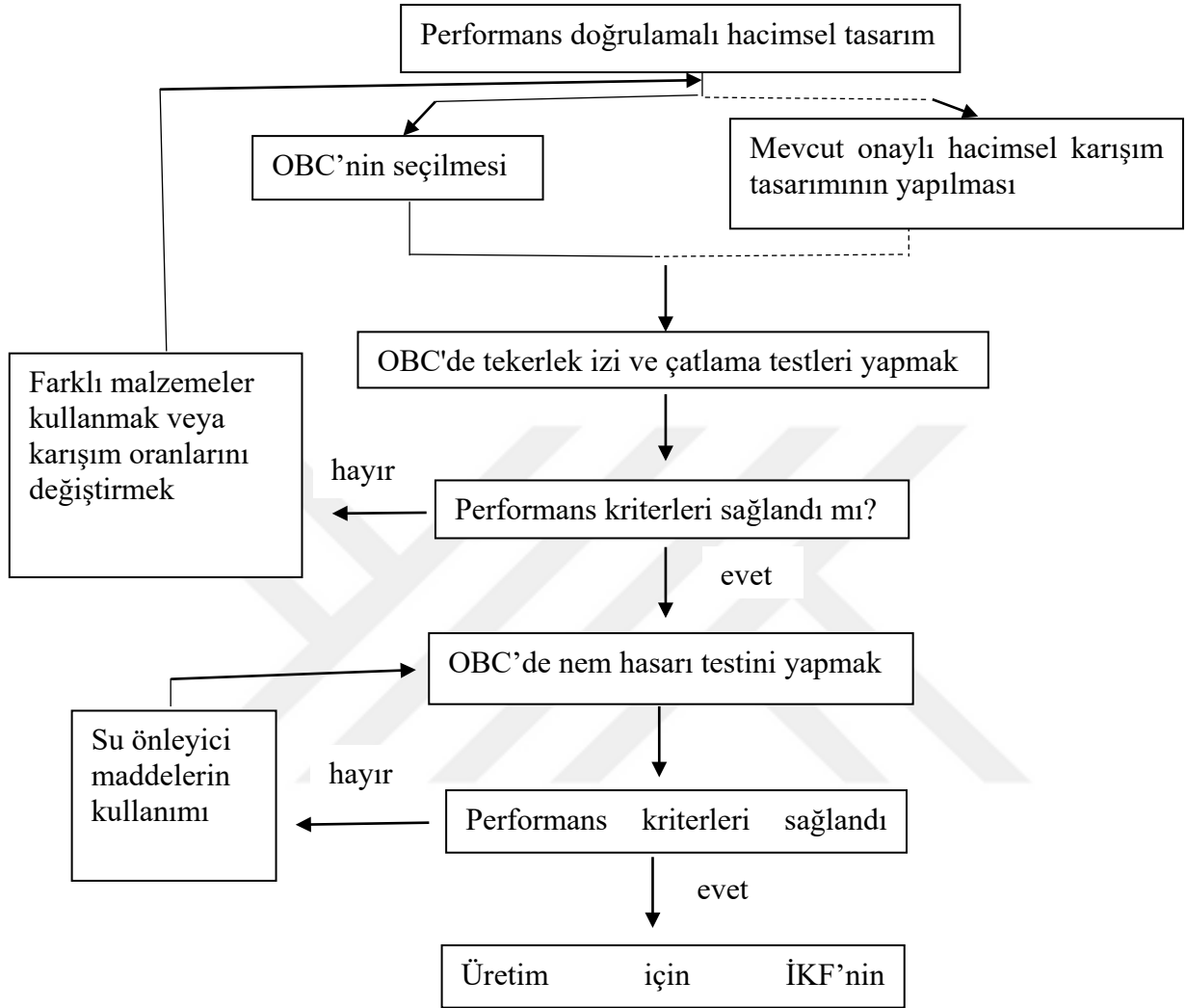
Yaklaşım C- Performansa Göre Değiştirilmiş Hacimsel Tasarım: Bu yaklaşım, ilk agrega derecelendirmesini ve bağlayıcı içeriğini belirlemek için mevcut hacimsel karışım tasarım yöntemiyle (yani Superpave, Marshall veya Hveem) başlar. Alternatif olarak, ajansın onayladığı mevcut bir karışım tasarımı kullanılabilir. İlk tasarım daha sonra seçilen tekerlek izi ve çatlama testleri ile test edilir. Test sonuçları hem tekerlek izi hem de çatlama kriterleri karşılanana kadar bağlayıcı içeriğini veya diğer karışım bileşeni özelliklerini ve oranlarını (örneğin agregalar, bitümlü bağlayıcılar, geri dönüştürülmüş malzemeler ve katkı maddeleri) ayarlamak için kullanılır. Daha sonra karışım tasarımı seçilen nem hasarı testiyle değerlendirilir. Tasarım nem testi kriterini geçerse, iş karışımı formülü oluşturulmadan önce belirli hacimsel özellikler ölçülür ve kurum gereksinimlerine uygunluk açısından karşılaştırılır. Aksi takdirde, LAS katkı maddeleri veya sönmüş kireç gibi soyulma önleyici maddelerin eklenmesi gerekir ve değiştirilmiş karışım, kriter karşılanana kadar aynı nem hasarı testi kullanılarak yeniden değerlendirilir. Performans doğrulama amacıyla değiştirilmiş karışım üzerinde ek tekerlek izi ve çatlama testleri de yapılabilir. Bu yaklaşım, karışım tasarımının öncelikli olarak hacimsel gereksinimlerden ziyade BMD performans testi kriterlerini karşılamasına odaklanmasını gerektirir. AASHTO M 323'teki Superpave $N_{başlangıç}$, N_{max} ve toz oranı (D/P) gereksinimlerinin kaldırılması önerilir; çünkü mevcut araştırmalar, bunların saha performansı ile sınırlı bir korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. Araştırmalar ayrıca AASHTO M 323'teki hava boşlukları, VMA ve VFA gereksinimlerinin

gevşetilmesi gerektiğini, böylece yerel olarak temin edilebilen malzemelerin, geri dönüştürülmüş asfalt malzemelerinin ve katkı maddelerinin kullanılmasına izin verilmesini önermektedir; yeter ki karışım tasarımı BMD performans testi gereksinimlerini karşılayabilsin. Ayrıca, karayolu kurumlarının, güvenlik nedenleriyle agrega sürtünme özellikleri hariç olmak üzere, hammaddenin özelliklerini karışım tasarımı gereksinimleri olarak değil, rehberlik amacıyla belirtmeleri teşvik edilmektedir. Gevşetilmiş hacimsel gereksinimler nedeniyle, Yaklaşım C, Yaklaşım A ve B'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek yenilik potansiyeli sunmaktadır.

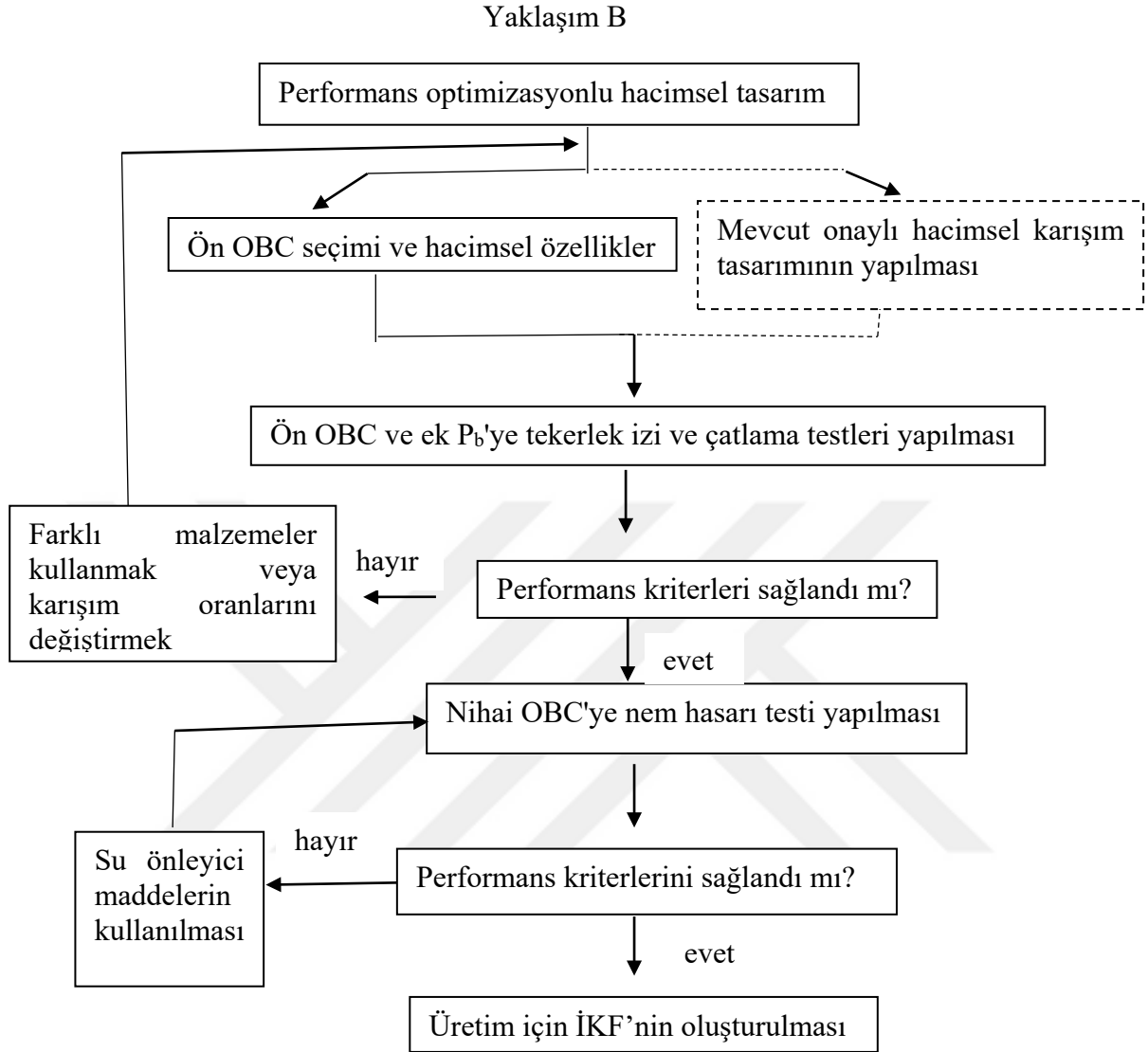
Yaklaşım D- Performans Tasarımı: Bu yaklaşım, ilk agrega derecesinin, geri dönüştürülmüş asfalt malzeme içeriğinin ve işlenmemiş bağlayıcı derecesinin seçimiyle başlar. Alternatif olarak, ajansın onayladığı mevcut bir karışım tasarımı kullanılabilir. Daha sonra ilk karışım tasarımı, yüzde 0,3 ila 0,5 aralıklarla üç veya daha fazla bağlayıcı içeriğinde seçilen tekerlek izi ve çatlama testleriyle test edilir. OBC olarak hem tekerlek izi hem de çatlama kriterlerini karşılayan bir bağlayıcı içeriği (en düşük içerik olması gerekmez) seçilir. Geçerli bağlayıcı içeriğinin mevcut olmadığı durumlarda hem tekerlek izi hem de çatlama kriterleri karşılanana kadar, başlangıç karışım tasarımının farklı karışım bileşenleri veya oranları (örneğin agregalar, asfalt bağlayıcılar, geri dönüştürülmüş malzemeler ve katkı maddeleri) kullanılarak ayarlanması gerekir. Daha sonra karışım tasarımı seçilen nem hasarı testiyle değerlendirilir. Tasarım nem testi kriterini geçerse iş karışımı tasarımı oluşturulur. Aksi takdirde, LAS katkı maddeleri veya sönmüş kireç gibi soyulma önleyici maddelerin eklenmesi gerekir ve değiştirilmiş karışım, kriter karşılanana kadar aynı nem hasarı testi kullanılarak yeniden değerlendirilir. Performans doğrulama amacıyla değiştirilmiş karışım üzerinde ek tekerlek izi ve çatlama testleri de yapılabilir. Diğer üç yaklaşıma kıyasla, Yaklaşım D en yüksek yenilik potansiyelini sunar; çünkü asfalt müteahhitlerinin yerel olarak temin edilebilen malzemeler, geri dönüştürülmüş asfalt malzemeleri ve katkı maddeleri kullanarak tatmin edici performansa sahip karışım tasarımları geliştirmesine ve böylece ekonomiyi ve sürdürülebilirliği optimize etmesine olanak tanır. Yaklaşım C gibi, Yaklaşım D ile tasarlanan BMD karışımlarının üretim onayı bitümlü bağlayıcı içeriği, agrega granülometrisi ve yerinde yoğunluk temelinde belirlenebilir. Şekil 3.46 (a-d), her bir yaklaşımın sırasal işleyişi akış diyagramı olarak göstermektedir. Tablo 3.18, dört BMD yaklaşımının hacimsel ve performans gereksinimleri, esneklik seviyesi ve yenilik potansiyeli açısından farklılıklarını özetlemektedir.

Şekil 3.46: (a) Performans doğrulamalı hacimsel tasarım adımları

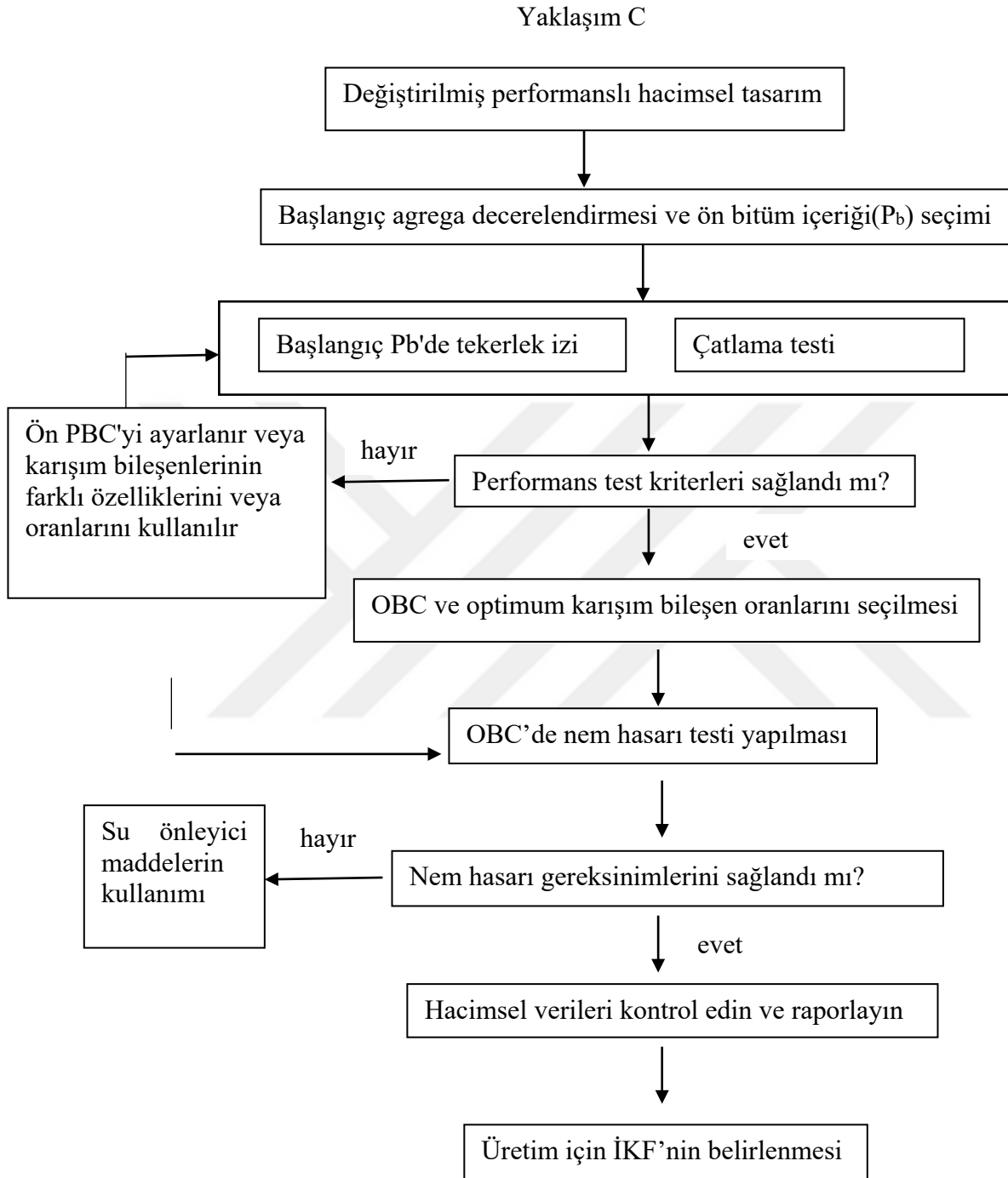
Yaklaşım A



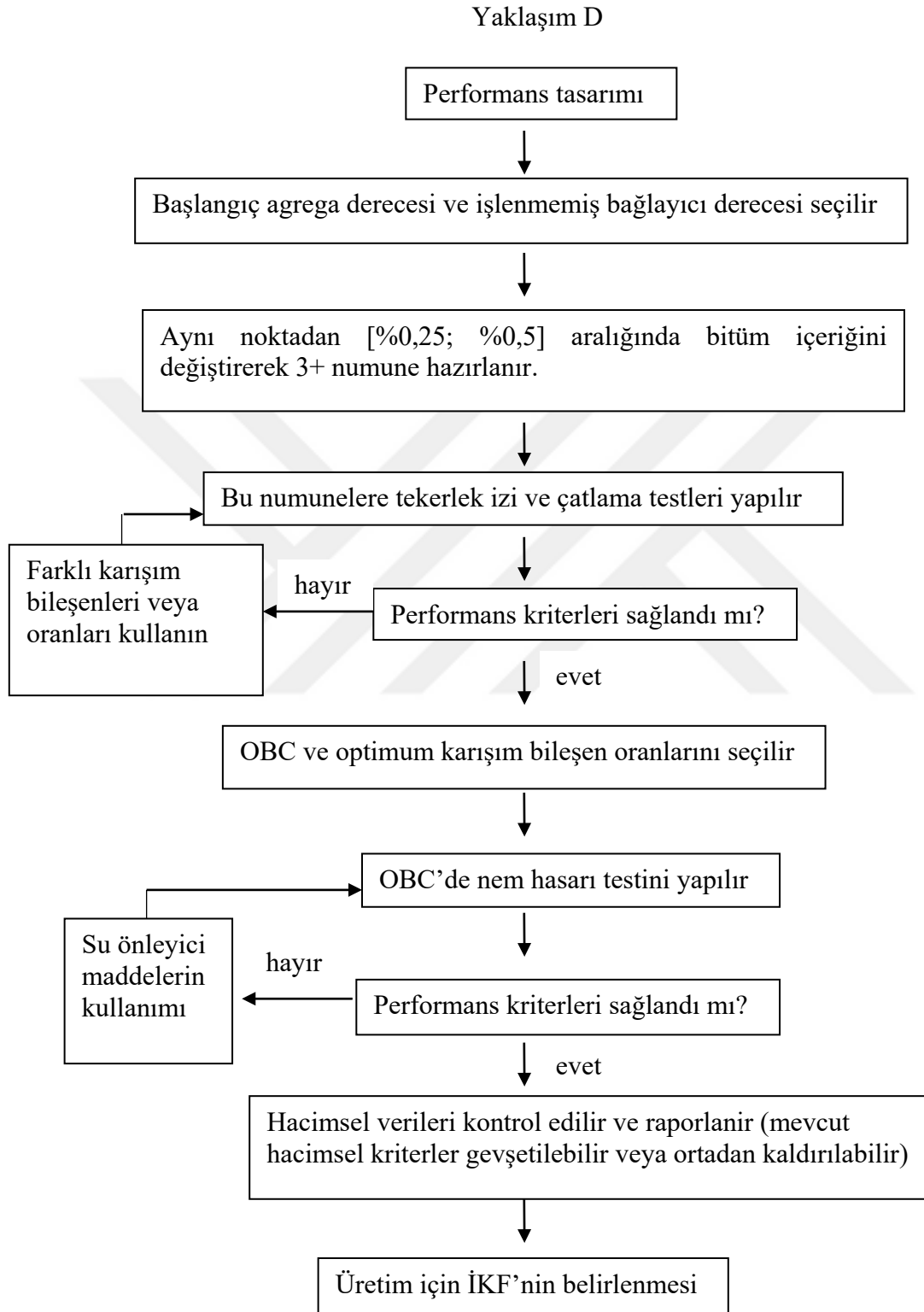
Şekil 3.46: (b) Performans optimizasyonu ile hacimsel tasarım adımları



Şekil 3.46: (c) Performansa göre değiştirilmiş hacimsel tasarım adımları



Şekil 3.46: (d) Performans tasarımı adımları



Tablo 3.18: BMD yaklaşımlarının hacimsel ve performans gereksinimleri, esneklik ve yenilik potansiyelinin özeti

BMD yaklaşımı	Hacimsel gereksinimler	Performans gereksinimleri	Esneklik	Yenilik potansiyeli
A	Tam uygunluk	Tam uygunluk	En ölçülü	En düşüğü
B	Ön OBC ile tam uyum	Bitümlü bağlayıcı içeriğinde orta düzeyde değişikliklerle performans optimizasyonu	A yaklaşımından biraz daha esnek	Sınırlı
C	Bazı gereklilikler azaltılmış veya ortadan kaldırılmıştır	OBC veya karışım bileşen özelliklerinin veya oranlarının ayarlanmasıyla performansın optimizasyonu	Yaklaşım A ve yaklaşım B'den daha az ölçülü	Orta derece
D	Sınırlı veya hiç gereklilik yok	Bileşenleri ve karışım oranlarını ayarlayarak performans optimizasyonu	En az ölçülü	Maksimum derece

3.8.2 Performans Testleri İçin Numune Hazırlaması

BMD yöntemine göre performans testlerine tabi tutulacak numunelerin doğru hazırlanması, doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi için temel bir gerekliliktir. Aşağıdaki detaylı prosedür, her numunenin titizlikle ve tutarlılıkla hazırlanmasını sağlamak amacıyla standartlaştırılmış kılavuzlara dayanmaktadır:

Agregaların İşlenmesi: Agregalar, AASHTO T255'e göre, tamamen kuruyana kadar 230°F (110°C)'de fırında kurutulmalıdır; bu işlem genellikle bir gece sürebilir. Eğer RAP agregası seçilmişse, toz partikülleri kaybını önlemek için vantilatörle kurutma tercih edilmelidir. RAP için fırında kurutma işlemi bitüm oksidasyonunu azaltmak adına 140°F (60°C)'yi geçmemelidir. Kurutma işleminden sonra, AASHTO R47'ye uygun şekilde malzeme ayrılmalıdır. Agregaların boyutlarına göre ayrılması, son tane boyutu dağılımının doğruluğunu artırır.

Agregaların Miktarının Ayarlanması: Agregalar, malzemelerin homojenliğini sağlamak için düz bir spatula kullanarak düz tabanlı bir kapta yapılır. İnce, kaba veya boyutlarına göre sınıflandırılmış agregalar, sistematik olarak ayarlanmalıdır. Mineral filler ya da geri dönüşüm filler (bitümlü karışım üretim tesislerinin egzoz gazlarından yakalanan toz partikülleri) kullanılıyorsa, dökülme sırasında malzeme kaybını azaltmak için bu filler, agregaların ortasına eklenmelidir. Her karışım, herhangi bir malzeme eklenmeden önce ve sonra tartılmalıdır. Karışımlar, dane kaybını önlemek için kapatılmalı ve ısıya dayanıklı araçlar kullanılarak net bir şekilde etiketlenmelidir. RAP kullanıldığında ise aynı şekilde miktarı

ayarlanmalı, ancak karışımda doğru miktarda RAP agregası sağlamak için ayrı bir kapta bulundurulmalıdır.

Bitümlü Karışımın Isıtılması ve Karıştırılması: Bitümlü karışımın ısıtma ve karıştırma işlemi, agregaların, karışımda mevcut RAP miktarına bağlı olarak, karışım sıcaklığının yaklaşık 20-50°F (4-10°C) üstüne kadar ısıtılması ile başlar. RAP içeriği yüksek olan karışımlarda, mevcut asfaltın yeniden ısıtılması ve karıştırılması sırasında, aşırı yaşlanmayı önlemek amacıyla daha düşük sıcaklıklar tercih edilebilir. Doğal agregalar, en az 3 saat boyunca fırında dokunulmadan ısıtılmalıdır. Bitümlü bağlayıcı, karıştırma aralığının orta veya yüksek sıcaklıkta ısıtılır ve sıcaklık değişimlerini önlemek için sık sık karıştırılır. Agregalar, RAP ve diğer katkı maddeleri birleştirildikten sonra karıştırma kabında bir oyuk oluşturularak bitümlü bağlayıcı bu oyuğa eklenir. Tüm agregalar tamamen kaplanana kadar karıştırma devam eder, ardından karışım kısa bir yaşlanma için bir tepsiye dökülür.

Bitümlü Karışımın Numune Alınması, Isıtılması ve Bölünmesi: Bu aşamada, fırında ek yaşlanmayı en aza indirerek performans testleri için homojen numuneler elde edilmesi amaçlanır. Gerekenden %25 daha fazla malzeme alınması ve test sonuçlarındaki değişkenliği azaltmak için gerekenden fazla numune hazırlanması önerilir. Bir kez soğutulmuş numuneler yeniden ısıtıldığında, homojenleştirilmeli ve mekanik bir bölücü ile bölünmelidir. Bölme işlemi sonrasında numuneler, malzemenin ayrışmasını önlemek için sıkıştırma sıcaklığına ulaşana kadar bireysel tepsilerde ısıtılmalıdır.

Yaşlandırma ve karışım sıkıştırma: Laboratuvarda karıştırılmış ve sıkıştırılmış numunelerin AASHTO R30'a göre kısa süreli yaşlandırılması için sıkıştırmadan önce 275°F'de (135°C) iki saat bekletilmesini gerektirir. Sıcaklıklar ve süreler yerel şartnamelere bağlı olarak değişir. Bu aşamada kap olarak bir tava seçilmiştir. Çünkü karışımın yaklaşık 25-50 mm gibi eşit bir kalınlıkta olmasını sağlar. Kısa süreli yaşlandırmadan sonra, karışım başka bir düz tavaya aktarılır ve içeriği maksimum 12,5 mm kalınlığa dağıtılır. Karışım tekrar 275°F'ye ısıtılır. Son sıkıştırmadan önce kalıplar da ısıtılır ve karışım karıştırılarak AASHTO T312'ye göre sıkıştırma kalıbında eşit bir dağılım sağlanır. Görünür özgül ağırlık belirlenmeden önce numunenin tamamen soğumasına izin verilir. Bu aşamada numuneler, daha önce belirtilen performans parametrelerini doğrulamak için çeşitli testler için hazırlanır (Trivellato, 2023).

3.8.3 BMD ile Kullanılabilen Performans Testleri

Dengeli bir karışım tasarımı geliştirmenin hedeflerinden biri, performans testlerinin herhangi bir inşaat malzemesi laboratuvarında tamamlanabilecek kadar basit olmasıdır. Uygun fiyatlı laboratuvar test ekipmanlarının kullanıldığı basit test yöntemleri, testlerin verimli bir şekilde yapılmasını sağlar. Uygun performans testlerinin seçimi trafik yüklerine, iklime ve kaplama yapısındaki yerleşime bağlı olarak değiştiğinden, birden fazla testi gerçekleştirmek üzere kolayca uyum sağlayabilen çok yönlü test ekipmanları kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar, bağlayıcı içeriği, mukavemet, dayanıklılık ve fiziksel özellikler gibi çeşitli özelliklerin test edilmesine olanak tanır ve böylece gerekli standartları karşılayan ve yolların sağlamlığını ve stabilitesini sağlayan asfalt karışımlarının tasarlanmasına yardımcı olur.

Performans testleri, BMD sürecinin temelini oluşturur. Test yöntemine ve yapılandırmasına bağlı olarak, bir performans testi, bir karışımın performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için mekanik parametreler, laboratuvar ortamında geliştirilen performans modelleri veya bunların bir kombinasyonu ile sonuçlanabilir. Göstergeler, sahadaki zemin gerilmeleri ile ilişkilendirilmelidir. Eğer bir asfalt karışımı belirlenen bir veya birden fazla performans kriterini karşılamıyorsa, iş karışım formülünde bitüm ve agrega miktarları veya türlerini değiştirerek ayarlamalar yapmak gerekebilir. Belirli bir testin seçimi, çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak yapılır:

- Örnek hazırlama: Örnek hazırlamak için gereken çaba ve ilgili ekipman değerlendirilir.
- Örneklerin koşullandırılması ve test edilmesi: Test edilebilir bir örneği elde etmek için gereken zaman değerlendirilir.
- Eğitim gereksinimleri ve uygulanabilirlik: Ekipmanın çalıştırılması ve veri analizi için gerekli eğitim seviyesi, laboratuvar ortamında üretilen örnekler ile sahadan alınan örnekler için testin uygunluğu ve testin saha kabulü veya kalite kontrolü için mobil bir laboratuvar ortamında kullanılabilirlik kapasitesi değerlendirilir.
- Ekipman maliyeti: Yeni ekipman alımı veya mevcut ekipmanların hazırlık ve analiz için değiştirilmesi amacıyla gereken finansal yatırım seviyesine göre değerlendirilir.
- Tekrar edilebilirlik: Tek bir laboratuvar içinde analiz edilen farklı örnekler üzerindeki tekrar eden ölçümlere ilişkin varyasyon katsayısı değerlendirilir.

- Malzemenin hassasiyeti: Mevcut ulusal ve yerel hassasiyet analiz çalışmalarının durumu ile gösterge parametresinin karışım bileşenlerinin (örneğin agregalar, bitüm, geri dönüştürülmüş malzemeler, katkı maddeleri), hava boşlukları ve yaşlanma ile ilgili özelliklerine veya oranlarına olan hassasiyet seviyesinin önemi değerlendirilir.

Kırılma mekanizmalarının birden fazla tetikleme ve yayılma mekanizmasını göz önünde bulundurarak, karışımların performans testleri çatlamaya karşı direnç, kalıcı deformasyona karşı direnç, nem hasarlarına karşı direnç ve aşınma kaybı farklı türlerde kategorize edilebilir. Tablo 3.19’da BMD’yi benimseyen ABD Ulaştırma İdaresi tarafından bitümlü karışım araştırmalarında yaygın olarak kullanılan laboratuvar testlerini listelemektedir. Ancak, bu testlerin önemi göz önünde bulundurulduğunda, böyle testlerin geliştirilmesi ve uygulanması için şu anda iyi tanımlanmış bir süreç bulunmadığını belirtmek önemlidir.

Tablo 3.19: Dengeli Karışım Tasarımı için önerilen performans testleri(Devam ediyor)

Dengeli Karışım Tasarımı için Önerilen Performans Testleri			
Dikkate Alınacak Durumlar için Testler		Asfalt Performans Testleri	Kriterleri
Çatlama Karşı Direnç	Termal çatlamlar, düşük sıcaklıkların veya ani sıcaklık düşüşlerinin tipik olduğu soğuk bölgelerde bir sorundur. Asfalt malzemelerin büzülmesine neden olan sıcaklık dalgalanmaları, çatlakların oluşmasına yol açabilir. Bu nedenle, asfalt malzemelerin büzülmesi durumunda çatlak oluşumunu en aza indirmek için bağlayıcıların dikkatli bir şekilde seçilmesi önemlidir.	Disk Şekli Kompakt Gerilme Testi (Disc-Shaped Compact Tension Test- DCT)	ASTM D7313
		Illinois Esneklik Endeksi Testi (Illinois Flexibility Index Test- I- FIT)	AASHTO T 393
		Düşük Sıcaklıkta Yarı Dairesel Eğilme Testi (SCB)	AASHTO T 394
		Dolaylı Çekme Sünme Uyumluluğu ve Dayanım Testi(IDT Creep Compliance and Strength Test)	AASHTO T 322
	Oluşan çatlaklar, alt tabakadaki çatlakların kaplama üzerine yansıyor yayılmasıyla oluşur.	Bindirme Tabakası Testi (Overlay Test-OT)	TXDOT Tex-248-F
		DCT	ASTM D7313
	Alt-tabakadan yukarı doğru yorulma çatlama, trafik yüklemesi alt tabakanın en büyük gerilme deformasyonlarını oluşturduğunda meydana gelir. Bir çatlak tabakanın alt kısmında oluşur ve zamanla ve tekrarlayan yüklemelerle yukarı doğru yayılır.	OT	TXDOT Tex-248-F
		I-FIT	AASHTO T 393
		Doğrudan Çekme Döngüsel Yorulma Testi	AASHTO TP 107 AASHTO TP 133
		N _{Flex} Faktörü	AASHTO TO 141
		Kiriş Eğilme Yorulma Testi (Flexural Bending Beam Fatigue Test)	AASHTO T 32-17 ASTM D8273-18
		Yarı Dairesel Eğilme Testi (Louisiana yöntemi) (Semi-Circular Bend Test (Louisiana method))	LADOTD TR 330 ASTM D8044
		I-FIT	AASHTO T 393
	Üstten aşağı çatlama, bitümlü bağlayıcının yaşlanması ve ardından kırılma ile meydana gelir.	Dolaylı Çekme Asfalt Çatlama Testi (Indirect Tensile Asphalt Cracking Test- IDEAL-CT)	ASTM D8225
Kalıcı Deformasyona Karşı Direnç	Kalıcı deformasyon, en yaygın olarak üst katmanın ilk 4 inçlik (100 mm) kısmında olmak üzere, trafik yüklerinin neden olduğu asfaltın kalıcı şekil değiştirmesidir.	HWTT	AASHTO T 324
		APA	AASHTO T 340
		Yüksek Sıcaklıkta Dolaylı Çekme Testi (High Temperature Indirect Tension- HT-IDT)	ALDOT-428 ASTM D6931

Dikkate Alınacak Durumlar için Testler		Asfalt Performans Testleri	Kriterleri
		Dolaylı Çekme Asfalt Tabakası Tekerlek İzi Test Cihazı-Hızlı Kalıcı Deformasyon Testi (Indirect Tensile Asphalt Layer Rutting Tester-Rapid Shear Rutting Test- IDEAL-RT)	ASTM Work Item (WK 71466)
		Akma Sayısı Testi (Flow Number-FN)	AASHTO T 378
		Gerilme Taramalı Tekerlek İzi Testi (Stress Sweep Rutting-SSR)	AASHTO TP 134
Nem Hasarlarına Karşı Direnç	Nem duyarlılığı, geleneksel olarak HWTT ve TSR testleri ile değerlendirilir; ancak bu testlerin saha performansı ile her zaman iyi bir korelasyon göstermediği bilinmektedir. Bu yöntemlerin geçerliliğini sağlamak için doğrulama araştırmaları yapılmalıdır.	HWTT	AASHTO T 324
		Çekme Dayanım Oranı (Tensile Strength Ratio-TSR)	AASHTO T 283
Aşınma Kaybı	Aşınma kaybı, asfalt karışımlarının yapışkanlık, bağlanma ve trafik aşınmasının etkilerinin dolaylı bir değerlendirmesidir.	Cantabro Aşınma Kaybı Testi	AASHTO TP 108

Performans testleri, BMD'nin temelini oluşturur. Test yöntemi ve yapılandırılmaya bağlı olarak, bir performans testi bir indeks parametresi, mekanik odaklı bir parametre, laboratuvarda geliştirilmiş bir performans modeli veya bunların bir kombinasyonu ile sonuçlanabilir. Endeks parametreleri çıktısı olan test yöntemleri, örneğin Dolaylı Çekme Çatlama Testi (Indirect Tensile Cracking Test-ITCT) veya APA, saha kaplama performansı ile ilişkilendirilmelidir. Bu tür testler genellikle BMD'de bir projenin tasarım ve kabul aşamalarında kabul/red kararında kullanılır. Asfalt karışımı herhangi bir endeks parametresi eşik değerini karşılayamazsa, İKF üzerinde ayarlamalar yapılmalıdır.

Öte yandan, diğer performans testleri, dinamik modül testinden elde edilen depolama ve kayıp modülü veya döngüsel yorulma testinden elde edilen hasar karakteristik eğrisi gibi mekanik odaklı parametreler üretir. Bu parametreler, asfalt karışımının kaplama ömrü boyunca performansını tahmin etmek için mekanik laboratuvar tarafından geliştirilen performans modelleri ile tamamlanabilir (Hajj vd., 2019).

Hajj vd. (2019), sırasıyla stabilite/kalıcı deformasyon, dayanıklılık/çatlama ve nem hasarı/soyulma için BMD yaklaşımında kullanılabilecek asfalt karışımı performans testlerine ilişkin örnekler sunmuştur. Her test için, standart test yöntemi, performans testi sonucu ve endeks parametresinin tanımı, Tablo 3.20 ile Tablo 3.21'de verilmiştir. Tablo 3.22 ise, testin ele almayı amaçladığı çatlama türleri hakkında da bilgi içerir.

Tablo 3.20: BMD için stabilite/çukurlaşma performansı testlerine örnekler

Test Adı	Test Metodu	Test Sonucu	Endeks Parametresi	Endeks Tanımı veya Performans Kriteri
APA	AASHTO T 340	G	RD	Tekerlek izi derinliği
Dinamik Modül	AASHTO T 342/ AASHTO T 378/ AASHTO TP 132	G, M	E^* $G-R_m$	Dinamik modül Glover-Rowe karışım endeksi
Akış Numarası	AASHTO T 378	G, P	FN ϵ_p	Akış sayısı Kalıcı eksenel gerilme
HWTT	AASHTO T 324	G	RD NF	Tepe izi derinliği Göçme anına kadarolan geçiş sayısı
Hveem Stabilometresi	AASHTO T 246	G	S	Hveem stabilitesi
Plastiklik Direncine Karşı Dayanım	AASHTO T 245	G	Stabilite Akma	Marshall stabilitesi Marshall akması
SSR	AASHTO TP 134	G, P	ϵ_{vp} RSI	Viskoplastik gerilme (kalıcı gerilme) Şekil bozulma gerilme endeksi

* **G:** Gösterge parametresi, **M:** Mekanistik odaklı parametre, **P:** Laboratuvarda geliştirilmiş performans modeli

Tablo 3.21: BMD için nem hasarı/soyulma performans testlerinden örnekler

Test Adı	Test Metodu	Test Sonucu (G, M, P)*	Endeks Parametresi	Endeks Tanımı veya Performans Kriteri
HWTT	AASHTO T 324	G	RD SIP NF $NSIP$	Yiv derinliği Soyulma kırılma noktası Kırılmaya kadar geçen geçiş sayısı Soyulma noktasına kadar geçen geçiş sayısı
TSR	AASHTO T 283	G	TS TSR	Dolaylı çekme dayanımı Dolaylı çekme dayanımı oranı

* **G:** Gösterge parametresi, **M:** Mekanistik odaklı parametre, **P:** Laboratuvarda geliştirilmiş performans modeli

Tablo 3.22: BMD için dayanıklılık/çatlama performansı testlerinden örnekler

Test Adı	Test Metodu	Test Sonucu (G, M, P)*	Endeks Parametresi	Endeks Tanımı veya Performans Kriteri
Doğrudan Gerilme Döngüsel Yorulma	AASHTO TP 107 / TP 133	G, M, P	D^R S_{app}	Sahte enerji temelli yorulma kırılma kriteri Çatlama endeks parametresi
DCT	ASTM D7313	G	G_f	Kırılma enerjisi
Dinamik Modül	AASHTO T 342 / T 378 / TP 132	G, M	E^* $G-R_m$	Dinamik modül Glover-Rowe karışım endeksi
Kiriş Eğilme Yorulma Testi	AASHTO T 321	G, M, P	N	Kırılmaya kadar çevrim sayısı
Illinois Esneklik Endeksi	AASHTO TP 124	G	FI	Esneklik endeksi
Dolaylı Çekme Çatlama Testi (IDEAL-CT) ²	ASTM D8225	G	CT_{Index}	Çatlama tolerans endeksi
OT	Tex-248-F / NJDOT B-10	G	N_{OT} G_c β	Kırılmaya kadar çevrim sayısı Kritik kırılma enerjisi Çatlak direnç endeksi
SCB	AASHTO TP 105 / ASTM D8044	G, M	J_c	Kritik gerinim enerjisi yayılım hızı
Tek Eksenli Termal Gerilme-Gerinim Testi	ASTM D8303	G, M	CRI_{Env}	Çevresel koşullara göre ayarlanmış çatlama direnç endeksi

¹ * **G**: Gösterge parametresi, **M**: Mekanistik odaklı parametre, **P**: Laboratuvarda geliştirilmiş performans modeli

² Önceki adıyla IDEAL-CT olarak bilinir.

Yukarıda görüldüğü gibi, her bir bozulma modunda seçilebilecek birkaç test bulunmaktadır. Bu nedenle, Hajj vd. (2019), bir kurum veya yüklenicinin BMD yaklaşımına dahil edilecek performans testlerini seçerken yardımcı olmak için adım adım kılavuzlar geliştirmiştir. Her adımın kısa bir açıklaması verilmiştir, ancak adımların tam açıklaması “Asfalt Kaplamalar için Performans Mühendisliği Karışım Tasarımları için Endeks Tabanlı Testler” adlı bilgilendirme belgesinde bulunabilir.

- Adım 1. BMD'nin bir parçası olarak dikkate alınacak birincil asfalt kaplama bozulma türlerini (ör. alttan yukarıya yorulma çatlakları, yansıma çatlakları, çukurlaşma, nem hasarı) belirleyin. Bozulma seçimi, asfalt karışımının işlevine göre özelleştirilebilir (ör. taban katmanı, aşınma tabakası, üst katman).

- Adım 2. Adım 1'de belirlenen kaplama hasar türlerine karşı asfalt karışımının direncini tahmin etmek için kullanılabilecek veya geçmişte kullanılmış olan aday performans testlerini belirleyin.
- Adım 3. Adım 2'de belirlenen aday performans testlerinin her birinin, kurumların ve yüklenicilerin ihtiyaçları, yetenekleri, kaynakları vb. temelinde BMD yaklaşımında rutin kullanım için genel uygunluğunu değerlendirin. Bu adımda, aşağıdaki değerlendirme faktörleri dikkate alınmalıdır: numune hazırlama, numune koşullandırma ve test etme, eğitim ihtiyaçları ve uygulanabilirlik, ekipman maliyeti, tekrarlanabilirlik, malzeme hassasiyeti ve saha doğrulaması. Bu adımın sonunda, 4. adımda daha ayrıntılı değerlendirme için hedeflenen her bir bozulma türü için bir performans testi seçilebilir.
- Adım 4. NCHRP Projesi 20-07/Görev 406'da belirlenen sürece uygun olarak, mevcut (yerel) malzemeler için tam uygulama için seçilen performans testlerinin hazır olup olmadığını değerlendirin.
- Adım 5. Asfalt karışımlarının tasarımı ve kabulü için mevcut kurum ve endüstri uygulamaları üzerinde birden fazla performans testinin uygulama etkilerini değerlendirin.

Adım 3'te belirtildiği gibi, bir kurum veya yüklenici tarafından BMD yaklaşımında kullanılacak performans testlerinin genel uygunluğunu değerlendirmek amacıyla yedi değerlendirme faktörünün dikkate alınması önerilir. Hajj vd. (2019), seçilen performans testlerinin uygun şekilde karşılaştırılabilmesi için her bir faktör için üç hiyerarşik seviye (Seviye A, B ve C) belirlemiştir. Üç hiyerarşik seviye şu şekilde tanımlanmıştır:

- Seviye A, bir kurum veya yüklenici için en faydalı seviyeyi gösterir. Bu seviyenin özellikleri şunlar olabilir: en az numune koşullandırma ve test süresi, en düşük maliyet vb.
- Seviye B, orta seviyeyi gösterir. Bu seviyenin özellikleri şunlar olabilir: orta düzeyde numune koşullandırma ve test süresi, orta düzeyde maliyet vb.
- Seviye C, bir kurum veya yüklenici için en az faydalı seviyeyi gösterir. Bu seviyenin özellikleri şunlar olabilir: en fazla eğitim ihtiyacı, en düşük tekrarlanabilirlik vb. (Chkaiban, 2021).

3.8.4 BMD İle Geleneksel Hacimsel Yöntemleri Arasındaki Farklar

Bu bölümde, bu yenilikçi yöntem ile önceki yöntemler arasındaki temel farklar vurgulanmak istenmektedir. Aslında, BMD tam anlamıyla bir devrim değildir. Tablo 3.23'te belirtildiği gibi, Marshall ve Hveem gibi geleneksel yöntemlerde kullanılan birçok aşama, BMD'de hala kavramsal olarak mevcuttur., BMD'nin yenilikçi yönü performans testlerinin entegrasyonunda yatmaktadır. Bu testler, karışımın deformasyonlara karşı direncini ve dayanıklılığını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi sağlar, aynı zamanda test sonuçlarına göre karışımı uyarlayıp değiştirerek, çoğunlukla bitümlü karışımın performans davranışını yansıtmayan hacimsel kurallar ve kriterlere göre tasarım klasik kalıplarının dışına çıkar. Bu yaklaşım, yalnızca hacimsel gerekliliklere uyan değil, aynı zamanda uzun vadede daha yüksek performans için optimize edilmiş bitümlü karışımları geliştirmeyi sağlar ve böylece modern karayolu altyapısının karşılaştığı zorluklara yanıt verir (Trivellato, 2023).

Tablo 3.23: BMD ve geleneksel yöntemlerdeki adımlar

Yöntemdeki geçiş	Marshall	Hveem	BMD
Bitüm tipinin seçimi	Evet	Evet	Evet
Geri dönüştürülmemiş agregaların seçimi	Evet	Evet	Evet
Geri dönüştürülmüş malzemelerin seçimi	Evet	Evet	Evet
Farklı bitüm yüzdelere sahip sıkıştırılmış test numuneleri	Evet	Evet	Evet
Hacimsel özelliklerin hesaplanması	Evet	Evet	Evet (Yaklaşım D hariç)
Stabilite ile ilgili performans testleri yapılması	Evet (Marshall stabilite yöntemi)	Evet (Hveem stabilometre)	Evet (kullanıcı tercihi)
Dayanıklılık konusunda performans testleri yapılması	Evet (Marshall sünmesi)	Evet (Hveem kohezyometresi)	Evet (belirli bozulma türü için kullanıcı tercihi)
Karışım için geliştirilen özel kriterlere göre performans testlerinin değerlendirilmesi	Hayır	Hayır	Evet
OBC'nin seçilmesi	Evet	Evet	Evet
Hacimsel özelliklerin belirlenmesi	Evet	Evet	Evet
OBC'de neme duyarlılığın değerlendirilmesi	Hayır	Hayır	Evet
Üretim sırasında karışımın kontrol edilmesi	Evet (hacimsel özellikler)	Evet (hacimsel özellikler)	Evet (hacimsel özellikler ve performans testleri)

3.8.5 BMD'nin Karayolu Yöneticileri için Uygulama Yöntemleri

BMD'nin uygulanmasına yönelik hedefler, yol idarelerinin farklı ihtiyaçlarına göre değişebilir. Başlangıçta, bazıları sadece performans testleri eklemek isteyebilirken, diğerleri karışım tasarımının onaylanması ve kalite güvencesi programı kapsamında mevcut bazı kriterleri yeni laboratuvar test kriterleriyle değiştirmek isteyebilir. Asfalt karışımlarını tasarlamak için BMD'yi kullananlar tarafından belgelenen başarılı uygulamalar toplanmış ve BMD'nin uygulanması için genel bir süreçte özetlenmiştir. Bu çalışma, BMD ile ilgili bölgesel atölye çalışmaları ve BMD'nin uygulanmasına ilişkin kılavuz gibi aynı anda gerçekleştirilebilecek faaliyetlere dayalı sekiz ana görev önermiştir. Görevler ve ilgili alt görevler bir Tablo 3.24'te sunulmuştur ve bir yöneticinin BMD programını uygulamak için gerçekleştirmesi gereken önerilen faaliyetleri özetlemektedir. Tüm görevler bir yönetici tarafından uygulanabilir veya dikkate alınabilir olmayabilir, çünkü bu, organizasyon yapısına, personel düzeyine, mevcut çalışma alanına, yıllık asfalt karışımı kullanım miktarına ve sektördeki uygulamaların deneyimlerine bağlıdır. Bu görevlerin benimsenmesinin federal düzeyde zorunlu olmadığı ve bu nedenle çeşitli yöneticilere esneklik sağladığına dikkat etmek önemlidir. Bazı faaliyetler için mantıksal sıralamalar olsa da, bazıları paralel olarak veya farklı bir sırayla gerçekleştirilebilir ve bu durum olumsuz sonuçlara yol açmaz. Aşağıdaki bölümlerde BMD'nin uygulanmasına yönelik çeşitli faaliyetler açıklanmaktadır.

Tablo 3.24: BMD'nin uygulanması için 7 potansiyel görev

No	Görev	Alt Görev	Açıklama
1	Gerekçeler ve Faydalar	-	-
2	Genel Planlama	2.1	Lider kişilerin belirlenmesi
		2.2	Paydaş iş birliğinin kurulması
		2.3	Ön hazırlık yapılması
		2.4	Hedeflerin belirlenmesi
		2.5	Görevlerin haritalanması
		2.6	Mevcut dış teknik bilgi ve desteğin belirlenmesi
		2.7	Uygulama zaman çizelgesinin hazırlanması
3	Performans Testlerinin Seçilmesi	3.1	Ana hasar türlerinin belirlenmesi
		3.2	Uygun performans testlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi
		3.3	Performans testlerinin doğrulanması
4	Performans Test Ekipmanları: Temin, Yönetim, Eğitim ve Değerlendirme	4.1	Ekipmanın temin edilmesi
		4.2	Kaynakların yönetilmesi
		4.3	İlk eğitimlerin gerçekleştirilmesi
		4.4	Performans testlerinin değerlendirilmesi
		4.5	Laboratuvarlar arası çalışmaların yapılması
5	Temel Verilerin Oluşturulması	5.1	Geçmiş verilerin gözden geçirilmesi
		5.2	Kıyaslama çalışmalarının yapılması
		5.3	Gölge projelerin yürütülmesi
		5.4	Üretim verilerinin analiz edilmesi
		5.5	Yerel malzemeler içeren asfalt karışımlarına nasıl uyum sağlanacağını belirlenmesi
6	Şartname ve Program Geliştirme	6.1	Numune alma ve test planlarının hazırlanması
		6.2	Ücret ayarlama faktörleri
		6.3	Pilot şartnameler ve politikaların geliştirilmesi
		6.4	Pilot projelerin gerçekleştirilmesi
		6.5	Son analizlerin yapılması ve şartname revizyonları
7	Eğitim, Sertifikasyon ve Akreditasyonlar	7.1	Eğitim ve sertifikasyon programlarının oluşturulması/güncellenmesi
		7.2	Laboratuvar akreditasyon programı

3.8.6 BMD'nin Mevcut Uygulamaları

Son yıllarda geliştirilen yeni bir yaklaşım olan BMD, henüz dünya çapında sistematik bir gelişme gösterememiştir. Tam olarak kullanımı, Kaliforniya, Illinois, Iowa, Louisiana, New Jersey ve Teksas gibi ABD'ye ait bazı eyaletlerle sınırlıdır ve bu eyaletler BMD'yi asfalt kaplama programlarında denemiş veya uygulamıştır. Ancak ihtiyaçlar ve yaklaşım türleri hepsi aynı değildir:

- Kaliforniya, performans temelli spesifikasyonlar ve ampirik-mekanik tasarım programı CallME'yi içeren bir BMD karışımları çerçevesi benimsemiştir. Performans test protokolü, tekrarlanan basit kesme testi, eğilme kirişi yorgunluk testi (Bending Beam Fatigue-BBF) ve HWTT içerir;
- Illinois Ulaştırma Departmanı, BMD Yaklaşım A'yı uygulamakta ve HWTT, I-FIT ve karışımın çeşitli performans özelliklerini değerlendirmek için değiştirilmiş bir Çekme Dayanımı Oranı Testi gibi özel testler talep etmektedir;
- Iowa Ulaştırma Departmanı, esas olarak Superpave hacimsel yaklaşımını kullanmakla birlikte, çok yoğun trafik ve/veya özel agrega mineralojisi için tasarlanmış bazı özel karışımlar için HWTT kullanarak iz direncini değerlendirmektedir. Ayrıca, termal çatlamayı değerlendirmek için disk şeklindeki kompakt gerilim testinin kullanımını da değerlendirmektedir;
- Louisiana Ulaştırma Departmanı, geleneksel hacimsel kriterleri, yüklemeli tekerlek izi testi ve SCB gibi özel testlerle birlikte kullanarak BMD Yaklaşım A'yı uygulamıştır. Bu testler sırasıyla tekerlek izi oluşumunu ve orta sıcaklıkta çatlamayı değerlendirmek için kullanılmaktadır;
- New Jersey Ulaştırma Departmanı, çeşitli bitümlü agrega karışımları üzerinde BMD Yaklaşım A'yı kullanmaktadır ve çatlama ve iz oluşumunu değerlendirmek için IDT gibi daha hızlı testlerin kullanımını değerlendirmektedir;
- Texas Ulaştırma Departmanı, BMD Yaklaşım A'yı kullanmaktadır ve karışımın performansının çeşitli yönlerini değerlendirmek için HWTT ve OT gibi özel testler talep etmektedir;

Florida, Georgia, Indiana, Minnesota, Nebraska, New Hampshire, New Mexico, Ohio, Oklahoma, Oregon, Güney Dakota, Utah ve Wisconsin dahil olmak üzere diğer eyaletler şu anda BMD'yi kendi araştırma ve tasarım programlarına uygulamak için çalışmaktadır. Bizim bölgemiz ve kıtamızda, Avrupa'da ve potansiyel olarak İtalya'da da BMD'nin kullanımı ve incelenmesi konusunda girişimler ve ilgi vardır:

- Araştırma projeleri: Avrupa'da, çeşitli araştırma projeleri, yol kaplamalarının performansını iyileştirme potansiyeli nedeniyle BMD'yi incelemiştir. Bu projeler genellikle üniversiteler, araştırma enstitüleri ve uluslararası işbirliklerini içermektedir. Örneğin, "Eurasphalt & Eurobitume Congress" konferansı, BMD üzerine yapılan

alışmalar da dahil olmak üzere, asfaltlama alanındaki gelişmelerin sunulduğu bir etkinliktir;

- Bazı ülkelerde benimsenmesi: İngiltere, Almanya ve Hollanda gibi lkeler BMD'ye ilgi göstermiştir. Bu lkeler, BMD'nin kendi yerel koşullarına uygulanabilirliğini değerlendirmek için çalışmalar ve araştırmalar yürütmektedir. Özellikle Almanya, asfaltlama alanındaki yeniliklere büyük ilgi duymaktadır ve bu yöntemin kullanımını en çok araştırarak ülkelerden biri olabilir.
- Uluslararası işbirlikleri: ERANET Road (bir Avrupa yol araştırma girişimi), yol asfaltlamadaki yenilikler üzerine yaptıkları araştırmaların bir parçası olarak BMD bileşenlerini içerebilecek projeleri finanse etmiştir.

Türkiye'ye gelince, bugüne kadar, ülkede BMD'nin yaygın kullanımını ayrıntılı olarak anlatan çok fazla yayınlanmış belge bulunmamaktadır. Bununla birlikte, bazı ilgi ve faaliyet belirtileri vardır. Bazı araştırma kurumları ve üniversiteler pilot projelerde yer almıştır. Performansa dayalı tasarım yöntemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla etkinliğini araştıran karşılaştırmalı çalışmalar dışında, BMD'nin Türkiye koşullarında uygulanabilirliğini ve performansını araştıran bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

BMD'nin henüz yaygın olarak evrensel bir tasarım yöntemi değildir. Bu nedenle, henüz performans kriterlerinin yaygın olarak benimsenmesi için gerekli standartlara kolay ulaşılamamaktadır. Ancak, yukarıda belirtilen bazı eyaletler farklı yaklaşımlar kullanarak BMD yöntemini denemeye başlamıştır. Yaklaşım A en yaygın olanıdır ve Tablo 3.23'te belirtilen testler ve kriterler kullanılarak Illinois, Louisiana, New Jersey, Teksas ve Virginia'daki spesifikasyonlarda kullanılmıştır (Costa, 2021).

Tablo 3.25: Farklı Ulaştırma Departmanlarının kullandıkları performans testleri ve kriterleri

Eyalet	Tekerlek İzi	Tekerlek İzi Test Kriterleri	Çatlama Testi	Çatlama Test Kriterleri
Illinois	HWT	Maksimum Tekerlek İzi Derinliği 12,5 mm	I-FIT, SCB Testi	Minimum FI: Yaşlandırılmamış ve fırınlanmış numuneler için sırasıyla 8 ve 5.
Louisiana	HWT	Maksimum 12 mm Tekerlek İzi Derinliği	Louisiana SCB Testi	Minimum SCB kırılma enerjisi: Modifiye edilmemiş ve modifiye edilmiş asfalt karışımları için sırasıyla 0,5 kJ/m ² ve 0,6 kJ/m ² .
New Jersey	APA	Maksimum Tekerlek İzi Derinliği 8.000 geçişte 4 mm	OT	Minimum Döngü Sayısı: 600
Teksas	HWT	Maksimum Tekerlek İzi Derinliği 20.000 geçişte 12,5 mm	OT	Minimum Döngü Sayısı: 200
Virginia	APA	Maksimum 8.000 geçişte 8 mm Tekerlek İzi Derinliği	İdeal Çekme Çatlama Testi (Ideal Tensile Cracking Test)	Minimum CT indeksi: 70

3.8.7 BMD Yönteminin Sürdürülebilirliği

Çeşitli devlet kurumları, BMD mekanik testlerinin bitümlü agreg a karışımlarının yaygın bozulmalara karşı direncini değerlendirmeye ve sürdürülebilir ve yenilikçi malzemeler kullanmaya nasıl olanak tanıdığını tartıştı. Geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı, düşük karbon emisyonu hedeflerine ulaşmaya ve kaplamaların ömrünü uzatmaya yardımcı olabilir. Illinois, Indiana, Minnesota ve Missouri, sürdürülebilir kaplamaların emisyonlarını ölçmek için FHWA İklim Mücadelesi programına katılmaktadır. BMD'yi sürdürülebilirliğe entegre etmek, kaplamaların ömrünü uzatmak ve yerel malzemeler ve RAP kullanımıyla karbon emisyonlarını azaltmak için fırsatlar belirlenmiştir. Ancak, çevresel iyileştirmeleri ölçmek ve BMD verilerini varlık yönetimi uygulamalarına entegre etmekte zorluklar olduğu vurgulanmıştır. BMD'nin faydalarını ve başarılarını iletmek, uygulamanın kolaylaştırılması için çok önemlidir. Ayrıca, sürdürülebilirlik için asfalt karışımının üst üste bindirme programları tartışılmış ve BMD'nin yapısal projede öngörülen ömre ulaşılmasına katkıda bulunup bulunamayacağı araştırılmıştır.

BMD, yenilik ve optimum performansı bir araya getirerek bitümlü agreg a karışımlarının

tasarımında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Geleneksel olarak, bitümlü agrega karışımlarının tasarımı, esas olarak karışımın fiziksel özelliklerine ve bileşimine odaklanan Marshall veya Superpave gibi hacimsel kriterlere dayanmaktadır. Ancak, bu yöntemler tekerlek izi ve çatlamaya karşı direnç açısından uzun vadeli performansı her zaman doğru bir şekilde tahmin edemez.

BMD, tasarım aşamasına özel performans testlerini entegre ederek paradigmatik bir değişiklik getirir. Bu yaklaşım, hacimsel gereksinimleri karşılayan ve aynı zamanda gerçek yük ve çevre koşullarına dayanacak şekilde optimize edilmiş bir karışım elde edilmesini sağlar. BMD'nin en önemli yeniliklerinden biri, sırasıyla izlenmeye ve çatlamaya karşı direnci değerlendiren FN testi ve SCB testi gibi mekanik testlerin dahil edilmesidir. Bu, karışımın performansını etkili bir şekilde dengeleyerek erken kusurların olasılığını azaltır ve kaplamanın genel dayanıklılığını artırır.

BMD ile geleneksel yöntemler arasındaki temel farklardan biri, tasarıma yönelik yinelemeli yaklaşımdır. BMD'de, performans testi sonuçları karışımın bileşiminde, örneğin tane boyutu dağılımının değiştirilmesi veya bitümlü bağlayıcı içeriğinin optimize edilmesi gibi ayarlamalar yapılmasını gerektirebilir. Bu yinelemeli süreç, nihai karışımın projeye özgü koşullar için optimize edilmesini sağlar ve daha dayanıklı ve performanslı bir kaplama ile sonuçlanır.

Geleceğe bakıldığında, BMD birçok geliştirme ve iyileştirme fırsatı sunmaktadır. İlgili alanlarından biri, karışımların performansını daha da artırabilecek modifiye bağlayıcılar ve katkı maddeleri gibi yeni teknolojilerin ve malzemelerin entegrasyonudur. Ayrıca, gelişmiş modelleme teknikleri ve yapay zeka kullanımı, tasarım sürecini daha da hassas ve verimli hale getirebilir. Kaplama performansının izlenmesi yoluyla sahada veri toplanması ve analizi, tasarım kriterlerini daha da iyileştirmek için çok önemli geri bildirimler sağlayacaktır. Gelecekteki bir diğer önemli gelişme, BMD'nin sadece ABD'de değil, dünyanın geri kalanında da ulaşım kurumları ve yol yetkilileri tarafından geniş çapta benimsenmesidir. Bu, sektördeki teknisyenler ve mühendisler için eğitim ve beceri geliştirme açısından önemli çabalar gerektirecek mevcut düzenlemelerin ve kılavuzların güncellenmesini gerektirecektir.

4. BMD YÖNTEMİNDE KULLANILAN PERFORMANS TESTLERİ

Asfalt kaplamalar, yol yapımında yaygın olarak kullanılan ve çeşitli trafik, iklim ve çevresel koşullara maruz kalan mühendislik malzemeleridir. Asfalt karışımlarının davranışını anlamak ve optimize etmek amacıyla geliştirilen performans testleri, bu malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Bu nedenle, asfalt karışımlarının performans özelliklerini hem teknik hem de ekonomik açıdan değerlendirmek, dayanıklı ve uzun ömürlü yolların tasarımı için kritik bir gerekliliktir.

Asfalt karışımlarının çatlama direnci, nem dayanımı, aşınma özellikleri ve diğer mekanik davranışlarını değerlendiren bu testlerin teknik ve ekonomik açılardan analiz edilmesi, karışım tasarımı sürecinde karar vericilere rehberlik etmektedir. Bu bağlamda farklı test yöntemlerinin karışım tasarımındaki rolleri ve kalite güvencesine olan katkıları açısından kıyaslanarak incelenmiştir. Ayrıca, asfalt karışımı performans testlerinin modern yol mühendisliğindeki önemini vurgularken, kullanılan yöntemlerin teknik üstünlüklerini ve maliyet verimliliklerini sunmayı amaçlamaktadır.

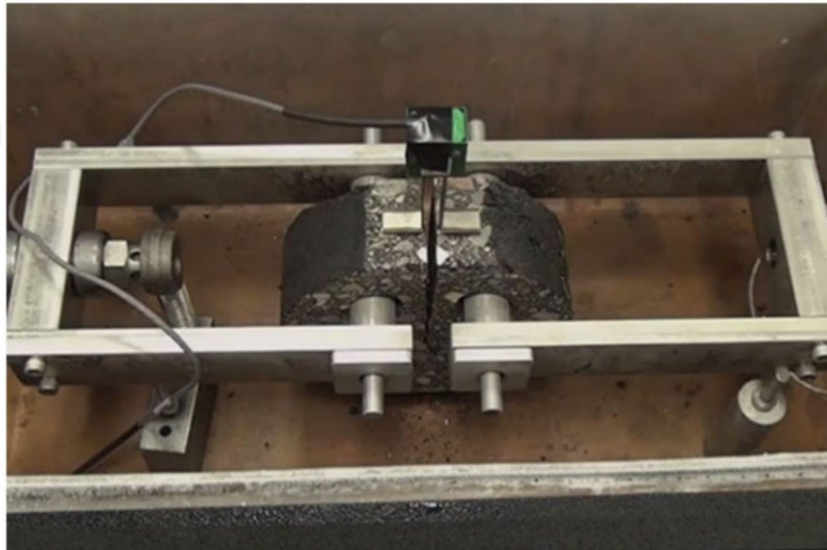
Bu bölümde, asfalt karışımlarının performansını değerlendirmek için kullanılan temel test yöntemleri ele alınmıştır. Çalışmada öncelikle testlerin tanımları, geliştirildikleri süreçler ve dünya genelindeki uygulama alanları açıklanarak, testlerde kullanılan standartlar, sıcaklık ve diğer koşullara bağlı değişkenler ile ekipman ve maliyet analizlerine yer verilmiştir. Testlerin numune üretim süreçleri, veri analizi zorlukları ve kalite güvencesi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu testler hakkında literatür taraması yaparak her biri detaylı bir şekilde incelenmiş; literatür kaynakları, bu testlerin geliştirilmesi, uygulanabilirliği, kabul durumu ve testlerin asfalt karışımlarındaki performansını değerlendiren çalışmalarla oluşturulmuştur. Bu araştırma ile testlerin uygulama yerleri, kullanım sürekliliği, literatürdeki kabulü ve basit performans testlerine uyumluluğu hakkında doğru ve kapsamlı verilerle sunulmuştur.

4.1 Çatlama Direnci ile İlişkili Deneyler

4.1.1 Disk Şekilli Kompakt Çekme Testi (Disc-Shaped Compact Tension Test-DCT)

Disk Şekilli Kompakt Çekme Testi (DCT), Buttlar ve ekibi tarafından Illinois Üniversitesi'nde

asfalt karışımlarının özellikle termal çatlama dayanımını ölçmek amacıyla geliştirilmiştir. Şekil 4.1'deki test sistemi, yükleme ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır. ASTM D7313-07a standardı altında yapılan test, asfalt karışımlarının çatlama dayanımı için güvenilir bir yöntem sunar. Test, ABD'de Iowa, Minnesota ve Missouri gibi eyaletlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. DCT test numuneleri, tasarım hedef hava boşluk oranında Superpave döner kompaktör ile 150 mm çapında ve 50 mm kalınlığında hazırlanır. Hazırlanan numunelerin ortasında, hassas testere, lazer kesici veya su jeti yardımıyla 45° eğimli bir çentik açılır. Dolayısıyla, numunelerin hazırlanmasında, hassas testere ve karot matkap makinesi gibi genel laboratuvar teçhizatınada gereksinim duyulur. Yükleme veri toplama sistemi bulunur. Bu çentik, çatlak yayılmasını başlatmak için gereklidir. Numuneler, test öncesinde belirlenen sıcaklıkta şartlandırılır. Genellikle düşük sıcaklıklarda (genellikle -10°C'de) yapılan bu deney, numunelerin düşük sıcaklık çatlak oluşum direncinin gerçek saha koşullarına benzer bir şekilde test edilmesini sağlar. Bu özellik, testin soğuk iklimlerdeki asfalt kaplamaları değerlendirmede kullanılmasını oldukça değerli kılar.



Şekil 4.1: DCT deney cihazı

Test sırasında, numune uygun bir yükleme cihazına yerleştirilir ve çentik ağzına, çatlak açılma miktarını ölçen bir cihaz (Clip-on Gage) monte edilir. Bu cihaz, test boyunca çatlak genişliğindeki (Crack Mouth Opening Displacement-CMOD) değişiklikleri ölçer. Teste başlamadan önce, numuneye 0,2 kN'yi geçmeyen bir ön yük uygulanır. Bu işlem, numunenin doğru bir şekilde yerleşmesini ve ölçümlerin güvenilirliğini sağlamak için yapılır. Ardından, sabit bir çatlak açılma hızı (1 mm/dk) uygulanarak yükleme yapılır. Çentik bölgesinden

itibaren çatlak yayılmaya başlar. Test cihazı, yük ve çatlak açılma değerlerini sürekli olarak kaydeder.

Test, yükün maksimum seviyeye ulaştıktan sonra azalarak 0,1 kN seviyesine düştüğü noktada tamamlanır. Bu süreç boyunca, yük ve deformasyon verileri kaydedilir. Elde edilen veriler, asfalt karışımının kırılma enerjisi ve çatlak yayılma direncini belirlemek için kullanılır. Kırılma enerjisi, yük-deformasyon eğrisi altındaki alan hesaplanarak bulunur.

DCT testi, asfalt karışımlarının termal çatlamaya karşı kırılma dayanımını değerlendirmede hem teknik hem de ekonomik açıdan etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Kırılma enerjisi gibi performans belirleyici parametrelerin hesaplanmasına olanak tanıyan test, özellikle soğuk iklim koşullarında dayanıklı kaplama tasarımı için kritik öneme sahiptir. Yöntemin uygulanması görece basit bir veri analizine dayanmakla birlikte, doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi için numune hazırlığı, test sıcaklığı ve deney prosedürlerinin titizlikle yürütülmesi gerekmektedir. İlk kurulum maliyetleri yüksek olsa da, uzun vadede çatlamaya dirençli karışımların geliştirilmesi sayesinde testin ekonomik yararı ortaya çıkmaktadır. Bu çerçevede, DCT testi asfalt kaplamalarının uzun ömürlü ve performans odaklı tasarımına katkı sunan güvenilir bir araç niteliğindedir (National Asphalt Pavement Association(NAPA), t.y.ç).

Wagoner vd. (2005) yaptığı çalışmada, DCT testinin asfalt betonunun çatlama enerjisini belirlemek için pratik bir yöntem olmasını nedeniyle kullanmışlardır. Çalışmada, DCT testinin farklı sıcaklık ve yükleme hızlarında asfalt karışımlarının çatlama enerjisini ölçme yeteneği değerlendirilmiştir. Sonuçlar, DCT testinin asfalt karışımlarının düşük sıcaklıkta kırılmalardan yüksek sıcaklıkta daha sünek bir malzemeye geçişini doğru bir şekilde yakalayabildiğini göstermektedir.

Dave vd. (2019) tarafından yürütülen çalışmada, asfalt kaplamaların performansını değerlendirmeye yönelik olarak DCT testi için spesifikasyonların geliştirilmesine odaklanılmıştır. Çalışma kapsamında, DCT test prosedürü detaylı şekilde optimize edilmiş ve özellikle erken yansıma çatlaklarının önlenmesine katkı sağlamak amacıyla kırılma enerjisine dayalı eşik değerler önerilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen kriterlerin, asfalt kaplamaların çatlama performansını daha tutarlı biçimde değerlendirmede etkili bir araç sunduğu

belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada DCT testinin asfalt karışımlarının çatlama direncini belirleme kabiliyeti değerlendirilmiştir. Bulgular, DCT testinin termal çatlama potansiyelleri açısından karışımlar arasında etkili bir ayırım yaptığını göstermiş ve performansa dayalı şartnamelerdeki önemini vurgulamıştır (Haslett vd., 2022).

Mandal vd. (2019) yaptığı araştırmalar, DCT testinin kullanımında özellikle farklı karışım tasarım parametreleriyle ilgili zorlukların altını çizmiştir. Bu çalışma, DCT test sonuçlarının doğru olmasını sağlamak için bu parametrelerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamış ve böylece testin saha performansını tahmin etmedeki güvenilirliğini artırmıştır.

Bu çalışmalar, DCT testinin çatlama performansını değerlendirmede güçlü bir araç olduğu ortaya çıkmaktadır. Testin hem termal çatlama karşı duyarlılığı yüksek hem de karışım özellikleri ile saha performansı arasındaki ilişkiyi anlamada kullanışlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, test prosedürlerinin standardizasyonu, karışım parametrelerine duyarlılık ve performansa dayalı eşik değerlerin belirlenmesi, yöntemin güvenilirliğini ve uygulama alanını daha da geliştirmek adına önemli araştırma başlıkları olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, DCT testine ilişkin literatür giderek olgunlaşmakta ve performans temelli asfalt tasarım süreçlerine katkı sunmaktadır.

4.1.2 Illinois Esneklik Endeks Testi (Illinois Flexibility Index Test - I-FIT)

Illinois Esneklik Endeksi Testi (I-FIT), asfalt karışımlarının çatlama dayanımını değerlendirmek amacıyla, Illinois Üniversitesi Urbana-Champaign (UIUC) ile IDOT iş birliğiyle geliştirilmiş olup, ilk araştırma çalışmaları 2012 yılında başlatılmıştır.

I-FIT, 150 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde yarı-silindirik bir numune kullanılarak gerçekleştirilir. Numunenin düz yüzeyine ortalanmış şekilde, 15 mm derinliğinde bir çentik açılır. Numune, yatay bir düzlem üzerinde iki paralel çubuk arasında basit destek koşulları altında yerleştirilir ve üzerine 50 mm/dakika hızla düşey bir yük uygulanır. Uygulanan yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerleri test boyunca sürekli olarak kaydedilir. Deney, yük değeri 0,1 kN seviyesine düştüğünde sonlandırılır.

Şekil 4.2’de gösterilen bu test yöntemi, asfalt karışımlarının kırılmalık ve esneklik özelliklerini nicel olarak değerlendirmeye yönelik önemli bir deney prosedürüdür.



Şekil 4.2: Illinois esneklik endeksi testi

Testten elde edilen yük-yer değıştirme verileriyle, yük-deplasman eğrisi oluşturulur. Bu eğrinin altındaki alan, kırılma enerjisi olarak hesaplanır ve asfalt karışımının çatlamaya karşı gösterdiği direnç hakkında bilgi sağlar. Eğrinin maksimum noktası sonrasındaki negatif eğim ise malzemenin kırılmalıktan esnek davranışa geçiş karakteristiğini temsil eder.

Bu veriler ışığında hesaplanan Esneklik Endeksi (Flexibility Index - FI), kırılma enerjisinin belirli bir ölçekleme faktörü ile çarpılması ve negatif eğime bölünmesi yoluyla elde edilir. FI değeri, asfalt karışımının çatlama eğilimini ve deformasyon kapasitesini birlikte değerlendirerek, malzemenin düşük sıcaklıklardaki performansına ilişkin önemli bir gösterge sunar. Bu nedenle I-FIT, asfalt karışımlarının dayanıklılığını ve servis ömrünü tahmin etmede performansa dayalı tasarım ve kalite kontrol süreçlerinde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır.

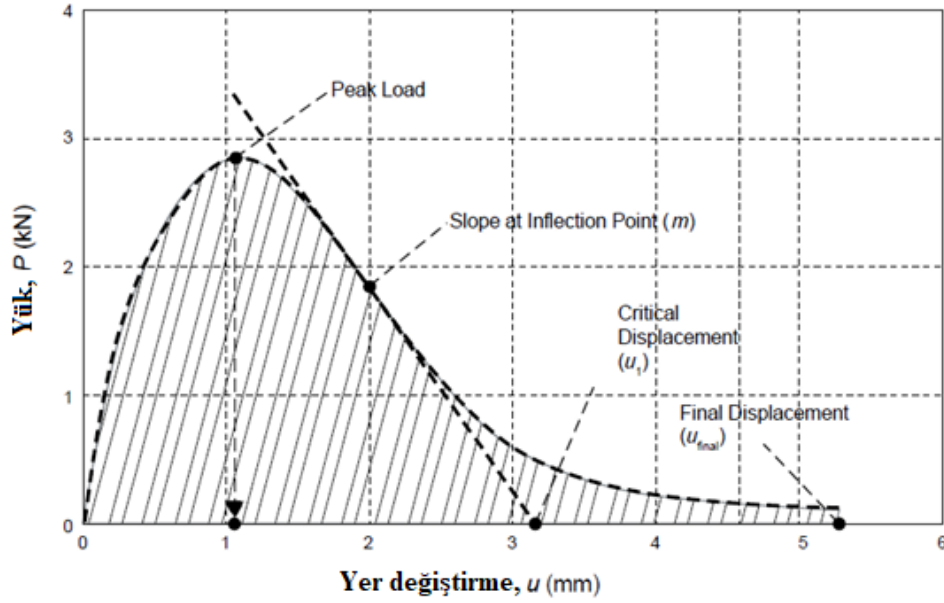
I-FIT, AASHTO T 393-19 standardına uygun olarak gerçekleştirilmekte olup, ASTM E399 gibi ilgili diğer uluslararası standartlarla da uyumludur. Başlangıçta ABD’nin Illinois ve çevresindeki eyaletlerde yaygın olarak uygulanan bu test, günümüzde dünya genelinde çeşitli araştırma ve saha uygulamalarında da kullanılmaktadır (Federal Highway Administration (FHA), t.y.).

Test genellikle 25 °C sıcaklıkta uygulanmakla birlikte, proje gereksinimleri ve bölgesel iklim koşullarına bağlı olarak bu sıcaklık ayarlanabilmektedir. I-FIT deneyinde kullanılan ekipmanlar arasında, yarı dairesel eğilme numune tutucusu, hassas yükleme cihazı, veri toplama sistemi ve sıcaklık kontrollü çevre odası bulunmaktadır.

Test numuneleri, laboratuvar ortamında Superpave döner sıkıştırıcı kullanılarak ya da sahadan alınan karot örneklerle hazırlanır. Numune kalınlığı genellikle 45–50 mm olup, hava boşluğu oranı 7 ± 1 aralığında olmalıdır. Numune hazırlık süreci yaklaşık 2 saat sürmekte olup, test öncesinde numuneler 25 °C’de 2 saat şartlandırılarak termal dengeye getirilir. Bu şartlandırma, test sırasında numunelerin homojen davranmasını ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Test kapsamında genellikle 3–4 numune kullanılır ve analizde en yakın üç sonucun ortalaması alınarak temsili değer belirlenir. Her numunenin test süresi ise yaklaşık 10–15 dakika arasındadır.

I-FIT testi, asfalt karışımlarının çatlama direncine dair kapsamlı bir değerlendirme sunar ve karışım tasarım süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılabilir. Kalite güvencesi açısından da güvenilirliği kanıtlanmış olan bu test, asfaltların uzun vadeli performansına ilişkin değerli öngörüler sağlar. Veri analizi, test sırasında elde edilen Şekil 4.3’te verilen yük-deplasman eğrisine dayanır. Bu eğri altında kalan alan kırılma enerjisi (G_f) olarak hesaplanırken, eğrinin tepe noktasından sonraki eğim (m) malzemenin çatlama sonrası davranışını yansıtır. Hesaplama süreci sistematik ve anlaşılırdır, bu da verilerin etkin ve kolay analiz edilmesini mümkün kılar.

I-FIT, asfalt karışımlarının çatlama dayanımını ekonomik ve teknik açıdan kapsamlı biçimde değerlendiren çağdaş bir yöntemdir. Laboratuvar ortamında kolaylıkla uygulanabilmesi ve saha performansına dair pratik geri bildirimler sunması sebebiyle geniş kabul görmektedir. Test sonucunda hesaplanan FI, karışım tasarımında çatlama karşı uzun vadeli dayanıklılığın öngörülmesini sağlamaktadır. Basit ve hızlı test prosedürü ile veri analizi, hem zaman hem de maliyet açısından önemli avantajlar sunarken, kalite güvencesi kapsamında da yüksek güvenilirlik sağlamaktadır. Bu özellikleriyle I-FIT, asfalt kaplamaların performansını artırmak isteyen araştırmacılar ve mühendisler için vazgeçilmez bir değerlendirme aracı olarak öne çıkmaktadır (National Asphalt Pavement Association(NAPA), t.y.h).



Şekil 4.3: Yük-yer değiştirme eğrisi

I-FIT, özellikle orta sıcaklıklarda asfalt karışımlarının çatlama direncini değerlendirmek amacıyla yaygın şekilde benimsenmiş bir test yöntemidir. Bu test, malzemenin çekme gerilmelerine karşı dayanma kapasitesini ölçerek, trafik yükleri ve çevresel koşullar altında karışımın potansiyel performansı hakkında önemli bilgiler sunar. Birçok çalışma, I-FIT testinin etkinliğini ve saha performansı ile olan korelasyonunu detaylı şekilde incelemiştir. Örneğin, Batioja-Alvarez vd. (2019) tarafından yapılan çalışma, Indiana asfalt karışımlarının çatlama potansiyelini değerlendirmek amacıyla I-FIT'in uygulanabilirliğini detaylı olarak incelemiştir. Araştırma, I-FIT testinin farklı asfalt karışımlarının deformasyon ve çatlama davranışlarını etkin bir şekilde değerlendirebildiğini ortaya koyarak, bu testin performans analizlerinde güvenilir ve etkili bir yöntem olduğunu vurgulamaktadır.

Al-Qadi vd. (2015) çalışmalarında, I-FIT'nin düşük sıcaklık koşullarında asfalt karışımlarında meydana gelen yorulma çatlakları üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Araştırmada, modifiye bağlayıcılar ve katkı maddelerinin I-FIT ile ölçülen esneklik indeksine olan katkısı analiz edilmiş; elde edilen bulgular, I-FIT testinin karışım tasarımında çatlak direncinin artırılmasında etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, laboratuvar sonuçları ile saha performansı arasında güçlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Ozer vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Illinois eyaletinde kullanılan asfalt karışımlarında I-FIT testi uygulanmış ve testin saha performansını tahmin etmede güvenilir

bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Araştırma, hem yeni hem de geri dönüştürülmüş asfalt malzemelerinin esneklik indekslerini karşılaştırmış ve uygun tasarım kriterleri sağlandığında RAP performansta anlamlı bir düşüşe yol açmadığını ortaya koymuştur.

Yukarıda sunulan literatür, Illinois Esneklik İndeksi Testi'nin (I-FIT) asfalt karışımlarının çatlama dayanımını değerlendirmede hem teknik hem de pratik açıdan etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. I-FIT, farklı iklim koşullarında ve malzeme türlerinde (yeni ya da geri dönüştürülmüş) tutarlı sonuçlar vermekte, laboratuvar ve saha performansı arasında güçlü korelasyonlar sağlamaktadır. Ayrıca, modifiye bağlayıcılar ve katkı maddelerinin etkisini değerlendirmede de önemli katkılar sunarak karışım tasarımının optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu  zellikleriyle I-FIT, asfalt kaplama performansının artırılması ve uzun vadeli dayanıklılığın öngörülmesi için kritik bir araç olarak literatürde kabul görmüş durumdadır.

4.1.3 Dolaylı  ekme Sünme Uyumluluğu ve Dayanım Testi (Indirect Tensile-IDT Creep Compliance and Strength Test)

Dolaylı  ekme Sünme Uyumluluğu ve Dayanım Testi, düşük sıcaklıklarda asfalt karışımlarının performansını değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş modern bir yöntem olup, AASHTO T 322-07 (2020) standardı doğrultusunda uygulanmaktadır. Asfalt karışımlarının uzun vadeli deformasyon ve dayanım davranışlarını analiz etmeye olanak tanıyan test, ilk olarak Pennsylvania State University'den Roque vd. tarafından geliştirilmiştir.

Test prosedürü iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, şekil 4.4'te görülen IDT sünme testi, asfalt karışım numunesine belirli bir sıcaklıkta sabit bir yük uygulayarak, numunenin zamanla gösterdiği deformasyon (sünme) davranışını  l er. Genellikle 100 ila 1000 sn süresince sabit yük uygulanarak, viskoelastik deformasyon karakteristikleri analiz edilir. Bu süreçte, numune merkezine yakın bölgelerdeki yatay ve düşey deformasyon hareketleri hassas sensörlerle kaydedilir ve bu veriler kullanılarak sünme uyumluluğu hesaplanır. Bu parametre, asfalt karışımının elastik ve viskoelastik özelliklerini yansıtarak, uzun süreli yükleme altında göstereceği davranışın tahmin edilmesine imkân tanır.

İkinci aşamada ise, çekme mukavemeti testi gerçekleştirilir. Bu tahribatlı test sürecinde, daha önce sünme testi yapılan numune üzerine 12,5 mm/dk hızında yük uygulanarak malzemenin

kırılma davranışı ve maksimum çekme dayanımı belirlenir. Böylece, asfalt karışımının hem deformasyona karşı direnci hem de gerilme altında çatlamaya karşı dayanıklılığı bütüncül bir şekilde değerlendirilmiş olur.



Şekil 4.4: IDT sünme uyumluluğu ve dayanım testi

Numune hazırlığı, test sonuçlarının güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Genellikle 100–150 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde silindirik olarak hazırlanan numuneler, Superpave döner sıkıştırıcı ile hedef yoğunluk ve homojenlikte üretilir. Ardından taşlama ve kesim işlemleriyle standart boyutlara getirilir. Test öncesinde belirli sıcaklıklarda şartlandırılan numuneler, bağlayıcının PG'sine göre farklı sıcaklıklarda değerlendirilir. Bu kapsamda; PG XX-34 ve daha yumuşak bağlayıcılar için 30°C, 20°C ve 10°C; PG XX-28 ve PG XX-22 için 20°C, 10°C ve 0°C; PG XX-16 ve daha sert bağlayıcılar için ise 10°C, 0°C ve -10°C sıcaklıkları kullanılmaktadır. Bu sıcaklıklar, asfalt karışımının farklı iklim koşullarındaki davranışını temsil etmek amacıyla seçilmektedir.

Bu sıcaklık aralıkları, asfalt karışımının sıcaklığa duyarlılığını ve performans değişimini daha doğru şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen veriler, asfalt karışımının düşük sıcaklık koşullarındaki sünme davranışını, çatlama potansiyelini ve uzun vadeli servis ömrünü tahmin etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Böylece, hem laboratuvar düzeyinde hem de saha koşullarında daha dayanıklı ve güvenilir kaplama tasarımı mümkün hale gelmektedir. Numune hazırlığı, iki kesim işlemi ve master noktalarının yapıştırılması ile gerçekleştirilmekte olup, bu süreç yaklaşık 2 saat sürmektedir. Numuneler, belirlenen test

sıcaklığında en az 3 saat süreyle şartlandırılmaktadır. Test prosedüründe genellikle üç adet numune kullanılmakta olup, bu numuneler üzerinden elde edilen ölçümlerle asfalt karışımının sürünme uyumluluğu ve çekme mukavemeti hesaplanmaktadır. Test süresi, karışım özelliklerine bağlı olarak 1 ile 2 gün arasında değişmekte ve test edilen sıcaklık sayısı ile numune tekrarlarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Özellikle termal çatlama analizlerinde önemli bir değerlendirme aracı olarak kullanılan bu test, asfalt karışımlarının düşük sıcaklık performansının detaylı incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Testin uygulanabilirliğiyle ilgili coğrafi sınırlamalar bulunmamakla birlikte, sünme ve çekme özelliklerinin değerlendirilmesi gereken tüm asfalt test laboratuvarlarında uygulanabilirliği mevcuttur. Testin gerçekleştirilmesi için gerekli ekipmanlar arasında yükleme cihazı, veri toplama sistemi, numune deformasyon ölçüm cihazı ve iklimlendirme kabini yer almaktadır.

IDT Sünme Uyumu ve Mukavemet Testi'nin etkinliğini ve saha performansı ile olan korelasyonunu inceleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. Christensen ve Bonaquist (2004) tarafından yürütülen araştırmada, sıcak karışım asfalt malzemelerinin düşük sıcaklık performansını belirlemek amacıyla IDT test prosedürleri değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmada, IDT sünme testinin asfalt betonunun düşük sıcaklık koşullarındaki sünme davranışını belirlemek açısından standart bir yöntem olarak korunması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca testin, kaplama sistemlerinde termal çatlamaya karşı dayanımın öngörülmesinde yüksek düzeyde temsil kabiliyeti sunduğu vurgulanmıştır.

Richardson ve Lusher (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışma, aşınma tabakalarında kullanılan HMA malzemelerinin sünme uyumluluğu ve IDT belirlenmesine odaklanmıştır. Araştırmada, sünme uyumluluğu, birim gerilme başına zamana bağlı oluşan gerinim olarak tanımlanırken; IDT mukavemeti, asfalt karışımının maksimum gerilme altında gösterdiği dayanım olarak ifade edilmiştir. Bu iki parametrenin, malzemenin düşük sıcaklık koşullarında maruz kalabileceği termal gerilmeler altındaki performansının değerlendirilmesinde kritik rol oynadığı vurgulanmıştır. Ayrıca, sıcak karışım asfaltların sünme uyumluluğu ve çekme mukavemetine yönelik gerçekleştirilen değerlendirmeler, bu mekanik özelliklerin, düşük sıcaklık çatlamaları ve termal gerilme modelleri gibi kaplama tasarım parametrelerinde temel girdi verileri olarak kullanıldığını göstermektedir. Çalışma, IDT tabanlı değerlendirmelerin, asfalt karışımlarının düşük sıcaklıktaki davranışlarını anlamada ve performans tahmininde önemli bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

Bu yöntemin asfalt karışımlarının sünme uyumluluğu ve çekme mukavemetinin değerlendirilmesinde etkili bir araç olmasına rağmen, kalite güvencesi açısından birtakım kısıtlamalar ve zorluklar içermektedir. Karışım tasarım sürecinde faydalı bilgiler sağlamakla birlikte, testin karmaşık veri analizi ve uzun süren uygulama prosedürleri, sahadaki pratik kullanımı açısından sınırlayıcı olabilmektedir. Ayrıca, testin gerektirdiği yüksek maliyetli ekipmanlar ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen uzun süreli deneyler, geniş ölçekli kalite kontrol uygulamalarında verimliliği olumsuz yönde etkileyebilir. Bunun yanı sıra, test sonuçlarının genellikle teorik hesaplamalarla desteklenmesi, gerçek yol koşullarındaki davranışların tam anlamıyla yansıtılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle, kalite güvencesinin artırılması amacıyla, test sonuçlarının saha verileri ile daha kapsamlı doğrulanması ve tamamlayıcı test yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Özellikle dayanıklılık testlerinin sahada uygulanabilirliğinin artırılması için test prosedürlerinin sadeleştirilmesi ve erişilebilirliğinin yükseltilmesi önem arz etmektedir (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.ğ).

4.1.4 Bindirme Tabakası Testi (Overlay Test - OT)

Bindirme Tabakası Testi (OT), asfalt karışımlarının çatlama direncini ve dayanımını değerlendirmek amacıyla El Paso'daki araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve Texas A&M Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarla detaylandırılmıştır. OT cihazı, asfalt karışımlarının çatlama duyarlılığını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir cihazdır. Teksas'ta, bitümlü karışımların yorulmaya veya yansıma çatlaklarına karşı duyarlılığını değerlendirmek için OT testinin yapılmasına ilişkin prosedürleri özetleyen Tex-248-F kapsamında standartlaştırılmıştır. New Jersey'de, OT deneyi için kendi şartnamesi olan NJDOT B-10'u kullanmaktadır. Bu şartname, özellikle yüksek RAP içerikli asfalt karışımlarının yorulma çatlama direncini değerlendirmek için kullanılır. Her iki standart da kaplama test cihazını kullanırken, bölgesel gerekliliklere ve kaplama performansı beklentilerine göre test parametreleri, numune hazırlama ve göçme kriterleri açısından farklılıklar gösterebilir (Rashid vd., 2015).

OT, asfalt karışımlarının çatlama dayanımını ve uzun süreli performansını değerlendirmek için yapılan bir testtir. Test numuneleri, genellikle Superpave döner sıkıştırıcı ile hazırlanan laboratuvar örneklerinden veya saha karotlarından elde edilir. Hazırlanan silindirik numuneler, belirli boyutlarda prizmatik parçalara kesilir ve düzgün bir geometriye getirilerek

test için uygun hâle getirilir. Numuneler, test öncesinde 25 °C’de en az 1 saat boyunca şartlandırılmaktadır. Bu sıcaklık, asfalt karışımının mekanik özelliklerinin kararlı hâle gelmesini sağlarken, farklı sıcaklıklarda gösterebileceği davranış farklarının kontrol altına alınmasına da imkân tanır. Numuneler, Şekil 4.5’te görüldüğü gibi (TxDOT, 2019) iki çelik taban plakası üzerine uygun yapıştırıcılarla sabitlenir.



Şekil 4.5: Bindirme Tabakası test numunelerinin plakalar üzerine yerleştirilmesi

Test numunesinin üzerine yerleştirildiği bu plakalardan biri sabitlenmişken diğeri yatay düzlemde ileri-geri hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Hareketli plaka, 0,1 Hz frekansla uyguladığı tekrarlı yatay yer değiştirme hareketi ile numune üzerinde gerilim oluşturarak çatlama davranışını simüle eder. Uygulanan yer değiştirme genliği maksimum 0,025 inç (yaklaşık 0,635 mm) ile sınırlandırılmıştır. Test, numuneye uygulanan yükte %93 oranında azalma meydana gelmesi veya 1000 döngünün tamamlanması durumlarında sonlandırılır. Her bir numune için test süresi, karışımın özelliklerine bağlı olarak genellikle 3 saate kadar uzayabilmekte, hazırlık işlemleri dâhil olmak üzere toplam süre yaklaşık 4 saati bulabilmektedir. OT, genellikle üç numune üzerinden gerçekleştirilir ve sonuçların güvenilirliği açısından bu tekrarlar önemlidir. Test, sabit bir sıcaklıkta gerçekleştirilmekle birlikte, iklimsel koşullar ve saha özellikleri göz önünde bulundurularak farklı sıcaklıklarda da uygulanabilir. Bu yönüyle OT, asfalt karışımlarının deformasyon kapasitesi, çatlama

direnci ve servis ömrü gibi kritik performans özelliklerinin laboratuvar ortamında belirlenmesine olanak tanıyan güvenilir ve uygulama odaklı bir yöntem olarak kabul edilmektedir (National Asphalt Pavement Association(NAPA), t.y.j).

Bu yöntem, asfalt karışımlarının çevresel koşullara karşı çatlama direncini belirlemek için özellikle New Jersey ve Teksas gibi bölgelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu testin ana parametreleri arasında göçme anına kadar olan döngü sayısı (N_f), kritik kırılma enerjisi (G_c) ve çatlama direnç endeksi (Beta) yer alır. Göçme anına kadar olan döngü sayısı, bir numunenin çatlama meydana gelmeden önce kaç yük döngüsüne dayanabileceğini gösterir ve bu da karışımın, tekrarlanan trafik yüklerine karşı dayanma kapasitesini doğrudan ölçen bir değerdir. Yüksek döngü sayısı, karışımın uzun vadede daha iyi çatlama direncine sahip olduğunu gösterir. Kritik kırılma enerjisi (G_c), karışım içinde bir çatlağın başlatılması ve yayılması için gerekli olan enerjiyi belirtmektedir. Yüksek kırılma enerjisi değerleri, karışımın daha dayanıklı ve daha güçlü olduğunu, dolayısıyla daha fazla gerilme altında dayanabileceğini gösterir. Çatlama direnç endeksi (Beta), hem göçme anına kadar olan döngü sayısını hem de kritik kırılma enerjisini tek bir değerde birleştirir ve asfaltın genel çatlama direncini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirir. Bu endeks, karışımın zorlu çevre koşullarında veya yoğun trafik koşullarında nasıl performans göstereceğini belirlemede oldukça faydalıdır. OT cihazı, yükleme çerçevesi, yük uygulama ünitesi, numune yerleştirme plakaları, iklimlendirme kabini, ölçüm sistemi (yer değiştirme ve yük) ve veri toplama ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır.

OT, asfalt karışımlarının tekrarlanan yükler altındaki çatlama direncini değerlendirmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Ancak, test sırasında elde edilen verilerin analiz süreci dikkat gerektirmekte olup, sonuçların güvenilirliği bu analizlerin doğruluğuna bağlıdır. OT, karışım tasarımında faydalı olmakla birlikte, yalnızca çatlama direncini ölçmesi nedeniyle kalite güvencesi açısından sınırlamalar taşır. Kalıcı deformasyon veya düşük sıcaklık çatlaması gibi diğer önemli performans kriterlerini kapsamadığı için, karışımın saha performansını tam olarak yansıtmaz. Bu nedenle, OT'nin farklı çevresel ve mekanik koşulları içeren ilave testlerle desteklenmesi önerilmektedir. OT, başlangıçta yüksek ekipman maliyetleri gerektirmesi nedeniyle bazı laboratuvarlar ve kurumlar için ekonomik bir engel teşkil edebilir. Ancak, çatlama direnci yüksek asfalt karışımlarının tasarımına olanak tanınması, uzun vadede daha dayanıklı yol kaplamalarının seçilmesini ve böylece bakım-onarım maliyetlerinin

azalmasını sağlar. Bu bağlamda, özellikle çatlak duyarlılığının yüksek olduğu bölgeler için ekonomik açıdan anlamlı ve sürdürülebilir bir çözüm sunduğu söylenebilir (TxDOT, 2019; Zhou ve Scullion, 2007).

Özellikle mevcut kaplama üzerine uygulanan asfalt tabakalarının yansıma çatlaklarına direncini değerlendirmek amacıyla kullanılan OT deneyinin, farklı sıcaklıklarda asfalt karışımlarının çatlama davranışlarının incelenmesindeki etkinliği ve saha performansı ile olan korelasyonu, aşağıdaki literatür çalışmalarında ele alınmıştır:

Zhou ve Scullion (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, asfalt karışımlarının yansıma çatlama direncini değerlendirmek amacıyla geliştirilen iyileştirilmiş bir OT yöntemi sunulmuştur. Araştırma bulguları, bu testin farklı çatlama direnci seviyelerine sahip asfalt karışımları arasında etkin bir ayırım yapabildiğini ve elde edilen sonuçların saha performansı ile yüksek düzeyde korelasyon gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, çalışmada yumuşak bağlayıcı içeren karışımların, daha sert bağlayıcı karışımlara kıyasla çatlama direnci açısından daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir.

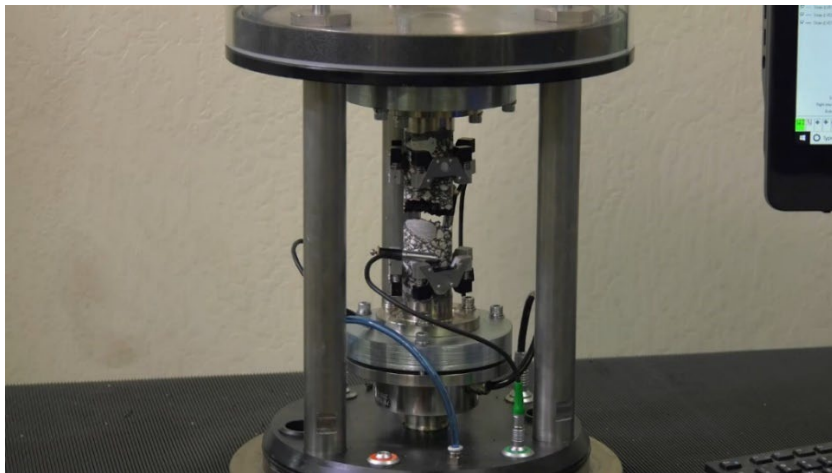
Idris vd. (2020) çalışmalarında, farklı HMA karışımlarının yansıma çatlama direnci performansını değerlendirmek amacıyla OT düzeneği kullanılmıştır. Araştırma bulguları, OT'nin saha koşullarını etkili biçimde temsil edebildiğini ve farklı HMA karışımlarının çatlama duyarlılığını ayırt etmede başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, çalışmada elde edilen verilerin karışım tasarımı ve bağlayıcı modifikasyonu süreçlerinde katkı sağlayabilecek nitelikte olduğu belirtilmiştir.

Bennert vd. (2019) OT düzeneğinin yorulma çatlama eğilimli asfalt karışımlarının belirlenmesindeki etkinliğinin incelendiği çalışmalarında, bu deneyin farklı karışım özelliklerine duyarlı olduğunu ve asfalt karışımlarının saha performanslarına göre güvenilir bir şekilde sıralayabildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, OT'nin yalnızca laboratuvar ortamında değil, aynı zamanda gerçek saha koşullarına yönelik performans tahminlerinde de etkili bir araç olduğunu göstermekte; dolayısıyla daha dayanıklı ve çatlama direnci yüksek asfalt kaplamaların tasarımında önemli bir rehberlik işlevi üstlenebileceğini vurgulamaktadır.

4.1.5 Doğrudan Çekme Döngüsel Yorulma Testi (Direct Tension Cyclic Fatigue Test-DTCFT)

Doğrudan Çekme Döngüsel Yorulma Testi (DTCFT), Kuzey Carolina Eyalet Üniversitesi tarafından geliştirilmiş olup, asfalt karışımlarının yorulma direnci ve çatlama potansiyelini değerlendirmeye yönelik önemli bir performans testidir. Test, asfalt karışımının doğrusal viskoelastik özelliklerini incelemek amacıyla kontrollü gerilme veya deformasyon uygulanarak numunelerin yorulma davranışlarını analiz eder. Farklı yükleme seviyelerinde döngüsel gerilme uygulanarak, numunelerin yorulma hasarına karşı direnci ölçülür ve elde edilen verilere dayanarak karakteristik hasar eğrileri oluşturulur. Bu eğriler, yol kaplamasının yorulma ömrünü tahmin etmekte kullanılırken, S_{app} yorulma endeksi (Fatigue Index) karışımın genel performansını özetleyen önemli bir parametre olarak hesaplanır.

Şekil 4.6'daki DTCFT için kullanılan numune boyutları, AASHTO standartlarına göre farklılık göstermektedir; büyük numuneler için AASHTO TP 107-14, küçük numuneler için ise AASHTO TP 133-19 standartları uygulanmaktadır. Genellikle 150 mm çapında ve 180 mm yüksekliğinde Superpave döner sıkıştırıcı ile hazırlanan numuneler, test öncesi uygun yaşlandırma ve iklimlendirme süreçlerinden geçirilir. Numune sayısı genellikle üç ila beş arasında değişmekte olup, test sıcaklığı bitümlü bağlayıcının PG'sine göre belirlenir. Test süresi, numunelerin yorulma ömrüne bağlı olarak 1 ila 2 gün arasında değişmekte ve hassasiyet ile doğruluğu artırmak amacıyla kontrollü koşullarda gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.6: DTCFT testi

DTCFT testinde kullanılan numune boyutları AASHTO standartlarına göre farklılık

göstermektedir. Büyük numuneler için AASHTO TP 107-14, küçük numuneler için ise AASHTO TP 133-19 standardı kullanılmaktadır. Test numuneleri, Superpave Döner Sıkıştırıcı ile 150 mm çapında ve 180 mm yüksekliğinde sıkıştırılan numunelerden elde edilmektedir. AASHTO TP 107-14 standardına göre karotla 100 mm çapında kesilen 130 mm yükseklikli büyük test numuneleri kullanılmaktadır. Testin küçük boyutlu numunelerle gerçekleştirildiği AASHTO TP 133-19 standardı için bu 100 mm çapındaki gövdelerden AASHTO T 378/R 84 standardına uygun şekilde 38 mm çapında numuneler hazırlanmaktadır. Laboratuvar ortamında standart yöntemlerle üretilen silindirik veya prizmatik numuneler, test öncesinde 135°C'de 4 saat süreyle kısa süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulur ve iklimlendirilir. Numune sayısı genellikle üç ile beş arasında değişmektedir. Testin gerçekleştirileceği sıcaklık ise kullanılan bitümlü bağlayıcının PG'sine bağlı olarak belirlenir. Bu sıcaklık, PG derecesinin yüksek ve düşük değerlerinin ortalamasından 3°C çıkarılarak hesaplanır; ancak elde edilen sıcaklık 21°C'yi aşarsa test maksimum 21°C'de yapılmaktadır. Aşağıda görseli verilen test sistemini oluşturan ekipmanlar arasında doğrudan çekme test cihazı, üç eksenli koşullandırma sistemi, numune sabitleme aparatları, iklimlendirme kabini ve yükleme kontrol ünitesi yer almaktadır.

Numune sayısı genellikle 3 ila 5 arasında değişir. Test sıcaklığı tipik olarak karışımda kullanılan asfalt bağlayıcının PG'ye göre belirlenir. Spesifik olarak, test yüksek ve düşük PG sıcaklıklarının ortalaması -3°C, maksimum sınır 21°C olacak şekilde gerçekleştirilir. Örneğin, bir asfalt bağlayıcı 64-22 PG derecesine sahipse, ortalama $(64 + (-22))/2 = 21^{\circ}\text{C}$ 'dir. 3°C çıkarıldığında 18°C'lik bir test sıcaklığı elde edilir. Ancak, hesaplanan sıcaklık 21°C'yi aşıyorsa, test 21°C'de yapılmalıdır. Test, numunelerin yorulma ömrüne bağlı olarak değişen sürelerde gerçekleştirilir ve tipik olarak her bir numune için test süresi 1 ila 2 gün arasında değişir. Bu uzun süre, testin hassasiyetini ve doğruluğunu artırmayı amaçlar.

Veri analizi süreci, gelişmiş yazılımlar ve hesaplama araçları gerektirmekte olup; yorulma ömrü, hasar karakteristik eğrileri (C ve S), gerilme-deformasyon ilişkileri ve yorulma indeksi gibi parametrelerin hesaplanmasını içermektedir. Bu yönüyle analiz süreci oldukça karmaşık ve zaman alıcıdır. DTCFT, karışım tasarımı açısından güvenilir ve detaylı bir değerlendirme sunarken, kalite güvencesi açısından bazı sınırlamalara sahiptir. Özellikle testin saha koşullarını tam olarak temsil edememesi ve çevresel değişkenlerin etkilerini sınırlı şekilde yansıtması, performans tahminlerinde belirsizlik oluşturabilmektedir. Buna karşın, DTCFT

laboratuvar ortamında asfalt karışımlarının yorulma özelliklerini değerlendirmek için teknik açıdan etkili, kapsamlı ve bilimsel temellere dayanan bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (National Asphalt Pavement Association(NAPA), t.y.c).

FHWA, DTCFT'yi Asfalt Karışım Performans Test Cihazı (AMPT) çerçevesine dâhil etmiştir. Bu uyum, asfalt karışımlarında yorulma çatlaması potansiyelinin değerlendirilmesini kolaylaştırarak saha performansı ile uyumluluğu artırmıştır (FHWA, 2016).

4.1.6 N_{Flex} Faktörü

N_{Flex} Faktörü Testi, West ve ekibi tarafından asfalt karışımlarının düşük sıcaklık koşullarında çatlama direncini arttırmak ve çatlama potansiyelini doğru bir şekilde değerlendirme amacıyla geliştirilmiş bir performans testidir. Şekil 4.7'te gösterilen bu test, özellikle NCAT tarafından kullanılmaktadır.



Şekil 4.7: N_{Flex} faktörü testi

N_{Flex} testi, geleneksel IDT testine benzer ve bir asfalt karışımının dayanıklılığını değerlendirmeyi amaçlar. Test için genellikle 50 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda silindirik numuneler kullanılır. Bu numuneler Superpave döner sıkıştırıcı ile hazırlanır. Test sırasında, numuneye 50 mm/dk hızında dikey tek yönlü bir yük uygulanır ve çapraz kafa yer değiştirmesi sürekli olarak izlenir ve kaydedilir. Yükleme süreci sonucunda elde edilen yük-

yer değiştirme eğrisi, numunenin deformasyon davranışını temsil etmektedir. Bu eğrinin analizinde, tepe noktasının ardından eğimin değiştiği bükölme noktası belirlenir ve bu noktaya ilişkin eğim, numunenin yük altındaki dayanım sonrası davranışının değerlendirilmesinde temel alınır. N_{Flex} faktörü, yük-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanın (tokluk) tepe sonrası bükölme noktasındaki eğime oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Bu parametre, asfalt karışımının çatlamaya karşı gösterdiği direnç ve enerji emme kapasitesi hakkında nicel bilgi sağlamaktadır.

Sonuç olarak, N_{Flex} Faktörü Testi, özellikle düşük sıcaklık koşullarında asfalt karışımlarının uzun vadeli performansını değerlendirmek ve dayanıklılığı artırmaya yönelik karışım tasarımında önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır (Yin vd., 2017).

N_{Flex} Faktörü, AASHTO TP 141-20 standardına dayalı olarak geliştirilmiş ve asfalt karışımlarının çatlama potansiyelini değerlendirmeyi amaçlayan bir performans parametresidir. Bu standart, IDT testi temel alınarak asfalt karışımının düşük sıcaklıklardaki çatlamaya karşı direncini analiz etmeye yönelik bir yöntem sunmaktadır. Test, dayanıklılık (tokluk) ve kırılğanlık eğimi olmak üzere iki temel kavrama dayanmaktadır. Dayanım, yük-yer değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar olan alanını temsil eder ve karışımın çatlamaya karşı enerji absorbe etme kapasitesini, yani direncini gösterir. Kırılğanlık eğimi ise, eğrinin tepe noktasından sonra, çatlama gerçekteştikten sonraki kısmındaki eğimi ifade eder ve karışımın çatlama sonrası yapısal davranışını yansıtır. N_{Flex} Faktörü, dayanım değerinin eğimin mutlak değerine bölünmesiyle hesaplanır. Bu değer, asfalt karışımının çatlamaya karşı direncini nicel olarak değerlendirmeye yardımcı olur. Yüksek N_{Flex} değerleri, karışımın hem dayanıklı hem de çatlamaya karşı daha az kırılğan olduğunu gösterir. Test, özellikle düşük sıcaklıklarda termal çatlamaların değerlendirilmesinde kullanılır ve test sıcaklıkları genellikle -10°C ile -30°C arasında seçilmektedir. N_{Flex} Faktörü, asfalt karışımlarının uzun ömürlü ve çatlamaya dayanıklı olacak şekilde tasarlanmasında yararlı bir araç olarak kabul edilmesine rağmen, küresel ölçekte henüz yaygın bir uygulama alanı bulamamıştır. Daha çok bilimsel çalışmalarda kullanılan bu yöntem, asfalt kaplamaların performans değerlendirmesine katkı sağlayan yenilikçi bir parametre olarak öne çıkmaktadır (Yin vd., 2018).

N_{Flex} Faktörü Testi için kullanılan ekipmanlar arasında yükleme sistemleri, kırılma ölçüm cihazları ve gelişmiş veri toplama ile analiz yazılımları yer almaktadır. Bu ekipmanlar, testin

doğru ve hassas bir şekilde uygulanmasını sağlarken, ileri teknolojiye dayanmaları nedeniyle yüksek maliyetli olabilir. Ayrıca, testin güvenilir biçimde uygulanabilmesi için alanında uzman, eğitimli personele ihtiyaç duyulmaktadır.

Test numuneleri, genellikle SGC kullanılarak hazırlanmakta ve silindirik formda üretilmektedir. Numuneler, test öncesinde $25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta iki saat süreyle şartlandırılır. Bu şartlandırma süreci, numunelerin test sırasında tutarlı davranış sergilemesini sağlar ve sonuçların karşılaştırılabilirliğini artırır. Test, karışım başına en az üç numune ile gerçekleştirilmekte olup, bu sayı analiz ihtiyacına bağlı olarak değiştirilebilir. Her bir testin süresi yaklaşık bir dakikadır. Yük çerçevesi ve veri toplama sistemleriyle test süreci izlenmekte, yük-şekil değiştirme eğrileri üzerinden performans değerlendirmesi yapılmaktadır. Kısa sürede tamamlanabilmesine rağmen, yüksek doğrulukta ve kapsamlı bir değerlendirme sunduğundan, özellikle numune üretimi ve şartlandırma süreçlerinin titizlikle takip edilmesi önemlidir.

Veri analizi aşaması; deformasyon, gerilme ve düşük sıcaklık değişkenlerine ilişkin verilerin değerlendirilmesini kapsar. Bu süreç, kullanılan yazılım altyapısına ve operatör deneyimine bağlı olarak karmaşık hale gelebilmektedir. Özellikle, termal çatlama davranışının doğru biçimde modellenmesi ve sonuçların yorumlanabilir olması testin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Ancak, testin karışım tasarımı ve kalite güvencesi açısından kullanım potansiyeli sınırlıdır. Standart bir metodolojinin mevcut olması olumlu bir özellik olsa da, geniş kabul görmüş aralıkların bulunmaması ve sonuçların tekrarlanabilirliği konusunda yaşanan belirsizlikler, testin güvenilirliğini sorgulatabilmektedir.

Teknik açıdan değerlendirildiğinde, N_{Flex} Faktörü Testi, asfalt karışımlarının düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı performanslarını belirlemek için potansiyel vadeden bir yöntemdir. Ancak, sınırlı standartlaşma düzeyi ve yaygın kullanım eksikliği, bu potansiyelin tam anlamıyla pratiğe aktarılmasını engellemektedir. Ekonomik açıdan bakıldığında ise, test sistemlerinin yüksek yatırım maliyeti, uzman operatör ihtiyacı ve düşük yaygınlık, testin saha uygulamaları ve kalite kontrol süreçlerinde geniş çaplı kullanımını sınırlamaktadır.

Sonuç olarak, N_{Flex} Faktörü Testi düşük sıcaklık performansını değerlendirmede bilimsel açıdan güçlü ve umut vadeden bir araçtır. Ancak, uluslararası düzeyde daha geniş kabul

görmesi, ekonomik uygulanabilirliğinin artırılması ve standartlaştırılmış test protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, test yöntemi özellikle araştırma ve geliştirme çalışmaları için uygun bir alternatif sunarken, yaygın karışım tasarımı ve kalite güvencesi uygulamalarında sınırlı bir kullanım alanına sahiptir (National Asphalt Pavement Association(NAPA) t.y.i).

Asfalt karışımlarının düşük sıcaklık çatlamlarına karşı performansını değerlendirmede kullanılan IDT N_{Flex} Faktörü testinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, son yıllarda test koşullarının etkilerine odaklanan çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yin vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, asfalt karışımlarının çatlama direncinin değerlendirilmesine yönelik olarak IDT N_{Flex} Faktörü testinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Araştırma kapsamında elde edilen bulgular, test sıcaklığının hem Poisson oranı hem de N_{Flex} Faktörü üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu, buna karşılık yükleme hızının test sonuçları üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, asfalt karışımlarının düşük sıcaklık davranışlarını değerlendirirken test sıcaklığının belirleyici bir parametre olarak dikkate alınması gerektiğini ortaya koymakta ve doğru test koşullarının seçiminin, sonuçların güvenilirliği açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Yin vd. (2017) tarafından yürütülen çalışmada, asfalt karışım numunelerinin yeniden ısıtılması ve farklı yükleme oranlarının, IDT N_{Flex} Faktörü testi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma bulguları, yeniden ısıtılmış numunelerin, sıcak üretimden elde edilen numunelere kıyasla daha düşük N_{Flex} Faktörü değerleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, testin sonuçlarının numune hazırlama koşullarına duyarlılığını açıkça ortaya koymakta ve test protokollerinde numune üretim süreçlerinin dikkatle kontrol edilmesinin, güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesi açısından kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır.

4.1.7 Kiriş Eğilme Yorulma Testi (Flexural Bending Beam Fatigue Test)

Kiriş eğilme yorulma testi, asfalt karışımlarının yorulma performansını değerlendirmek amacıyla Kaliforniya Üniversitesi'nden Monismith ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, özellikle asfaltın tekrarlı eğilme yükleri altındaki davranışını incelemek için kullanılan dört noktalı eğilme düzeneğine dayanmaktadır (Şekil 4.8). Testte, dikdörtgen kesitli bir asfalt kiriş numune, dört noktadan desteklenerek sabitlenir. Yükleme sinüzoidal formda ve genellikle 10 Hz frekansta, ortadaki iki iç destek noktası üzerinden

uygulanır. Numunenin orta noktasında meydana gelen şekil değiştirme, uygulanan yüklerle birlikte test süresince sürekli izlenir ve kaydedilir.

Bu testin temel amacı, asfalt karışımının eğilme rijitliği, kümülatif enerji dağılımı ve yorulma kırılmasına kadar geçen yükleme döngüsü sayısını (N_f) belirlemektir. Karışımın uzun süreli tekrarlı yükler altındaki performansı nicel olarak değerlendirilmesinde, genellikle numunenin rijitliği ile yükleme döngülerinin çarpımının en yüksek olduğu nokta olarak tanımlanan yorulma kırılması dikkate alınır. Farklı gerinim seviyelerinde uygulama yapılabilmesi, asfalt karışımının değişen yükleme koşullarındaki yorulma davranışının çok yönlü bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır. Elde edilen veriler, karışım tasarım süreçlerinde kullanılabilecek kritik mühendislik parametrelerini sağlar. Test, uluslararası geçerliliği olan AASHTO T321 ve ASTM D8273-18 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmekte olup, asfalt kaplamaların hizmet ömrünün tahmin edilmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.



Şekil 4.8: Kiriş eğilme yorulma test cihazı

Kiriş eğilme yorulma testi numuneleri, genellikle 380 mm uzunluğunda, 50 mm genişliğinde ve 63 mm kalınlığında dikdörtgen prizma şeklinde hazırlanır. Bu boyutlar, test cihazıyla uyum ve homojen yük dağılımı sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Numuneler, karışımların tasarım hedef yoğunluğunda laboratuvar ortamında üretilen sıkıştırılmış asfalt plakalarından kesilerek elde edilir. Numuneler, testin doğruluk ve tekrarlanabilirliği açısından, lazer kesici veya taşlama makineleri gibi hassas cihazlar kullanılarak düzgün ve paralel yüzeyli olacak şekilde elde edilir. Hazırlanan numuneler, test öncesinde 20–25°C aralığında şartlandırılarak

saha koşullarına yakın bir ortam oluşturulur. Yükleme noktalarının düzgün yerleşmesi için master noktalarına yapıştırıcı uygulanarak numuneler test tertibatına sabitlenir. Genellikle her bir deney için en az üç numune kullanılır ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirme yapılır. Test süreci, yükleme seviyesi ve karışımın rijitliğine bağlı olarak saatler ile haftalar arasında değişkenlik gösterebilir. Daha rijit karışımlar için göçme anına kadar geçen süre daha uzun olurken, daha esnek karışımlar daha kısa sürede yorulma hasarı gösterebilir. Deney, genellikle $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ sıcaklık kontrollü bir ortamda gerçekleştirilir.

Veri analizi, numune deformasyonları üzerinden esneklik modülü ve yorulma ömrü (N_f) hesaplamalarına dayanır. Analiz süreci, modern yazılımlar sayesinde kolaylaştırılmış olsa da, yorulma davranışının doğru şekilde modellenebilmesi için dikkatli bir değerlendirme gerektirir. Her ne kadar test, saha koşullarını doğrudan yansıtamaması ve uzun süresi nedeniyle kalite güvencesi açısından sınırlı bulunabilse de, karışım tasarımı ve asfalt kaplamaların uzun vadeli performansının tahmini açısından önemli bilgiler sunar. Özellikle çatlama direnci yüksek ve uzun ömürlü kaplamaların geliştirilmesinde mühendislik uygulamalarına değerli katkılar sağlamaktadır (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.d).

Aşağıdaki çalışmalar, literatürde Kiriş eğilme yorulma testinin asfalt karışımlarının yorulma performansını değerlendirmedeki etkinliğine dair çeşitli çalışmalardan bir kaçıdır. Adhikari ve You (2010), farklı sıcaklık ve yükleme frekansları altında tipik bir Michigan asfalt karışımı üzerinde yaptıkları çalışmada, malzeme özellikleri ile yük tepkileri arasındaki ilişki üzerinden yorulma direncinin tahmin edilebileceğini göstermiş ve bu testin asfalt kaplamaların performans analizinde önemli bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, “Flexural Fatigue – Pavement Tests” başlıklı Pavement Interactive (t.y.a) yayınlanan çalışmasında, sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamaların ortalama servis sıcaklıklarında yorulma ömrünü belirlemede etkili olduğu belirtilmiş; tekrarlanan trafik yükleri altında kaplama tabakasının dayanıklılığını tahmin etmedeki rolü vurgulanmıştır. Harder (2015) ise yaptığı sunumda, kiriş yorulma cihazının asfalt kaplamaların çatlama potansiyelini anlamada sağladığı katkıya dikkat çekmiş ve bu yöntemin çatlama davranışının değerlendirilmesinde önemli bir performans göstergesi sunduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmalar, eğilme yorulma testinin asfalt kaplamaların uzun vadeli yapısal dayanımını öngörmede kritik bir değerlendirme aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1.8 Yarı Dairesel Eğilme Testi (Louisiana Yöntemi) (Semi-Circular Bending Test - SCB)

Yarı Dairesel Eğilme Testi, Louisiana Ulaşım Araştırma Merkezi'nde Muhammed ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen ve asfalt karışımlarının kırılma davranışını değerlendirmek üzere tasarlanmış bir yöntemdir. Bu test, kırılma tokluğu ve enerji salınım oranı gibi mekanik parametreleri belirlemeye olanak tanır. SCB testinde kullanılan yarı-silindirik numuneler, belirli derinliklerde (25,4 mm, 31,8 mm ve 38,0 mm) çentiklenir ve düz bir yüzey üzerinde iki paralel destek çubuğu arasında konumlandırılır. Numunenin kavisli yüzeyine, çentik ucuna hizalı olarak 0,5 mm/dk hızında dikey yük uygulanır.

Uygulanan yük ve karşılık gelen yer değiştirme verileri eş zamanlı olarak kaydedilir. Elde edilen veriler, her bir çentik derinliği için kırılma dayanımı (fracture toughness) hesaplamasında kullanılır. Bu hesaplamalar sayesinde, çentik derinliği ile kırılma dayanımı arasındaki ilişki analiz edilerek enerji salınım oranı (J-integrali) belirlenir. Bu parametre, asfalt karışımının kırılma sürecinde tükettiği enerjiyi yansıtarak, malzemenin çatlamaya karşı gösterdiği direncin nicel bir ifadesini sunar.

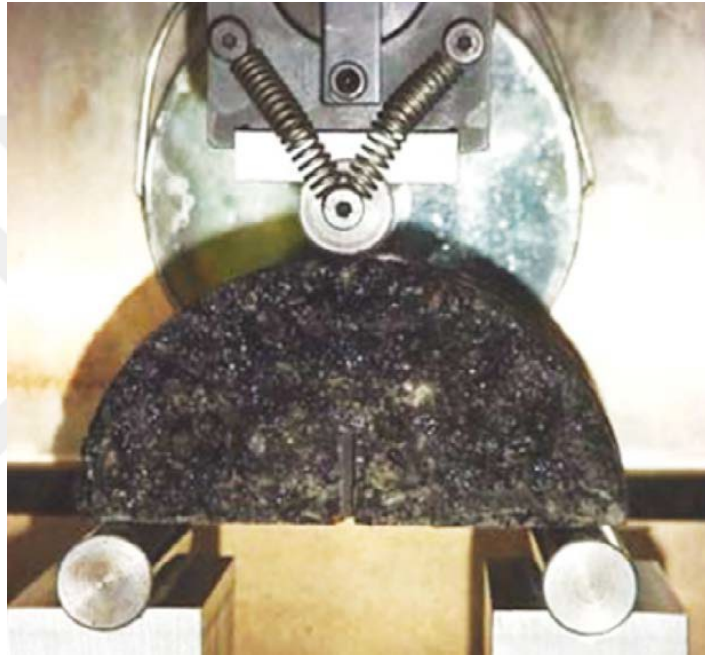
SCB testi ilk olarak LADOTD TR 330-14 standardı ile tanımlanmış, ardından ASTM D8044-16 standardı kapsamında asfalt karışımlarının kırılma enerjisinin belirlenmesine yönelik detaylar sunulmuştur. Ayrıca, AASHTO T 393-21 standardı da I-FIT yaklaşımı çerçevesinde SCB geometrisini kullanarak asfalt karışımlarının kırılma potansiyelini değerlendirmeye yönelik protokoller içermektedir.

SCB Testi kapsamında kullanılan yarı-silindirik numuneler, genellikle Superpave döner sıkıştırıcıyla 150 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde üretilir. Numuneler, yaklaşık $\pm 7,0 \pm 1,0$ hava boşluğu içerecek şekilde hazırlanır ve testten önce 25°C sıcaklıkta en az iki saat şartlandırılır. Daha sonra bu silindirik numunelerden 25 mm kalınlığında dilimler kesilir ve yarı dairesel forma getirilir. Çentik, simetri eksenı boyunca 15 mm derinlikte ve yaklaşık 1,5 mm genişliğinde oluşturulur. Her çentik derinliği için dört numune hazırlanması önerilirken, güvenilirlik açısından toplamda 12 numunenin test edilmesi tavsiye edilmektedir. Tek bir numunenin test süresi yaklaşık 1 saat olup, tüm test süreci 4 saatte tamamlanabilir.

Test için gerekli ekipmanlar arasında yük çerçevesi, çevre odası, hassas kesim için elmas uçlu

testere, yük hücresi ve deformasyon ölçüm cihazı yer alır. Testler genellikle 15°C ile 40°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmekte olup, özellikle sıcaklık değişimlerinin yoğun olduğu Louisiana gibi bölgelerde asfalt karışımlarının termal çatlamaya karşı dayanımını değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 4.9’da görülen SCB testi, özellikle düşük sıcaklık ve yansıma çatlaklarının analizinde güvenilir sonuçlar sağlaması nedeniyle asfalt karışımlarının mekanik performansının değerlendirilmesinde önemli bir araç olarak kabul edilmektedir.



Şekil 4.9: Yarı dairesel eğilme testi

SCB testi, asfalt karışım tasarımında kırılma dayanımı ve enerji salınım oranı gibi önemli parametrelerin belirlenmesine olanak tanıyan etkili bir laboratuvar testidir. Veri analizi görece basit olup, kırılma tokluğu ve enerji salınımı temelinde değerlendirme yapılır. Ancak, kalite güvencesi açısından sınırlılıkları bulunmaktadır; özellikle saha koşullarını doğrudan yansıtamaması ve sınırlı tekrarlanabilirlik potansiyeli dikkate alınmalıdır. Numune hazırlama süreci kısa ve test süresi nispeten ekonomik olsa da, gerekli ekipman maliyeti küçük ölçekli laboratuvarlar için kısıtlayıcı olabilir. Bu nedenle, SCB testinin saha performansı ile desteklenmesi ve diğer test yöntemleriyle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.l; Safazadeh vd., 2022).

Literatürde yapılan çeşitli çalışmalar, SCB testinin asfalt karışımlarının kırılma davranışını değerlendirmede etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Wang vd. (2021), SBS modifiye asfalt ile kauçuk-plastik modifiye asfalt içeren farklı bağlayıcı türlerine sahip karışımlar üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, SCB testinin farklı sıcaklık ve yükleme hızlarında kırılma parametrelerini (özellikle sertlik, gerilme mukavemeti, kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi) belirlemedeki işlevselliğini vurgulamışlardır. Mandal, Ling vd. (2019), orta sıcaklıklarda yürüttükleri deneylerle SCB testinin çatlama direncini değerlendirmede uygun bir yöntem olduğunu göstermiş; özellikle karışım tasarımına ilişkin parametrelere karşı duyarlılığına dikkat çekmişlerdir. Vackova ve Valentin (2022), SCB test prosedüründe gerçekleştirdikleri protokol değişiklikleriyle, asfalt karışımlarının gerilim altındaki davranışlarının daha kapsamlı analizine imkân tanıyan yeni değerlendirme parametreleri önermiş ve testin kırılma tokluğu ile kırılma enerjisi hesaplamalarındaki uygulanabilirliğini teyit etmişlerdir. Bu çalışmalar, SCB testinin hem standart hem de geliştirilen protokoller altında, asfalt karışımlarının çatlama potansiyelini değerlendirmede güçlü bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4.1.9 Dolaylı Çekme Asfalt Çatlama Testi (Indirect Tensile Asphalt Cracking Test-IDEAL-CT)

Dolaylı Çekme Asfalt Çatlama Testi (IDEAL-CT), Teksas A&M Ulaşım Enstitüsü tarafından geliştirilen ve geleneksel dolaylı çekme dayanımı testine benzer şekilde uygulanan bir performans testidir. Bu yöntem, özellikle asfalt karışımlarının çatlama direncini değerlendirmek amacıyla kullanılır ve ASTM D8225 standardı doğrultusunda gerçekleştirilir. Testte, genellikle 25°C'lik standart bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Ancak, karışım özelliklerine bağlı olarak farklı sıcaklıklarda da uygulanabilmektedir.

Yerel şartnamelere bağlı olarak boyutlar değişebilmekle birlikte, test genellikle 150 mm çapında ve 63 mm yüksekliğinde, 3 ila 5 adetsilindirik numune kullanılarak gerçekleştirilir. Bu numuneler, Superpave döner sıkıştırıcı ile hazırlanır ve düzgün, paralel yüzeyler elde edilecek şekilde kesilir., numuneler test öncesinde 25–40°C aralığında, genellikle 2–4 saat boyunca şartlandırılır. Bu sıcaklık aralığı, asfaltın viskoelastik davranışını temsil ederek, saha koşullarındaki performansını daha gerçekçi şekilde yansıtır. Silindirik test numunelerine 50 mm/dakika sabit hızla dikey yönde monotonik yük uygulanır. Yükleme işlemi, dayanım yükünün 0,1 kN seviyesine düşmesiyle sonlandırılır. Test üst kırma başlığına yerleştirilen

ölçüm ekipmanı ile deformasyon sürekli olarak izlenir ve kaydedilir. Elde edilen bu deformasyon verilerinden yük-yer değiştirme eğrisi oluşturularak çatlama davranışı analiz edilir (Zhou ve West, 2023). Şekil 4.10'da gösterilen testin görseli verilmiştir.

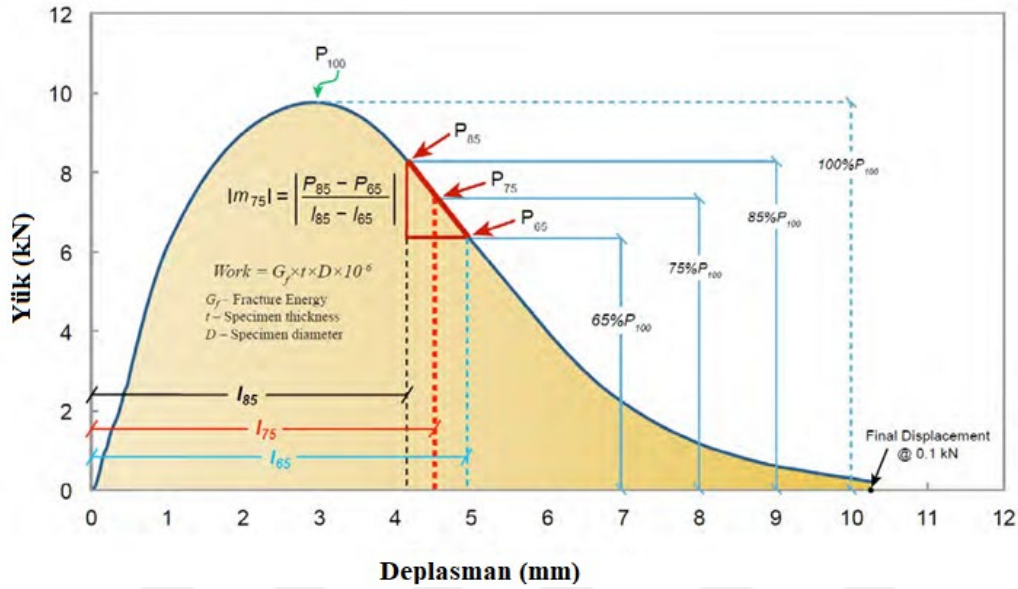


Şekil 4.10: Dolaylı çekme asfalt çatlama testi (IDEAL-CT)

Düşük maliyetli ve hızlı uygulanabilirliği sayesinde pratik laboratuvar uygulamaları açısından tercih edilen yöntemlerden biri olan IDEAL-CT, BMD süreçleri kapsamında Alabama, Missouri, Virginia ve Kentucky eyaletlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mevcut laboratuvar altyapısı, küçük ölçekli düzenlemelerle testin uygulanmasına uygun hale getirilebilmektedir.

IDEAL-CT asfalt karışımlarının çatlama direncini değerlendirmek amacıyla geliştirilen, hızlı, düşük maliyetli ve pratik bir performans testidir. IDEAL-CT testinin temel çıktısı olan $CT_{Endeksi}$, numunenin çatlama direncini nicel olarak ifade eder. Bu indeks, toplam kırılma enerjisi ile yük-deplasman eğrisinde zirve yükten sonra %25 yük kaybı noktasındaki eğimin fonksiyonuna dayanarak hesaplanır. Elde edilen $CT_{Endeksi}$, asfalt karışımının çatlama karşı dayanımını gösteren kritik bir parametre olup, karışım tasarımı, kalite kontrol ve kalite güvencesi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.1).

Şekil 4.11'deki IDEAL-CT testinin yük-deplasman eğrisinden elde edilen verilere dayanarak Çatlama Tolerans Endeksi (CT_{Endeksi}) adı verilen performans göstergesini hesaplanır. CT_{Endeksi}, asfalt karışımının çatlama karşı gösterdiği direnci nicel olarak ifade eder. Bu değer, hem karışım tasarım sürecinde hem de kalite kontrol uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabilir.



Şekil 4.11: IDEAL-CT yük-yer değiştirme eğrisi

Leavitt vd. (2024), IDEAL-CT'nin çatlama problemlerine karşı asfalt kaplamaların ara sıcaklık dayanımını değerlendirmede basit ve uygulanabilir bir prosedür sunduğunu belirtmiştir. Bu bulgu, testin saha performans tahminlerindeki geçerliliğini ortaya koymakta ve IDEAL-CT'nin asfalt teknolojisindeki önemini pekiştirmektedir.

Bununla birlikte, IDEAL-CT yalnızca ara sıcaklık çatlama dayanımını değerlendirdiğinden, düşük sıcaklık çatlama ya da yorulma davranışları gibi diğer performans kriterlerine doğrudan yanıt verememektedir. Ancak genel performansın öngörülmesinde etkin bir gösterge sunmaktadır.

4.2 Tekerlek İzi Direnci ile İlişkili Deneyler

4.2.1 Hamburg Tekerlek İzi Testi (Hamburg Wheel-Tracking Test – HWTT)

Hamburg Tekerlek İzi Testi (HWTT), asfalt karışımlarının hem kalıcı deformasyona (tekerlek

izi oluşumu) hem de nem etkisiyle oluşan soyulmaya karşı direncini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş önemli bir laboratuvar testidir. İlk olarak Almanya'da geliştirilen bu yöntem, AASHTO T 324 göre uygulanmaktadır. Bu test ülkemizde, TS EN 12697-22 standardı ile KTŞ'de bitümlü sıcak asfalt tasarım şartnamelerinde yer almaktadır. Şekil 4.12'deki HWTT cihazı, su haznesi, sıcaklık kontrol sistemi ve deformasyon ölçüm ekipmanlarından oluşmaktadır (National Asphalt Pavement Association(NAPA), t.y.f).

Test, genellikle 50 °C sıcaklıkta suyla dolu bir hazne içinde gerçekleştirilir. Hedef karışım tasarım yoğunluğunda kompaksiyon cihazlarıyla hazırlanan ve kesilerek elde edilen plaka (300 mm x 300 mm) ya da silindirik (100 mm çap, 150 mm yükseklik) formdaki numuneler, belirli sayıda tekrarlanan tekerlek yüklerine maruz bırakılır. Genellikle iki adet numune yeterli olmakla birlikte, testin güvenilirliğini artırmak amacıyla bazı durumlarda daha fazla numune de kullanılabilir. Test, 20.000 tekerlek geçişine kadar veya iz derinliği 12,5 mm'ye ulaştığında sonlandırılır. Şartlandırma süreci dâhil olmak üzere testin toplam süresi yaklaşık 6,5 saat olup, bu süre zarfında deformasyon verileri düzenli aralıklarla kaydedilerek deformasyon eğrisi elde edilir (Lu ve Harvey, 2006).

HWTT, yalnızca yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyon direncini değil, aynı zamanda numunenin nem hasarına karşı duyarlılığını da değerlendirerek çok yönlü bir analiz imkânı sunar. Veri analizi süreci, maksimum iz derinliği, deformasyon hızı ve soyulma başlangıcı gibi kritik parametreler üzerinden yapılır. Bu analizler, karışım tasarımında yapısal bütünlüğü sağlamaya yönelik kararların alınmasında kullanılır. HWTT'nin bu yönüyle kalite güvencesi açısından güçlü bir test olduğu kabul edilmektedir.

Çeşitli araştırmalar da testin uygulama başarısını ortaya koymaktadır. Kansas'ta yapılan bir çalışmada, geri kazanılmış asfalt içeriğinin HWTT sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Bu durum, testin karışım özelliklerine duyarlılığını ve karışımlar arası farklılıkları ayırt etme kapasitesini göstermektedir. Benzer şekilde, Yin vd. (2020) test verilerinden elde edilen deformasyonun tekerlek izi ve soyulma bileşenlerini ayrı ayrı analiz edebilen pratik bir yöntem geliştirmiştir. Bu analiz yaklaşımı, testin yorumlanabilirliğini artırarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, HWTT'nin BMD sürecindeki rolü de literatürde sıkça vurgulanmaktadır. Testin, karışım tasarımında performans odaklı dengeyi sağlamada etkin olduğu ve hem teknik hem de ekonomik açılardan

asfalt kaplama ömrünü optimize etmede katkı sunduğu belirtilmektedir. Sonuç olarak, HWTT; tekerlek izi direnci ve nem hasarına duyarlılığı değerlendirmede kapsamlı, güvenilir ve uygulanabilir bir performans testidir.

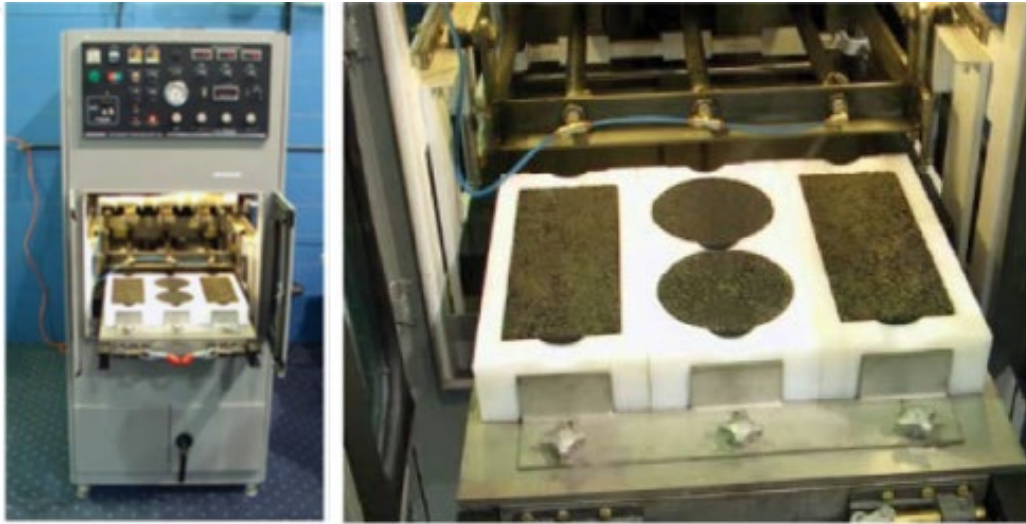


Şekil 4.12: Hamburg tekerlek izi testi

4.2.2 Asfalt Kaplama Analizörü (Asphalt Pavement Analyzer - APA)

Asfalt Kaplama Analizörü (APA), ilk olarak 1985 yılında Georgia Ulaştırma Bakanlığı (Georgia Department of Transportation-GDOT) ve Georgia Teknoloji Enstitüsü iş birliğiyle geliştirilmiştir. Başlangıçta, bulamaç kaplamaların performansını değerlendirmek amacıyla tasarlanan bu test, zamanla modifiye edilerek bitümlü sıcak karışımlarının tekerlek izi direncini ve üretim kalitesini ölçmek için kullanılmaya başlanmıştır. Geliştirilen bu versiyon, ‘‘Georgia Tekerlek İzi Test Cihazı’’ olarak adlandırılmıştır ve başta GDOT olmak üzere birçok eyalet ulaştırma birimi tarafından yaygın olarak benimsenmiştir. Test yöntemi, AASHTO T 340-10 (2019) standardı kapsamında yürütülmekte olup, özellikle Alaska, Alabama, Arkansas, Kuzey Carolina, New Jersey, Güney Carolina, Güney Dakota ve Virginia gibi eyaletlerde uygulanmaktadır (National Asphalt Pavement Association(NAPA), t.y.a).

Şekil 4.13'te görülen APA test cihazında, hem kiriş (125mm×300mm×75mm), hem de genellikle Superpave döner sıkıştırıcı kullanılarak hazırlanan silindirik numuneler (150 mm çap ve 75 mm kalınlık) test edilebilmektedir. Deneyde 4 ila 6 numune kullanılmakta ve test sıcaklığında 6–24 saat süreyle şartlandırılmaktadır. Test, 40–60°C sıcaklık aralığında ve 445 N (100 lb) kuvvet ve 690 kPa (100 psi) basınç seviyelerinde 8.000 döngüye kadar pnömatik tekrarlı tekerlek yükleri uygulanarak gerçekleştirilir. Deney, ortalama test süresi 2,25 saat olup ve deformasyon eğrileri üzerinden analiz yapılmaktadır. Veri analizi oldukça basit olmakla birlikte, karışım tasarımı ve kalite güvencesi açısından anlamlı sonuçlar üretmektedir. Deformasyon derinliği, tekerlek izi hızı gibi parametreler üzerinden değerlendirme yapılır (Global Gilson Company, t.y.).



Şekil 4.13: Asfalt kaplama analizörü

APA yalnızca tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirmekle kalmaz; aynı zamanda nem etkisi ve yorulma çatlağı gibi hizmet koşullarında karşılaşılabilecek performans kriterlerini de analiz edebilme kapasitesine sahiptir. Bu çok yönlülüğü sayesinde, asfalt karışımlarının mekanik ve çevresel koşullara karşı dayanıklılığı hakkında kapsamlı veriler sunar. Ağır trafik yükleri ve yüksek sıcaklık gibi zorlu koşullar altında karışım davranışını test edebilmesi, düşük performanslı karışımların önlenmesinde etkin bir kalite kontrol aracı olarak da öne çıkmaktadır.

APA'nın doğruluğu ve güvenilirliği üzerine yapılan birçok çalışma, bu yöntemin sahadaki performansı yansıtmadaki başarısını ortaya koymuştur. Örneğin, Rushing vd. (2012),

APA'nın çeşitli asfalt karışımlarının tekerlek izi dayanımını etkili şekilde ölçtüğünü göstermiştir. Coffey (2023) ortak yazarlardan biri olduğu “Simple and Practical Tests for Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures in the Balanced Mix Design Process” adlı teknik rapor, Ocak 2023'te yayınlanmış ve VDOT/BMD sürecinde rut riski değerlendirmesi için APA'nın yaygın şekilde kullanıldığını belirtmektedir. APA, VDOT'un BMD sistemindeki bir test aracı olarak açıkça tanımlanmıştır. Bu raporda, alternatif testler (monotonik yükleme testleri – IDT-HT, Rapid Rutting, Marshall vs.) APA'ya karşı değerlendirilmiş, bu testlerin daha hızlı, daha uygun maliyetli ve laboratuvar ortamında kullanılabilir olduğu ve APA ile istatistiksel olarak olumlu korelasyonlar gösterdiği vurgulanmıştır. APA testinin laboratuvar verileri ile saha performansı arasında bir ilişki kurulduğu ve APA'nın “field screening” amacıyla kullanılabilirliği konusunda teknik dokümanda olumlu bulgular yer almaktadır.

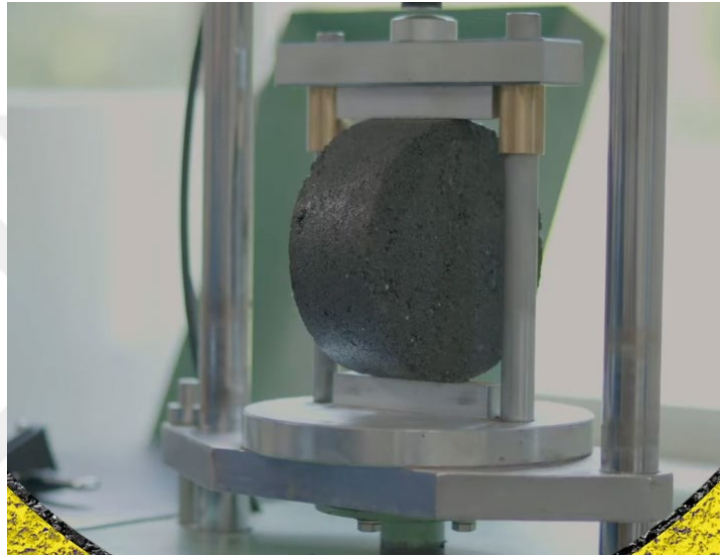
Skok vd. (2003) yapmış olduğu değerlendirmede APA'nın sıcak karışımlar için Minnesota koşullarında bir rutlaşma duyarlılığı aracı olarak güvenilir ve tekrar edilebilir olduğu, test protokollerine uygun şekilde uygulanırsa sahadaki tekerlek izi performansını laboratuvar ortamında yansıtabileceği belirtilmektedir. Raporda, uygun sıcaklık kontrolü, yükleme düzeni ve numune hazırlama (örneğin silindirik veya beam tip numuneler) gibi şartların sağlanması durumunda APA'nın saha performansını laboratuvar ortamında güvenilir biçimde temsil ettiğine dair güçlü destek sunulmuştur. Benzer şekilde, Suleiman (2011) tarafından yapılan araştırma, sıcak karışım asfaltların tekerlek izi dayanımının APA ile doğru ve maliyet etkin biçimde değerlendirilebildiğini göstermektedir.

4.2.3 Yüksek Sıcaklıkta Dolaylı Çekme Testi (High Temperature Indirect Tension-HT-IDT)

Yüksek Sıcaklıkta Dolaylı Çekme (HT-IDT) Testi, Christensen ve Bonaquist tarafından geliştirilmiş olup, asfalt karışımlarının yüksek sıcaklık koşullarında kalıcı deformasyona (tekerlek izi oluşumu) karşı direncini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Klasik IDT testinin uyarlanmış bir versiyonu olan bu yöntem, asfalt karışımlarının deformasyon davranışlarını yüksek sıcaklık ve yükleme hızlarında değerlendirmeye olanak tanır. Test, genellikle ASTM D6931-17 standardı kapsamında yürütülmekte olup, Alabama Eyaleti Ulaştırma Departmanı'nın ALDOT-458 prosedürü gibi yerel uygulamalarda da benimsenmiştir.

Test sonuçlarının tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini için karışım tasarım hedef yoğunluğunda en az üç adet hazırlanan silindirik numuneler, yaklaşık bir dakikalık test sürecinde 50 mm/s hızla dikey ekseninde yük uygulanır ve numunelerde meydana gelen deformasyon sürekli olarak kaydedilir.

Şekil 4.14'te görülen test düzeneği, başta ABD olmak üzere birçok ülkede yaygın biçimde kullanılmaktadır. HT-IDT sistemi, yükleme çerçevesi, iklimlendirme kabini, veri toplama sistemleri oluşmaktadır.



Şekil 4.14: Yüksek sıcaklıkta dolaylı çekme testi

Veri analizi, elde edilen gerilim-deformasyon eğrileri üzerinden gerçekleştirilir. Düşük deformasyon değerleri, karışımın yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı daha dayanıklı olduğunu gösterirken; yüksek deformasyon değerleri, kalıcı şekil değiştirme eğiliminin fazla olduğunu ortaya koyar. Ayrıca numuneler arasındaki varyasyon, karışımın iç tutarlılığı ve üretim kalitesi hakkında bilgi sunar. HT-IDT testi, deformasyon direncine dair önemli veriler sunmasına karşın, yorulma çatlama veya düşük sıcaklık performansı gibi diğer davranışları doğrudan değerlendirmemektedir. Bu nedenle, karışım tasarımı ve kalite güvencesi açısından tamamlayıcı testlerle birlikte kullanılması önerilmektedir. Bununla birlikte, düşük maliyeti, hızlı uygulanabilirliği ve sağladığı performans göstergeleri ile HT-IDT, karışım tasarımında yaygın olarak tercih edilmektedir (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.g).

HT-IDT testinin etkinliğini ve saha performansı ile uyumluluğunu değerlendiren çeşitli çalışmalar, bu testin asfalt karışımlarının yüksek sıcaklıktaki davranışlarını belirlemede güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Bennert vd. (2018) tarafından yürütülen araştırma, bu testin hem yüksek sıcaklıktaki deformasyon direncini hem de orta sıcaklıklardaki yorulma davranışını etkili bir şekilde değerlendirebildiğini göstermiştir. Çalışmada, HT-IDT ile elde edilen sonuçların, diğer standart tekerlek izi ve yorulma testleriyle yüksek korelasyon gösterdiği ve kalite kontrol programlarına entegre edilebileceği vurgulanmıştır. Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi(NCAT) (2023) yılında HT-IDT için ASTM'ye bir taslak test yöntemi sunarak standardizasyon sürecine katkı sağlamıştır. Bu girişim, testin ulusal düzeyde yaygınlaştırılması ve asfalt karışımlarının yüksek sıcaklıktaki dayanıklılığını değerlendirmede referans test haline gelmesini hedeflemektedir. NCAT ve diğer farklı çalışmalar, HT-IDT'nin HWTT gibi diğer deformasyon testleriyle güçlü korelasyon gösterdiğini ve sıcak iklimlerde yüksek trafik yükleri altındaki karışımların değerlendirilmesinde etkili olduğunu ortaya koymuştur (Beckemeyer, 2023).

4.2.4 Dolaylı Çekme Asfalt Tabakası Tekerlek İzi Test Cihazı- Hızlı Kayma Tekerlek İzi Testi (Indirect Tensile Asphalt Layer Rutting Tester -Rapid Shear Rutting - IDEAL-RT)

IDEAL-RT testi, Teksas A&M Ulaşım Enstitüsü tarafından geliştirilmiş olup, asfalt karışımlarının yüksek sıcaklık koşullarında tekerlek izi oluşumuna karşı direncini değerlendirmek amacıyla tasarlanmış pratik bir performans testidir (Cooper, 2020). Testin temel hedefi, karışımın yük altında kesme deformasyonuna karşı gösterdiği direnci nicel olarak belirlemek ve bu doğrultuda Tekerlek İzi Tolerans Endeksi ($RT_{Endeksi}$)'ni hesaplamaktır. Yöntem, farklı bağlayıcılar, katkı maddeleri, agrega kombinasyonları, lif takviyeleri ve geri dönüştürülmüş malzemeler içeren asfalt karışımlarının tasarımında ve kalite kontrol süreçlerinde deformasyon riskini belirlemek için kullanılmaktadır.

ASTM D8360 ve WK 71466 standartlarına dayanan bu test, yük çerçevesi, kesme aparatları, veri toplama sistemi ekipmanlarını gerektirir. Laboratuvar ortamında hazırlanmış veya saha karotlarından elde edilen 150 ± 2 mm çapındaki silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilir. Superpave döner sıkıştırıcı ile hazırlanan laboratuvar test numuneleri, ilave bir işlem gerektirmez. Test genellikle $50 \pm 15^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında yapılır ve her bir numune yaklaşık 1 dakika içinde test edilebilir, bu da yöntemi hem zamandan hem de maliyetten tasarruf

sağlayan bir çözüm haline getirir. Şekil 4.15'teki görülen test cihazı, ABD'nin birçok eyaletinde yaygınlaşmış ve dünya çapında da yeni kullanım alanları bulmuştur.



Şekil 4.15: IDEAL-RT deney cihazı

Veri analizi süreci oldukça basit olup, $RT_{Endeksi}$ en büyük yük verilerine dayalı olarak hesaplanır ve karışımın deformasyon potansiyelini açık biçimde yansıtır. Karmaşık modellemelere ihtiyaç duyulmaksızın elde edilen bu veri, hem laboratuvar hem de saha uygulamaları için kolay yorumlanabilir sonuçlar sunar. Özellikle üretim sırasında kalite kontrol ve güvence süreçlerinde, düşük tekerlek izi performansı gösteren karışımların erken tespitinde etkili bir araç olarak öne çıkar (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.k).

IDEAL-RT testinin etkinliği, çeşitli bilimsel çalışmalarla desteklenmiştir. Salari ve Rupnow (2024), Louisiana Ulaştırma Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirdikleri çalışmada testin, geleneksel yöntemlere kıyasla hem daha hızlı hem de saha performansını yüksek doğrulukla yansıttığını göstermiştir. Chen vd. (2023) farklı karışımlar üzerinde yürüttükleri karşılaştırmalı çalışmada, IDEAL-RT endeksi ile diğer tekerlek izi test parametreleri arasında güçlü korelasyonlar tespit etmiş ve testin deformasyon direncini güvenilir biçimde ölçtüğünü ortaya koymuştur.

IDEAL-RT testi; düşük maliyet, hızlı uygulanabilirlik ve güçlü saha uyumluluğu gibi avantajlarıyla asfalt karışımlarının yüksek sıcaklık altındaki davranışını değerlendirmede

etkili, teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir bir test yöntemidir. Hem karışım tasarımında hem de üretim aşamalarında kalite güvencesi için tercih edilen bu yöntem, modern asfalt performans testleri arasında önemli bir konumda yer almaktadır.

4.2.5 Akma Sayısı Testi (Flow Number - FN Test)

Akma Sayısı (FN) Testi, asfalt karışımlarının kalıcı deformasyona karşı direncini değerlendirmek amacıyla kullanılan önemli bir performans testidir. Maryland Üniversitesi'nde Witczak ve ekibi tarafından geliştirilen bu yöntem, Şekil 4.16'da görülen asfalt karışım performans test cihazı (Asphalt Mixture Performance Tester-AMPT) ile gerçekleştirilir.



Şekil 4.16: Asfalt karışım performans test cihazı

Test, silindirik numunelere belirli bir sıcaklıkta tekrarlı eksenel yükler uygulanarak yapılır. Her döngüde ölçülen kalıcı deformasyon miktarı kullanılarak, deformasyon hızının en düşük olduğu nokta "Akma Sayısı" olarak tanımlanır. Bu değer, karışımın viskoelastik davranışını yansıtarak, tekerlek izi oluşumuna karşı gösterdiği direnci belirler. FN testi, özellikle yüksek sıcaklık ve ağır trafik yükleri altındaki asfalt kaplamaların performansının değerlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılmakta olup AASHTO T378 standardına göre uygulanmaktadır.

Genellikle 30°C ile 60°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen test, sıcaklık seçimi ve test süresi gibi parametrelere göre uyarlanabilir. Numuneler, Superpave döner sıkıştırıcı ile

hazırlanmakta ve test öncesinde belirlenen sıcaklıkta şartlandırılmaktadır. Numune hazırlama süresi 5–15 dakika arasında değişirken, test süresi numune başına yaklaşık 30 dakika ile 4 saat arasında sürmektedir. Uygulamada en az üç numune kullanılarak istatistiksel güvenilirlik sağlanır. Test için karot matkabı, iklimlendirme kabini ve numune kesme testeresi gibi ilave ekipmana gereksinim duyulur.

Veri analizi, kalıcı deformasyonun yükleme döngüsüne göre değişim grafiği üzerinden gerçekleştirilir. Bu analizler, FN değerinin doğru şekilde belirlenmesini ve asfalt karışımının yüksek sıcaklıkta viskoelastik davranışı hakkında önemli bilgiler sağlar. Test orta düzeyde analiz karmaşıklığına sahip olup, ekipman kalitesi ve kullanıcı uzmanlığı sonuçların doğruluğunda belirleyici rol oynar (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.e).

FN testi, yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı dayanıklı karışımların belirlenmesinde etkili bir yöntemdir. Ancak yalnızca kalıcı deformasyonu değerlendirdiği için, yüzey çatlaması ya da düşük sıcaklık performansı gibi diğer parametreler için tamamlayıcı testlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle kalite güvencesinde sınırlı olmakla birlikte, karışım tasarımı sürecinde değerli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Ekipman maliyeti ve uzun test süresi nedeniyle bazı laboratuvarlar açısından ekonomik sınırlamalar oluşturabilir.

Literatürde FN testinin performans değerlendirmesi açısından etkinliği çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Roy vd. (2015), FN testinin kalıcı deformasyon karakteristiklerini nicelendirmede, dolayısıyla farklı deformasyon duyarlılığına sahip karışımları ayırt etmede etkili bir araç olduğu vurgulanmaktadır. Bonaquist (2013) raporunda, FN değerlerini karışım kabul ve tasarımı kullanan bir bakış açısı sunmakta, zira testin karışım özellikleri bakımından ayırt edici olduğunu ve özellikle trafik yorulması yönünden yüksek hacimli yollar için karışım seçiminin desteklenebileceğini belirtmektedir. Benzer şekilde, İslam vd. (2019), bağlayıcı içeriği ve hava boşlukları gibi faktörlere bağlı olarak değişen deformasyon davranışlarını FN testinin başarıyla tespit ettiğini göstermiştir. Rodezno vd. (2015), TP 79-13 kriterlerini HMA ve WMA karışımları üzerinde uygulayarak FN testinin bu malzemeleri trafik seviyelerine göre ayırt etmede güvenilir olduğunu göstermiştir. Tüm bu bulgular, FN testinin asfalt kaplamaların kalıcı deformasyon potansiyelini belirlemede güvenilir ve pratik bir yöntem olduğunu teyit etmektedir.

4.2.6 Gerilme Taramalı Tekerlek İzi Testi (Stress Sweep Rutting-SSR)

Gerilme Taramalı Tekerlek İzi (SSR) Testi, asfalt karışımlarının kalıcı deformasyona karşı direncini değerlendirmek amacıyla Kuzey Carolina Eyalet Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Şekil 4.17’de görülen test düzeneğine yerleştirilen numuneye, farklı gerilme seviyelerinde tekrarlı yükler uygulanarak asfalt karışımların deformasyon davranışını analiz etmeye olanak tanır.



Şekil 4.17: SSR test numunesinin AMTP sistemine yerleştirilmesi

SSR yöntemi, AASHTO TP 134-19 standardına dayanmakta olup, farklı çevresel koşullara uyarlanabilir yapısı sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Testin uygulanabilmesi için AMPT, karot matkabı, iklimlendirme kabini ve kesme cihazı gibi ekipmanlar gereklidir. Test, genellikle 10 psi (69 kPa) basınca kadar iki farklı gerilim düzeyinde (düşük ve yüksek) toplam 600 yük döngüsü uygulanarak gerçekleştirilir. Uygulama sıcaklığı ise gerçek saha koşullarını yansıtacak şekilde 40–60°C arasında değişmektedir. Her bir sıcaklık düzeyi için iki adet numune test edilir. Numuneler, sıkıştırılmış asfalt bloklarından alınan silindirik örneklerin hassas şekilde kesilmesiyle hazırlanır. Her numunenin testi, gerilme düzeyine bağlı olarak 20 ila 40 dakika arasında sürmektedir.

Test sürecinde elde edilen veriler, FlexPAVETM yazılımı aracılığıyla analiz edilir. Bu analiz kapsamında, Tekerlek İzi Deformasyon Endeksi (Rutting Strain Index-RSI) ve kalıcı

deformasyon kayması modeli gibi parametreler hesaplanarak karışımın deformasyon direnci değerlendirilir. Veri işleme süreci orta düzeyde teknik uzmanlık gerektirir ve analiz sonuçları karışım tasarımında yol gösterici rol oynar (National Asphalt Pavement Association (NAPA), t.y.m).

Literatürde SSR testinin etkinliği üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Tong vd. (2023), yüksek oranlı RAP içeren yüzey karışımlarında SSR ile laboratuvar ve hızlandırılmış saha test sonuçları arasında anlamlı korelasyonlar tespit etmiştir. Kim vd. (2021) tarafından hazırlanan teknik bültende, RSI parametresinin hesaplanmasına yönelik yöntemler açıklanmış ve SSR'nin tekerlek izi performansını değerlendirmede etkili bir araç olduğu vurgulanmıştır. SSR testi, asfalt karışımlarının deformasyon performansını değerlendirmede güvenilir, tekrarlanabilir ve uygulama alanı geniş bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Hem karışım tasarımı hem de katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilen bu yöntem, saha performansı ile yüksek uyum göstermesi sayesinde asfalt teknolojisinde önemli bir değerlendirme aracı olarak kabul edilmektedir. Teknik açıdan uygulanabilirliği yüksek olmakla birlikte, kalite güvencesi kapsamında bazı sınırlılıklar taşır. Kalıcı deformasyonla ilgili güvenilir veri sunmasına rağmen, uzun vadeli performans ve çevresel dayanım gibi diğer kriterlerin değerlendirilmesi için tamamlayıcı testlerle desteklenmesi önerilmektedir.

4.3 Nem Hasarı Direnci ile İlişkili Deneyler

4.3.1 Çekme Dayanım Oranı (Tensile Strength Ratio – TSR)

Çekme Dayanımı Oranı (TSR) testi, asfalt karışımlarının neme karşı dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş önemli bir performans testidir. İlk olarak Lottman tarafından önerilen bu yöntem, daha sonra Tunnicliff ve Root tarafından revize edilerek günümüzde kullanılan halini almıştır. Temel amacı, asfalt karışımlarında nem kaynaklı bozulmaları öngörmek ve bu doğrultuda karışım tasarımında iyileştirmeler yapılmasına imkân sağlamaktır.

Genellikle AASHTO T 283 veya ASTM D4867 standartlarına uygun olarak yürütülen testte, numuneler öncelikle kısmi vakum altında suyla doygun hale getirilir. Ardından bir -18°C ve 25°C'lerde donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılarak 60°C'de su banyosunda bekletilir. Bu şartlandırma süreci, saha koşullarını simüle ederek karışımın neme karşı direncini ölçmeyi

amaçlar. Şekil 4.18’de görülen IDT test sistemi ile gerçekleştirilir ve numunelerin kuru ve nem hasarı için koşullandırılmış dayanımlarının karşılaştırılma esasına dayanmaktadır.



Şekil 4.18: Dolaylı çekme dayanımı test cihazı

TSR testi, başta ABD olmak üzere dünya genelinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle Alabama, California, Florida ve Illinois gibi eyaletlerde kalite güvencesi ve karışım tasarımı süreçlerinde önemli bir yer tutar. Avrupa ülkelerinde ve Türkiye’de de nem etkisine açık bölgelerde kullanılan bu test, otoyollar, şehir içi yollar ve havaalanı pistleri gibi yüksek trafik yüküne maruz kalan yüzeylerdeki asfalt kaplamaların değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, nem hassasiyetini azaltmak amacıyla kullanılan katkı maddelerinin etkinliğini değerlendirmek için de tercih edilmektedir. Veri analizi oldukça basittir. Nemli numunelerin çekme dayanımı, kuru numunelere oranlanarak TSR değeri hesaplanır. Bu oran, karışımın nem hasarına karşı dayanımını yansıtır. Genellikle %80’in altında kalan değerler, karışımın neme karşı yetersiz performans sergilediğini gösterir (National Asphalt Pavement Alliance(NAPA), t.y.n).

Literatürde, TSR testinin esas olarak nem hasarına karşı direnci değerlendirmeye yönelik olduğu ve yüksek sıcaklık performansının analizi için yetersiz kaldığı vurgulanmaktadır. Örneğin, Pavement Interactive (t.y.b) kaynaklarında da testin yalnızca nem duyarlılığı bağlamında ele alındığı ifade edilmektedir. Yüksek sıcaklık etkilerinin değerlendirilmesi için farklı testlerin tercih edilmesi gereklidir. TSR testi, nemin asfalt karışımları üzerindeki

olumsuz etkilerini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan, standartlaştırılmış ve teknik açıdan değerli bir yöntemdir. Ancak sınırlı kapsama sahip olması nedeniyle, özellikle yüksek sıcaklık ve çatlama performansı gibi parametrelerin değerlendirilmesinde tamamlayıcı testlerle birlikte kullanılması önerilmektedir.

4.4 Aşınma Kaybı ile İlişkili Deneyler

4.4.1 Cantabro Testi

Cantabro Testi, İspanya'da geliştirilmiş olup, asfalt karışımlarının aşınma ve mekanik zorlanmalara karşı genel dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla kullanılan laboratuvar temelli bir yöntemdir. Dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir araç olan bu test, özellikle yüksek trafik hacmi ve ağır yük taşıyan yollar gibi zorlu koşullar altında hizmet verecek asfalt karışımlarının performansını değerlendirmek için tercih edilmektedir. Test, AASHTO TP 108-14 standardına uygun şekilde yürütölmektedir. Bu test, Şekil 4.19'daki Los Angeles Aşınma test cihazı ile gerçekleştirilir.



Şekil 4.19: Los Angeles aşınma test cihazı

SGC ile hazırlanan numuneler, tek tek test cihazına yerleştirilerek 300 devir döndürölür ve test sonunda numunede oluşın malzeme kaybı ölçölerek aşınma kaybı yüzdesi hesaplanır. Bu oran, karışımın aşınma direnci ve dayanıklılığı hakkında doğrudan bilgi sunar. Test genellikle $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Her bir numune için yaklaşık 10 dakikalık test süresi, yöntemi hem ekonomik hem de verimli kılmaktadır. Analiz açısından yöntem oldukça

basittir; yalnızca aşınma yüzdesi üzerinden değerlendirme yapılır. Ancak testin %10–25 arasında olan varyasyon katsayısı, sonuçların yorumlanmasında dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir. Buna rağmen test, özellikle aşınmaya karşı performansın karşılaştırmalı değerlendirilmesinde güvenilir bir araçtır (National Asphalt Pavement Association(NAPA), t.y.b).

Cow vd. (2017) tarafından yapılan araştırmada, testin yoğun gradasyonlu asfalt karışımlarının dayanıklılığını değerlendirmede başarılı olduğu ortaya konmuştur. Diefenderfer vd. (2023) ise, testin BMD tasarım yöntemi kapsamında yüzey karışımlarının çatlama ve aşınma direncini değerlendirmede etkili bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışma aynı zamanda, farklı RAP içeriklerinin karışım performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmede testin duyarlılığını ortaya koymuştur.

5. TÜRKİYE'DE UYGULANAN BSK TASARIM YAKLAŞIMLARI

Türkiye'de asfalt uygulamaları, Fransızların desteğiyle “penetrasyon makadam kaplama” adıyla Osmanlı döneminde başlamıştır. 1929 yılında Şose ve Köprüler Kanunu ile asfalt yol yapımı için ilk girişim başlatılmıştır. Böylelikle, Ankara civarında 200 km uzunluğunda asfalt yol yapımı ve ana arterlerin asfaltlanması programlanmıştır. 1942 yılında Devlet Yolları, 1. Sınıf Yollar, 2. Sınıf Yollar ve Köy Yolları olarak sınıflandırılmış ve bu alandaki asfalt ve beton kaplama çalışmaları hız kazanmıştır.

1945 yılında, Türkiye'de karayolu ağının planlı ve programlı olarak tanıtılması amacıyla ABD'den Marshall Planı kapsamında destek alınmıştır. Bu plan, II. Dünya Savaşı sonrasında Avrupa'nın siyasi ve ekonomik açıdan yeniden yapılandırılmasını kapsayan bir ekonomik yardım programıdır. Plan kapsamında, Avrupa ülkelerinin kendi aralarında ekonomik işbirliği yaparak eksiklerini tamamlamaları ve bu işbirliğinin yetersiz kalması durumunda ABD'nin ekonomik desteğinin alınması öngörülmektedir.

Türkiye’de, bu yardım kapsamında 1948’de makineli yol yapımına başlanmış ve 23.000 km uzunluğundaki Devlet Yolu Programı'nın 9 yıl süreyle desteklenmesi hedeflenmiştir. 1950’de KGM kurulduğunda 47.000 km uzunluğundaki yol ağının sadece %3’ü asfalt kaplama olup; geri kalan yollar stabil veya toprak niteliğindeydi. 1956 yılında özel sektör tarafından ilk asfalt plantinin kurulumuyla BSK asfalt üretimine başlanmıştır. 1960 yılında ise KGM, asfalt plantlerini artırarak asfalt çalışmalarına ağırlık vermiştir.

1960-1970 yılları arasında asfalt kaplamalı yol uzunluğunun artırılması için yürütülen çalışmaların sonucunda, 1970 yılında asfalt kaplamalı Devlet Yolu uzunluğu 17.124 kilometreye ulaşmıştır. 1970'ler, ülkemizin karayolu politikalarında yeni boyutlar kazandığı bir dönem olmuştur. Bu yıllarda çok şeritli ekspres yolların yapımına başlanmış ve asfalt endüstrisi büyük atılımlar gerçekleştirmiştir. Yoğun trafiğe sahip yollar için yüksek standartlı ve çok şeritli ekspres yollar inşa edilmeye başlanmış; mevcut yollarda karşılaşılan sorunlara yönelik çözüm arayışları hız kazanmıştır. Ayrıca, kısa ömürlü ve sürekli bakım gerektiren sathi kaplamalı asfalt yolların yerine, ağır taşıt trafiğine dayanıklı, uzun ömürlü, güvenli ve konforlu bir sürüş sağlayan BSK asfalt yapımına geçilmiştir.

1980'li yıllara gelindiğinde asfalt kaplamalı karayolu uzunluğu 34.205 kilometreye ulaştı. Bu dönemde yüksek standartlı yolların yapımına ağırlık verilmiş ve çalışmalar yürütülmüştür. Devlet ve il yollarında da geometrik ve fiziksel standartlar yükseltilerek, asfalt kaplamalı yol ağı oranı %80 seviyesine çıkarılmıştır. Ancak mevcut yolun %10'undan azında BSK uygulaması gerçekleştirilmiş; genellikle sathi kaplama yapılmıştır.

1990'lı yıllarda otoyol projeleri ve yeni teknolojilerin aktarımıyla asfalt endüstrisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Artan ağır taşıt trafiğine karşı kaplama dayanımı artırmak için BSK üretiminde PMB kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca ağır trafiğe maruz kalan yollar için sert taş ve yüksek koruyucu içeriği ile yüksek dayanıma sahip Taş Mastik Asfalt (TMA) uygulamalarına geçilmiştir.

2000'li yıllarda artan trafik yoğunluğu nedeniyle karayolu ulaşımında kapasite yetersizliği ve trafik güvenliği esas alınarak hazırlanan 2003 yılı “Acil Eylem Planı” çerçevesinde, 6.101 km’lik bölünmüş yol ağının hızla geliştirilmesine karar verilmiştir. Bu dönemde yaklaşık 2.000 kilometre uzunlukta, çoğunlukla sathi kaplamalı yeni yol yapılmıştır.

2010'lu yıllarda, mevcut sathi kaplamalı yolların BSK'ya dönüştürülmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda BSK üretim ve uygulamalarında önemli artışlar yaşanmıştır. Bu strateji, daha uzun ömürlü, dayanıklı ve konforlu yolların oluşturulmasını amaçlamıştır. 31 Aralık 2024 itibarıyla, Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğundaki 68.550 kilometrelik karayolu ağının 31.727 kilometresi BSK kaplamalı, 34.301 kilometresi ise sathi kaplamalı yollar olarak hizmet vermektedir. Karayolu ağı içerisinde yer alan 3.796 kilometrelik otoyol dâhil olmak üzere, toplam bölünmüş yol uzunluğu 29.730 kilometreye ulaşmıştır. Bu veriler, Türkiye'nin karayolu altyapısında BSK kaplama uygulamalarının yaygınlaştığını ve daha yüksek standartlara sahip bölünmüş yolların ağ içindeki oranının her geçen yıl arttığını ortaya koymaktadır (URL-6, 20..).

1950'lerden bu yana artan trafik hacmi ve ağırlığına paralel olarak BSK asfalt kaplamalı yol ağı hızla artmış, günümüzde yıllık BSK kullanımı 25 milyon ton seviyelerine çıkmıştır. İdeal bitümlü karışım tasarımı için iyi planlanmış bir laboratuvar prosedürü ve doğru belirlenmiş tasarım kriterleri gerekliliği her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir. Türkiye’de, BSK üretiminde gelişmiş teknoloji kullanılmasına rağmen, istenilen düzeyde kaliteli karayolu

esnek üstyapısı sağlanamamaktadır. Bu durumun başlıca nedenleri arasında, tasarım ve uygulamayla ilişkili mevcut teknik şartnamelerin ve yolun inşası esnasındaki kontrol süreçlerinin yetersizliği ve yüklenicilerin sorumluluk sürelerinin kısa tutulması yer almaktadır. Bu nedenle, teknik şartnamelerin güncellenmesinin yanı sıra, yüklenicileri daha yüksek kaliteli uygulamalara yönlendirecek teşvik mekanizmalarının araştırılması gerekmektedir (Orhan, 2014).

Bu çalışmanın konusu çerçevesinde, Türkiye’de asfalt karışım tasarımlarının güncel durumu ve dünyadaki gelişmelere adaptasyon çalışmaları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu noktada Avrupa uyumlaştırılmış standart çalışmaları ile yürürlüğe giren BSK tasarımı ilişkili standartlar ve Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı’nın 2012 yılındaki Superpave bitüm sınıflama sistemi ile ilgili çalışmalar öne çıkmaktadır. Ayrıca, asfalt sektörünün otoritesi konumunda olan KGM’nin hazırladığı 2006, 2013 ve 2023 yıllarında hazırlanan Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ)’lerinde BSK üretiminde kullanılan malzemeler (bitüm ve agrega) ve bitümlü sıcak karışımlarla ilgili bölümler incelenmiştir. Özellikle, BSK karışım tasarımı konusunda dünyadaki gelişmeler çerçevesinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Böylelikle, Türkiye’de uygulanan BSK tasarım şartnamelerinin güncel durumu belirlenmiş ve dünyadaki gelişmeler ışığında görüş ve öneriler sunulmuştur.

5.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarla İlgili Avrupa Standartları Uyum Çalışmaları

Yapı malzemelerinin Avrupa Ekonomik Topluluğu içerisinde ticaretine dair teknik engellerin kaldırılması amacıyla 1989 yılında yürürlüğe giren Yapı Malzemeleri Yönetmeliği 2002 yılında ülkemizde yayınlanmış ve 2007 yılından itibaren yapı malzemelerinin "CE işareti" taşımasının ve "Uygunluk beyanı" ile pazara arz edilmesi zorunlu kılınmıştır. Asfalt ve bileşenlerini de kapsayan bu düzenleme 2011 yılında yürürlüğe giren yeni Yapı Malzemeleri Regülasyonu ülkemizde de eş zamanlı olarak yayınlanmış ve 2013 yılında uygulanmaya başlanmıştır. Söz konusu yönetmelikle Avrupa uyumlaştırılmış standartları ve Avrupa Teknik Değerlendirmesi kapsamında piyasaya arz edilecek yapı malzemeleri için Uygunluk Beyanı yerine "Performans Beyanı" düzenlenmesi ve CE işareti zorunlu hale gelmiştir. Uyumlaştırılmış standartlar Türk Standartları Enstitüsü tarafından TS EN olarak ülkemizde yayınlanmış ve piyasaya arz edilen yapı malzemeleri için zorunlu kılınmıştır. Söz konusu uyumlaştırılmış standartlarda yapı malzemelerinin bu temel gereklerle ilişkilendirilmiş tüm performans karakteristiklerinin beyan edilmesi ve değerlendirilmesi ilgili

yöntemlerle belirtilmiştir (URL-6, t.y.).

Türkiye, Avrupa Birliği ile olan Gümrük Birliği kapsamında Avrupa teknik mevzuatına uyum sağlama yükümlülüğünü üstlenmiştir. Bu süreç doğrultusunda, bitümlü kaplamalar ve bitümlü karışımlar ile ilgili olarak EN standartları Türkiye'de uygulamaya alınmış, CE işareti taşıma zorunluluğu getirilmiştir. Avrupa Birliği'nin yapı malzemeleri direktifine (89/106/EEC) uygun olarak Türkiye'de de EN 13043 ve EN 13108 serisi standartlar kabul edilmiştir. Bu standartlar; agrega, bitüm ve bitümlü karışımların tasarımı, üretimi ve performansına yönelik deney ve kontrol esaslarını belirlemektedir. Bu kapsamda, Avrupa normlarına göre BSK tasarımı ile Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) arasındaki kapsam, yaklaşım ve uygulama yönünden farklılık ve uyumluluk noktaları aşağıda detaylı şekilde incelenmiştir:

5.1.1. Agrega ve Bitüm Gerekliklikleri

Avrupa standardı EN 13043, BSK'da kullanılacak agregaların fiziksel, geometrik ve kimyasal özelliklerini belirler. Bu standarda göre:

- Agrega gradasyonu EN 933-1 ile belirlenirken,
- Fiziksel özellikler (Los Angeles, Cilalı Taş Değeri (Polished Stone Value – PSV), su emme oranı, donma-çözülme direnci gibi) EN 1097 serisi ile test edilir.

KTŞ'de de benzer deney metotları uygulanmakta olup çoğu test yöntemi EN standardına paraleldir. Ancak EN 13043 kapsamında, CE işareti için zorunlu olan "başlangıç tip deneyleri" ve "Fabrika Üretim Kontrolü (Factory Production Control-FPC)" sistemi KTŞ'de birebir uygulanmamaktadır. Bunun yerine KTŞ, deney sıklığı ve sınır değerler açısından daha sabit ve deneyime dayalı koşullar öngörmektedir.

Bitüm bağlayıcılarda ise EN 12591 (saf bitüm) ve EN 14023 (Polimer Modifiye Bitüm-PMB) standartları geçerlidir. KTŞ de bu standarda referans verir, ancak bağlayıcı gereksinimlerinde performansa dayalı tanımlar EN kadar detaylı değildir.

5.1.2. Karışım Tipleri ve Tasarım Yöntemleri

EN 13108 serisi, BSK'yı oluşturan farklı karışım tiplerini kapsar:

- TS EN 13108-1: Asfalt Betonu

- TS EN 13108-5: Taş Mastik Asfalt
- TS EN 13108-20: Tip Deneyler
- TS EN 13108-21: Fabrika Üretim Kontrolü

EN 13108-1 standardında, asfalt betonu tasarımı hem ampirik hem de performans temelli yaklaşımlarla yapılabilmektedir. Ampirik yaklaşımda bileşen oranları ve gradasyon esas alınırken; temel (performans) yaklaşımda rijitlik, yorulma dayanımı, kalıcı deformasyon direnci gibi özellikler ön plandadır. Bu çerçevede kullanılan deneyler:

- Rijitlik (EN 12697-26)
- Kalıcı deformasyon (EN 12697-22)
- Suyu hassasiyet (ITSR, EN 12697-12)
- Yorulma dayanımı (EN 12697-24) gibi parametrelerle belirlenmektedir.

KTŞ ise hâlen ağırlıklı olarak ampirik tasarım yöntemine dayanmakta, Marshall tasarım yöntemini temel almaktadır. Performansa dayalı testler (örneğin TSR, Hamburg Tekerlek İzi, Dinamik Modül vb.) bazı pilot projelerde veya özel teknik şartnamelerde kullanılsa da KTŞ içerisinde zorunlu değildir.

5.1.3. Üretim ve Kalite Kontrol Sistematiği

EN 13108-21 standardı uyarınca, karışımların uygunluğu yalnızca başlangıç tip deneyleri ile değil, aynı zamanda sürekli yürütülen FPC ile sağlanır. Bu sistem, üretimin her aşamasında kalite kontrolünü, dokümantasyonunu ve üçüncü taraf belgelendirmesini içerir. Sistem 2+ kapsamında CE işareti için üreticinin ve onaylanmış kuruluşların görev dağılımı tanımlanmıştır.

KTŞ'de ise kalite kontrol, laboratuvar deneyleriyle ve saha denetimi ile sınırlı kalmaktadır. Sürekli üretim kontrolü veya üçüncü taraf belgelendirme uygulamaları yalnızca özel durumlarda, ihale şartnamesi ile belirlenmişse uygulanmaktadır.

5.1.4. Uygulamada Karşılaşılan Uyumlaştırma Gereklilikleri

EN gradasyon sisteminde temel elek boyutları, sınırlayıcı geçiş yüzdeleri ve kategori sistemi KTŞ'ye kıyasla daha esnektir. Ancak bu esneklik, Türkiye'deki üreticilerin EN sistemine

geçişinde problem yaratmamıştır çünkü KTŞ'deki gradasyon aralıkları EN limitleriyle örtüşebilmektedir.

Diğer yandan, deney frekansları ve sınır değerleri konusunda EN sisteminde daha sistematik ve belgelenmiş bir yapı varken; KTŞ'de uygulamalar, saha deneyimine ve tecrübeye daha fazla dayanmaktadır.

5.1.5. Genel Değerlendirme ve Uyum Durumu

- KTŞ ile EN standartları arasında yüksek oranda uyum bulunmaktadır. EN sisteminde yer alan deneylerin büyük bir kısmı Türkiye'deki merkez laboratuvarlarda uygulanabilmektedir.
- EN standartları performansa dayalı bir yaklaşıma yönelirken, KTŞ geleneksel ampirik yöntemlerle tasarımı sürdürmektedir. Ancak son yıllarda KTŞ'nin de performans testlerini içerecek şekilde güncellenmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.
- CE işaretleme, FPC ve üçüncü taraf onay sistemleri, KTŞ'de henüz yaygınlaşmamıştır (Orhan ve Güngör, 2009).

Avrupa Normlarına göre BSK tasarımı, daha geniş kapsamlı, performans odaklı ve sistematik bir kalite güvence yapısı sunmaktadır. KTŞ bu sistemlerle büyük ölçüde uyumlu olmakla birlikte, performans kriterlerinin zorunlu hale getirilmesi, FPC'nin yaygınlaştırılması ve CE işareti temelli kalite sistemlerinin benimsenmesi yönünde geliştirme potansiyeline sahiptir. Türkiye'nin AB ile teknik mevzuat uyumu süreci doğrultusunda, KTŞ'nin EN sistemine tam entegrasyonu hem kalite hem de uluslararası ticaret açısından önemli bir adım olacaktır.

5.2 BMD Yönteminde Kullanılan Basit Performans Testleri ile EN Standard Test Yöntemlerinin Karşılaştırılması

BMD, asfalt karışımlarının hem dayanım hem de dayanıklılık yönünden performans gerekliliklerini karşılamasını hedefleyen, dengeli ve performansa dayalı bir karışım tasarım yöntemidir. Özellikle Marshall ve Superpave gibi hacimsel tasarım yöntemlerinin sınırlılıklarını aşmak için geliştirilmiş olan BMD yaklaşımı, özellikle Amerika'da yaygınlaşmakta, ancak Avrupa normlarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi güncelliğini korumaktadır.

Bu çalışmada, BMD kapsamında yaygın olarak kullanılan basit performans testleri ile Avrupa Standardı olan EN 12697 serisindeki test yöntemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Amaç, her iki sistemin hangi yönlerden örtüştüğünü, hangi testlerin benzer işlevlere sahip olduğunu, hangilerinin ayrıştığını ortaya koymaktır.

Tablo 3.18’de kategorize edilen BMD performans testleri 4. Bölüm’de kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır. Bu testler genellikle karmaşık cihazlara gerek duymadan, saha veya bölgesel laboratuvarlarda uygulanabilir olmaları açısından “basit performans testleri” olarak kabul edilmektedir. EN 13108 (Bitümlü Karışımlar) ve ona bağlı olarak uygulanan EN 12697 (Sıcak Asfalt Karışımlar için Deney Yöntemleri), asfalt karışımların performans özelliklerini değerlendiren deney yöntemlerini detaylı olarak içerir. Bu bağlamda Tablo 5.1’de iki yöntem için yapılan karşılaştırma özetlenmiştir.

Tablo 5.1: BMD ve EN Standartlarının Karşılaştırması

BMD Testi	EN Standardında Karşılığı	Yorum
Hamburg Tekerlek İzi Testi (AASHTO T324)	EN 12697-22: Wheel Tracking Test (Large Device/Small Device)	Temel prensip aynıdır. EN'deki test cihazı boyutlandırması farklılık gösterebilir.
Akma Sayısı Testi (AASHTO T378)	EN 12697-25: Triaxial Cyclic Compression Test	Her iki test de kalıcı deformasyon eğilimini değerlendirir; FN testi zamana bağlı viskoelastik davranışı da ölçer.
IDEAL-CT (ASTM D8225)	EN 12697-24: Fatigue Resistance; EN 12697-46: Crack Propagation	Tam karşılığı yoktur. EN’de çatlama direncini doğrudan ölçen testler sınırlıdır.
SCB-IFIT (ASTM D8044 / AASHTO TP105)	EN 12697-44: Fracture Energy (SCB)	SCB benzeri test EN serisinde de vardır; ancak Amerika’daki gibi yaygın kullanımı yoktur.
DCT (Disc-Shaped Compact Tension, ASTM D7313)	EN 12697-46 (alternatif): Crack propagation (Limited use)	EN standardında DCT için doğrudan bir karşılık yoktur; EN 12697-46 kısmen karşılayabilir.
TSR (AASHTO T283)	EN 12697-12: Moisture Sensitivity (ITSR)	İki test benzer mantıkla çalışır. ITSR, Avrupa’da standartlaştırılmış formudur.

- EN 12697 serisindeki testler çoğunlukla araştırma merkezleri ve ileri düzey laboratuvarlar için önerilmekteyken, BMD yönteminde kullanılan testlerin büyük kısmı yerel seviyede uygulanabilirlik esasına göre seçilmiştir.
- Avrupa normlarında, test cihazlarının kalibrasyonu, örnekleme şekli ve test prosedürleri çok daha detaylı bir şekilde verilmiş, harmonizasyon amaçlanmıştır.

- BMD'deki test süresi ve sadelik önceliklendirilmiştir. Bu nedenle bazı testler, EN sistemine kıyasla daha pratik fakat daha az kapsamlıdır.

BMD ve EN sistemleri farklı altyapılara dayanmakla birlikte, performans temelli yaklaşımları giderek yakınlaşmaktadır. EN 12697 serisindeki testler, BMD yaklaşımında kullanılan bazı testlerle doğrudan veya dolaylı olarak örtüşmektedir. Ancak şu noktalar dikkat çekmektedir:

- HWTT ve ITSr testleri her iki sistemde de karşılık bulmakta ve yaygın kullanılmaktadır.
- BMD yöntemindeki çatlama direnci testlerinin (IDEAL-CT, SCB, DCT), EN sisteminde testlerle uygunluğu sınırlıdır.
- Avrupa'da performans testlerinin tasarım kıstası olarak değil, çoğunlukla tip onay veya özel projelerde kullanıldığı görülmektedir.

Türkiye'de BMD yaklaşımı yaygınlaşırsa, EN sisteminde yer alan testlerin bu amaçla kullanılabilirliği yeniden değerlendirilmelidir. Özellikle TS EN 13108'in temel gereklerinde yer alan kalıcı deformasyon ve su duyarlılığı deneyleri ile BMD'nin tekerlek izi ve TSR testlerinin entegre edilmesi mümkündür.

BMD ile EN test yöntemleri arasında önemli yapısal benzerlikler bulunmakta, ancak uygulama sıklığı ve pratiklik düzeyinde farklılıklar mevcuttur. Ayrıca, EN 12697-44 ve 46 gibi yeni gelişen çatlama testlerinin Türkiye'de de pilot uygulamalarla desteklenmesi, BMD'nin Avrupa normlarına entegrasyonu açısından faydalı olacaktır.

5.3 Superpave Bitüm Sınıflandırma Sistemi ile İlgili Çalışmalar

Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılmasında uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan sistemlerden biri, 25°C'de yapılan penetrasyona dayalı sınıflamadır. Ancak bu sınıflama sistemi, bitümün performansı hakkında sınırlı bilgi sunmakta ve yük altında sıcaklıkla ilgili herhangi bir veri sağlamamaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklık değişimi veya düşük sıcaklık termal çatlama gibi bozulmaların tahmini açısından yetersiz bir yaklaşımdır. Penetrasyon temelli bu geleneksel sistem, bitümün 25°C dışındaki kullanımlarını sınırlayacak şekilde ortaya koyarken, yük akışına ilişkin bilgi sunmaktadır. Bitüm endüstrisi, son yıllarda bitümün yüksek, orta ve düşük sıcaklık koşullarındaki performansları için fiziksel özelliklerden çok mekanik ve reolojik çalışmaya odaklanan sınıflama sistemlerine yönelmiştir.

Geleneksel sınıflama yöntemlerindeki bu eksiklikleri giderme amaçlı Superpave yöntemi, bitümleri maruz kalacakları sıcaklık koşullarında gösterdikleri performansa göre açıklamaktadır. Bu yöntem, PG olarak adlandırılmakta ve bitümlerin sıcaklık şartlarına uygun performans özelliklerine göre değerlendirilmesini sağlamaktadır. Superpave sistemi, kaplamanın uygulanacağı yerde iklime bağlı olarak bitümden beklenen temel özelliklerin karşılanacağı sıcaklıklara göre belirlenmesini öngörmektedir.

Performans sınıfı bitümlerde fiziksel özellikler benzerlik gösterebilir; ancak bitümün kaynağına ve reolojik yapısına bağlı olarak önemli performans farklılıkları görülebilmektedir. Ayrıca, sıcak karışımın üretimi sırasında ortaya çıkan hızlı yaşlanma ve servis koşullarında gerçekleşen yavaş yaşlanma, bitümlü bağlayıcıların performanslarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Bu durum, yaşlanmanın bitüm üzerinde etkisini incelemeyi ve yaşlanmadan sonraki reolojik özelliklerin belirlenmesini gerekli kılmaktadır.

Superpave yöntemi, kaplama performansını artırmak amacıyla, BSK bileşenlerinin özellikleri ve bu malzemelerin bir karışım olarak nasıl davrandığını anlamaya odaklanmaktadır. Sistem, kaplamaların maruz kaldığı trafik yükleri ile iklim koşullarını daha gerçekçi şekilde temsil edebilmek için, bağlayıcıların farklı sıcaklıklar, yaşlanma seviyeleri ve çevresel etkiler altında nasıl davrandığını inceleyen testler içermektedir. Bu özellik, Superpave PG bağlayıcı standardını üstyapı kaplamalarında ön plana çıkarmaktadır. Projeye özgü iklim ve bozulma sınırlamaları dikkate alan bu standart, beklenen kaplama eklerinin azaltılmasında etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Superpave bitümlü bağlayıcı performans sınıflamasında, sınıfları 6°C'lik aralıklarla artmakta veya azalmaktadır. Türkiye'de 2012 yılından bu yana kullanılan bu sınıflama sistemi, bitümlü bağlayıcıların performans odaklı değerlendirilmesinde önemli bir aşama olmuştur. Superpave performans sınıflama sistemi AASHTO M320 standardına göre Tablo 5.2'deki gibi verilmektedir.

Türkiye'de hâlihazırda penetrasyon testine dayalı sınıflama sistemi kullanılmaktadır. Superpave yönteminin bitüm sınıflandırmasına geçilmesinde çaba göstermektedir. Türkiye'de Superpave bağlayıcı sistemi konusunda ilk somut adımlar, 2012 yılında KGM Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı tarafından atılmıştır. Bu kapsamda, BSK kaplamalı yollar ve sathi kaplamalı yollar için uygun bitüm sınıflarını belirlemek amacıyla bitüm sınıfı seçim haritaları hazırlanmıştır. Bu haritalar, 2013 yılında yayımlanan Karayolu Teknik Şartnamesi

(KTŞ 2013) kapsamına alınmış ve tasarım süreçlerinde referans alınmaya başlanmıştır.

KGM'nin BSK kullanımını yoğun olarak gerçekleştirildiği 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 ve 13. Bölge Müdürlüklerinde, Superpave bitüm performans test cihazları aktif olarak kullanmaya başlamıştır. Güncel olarak 9. Bölge Müdürlüğünde test cihazlarının temini ve kullanımı için çalışmalar sürdürülmektedir. Bu düzende Superpave yöntemine dayalı olarak bahse konu performans testleri, ilgili prosedürler ve mevcut uygulamalar değiştirilmeden, KTŞ'de belirtilen bölümlere göre yürütülmektedir. Bu durum, Türkiye genelinde Superpave bağlayıcı sisteminin yaygınlaşması ve kalite kontrol açısından önemli bir ilerleme sağlamıştır.



Tablo 5.2: Superpave Performans Sınıfı Bitümlü Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO M320)

Performans Sınıfı	PG 46			PG 52						PG 58					PG 64					PG 70					PG 76					PG 82								
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34	
7 Gün Maks Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C*	< 46			< 52						< 58					< 64					< 70					< 76					< 82								
Minimum Kaplama Dizayn sıcaklığı, °C*	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34	
ORJİNAL BİTÜM																																						
Parlama Noktası, T48, Minimum (°C)	230																																					
Viskozite, ASTM D4402 ^b ≤3 Pa*s, Sıcaklık (°C)	135																																					
Dinamik Kesme, T315 ^c G*/sinδ ^d ≥ 1,00 kPa Sıcaklık @ 10 rad/s, °C	46			52						58					64					70					76					82								
RTFO DENEY KALINTISI (T 240)																																						
Kütle Kaybı, Maks, %	1																																					
Dinamik Kesme, T315 G*/sinδ ^d ≥ 2,20 kPa Sıcaklık @ 10 rad/s, °C	46			52						58					64					70					76					82								
PAV DENEY KALINTISI (PP 1)																																						
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90			90						100					100					100 (110)					100 (110)					100 (110)								
Dinamik Kesme, T 315 G* sinδ ^d ≤5000 kPa Sıcaklık @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28	
Fiziksel Sertleşme ^e	Rapor Edilecektir.																																					
Sünme Sertliği, T 313 S ≤300 MPa, m ≥ 0,300 Sıcaklık @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	
Direkt Çekme, T 314 Yenilme Deformasyonu≥1.0% Sıcaklık @ 1mm/dak, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	

5.3.1 BSK Kaplamalı Yollar için Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları

Türkiye’de, yüksek performanslı bitümlü sıcak karışımların yaygınlaşması ve artan trafik yüklerinin yol kaplamalarına olan etkisinin azaltılması amacıyla, bitüm bağlayıcılarının performans odaklı sınıflandırılmasına yönelik önemli bir dönüşüm süreci yaşanmıştır. Bu kapsamda, geleneksel penetrasyon ve viskozite esaslı bitüm sınıflandırma yöntemlerinin yetersiz kaldığı görülmüş; KGM öncülüğünde, Amerikan SHRP kapsamında geliştirilen Superpave bağlayıcı performans sınıflandırma sistemi, Türkiye şartlarına uyarlanarak uygulamaya alınmıştır.

2012 yılında, KGM tarafından Türkiye'nin iklimsel koşulları, yük trafiği düzeyleri ve bölgesel farklılıkları göz önünde bulundurularak, Superpave sistemine dayalı “Bitüm Performans Sınıfı Seçim Haritaları” hazırlanmış ve bu sistem 2013 yılında resmi olarak şartnamelere dahil edilmiştir. Bu haritalar, Türkiye’nin çeşitli bölgelerinde ölçülen uzun yıllara dayalı iklim verileri (yüksek ve düşük sıcaklıklar), trafik hacmi ve yük sınıfları gibi veriler doğrultusunda her il için önerilen PG sınıfını belirlemektedir.

Haritalar, minimum ve maksimum sıcaklıklara göre bağlayıcının performansını değerlendirerek PG sınıfını önermektedir. Örneğin, İç Anadolu’nun soğuk ve sıcak arasında geniş dalgalanmalar yaşadığı bölgelerinde PG 64-22 sınıfı bağlayıcılar önerilirken, güney kıyılarında yaz sıcaklıklarının daha etkili olduğu bölgelerde PG 70-16 gibi daha yüksek sıcaklık dayanımı olan bağlayıcılar önerilmektedir. Doğu Anadolu gibi kışın sert geçtiği ve düşük sıcaklık çatlaklarının yoğunlaştığı bölgelerde ise PG 58-28 gibi düşük sıcaklık performansı daha yüksek olan bağlayıcıların tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Bu sınıflandırmalar yalnızca iklim verilerine dayalı olmayıp aynı zamanda trafik hacmini de içermektedir. Özellikle ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde trafik sınıfı $\geq 10^7$ ESAL (eşdeğer tek dingil yükü) olarak değerlendirilerek yüksek modifiye bağlayıcılar (örneğin: PG 76-22) önerilmiştir. Bu bağlamda, İstanbul, Ankara, İzmir gibi büyükşehirlerdeki ana arterler, otoyollar ve çevre yolları için yüksek performans sınıfı modifiye bitüm bağlayıcıların kullanımı teşvik edilmiştir.

KGM tarafından hazırlanan seçim haritaları, uygulayıcıların iklim verileri ve trafik yüküne göre doğru bağlayıcı seçimini yapmalarına olanak sağlamıştır. Bu bağlamda KGM-EN

standartlarına uyumlu olarak geliştirilen haritalar ve eşik değer tabloları, Türkiye’deki asfalt tasarım mühendisliğinde önemli bir rehber niteliği kazanmıştır. Ayrıca bu yaklaşım, tasarım ve uygulama sürecinde yer alan firmaların da teknik açıdan yönlendirilmesine katkı sağlamış, proje bazlı özel tasarımların yapılmasına olanak tanımıştır.

Türkiye’de Superpave bağlayıcı sınıflamasının uygulanmasına yönelik çeşitli araştırma ve pilot uygulamalar da gerçekleştirilmiştir. Örneğin, KGM'nin bölgesel müdürlükleri tarafından yürütülen bazı pilot projelerde, farklı PG sınıfındaki bağlayıcıların sahadaki performansları gözlemlenmiş ve sıcaklık-gerilim ilişkileri izlenmiştir. Elde edilen geri bildirimler doğrultusunda harita güncellemeleri yapılmış ve bazı bölgelerde önerilen PG sınıfları revize edilmiştir.

Ayrıca üniversiteler ile KGM işbirliğinde yürütülen araştırmalarda, Türkiye’nin farklı iklim bölgelerindeki asfalt örnekleri üzerinde performans testleri yapılmış ve bu test sonuçları Superpave sisteminin Türkiye koşullarına ne ölçüde uygunluk sağladığını ortaya koymuştur. Bu araştırmalar, özellikle iklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışlarının bağlayıcı seçimine etkisi gibi güncel konulara da ışık tutmuştur.

Türkiye’de Superpave bağlayıcı performans sınıflandırma sistemine geçiş, asfalt yol kaplamalarının uzun ömürlü ve yüksek performanslı şekilde tasarlanabilmesi açısından önemli bir adım olmuştur. Bu kapsamda geliştirilen bitüm sınıfı seçim haritaları, mühendislik hesaplamalarının standart hale gelmesini sağlamış ve ülke genelinde kalite standardizasyonuna katkıda bulunmuştur.

5.3.2 Sıcaklık Verilerinin Analiz Edilmesi

Yol üstyapılarında kullanılacak bitüm performans sınıflarının belirlenebilmesi için ilk adım, yolun geçtiği bölgedeki sıcaklık koşullarının doğru bir şekilde analiz edilmesidir. Bu amaçlanan, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden, ülke genelindeki meteorolojik istasyonlardan alınan sıcaklık verileridir. Veriler, her yıl için ardışık 7 gün ve yüksek sıcaklık ortalamaları hesaplanmış ve son 20 yıllık ortalama sıcaklıklar ile standart sapmalar belirlenmiştir. Aynı şekilde her yıl için belirlenen yıl içindeki en düşük sıcaklık verisinin son 20 yıla ait ortalaması ve standart sapması belirlenmiştir. Elde edilen bu sıcaklıklar ekstrem hava sıcaklıkları olup, sırasıyla ortalama en yüksek hava sıcaklığı ve ortalama en düşük hava

sıcaklığı olarak adlandırılmaktadır. Meteoroloji istasyonlarından elde edilen hava sıcaklığı verileri doğrudan yol seviyesini yansıtmadığından, bu verilerin yol kotuna indirgenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, meteoroloji istasyonlarının konumları ile yol platform kotları arasındaki kot farklarını dikkate alan bir analiz yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle, kontrol kesimlerinde her bir yol güzergâhı için minimum ve maksimum hava sıcaklıkları belirlenmiştir. Elde edilen bu hava sıcaklıkları, aşağıda verilen ampirik bağıntılar aracılığıyla kaplama sıcaklıklarına dönüştürülmüştür.

$$T_{20mm} = 0.9545*(T_{havamaks}-0.00618*E^2 + 0.2289*E + 42.2) - 17.78$$

$$T_{min} = T_{havamin}$$

Burada;

T_{20mm} : Yüzeyden 20 mm derinlikteki en yüksek kaplama sıcaklığı, °C

T_{min} : Yüzeydeki en düşük kaplama sıcaklığı, °C

$T_{havamaks}$: Ortalama 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı, °C

$T_{havamin}$: Ortalama düşük 1 günlük hava sıcaklığı, °C

E : Bitümün kullanılacağı yol kesiminin derece olarak enlemi

5.3.3 Bitümlü Bağlayıcıların Performans Sınıflarının Belirlenmesi

Kaplama sıcaklıklarının hesaplanmasının ardından, ilgili yol kesiminde kullanılacak bitümlü bağlayıcının PG belirlenmiştir. Tablo 5.3'te de görüldüğü gibi PG sınıflandırması, hem yüksek hem de düşük sıcaklık aralıklarını 6°C'lik artışlarla kapsayacak şekilde tanımlanmaktadır. Örneğin, hesaplanan en yüksek kaplama sıcaklığı 56°C ve en düşük kaplama sıcaklığı -24°C ise, bu değerler esas alınarak önerilen bağlayıcı sınıfı PG 58-28 olarak seçilmektedir.

Tablo 5.3 Bitüm Sınıfı Seçim Tablosu

BITÜM SINIFI SEÇİM TABLOSU

Yüksek Sıcaklık Performans Sınıfı, °C

	58	64	70	76	82
Düşük Sıcaklık Performans Sınıfı, °C					
-16	B 50/70		Batman Rafinerisi B 50/70 veya PMB	Polimer Modifiye Bitüm (PMB)	
-22					
-28	B 70/100	Batman Rafinerisi B 70/100 veya PMB 64-28			

- 20 yıllık toplam standart dingil yükü tekrerrür sayısı 20-70 milyon arasında olan yollarda yüksek sıcaklık performansı bir sınıf artırılacaktır.
- 20 yıllık toplam standart dingil yükü tekrerrür sayısı ($T_{8,2}$) >70 milyon yollarda yüksek sıcaklık performansı iki sınıf artırılacaktır.
- Boyuna eğimi $\geq \%4$ ve uzunluğu $L \geq 500$ m olan rampalarda, yarıçapı ≤ 200 m olan yatay kurplarda, kavşak noktalarının gerisinde 200 metrelik bir kesim içerisinde ve kavşak içlerinde yüksek sıcaklık performans sınıfı bir sınıf artırılacaktır.
- Temmuz ve ağustos aylarının sıcaklık ortalaması ile haziran ve eylül aylarının sıcaklık ortalaması arasındaki fark ≤ 3 °C olan yollarda yüksek sıcaklık performansı bir sınıf artırılır (sıcaklık verilerine <http://www.dmi.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx> adresinden ulaşılabilir).
- Toplamda yüksek sıcaklık performansı üç sınıftan fazla artırılmaz.

ÖRNEKLER :

	1	2	3	4	5
Yol kesimi	Aliyman	Kavşak (1↑)	Rampa s=%6, L=1 km (1↑)	Kurp, R=150 (1↑)	Kavşak (1↑)
Temel PG sınıfı	PG 58-22	PG 58-22	PG 58-28	PG 64-16	PG 58-22
Proje trafiği ($T_{8,2}$)	45 Milyon (1↑)	123 Milyon (2↑)	15 Milyon	52 Milyon (1↑)	120 Milyon (2↑)
$T_{ort(ağus,tem)} - T_{ort(haz,ey)}$	5.0 °C	3.2 °C	4.5 °C	2.5 °C (1↑)	3 °C (1↑)
Gerekli PG sınıfı	PG 64-22	PG 76-22	PG 64-28	PG 82-16	PG 76-22
Kullanılacak Bitüm	B 50/70 (1↑)	PMB 76-22 (3↑)	Batman B 70/100 veya PMB 64-28 (1↑)	PMB 82-16 (3↑)	PMB 76-22 (3↑)

Yol projeleri için gerekli bitüm performans sınıflarının belirlenmesinin ardından, bu performans seviyelerini karşılayabilecek bitümlü bağlayıcıların tespiti, uygun bağlayıcının seçimi ve eğer mevcut ürün yeterli değilse, modifikasyon yöntemleriyle gerekli performansın sağlanması aşamalarına geçilmiştir. Bu kapsamda, ülkemizde faaliyet gösteren dört farklı rafineriden (Kırıkkale, İzmit, Aliğa ve Batman) farklı üretim dönemleri ve penetrasyon sınıflarını temsil eden bitüm numuneleri temin edilmiştir. Bu numunelerin hizmet verebileceği sıcaklık aralıkları, Superpave bağlayıcı şartnamesine uygun olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında; Kırıkkale, İzmit, Aliğa ve Batman rafinerilerinden temin edilen B 50/70, B 70/100 ve B 160/220 sınıfı bitümler ile ayrıca Aliğa rafinerisine ait B 100/150 sınıfı bitümler üzerinde, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvarı'nda ileri düzey performans deneyleri gerçekleştirilmiş ve her bir bağlayıcının PG sınıfı belirlenmiştir. Bunun için orjinal ve yaşlandırılmış bitümler üzerinde aşağıdaki Superpave bitüm deneyleri uygulanmıştır:

- Dönel viskozite (Brookfield viskozite) deneyi
- Basınçla yaşlandırma deneyi (PAV)
- Döner ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)
- Dinamik Kesme Reometresi (DSR)
- Kiriş Eğme Reometresi (BBR)

Buna ek olarak, söz konusu rafineri bitümleri farklı tip ve oranlarda polimer katkı maddeleriyle modifiye edilerek, elde edilen Polimer Modifiye Bitüm (PMB) numunelerinin performans sınıfları belirlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, Superpave sistemine dayalı olarak PMB'ler için yeni bir performans sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen PMB şartnamesi, 10.07.2009 tarihli ve B.11.1.TCK.0.12.03-274/1061 sayılı yazı ile ilgili birimlere dağıtılmış ve resmi olarak uygulamaya konulmuştur. Söz konusu PMB Şartnamesi Tablo 5.4'te yer almaktadır (Sağlık vd., 2012).

Tablo 5.4: Polimer Modifiye Bitüm (PMB) Teknik Şartnamesi

Sıra No	DENEY ADI	STANDARDI	BİRİMİ	PMB 64-28	PMB 70-16	PMB 70-22	PMB 70-28	PMB 76-16	PMB 76-22	PMB 76-28	PMB 82-16
1	PENETRASYON (25°C,100g,5sn.)	TS EN 1426	0,1mm	50-90	30-70	30-90	30-90	20-60	20-70	20-70	10-50
2	YUMUŞAMA NOKTASI min.	TS EN 1427	°C	52	62	62	62	67	67	67	72
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÜKTİLİTE ^a (25°C'de, 5cm/dk) min.	TS EN 13589	J	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1
4	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C) min.	TS EN 13398	%	80	60	70	80	60	70	80	60
5	PARLAMA NOKTASI min.	TS EN ISO 2592	°C	220	220	220	220	220	220	220	220
6	ÖZGÜL AĞIRLIK	TS EN 15326	g/cm ³	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1
7	DEPOLAMA STABİLİTESİ ^b										
7.1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI maks.	TS EN 13399	°C	5	5	5	5	5	5	5	5
7.2	PENETRASYON FARKI maks.		0,1mm	12	12	12	12	9	9	9	9
8	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G*/sinδ >1kPa) Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
9	DÖNMELİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ ^c	TS EN 12607-1									
9.1	KÜTLE KAYBI maks.		%	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.5
9.2	YUMUŞAMA NOKTASI min.	TS EN 1427	°C	50	60	60	60	65	65	65	70
9.3	Yumuşama Noktasındaki Değişiklik										
	artma maks.		°C	8	8	8	8	8	8	8	8
	azalma maks.		°C	5	5	5	5	5	5	5	2
9.4	KALICI PENETRASYON min.	TS EN 1426	%	50	50	50	50	45	45	45	40
9.5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G*/sinδ >2,2kPa) Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
10	RTFOT+PAV İle Yaşlandırılmış Modifiye Bitüme Yapılan Deneyler	TS EN 14769 AASHTO R28									
10.1	DSR (G*/sinδ <5000kPa) Yenilme Sıcaklığı maks.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	22	31	28	25	34	31	28	37
10.2	KIRIŞ EĞME REOMETRESİ (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği (S≤300 MPa, m≥0,300) Sıcaklık maks.	TS EN 14771 AASHTO T313 ASTM D6648	°C	-18	-6	-12	-18	-6	-12	-18	-6

^a Bu koşul gerekli olduğunda aranacaktır.

^b Modifiye bitüm depolanmadan kullanılacaksa, depolama stabilitesi deneyi yapılması zorunlu değildir.

^c Yüksek viskoziteli modifiye bitümlerde RTFO deneyi 163 °C 'den daha yüksek (180 °C'yi geçmeyen) sıcaklıkta yapılabilecektir.

NOT : 1, 2, 4, 9.1,9.2 ve 9.4 sıra nolu deneylerin şantiyede yapılmasının zorunludur.

Ayrıca, kullanılan modifiye bitümden, yılda en az iki kez numune alınarak tabloda belirtilen tüm deneyler yapılacaktır.

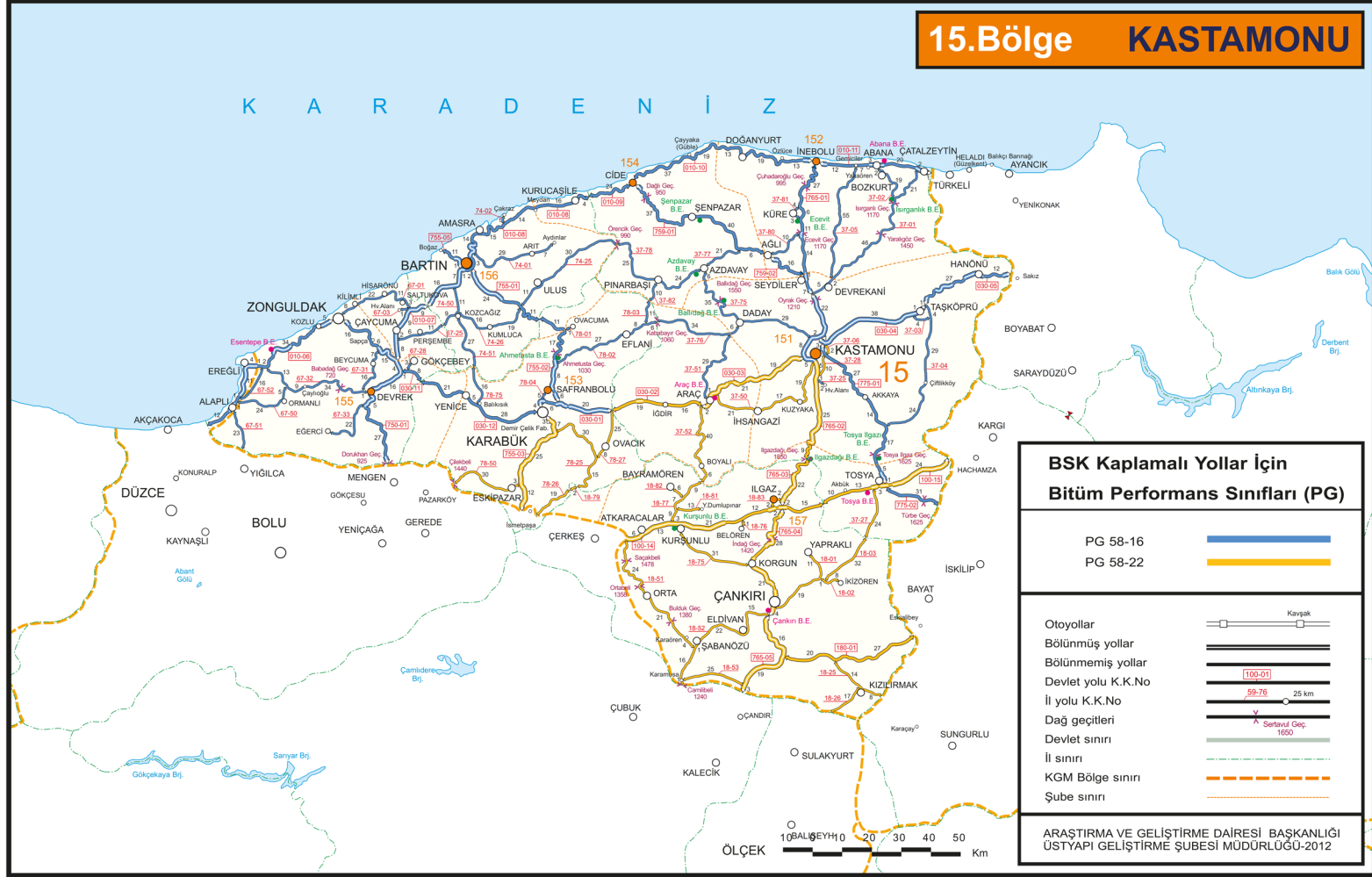
5.3.4 Bölgelere Göre Bitüm Sınıfının Seçimi

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından, yol bakım ve onarım faaliyetlerinin etkinliğini artırmak amacıyla, Ar-Ge Dairesi Başkanlığı bünyesinde bilgisayar destekli bir Üstyapı Yönetim Sistemi (ÜYS) geliştirilmiştir. KGM intranetinde erişilebilen bu ağ tabanlı yazılım, karayolu üstyapı envanter ve performans verilerinin toplanması, güncellenmesi ve analizine olanak sağlamaktadır.

Sistem; üstyapı katman bilgileri, bitüm sınıfları, malzeme özellikleri ve yapım yılları gibi envanter verilerinin yanı sıra profilometre ile ölçülen IRI, TİO, FWD ölçümleri, esneklik modülleri ve takviye kalınlıklarını da içermektedir. Performans takibi, grafiklerle desteklenerek en uygun bakım-onarım zamanının belirlenmesini mümkün kılar.

Yazılımda yer alan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) arayüzü, tüm verileri katmanlı yapıda harita üzerinde sunmakta; yol kesimlerine ait sıcaklık verileri, trafik yükleri ve önerilen bitüm sınıflarını birlikte göstererek karar desteği sağlamaktadır. Ayrıca, meteorolojik veriler ve Superpave yöntemiyle hesaplanan bitüm performans sınıfları sisteme entegre edilmiştir. CBS üzerinden meteorolojik veriler, kaplama sıcaklıkları, trafik yükleri ve bu verilere göre hesaplanan bitüm performans sınıfları görüntülenebilmekte; böylece saha koşullarına uygun asfalt tipi belirlenebilmektedir.

Meteorolojik istasyonlardan elde edilen verilerin analiz edilmesiyle elde edilen bitüm PG yol ağı üzerinde gösterildiği Karayolları Genel Müdürlüğü Bölgelerine göre haritalar oluşturulmuştur. Şekil 5.1'de 15. Bölge (Kastamonu) için hazırlanan BSK Kaplamalı Yollar için bitüm PG Haritası örnek olarak verilmiştir. Bu haritalarda yer alan PG değerleri, yalnızca sıcaklık kriterleri esas alınarak belirlenmiş olup, trafik yoğunluğu, araç hızı, yol eğimi gibi değişkenlik gösterebilen diğer etkenler dikkate alınmamıştır. Bu etkenler zaman ve yol kesimi bazında farklılık gösterebildiğinden, haritalarda yer verilmemiştir. Bu nedenle, uygulanacak nihai bitüm performans sınıfının belirlenmesinde, sıcaklık temelli PG değerlerine ek olarak yolun taşıdığı trafik yükü, hızı ve geometrik özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ancak bu değerlendirme yapılırken, yalnızca yüksek sıcaklık performans sınıfı güncellenmekte, düşük sıcaklık sınıfı sabit kalmaktadır (Yükü vd., 2021).



Şekil 5.1: Bölgeler bazında BSK kaplamalı yollar için bitüm performans sınıfları (PG) haritası

5.4 Karayolları Teknik Şartnamesindeki Bitümlü Sıcak Karışımlar İle İlgili Değişimlerin Değerlendirmeleri

Yol yapı elemanları, yapım ve bakım aşamaları ve kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri, ilgili standartlar ve teknik şartnamelerle belirtilir. Türkiye'de, karayolları ile bu gereklilikler KTŞ ile belirlenir. 1950 yılında KGM'nin kurulmasının ardından ilk teknik şartname 1952 yılında yayımlanmıştır. Asfalt kaplamaların güvenli, dayanıklı, sürüş konforu yüksek ve uzun ömürlü olması esas alınarak; malzemelerin kaynağı, nasıl elde edildiği, üretimi, yapım süreci, kullanım aşamasındaki durumu, yeniden kullanımı ve geri kazanımı ayrıntılı olarak tasarlanmalıdır. Asfalt kaplamalarında sürdürülebilirliği için sera gazı CO₂ emisyonunun azaltılması, yakıt tüketiminin azaltılması, atıkların kullanılması, asfaltın geri kazanılması ve performans artırıcı, çevreci katkıların kullanılması ve uygulanması KTŞ kapsamına dikkate alınması gereken ana konuları oluşturmaktadır. Yukarıda belirtilen konular doğrultusunda şartnamelerdeki asfalt kaplama kriterlerinin, ülkemizin ihtiyaçları ve koşulları göz önünde bulundurularak güncellenmesine gereksinim duyulmuştur. KTŞ, dünyadaki gelişmeler ve ülkemizin ihtiyaç duyduğu yenilikler dikkate alınarak 1963, 1973, 1978, 1989, 2006, 2013 ve 2023 olmak üzere çeşitli yıllarda güncellenmiştir. Bu kapsamda, ulusal ve uluslararası güncel standartlara, son teknolojik gelişmelere, uygulama ve araştırmalardan elde edilen tecrübelerle göre son güncellenen Karayolları Teknik Şartnamesi, 27.12.2023 tarih ile yürürlüğe girmiştir. Bu bölümde, 2006 ve 2023 yılları arasında yayımlanan KTŞ'lerin esnek yol üstyapısını oluşturan bitümlü temel, binder ve aşınma tabakaları ve Taş Mastik Asfalt (TMA) ile ilgili kısımlarda yapılan değişiklikler incelenmiş ve dünyadaki gelişmeler dikkate alınarak öneriler sunulmuştur (Tanyıldızı, 2022).

5.4.1 Bitümlü Bağlayıcılar (Kısım 412)

2006, 2013 ve 2023 yıllarında yürürlüğe giren KTŞ'lerdeki "Bitümlü Bağlayıcılar" başlığı altında modifiye bitümün sınıflandırılması ve kullanımı ile ilgili önemli değişiklikler bulunmaktadır. Özellikle Türkiye'de 2012 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı tarafından, BSK kaplamalı yollar için iklimsel koşulları esas alan bağlayıcı performans sınıflarının belirlenmesine yönelik olarak oluşturulan bitüm sınıfı seçim haritaları, KTŞ 2013'e entegre edilmiş ve proje tasarım ve yapım süreçlerinde referans doküman olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylece, Superpave sistemine geçiş sürecinde iklim verisi temelli bitüm seçimi esas alınarak performans odaklı bir yaklaşım

benimsenmiştir. Bu durum, KTŞ (2006)'da bulunmayan bir ayrıntıdır ve tasarımın plan ihtiyaçlarına daha uygun hale getirilmesini sağlamaktadır. Modifiye bitümün teknik özelliklerine bakıldığında önemli yenilikler yapılmıştır. KTŞ (2023)'te, Tablo 5.5 ile yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özelliklerine bakıldığında penetrasyon indeksi KTŞ'ye dahil edildiği görülmektedir. KTŞ (2023)'te standartlar daha güncel hale getirilmiş ve uluslararası standartlarla uyum sağlanmıştır. Önceki teknik özelliklerde kullanılan TS ve AASHTO standartları yerine, TS EN ISO ve güncellenmiş AASHTO dayanıklılık atıfları yapılmıştır. Böylelikle, KTŞ (2006)'ya kıyasla önemli bir standartlaştırma ve kalite artışı sağlanmaktadır. Ayrıca, KTŞ (2023)'te, aynı ihale kapsamında farklı çevre veya iklim koşullarına sahip bölgeler için tasarımlarda esneklik sağlamak amacıyla farklı modifiye bitüm sınıflarının kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.

Buna ek olarak, KTŞ 2023 ile birlikte yeni deney yöntemleri şartnameye dâhil edilmiş ve özellikle modifiye bitümlerin uzun dönem yaşlanma dayanımı gibi performans kriterlerinin değerlendirilmesine yönelik testler eklenmiştir. Bu güncellemelerle, bağlayıcıların servis ömrü boyunca göstereceği davranışın kapsamlı şekilde analiz edilmesi hedeflenmiştir.

5.4.2 Bitümlü Temel (Kısım 406)

KTŞ şartnamelerinde bitümlü temel tabakası ile ilgili malzeme ve karışım gereklilikleri karşılaştırıldığında deney listesi, standartları ve şartname limitlerinde yapılan değişiklikler aşağıda belirtilmektedir. 2006 yılında Los Angeles parçalanma direnci testi şartnamede yer alırken, 2013 yılında bu teste ek olarak Micro-Deval aşınma deneyi şartnameye dâhil edilmiştir. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık ölçümü ise 2006'da Na_2SO_4 ile % kayıp kriterine göre değerlendirilirken, 2013 yılında bu yöntemin yerine Mg_2SO_4 ile % kayıp kriteri getirilmiştir. Yassılık endeksi ise ilk kez 2013 yılında TS EN 933-3 standardıyla şartnameye girmiş ve 2023 yılında bu sınır %20'ye (FI_{20}) düşürülmüştür. Ayrıca, çubuklu elek testine tabi tutulan tanelerin toplam kütlesine oranla daha düşük bir yassılık değerine sahip olması önerilmiştir. Soyulma mukavemeti açısından 2013 yılında, bitüm kaplı yüzeyin soyulma mukavemetinin 60'tan büyük olması şart koşularak daha dirençli malzeme kullanımına yönelim sağlanmıştır. 2023 yılında ise bu deney standardı Kısım 403 EK-A olarak güncellenmiştir. 2013 yılında yapılan düzenlemelerle, ince agreganın üretildiği malzemenin, Los Angeles parçalanma direnci ve hava tesirlerine karşı dayanıklılık değerlerini sağlaması şart koşulmuştur.

Tablo 5.5: Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri (TS EN 12591)

SIRA NO	DENEY ADI	STANDARTI	BİTÜM SINIFLARI				
			B 40/60	B 50/70	B 70/100	B 100/150	B 160/220
1	PENETRASYON,(25 °C) 0,1 mm	TS EN 1426	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
2	YUMUŞMA NOKTASI, °C	TS EN 1427	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43
3	PENETRASYON İNDEKSİ, °C		0,7≥PI≥-1,5				
4	YAŞLANMAYA KARŞI DAYANIM	TS EN 12607-1					
4.1	KÜTLE DEĞİŞİMİ, %		≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
4.2	KALICI PENETRASYON, %	TS EN 1426	≥ 50	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
4.3	YUMUŞAMA NOKTASI YÜKSELMESİ, °C	TS EN 1427	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11
5	PARLAMA NOKTASI, °C	TS EN ISO 2592	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
6	ÇÖZÜNÜRLÜK, %	TS EN 12592	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
7-	PARAFİN MUMU İÇERİĞİ*, %	TS EN 12601-1	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2
		TS EN 12606-2	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5

*Gerek duyulduğunda yapılacaktır.

P_{25} =25 °C'de ki Penetrasyon değeri

T_{YN} =Yumuşama Noktası değeri

$$A = \frac{\log 800 + \log P_{25}}{T_{YN} - 25}$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$

Aynı yıl, ince agrega içerisindeki organik madde miktarının (%3 NaOH ile belirlenen) şartnameye eklenmesi de önemli bir değişiklik olmuştur. Metilen mavisi deneyi de 2013 yılında şartnameye dahil edilmiş ve TS EN 933-9 standardı doğrultusunda uygulanmıştır. KTŞ (2023)'te mineral fillerin gradasyon limitlerinin bir miktar kesikli hale getirildiği görülmektedir. Ayrıca, önceki şartnamelere ek olarak No.80 elek boyutu ve bu elekten ağırlıkça geçen sınır değeri eklenmiştir. Tüm bu değişiklikler, malzeme özelliklerinin daha dayanıklı ve güvenilir hale getirilmesi amacıyla yapılmıştır.

Bitümlü temelın karışım tasarımı, 'Asphalt Institute MS-2' el kitabı esas alınarak Marshall metodu ile yapılmaya devam edileceği belirtilmiştir. Bu yaklaşım, yol kaplamalarının BSK'ya geçtiği dönemden itibaren şartnameye çeşitli kriterlerin eklenmesine ve çıkarılmasına rağmen değişim olmamıştır. Ancak, geçtiğimiz yıl yürürlüğe giren KTŞ (2023) ile beraber, bitümlü temel karışım tasarımı, gradasyon limitleri ve tasarım kriterlerini karşılamak kaydıyla, AASHTO M 323 ve AASHTO R 35 standartlarına göre Superpave Tasarım Metodu da kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bununla birlikte, mevcut bilgiler ışığında, geleneksel Marshall yöntemi kullanılmaya devam edilmektedir ve Superpave yöntemine geçiş sürecinin henüz tamamlanmadığı görülmektedir. Bu durumun temel nedenleri arasında, Superpave yöntemi için gerekli cihazların yüksek maliyeti ve yeterli sayıda kalifiye elemanın bulunmaması düşünülmektedir. Bu sebeplerle, ilgili tasarım yöntemiyle uyum sağlanması için çalışmalar devam etmekte olup geçiş süreci henüz tamamlanamamıştır. Aynı durum, bitümlü temel, binder, aşınma tabakası ve TMA karışımları için de geçerliliğini korumaktadır.

Bitümlü temel tasarımına ilişkin tasarım kriterlerinde 2011 yılında EN standartlarına geçilmesinin ardından, 2013 yılında uygun deney standartlarının güncellendiği görülmektedir. Bu güncellemelerle birlikte, tasarım sürecine agregalar arası boşlukların maksimum değeri eklenmiştir. Ayrıca, sıkıştırılmış bitümlü karışımların su kaynaklı bozulmalara karşı direncinin belirlenmesinde İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı deneyi, ilk kez 2013 yılında şartnameye dâhil edilmiştir. 2023 yılında ise, AASHTO T 283 standardına göre İÇM oranı için minimum %80 kriteri getirilmiş ve bitümlü temel tasarımı sırasında bu deneyin yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bunun yanı sıra, briket yapımında uygulanacak darbe sayısı, karışım boşluk analizleri, Marshall stabilitesi ve akma deneyi için kullanılan standartlar güncellenerek eşdeğer ASTM ve AASHTO standartları da eklenmiştir. Tüm bu düzenlemeler,

tasarımın daha standart bir yapıya kavuşmasını ve malzemelerin performans özelliklerinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

KTŞ’de yapılan güncellemelerle birlikte, karışım tasarım sürecine yönelik bazı uygulamalarda da değişiklikler getirilmiştir. Marshall metodu ile gerçekleştirilen tasarımlarda, daha önce yalnızca önerilen agrega oranları ve optimum bitüm miktarı esas alınırken, yeni düzenlemeler doğrultusunda bu değerlere ek olarak $\pm 0,5$ bitüm yüzdelerinde en az üç farklı grup briket hazırlanması gerekliliği getirilmiştir. Superpave yöntemi için ise, malzemenin özgül ağırlıklarına ek olarak, deneme gradasyonlarının da tasarıma dâhil edilmesi sağlanmış; bu grupların her biri, başlangıç, tasarım ve maksimum sıkıştırma sayıları ($N_{\text{başlangıç}}$, $N_{\text{tasarım}}$, N_{max}) dikkate alınarak yoğunmalı kompaktörle hazırlanacak şekilde tanımlanmıştır. Elde edilen briketler üzerinde yapılan ölçüm ve değerlendirmelerle tasarım değerlerinin doğrulanması, ayrıca optimum bitüm oranıyla hazırlanan numuneler üzerinde yapılacak performans testleriyle şartname kriterlerinin karşılanıp karşılanmadığının kontrol edilmesi amaçlanmıştır. 2013 yılı itibarıyla TS EN 12697-30 standardına göre hazırlanan Marshall briketlerine ilişkin uygulamalarda da esneklik sağlanmıştır. 2023 yılında yapılan revizyonla birlikte, artık bu briketlerin ASTM D 6926 standardına uygun olarak hazırlanmasına da imkân tanınmıştır. Bununla birlikte, hazırlanan briketlerin belirlenen tasarım kriterlerini sağlayamaması durumunda, karışım tasarım sürecinin yeniden gözden geçirilmesi ve tasarımın tekrarlanması gerekmektedir (Orhan, 2014; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2006; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2023).

5.4.3 Asfalt Betonu Binder ve Aşınma Tabakası (Kısım 407)

KTŞ şartnamelerinde aşınma ve binder tabakalarına ilişkin malzeme ve karışım gerekliliklerindeki değişiklikler aşağıda sunulmuş ve Tablo 5.7’de KTŞ 2023’teki hali verilmiştir. 2023 yılında şartnameye göre yapılan düzenlemede Tip-2 aşınma tabakasının “Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi”ne göre hazırlanması “Üstyapı Projelendirme Raporu” veya “Üstyapı Takviye Raporu”nda belirlenmesi ve kalınlığa göre yeni yapım veya takviye olacak esnek üstyapılarda aşınma tabakası olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Tip-3 çok ince aşınma tabakası, ilk olarak 2013 yılında KTŞ’ye dahil edilmiş ve esnek üstyapılarda oldukça spesifik bir işlevi yerine getirmek üzere tanımlanmıştır. Üstyapı

Projelendirme Raporunda önerilmesi halinde, Tip-3 çok ince aşınma tabakası olarak kullanılacaktır. Bu tabaka, mevcut kaplamalarda kayma-sürtünme direncini artırma ve kaplamaya su girişini önleme gibi önemli görevler üstlenir. Ayrıca, hem yeni yapım hem de takviye projelerinde kullanılabilirliği ile esnek üstyapı tasarımında çok yönlü bir çözüm sunar. Ayrıca tekerlek izi derinliği en fazla 6 mm oluşmuş mevcut BSK tabakaları üzerine 25-30 mm arasında tasarlanır, bu da minimum malzeme kullanımı ile işlevsel bir performans sağlar.

KTŞ (2006)'da sadece Los Angeles parçalanma direncine bakılırken 2013 yılında Los Angeles testine tamamlayıcı bir test niteliği taşıyan agreganın yıpranma direncini ölçmek için daha hassas bir yöntem olan Micro-Deval Aşınma Deneyi (TS EN 1097-1) şartnameye dâhil edilmiştir. Buna karşılık 2006 yılında Donma-çözülme döngülerinde agreganın dayanıklılığını ölçmek amacıyla Na_2SO_4 ile %kayı yer almaktayken; 2013 yılında Na_2SO_4 yerine Mg_2SO_4 ile kullanımı şartnameye eklenmiştir. Mg_2SO_4 çözeltisi, bazı agrega türleri için daha uygun sonuçlar verir ve deneyin güvenilirliğini artırır. Yassılık indeksi (TS EN 933-3), agregaların geometrik özelliklerini belirlemek için 2013 yılında şartnameye dâhil edilmiştir. Yassı tanelerin oranının kontrol edilmesi, asfalt performansını doğrudan etkilemektedir. 2023 yılında ise % değeri sırasıyla 20(FI_{20}) ve 15(FI_{15})'e düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Şartname limitlerine daha düşük toleranslar getirerek kullanılan malzemenin kalitesini artırmayı hedeflediği anlaşılmıştır. Şartnamede kaba agrega ile ilgili deneylerin standartlarında TS EN uygulanmaya başlanıldığı görülmüştür. 2023 yılında trafik hacminin 10 milyon eşdeğer tekil aks yükünün altında olduğu yollar için ($\text{T8.2} < 10$ milyon) aşınma tabakasında kullanılan agregaların cilalanma değerinin en az 45 (PSV_{45}) olması şartnameye eklenmiştir. Bu düzenleme, aşınma tabakası tasarımında güvenlik ve dayanıklılık odaklı bir anlayışın benimsendiğini göstermektedir.

Aşınma ve binder tabakası ince agrega gereklilikleri incelediğinde, 2013'te yürürlüğe giren KTŞ'de Los Angeles aşınma ve hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyleri ilave edilmiş; Metilen Mavisi Deneyi, daha hassas ölçüm sağladığı için kil ve zayıf taneler testinin yerine getirilmiştir.

KTŞ (2013)'de yapılan düzenlemede, aşınma ve binder tabakalarında kullanılan bitümlü sıcak karışımlarda bağlayıcı olarak, KGM AR-GE birimi tarafından 2011 yılında oluşturulan "Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamalar İçin Bitüm Sınıfı Seçim Haritası" kitapçığına göre uygun bitümlü bağlayıcı sınıf seçimi ile yapılacağı belirtilmektedir. Ayrıca 2013 yılında şartnameye

giren Tip-3 çok ince aşınma tabakası üretiminde TS EN 12591'e uygun, "Bitümlü Bağlayıcılar"da verilen limitlere uygun PMB kullanılması şartı getirilmiştir.

Tablo 5.6: Kaba Agreganın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Deney		Şartname Limitleri ^c		Deney Standardı
		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 _{DE} 25)	≤20 (M _{DE} 20)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %		18 (MS ₁₈)	16 (MS ₁₆)	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, ağırlıkça % (Tüm yüzeyi kırılmış - tüm yüzeyi yuvarlak)		≥95- ≤0 (C _{95/0})	≥95- ≤0 (C _{95/0})	TS EN 933-5
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) ^e	TS EN 1097-8
	T _{8.2} ≥10 Milyon		≥50 (PSV ₅₀)	
Su Emme, %		≤2,5 (WA _{242,5})	≤ 2,0 (WA _{242,0})	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti (Bitüm Kaplı Yüzey), % (24 saat 60 °C Suda Bekletmeden Sonra)		≥60 ^d	≥60 ^d	Kısım 403 EK-A
Kil Topakları ve Ufalanabilir Tane Oranı, %		≤0,3	≤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 Standart Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı (T _{8.2}) 10 milyondan düşük Devlet ve İl Yollarında Cilalanma Değeri minimum 45 olan agregalar kullanılabilecektir.				

2013 yılında yapılan düzenleme ile bitümlü karışımlarda Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç (AASHTO T-283) Deneyi'nin binder ve aşınma tabakası tasarım aşamasında

gerçekleştirilmesi zorunlu hale getirilmiş ve ITSR oranı için minimum %80 değeri belirlenmiştir. Ayrıca, ilk kez aşınma tabakalarına tekerlek izi oluşumu sınırı getirilmiştir. VMA değerine üst limit eklenerek, karışımın aşırı miktarda bitümle doygun hale gelmesinin önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Böylece yeterli hava boşluğu sağlanarak, karışımın uzun vadeli dayanıklılığının artırılması hedeflenmiştir.

Bununla birlikte, bitüm toleransı $\pm\%0,2$ seviyesine indirilmiş ve böylece bitüm oranının daha hassas biçimde kontrol edilmesi ve karışımın tasarım parametrelerinden sapmasının önlenmesi sağlanmıştır.

KTŞ (2023) ile yapılan düzenlemeler sonucunda, bitümlü sıcak karışım tasarımında temel yöntem olarak Marshall metodu (Asphalt Institute MS-2) belirlenmiş; ancak Superpave yöntemi (AASHTO M 323 ve R 35) de alternatif olarak kabul edilmiştir. Superpave tasarımı kullanıldığında, Gyratory kompaktör ile belirli parametrelere göre deneylerin yapılması ve performans kriterlerinin sağlanması zorunlu kılınmıştır. Ayrıca Tekerlek İzinde Oturma Deneyi için TS EN 12697-22 standardı (HWT Metot B) şartnameye dahil edilmiş ve bu amaçla Ankara, İstanbul ve Konya bölgelerine cihaz temin edilmiştir. Diğer bölgeler, bu merkezlere numune gönderecektir. Ayrıca sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncin belirlenmesi için İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) deneyleri şartname kapsamına alınmıştır. Tablo 5.7’de KTŞ (2023) tasarım kriterleri verilmiştir (Orhan, 2014; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2006; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2023).

5.4.4 Taş Mastik Asfalt-TMA (Kısım 408)

Türkiye’de KGM 1997 yılında Alman TMA şartnamesinden faydalanarak ilk TMA şartnamesini yayınlamıştır. 1998’de inşaat çalışmaları başlamış ve 1999 yılı itibarıyla kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye’de TMA karışımlarının laboratuvar ve arazi performansının çok iyi olduğunun gözlenmesinden dolayı, ağır taşıt trafiği yüksek olan güzergâhlarda, aşınma tabakası olarak TMA kullanımı yaygınlaşmıştır. Ülkemizde TMA ağır trafik hacminin olduğu otoyollarda, şehir içi kavşak kesimlerinde sadece toplu taşıma olarak hizmet verilen yol koridorlarında, yol üstyapısının aşınma tabakası olarak kullanılmaktadır. Ülkemizdeki deneysel çalışmalar göstermiştir ki Marshall metodunun, TMA karışımlarının mekanik özelliklerini tam olarak yansıtmamaktadır. TMA karışımının gerçek performansını

gösteren testler ise yoğurmalı pres ile yapılan testler ve kalıcı deformasyon testleridir.

TMA agrega karışımının tasarım gradasyonu ve tolerans sınırları incelendiğinde, KTŞ (2013) ile birlikte Tip-1 gradasyonu Tip-1A ve Tip-1B olarak ikiye ayrılmıştır. Bu ayrım, farklı bölgesel malzeme özelliklerine ve teknik gereksinimlere göre karışım dayanıklılığını artırmak ve kaliteyi standartlaştırmak amacı taşımaktadır. Tip-1A için magmatik kayaç kullanımı zorunlu tutulmuş ve daha yüksek performanslı, uzun ömürlü yollar için önerilmiştir. Tip-1B ise magmatik kayaç bulunamayan veya temin zorluğu olan bölgeler için bir alternatif olarak sunulmuştur. KTŞ (2023) düzenlemesiyle, Tip-1B karışımında magmatik kayaçsız kullanım için idare onayı kaldırılmış ve kalite gereksinimleri sıkılaştırılmıştır. Böylece Tip-1B karışımları için de kalite standardı yükseltilmiş ve tolerans aralığı daraltılmıştır.

TMA’da kullanılan kaba agregaya ilişkin şartname gereklilikleri, yıllar içinde yapılan değişikliklerle, agreganın aşınma ve dayanıklılık performansı daha hassas bir düzeyde belirlenmesi amaçlanmıştır. 2006 şartnamesinde yalnızca Los Angeles parçalanma direnci aranırken, 2013’te Micro-Deval aşınma deneyi eklenmiş ve hava etkilerine dayanıklılık testi için $MgSO_4$ çözeltisi kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, TS EN 933-3 standardına uygun Yassılık İndeksi (FI) de şartnameye dahil edilmiştir. 2023 düzenlemesiyle, FI limiti %15 olarak güncellenmiştir.

KTŞ (2006)’da, ince agregaya yönelik temel kriterler plastisite indeksi ve organik madde deneyleriyle sınırlı iken; 2013 yılında yapılan düzenlemelerle, TS EN 1097-6 standardına uygun su emme ve TS EN 933-9 standardına göre metilen mavisi testleri de şartnameye dâhil edilmiştir. 2023 düzenlemesi ile metilen mavisi testine ilişkin “öğütülmüş magmatik agrega” ibaresi kaldırılmış ve böylece tüm ince agrega türlerinin aynı test prosedürüne tabi tutulması sağlanmıştır. Metilen mavisi test değerinin, magmatik kayaçlar için $\leq 3,5$ ve diğer kayaç türleri için $\leq 2,0$ metilen mavisi limit değerleri belirlenmiştir.

Tablo 5.7: Asfalt Betonu Dizayn Kriterleri

Özellikler	Binder		Aşınma TİP-1, TİP-2		Aşınma TİP-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
Boşluk, %	4	6	3	5	5	12	TS EN 12697-8
Asfaltla Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	-	-	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk, (VMA) %	13	15	14	16	-	-	TS EN 12697-8
Akma, mm (10 ⁻² in)	2(8)	4(16)	2(8)	4(16)	2(8)	4(16)	TS EN 12697-34 ASTM D 6927
Filler/Bitüm Oranı	-	1,4	-	1,5			
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	4,0	7,0	5,0	8,0	TS EN 12697-1 AASHTO T 164
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oran, min. %	80		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		5		
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C’de 10 cm kalınlığında numune), maks. %	-		8		-		TS EN 12697-22 (Büyük Ebatlı cihazla: LCPC)
Tekerlek İzinde Oturma (10.000 devirde,(20.000 geçişte), 60°C’de 5 cm kalınlığında numune),(RD _{ort}) maks. %	-		4,5		-		TS EN 12697-22 (Küçük Ebatlı cihazla: HWT, Metot B, Havada)
Tekerlek İzinde Oturma (3.000 devirde, 60 °C’de 5 cm kalınlığında numune), maks. %	-		-		7		TS EN 12697-22 (Büyük Ebatlı cihazla: LCPC)

2006 ve 2023 teknik şartnameleri arasında mineral filler malzemesi sınır değerler açısından herhangi bir değişiklik bulunmamaktadır. 2006 şartnamesinde yer alan organik madde renk skalası ve organik madde % kayıp testlerinin, malzeme tedarikini gereksiz şekilde kısıtladığı gerekçesiyle 2023 şartnamesinden çıkarıldığı görülmektedir. Ayrıca, 2013 yılında yapılan düzenleme plastisite indeksi için TS 1900-1 standardını değiştirmiş; 2023 güncellemesiyle bu testin artık TS EN ISO 17892-1, AASHTO T 89 veya AASHTO T 90 standartlarından biriyle yapılabileceği belirtilmiştir (Orhan, 2014; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2006; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013; Karayolları Genel Müdürlüğü, 2023).

KTŞ (2023), Superpave tasarım metodunun kullanımına da olanak tanımaktadır. TMA karışımların stabilite, dayanıklılık ve performans hedeflerini sağlamak için TMA tasarım kriterleri incelendiğinde, KTŞ (2013)'de şartnameye TMA binder tabakasının eklendiği ve bu tabaka için ayrı gradasyon limitlerinin belirlendiği görülmektedir.

Ayrıca, önceki uygulamalarda yer alan Fransız NF P 98-253-1 deney standardı, TS EN 12697-48 standardı ile değiştirilmiştir. 2023 yılı düzenlemeleriyle birlikte, TS EN 12697-22 standardına göre tekerlek izinde oturma testi ve AASHTO T 283 standardına göre suya dayanıklılık testi şartnameye dâhil edilmiştir. Bunun yanında, Superpave tasarım metodunun kullanılması halinde, tüm süreçlerin ayrıntılı olarak raporlanması zorunlu hale getirilmiştir.

Bunun yanı sıra, kaplamanın suya karşı dayanıklılığını ölçmek amacıyla AASHTO T 283 standardına göre İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) deneyleri şartnameye eklenmiştir. Her bir testte alınan numuneler, KTŞ'de yer alan İÇM kriterlerine uygunluk açısından değerlendirilir. Bu düzenleme, suyun neden olduğu bozulmaları azaltarak yol ömrünü uzatmayı ve daha dayanıklı yollar inşa etmeyi hedeflemektedir.

Tablo 5.8’de TMA için kaba agregâ özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.8: Kaba Agregâ Özellikleri(TMA)

Deney	Şartname Limitleri ^c	Deney Standardı
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	$\leq 25 (LA_{25})$	TS EN 1097-2 ^a AASHTO T 96
Aşınma Direnci (Micro-Deval) ^b , % Kayıp	$\leq 20 (M_{dc20})$	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %	$\leq 14 (MS_{14})$	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi, %	≤ 25	BS 812
	$\leq 15 (FI_{15})$	TS EN 933-3 ^a
Cilalanma Değeri, %	$\geq 50 (PSV_{so})$ $> 40 (PSV_{so})$ binder için	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 saat 60 °C Suda Bekletmeden Sonra)	$> 60^d$	Kısım 403 EK-A
Su Emme, %	$< 2,0 (WA_{24,0})$	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufalanabilir 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 5.9’da TMA dizayn kriterleri verilmiştir.

Tablo 5.9: TMA Dizayn Kriterleri

Özellikler		Şartname Limitleri		Deney Standardı
		TMA Aşınma	TMA Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı		50	50	TS EN 12697-30 AASHTO T 699
Hava Boşlukları, (%)		2 - 4	3 - 4	TS EN 12697-8
Sıcak iklim Bölgelerinde Hava Boşlukları, (%)		3 - 4		
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) Oram, min. %		80	80	AASHTO T 283
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, 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),(RD _{ort}) 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	
Behr Metodu İle Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks.		0,3	0,3	TS EN 12697-18 EK-A

6. TÜRKİYE’DEKİ BSK TASARIM SÜRECİNİN DÜNYADAKİ GELİŞMELER ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

Asfalt karışım tasarımının temel amacı, belirli proje koşulları (trafik hacmi, taşıt hızı ve iklim özellikleri gibi) doğrultusunda, kalıcı deformasyon ve çatlama gibi yaygın hasar türlerine karşı yeterli performans gösterebilecek uygun nitelikte ve oranda malzeme (agrega ve bitümlü bağlayıcı) kombinasyonunu belirlemektir. Bu çerçevede "proje koşullarına uygun performans", yalnızca teknik yeterliliği değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliği de kapsamakta; dolayısıyla maliyet unsuru da dikkate alınmalıdır. Performansa dayalı testlerin yaygın biçimde benimsenmesinden önce, çoğu uygulayıcı kurum, karışımın mekanik dayanımı yerine hacimsel özelliklerine dayalı vekil performans göstergelerini esas almayı sürdürmektedir.

Asfalt karışım tasarımı zamanla, reçeteye dayalı ve ampirik yöntemlerden performans odaklı modellere doğru önemli evrimler geçirmiştir. Ancak hem geleneksel hem de Superpave sisteminin sınırlılıkları, mevcut ve gelecekteki altyapı ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına yenilikçi çözümlere duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Hveem ve Marshall yöntemleri, özellikle karışımın hacimsel parametreleri ile stabilitesi konusunda dönemi için kıymetli veriler sağlamış; ancak günümüzün yoğun trafik yükleri ve değişken çevresel etkileri karşısında yetersiz kalmıştır.

1993 yılında geliştirilen Superpave sistemi, performansa dayalı bağlayıcı özelliklerinin yanı sıra gelişmiş sıkıştırma teknolojileri ile asfalt karışım tasarımında önemli ilerlemeler sunmuştur. Her ne kadar ideal bir sistem olmasa da, önceki yöntemlerle kıyaslandığında pek çok üstünlük barındırmakta ve halen bazı iyileştirme çalışmalarıyla geliştirilmeye devam etmektedir. Superpave yaklaşımı, sektörü 1950’lerin viskoziteye dayalı ölçüm sistemlerinden ve tokmakla temsil edilen sıkıştırma yöntemlerinden, açılı döner sıkıştırıcı (gyratory compactor) gibi daha çağdaş teknolojilere taşıyarak önemli bir dönüşüm gerçekleştirmiştir.

Başlangıçta farklı trafik seviyelerine göre üç düzeyde tasarlanan Superpave sisteminin, Düzey 2 ve Düzey 3 bileşenlerinde yer alan performans testleri uygulamadaki zorluklar nedeniyle yaygınlık kazanmamış; tasarım süreci, büyük ölçüde yalnızca hacimsel parametrelere dayanan

Düzey 1 ile sınırlı kalmıştır. Bu durum, asfalt karışım tasarımında gerçek saha koşullarını daha doğru temsil edebilecek, aynı zamanda uygulanabilirliği yüksek performans testlerine dayalı yeni yaklaşımların gerekliliğini doğurmuştur.

Bu kapsamda geliştirilen BMD, hem yenilikçi malzeme kullanımına olanak tanınması hem de sahada daha iyi performans gösterecek karışımların geliştirilmesini sağlaması açısından önemli bir metodoloji olarak öne çıkmaktadır. BMD yöntemi, karışımın hem tekerlek izi oluşumuna hem de çatlamaya karşı dayanımını dengeleyerek, daha kapsamlı bir performans değerlendirmesi yapılmasını mümkün kılar. Geleneksel yaklaşımlar ağırlıklı olarak hacimsel özellikler temelinde tasarım yaparken, BMD yöntemi karışımın saha koşullarında göstereceği uzun vadeli performansa odaklanarak, bakım maliyetlerini azaltmayı ve genel altyapı maliyetlerinde tasarruf sağlamayı hedefler. Bu yönüyle, daha ekonomik ve sürdürülebilir bir karışım tasarımı anlayışını temsil etmektedir.

Türkiye’de ise BSK tasarımına yönelik şartnamelerin, daha dayanıklı, uzun ömürlü ve çevresel açıdan sürdürülebilir asfalt kaplamaların elde edilmesini teminen güncellenme çabası sürmektedir. Güncellenen KTŞ’ler incelendiğinde, performansa dayalı bazı göstergelerin karışım tasarım süreçlerine entegrasyonu, yeni nesil bağlayıcıların teşvik edilmesi ve geri dönüştürülmüş ya da yenilenebilir kaynaklı malzemelerin kullanımına yönelik uygulamaların yaygınlaştırılmasına yönelik çabalar görülmektedir. Bu bölümde, 2023’te yürürlüğe giren KTŞ’deki BSK tasarım süreçleri ile ilgili mevcut durum değerlendirilerek dünyadaki gelişmeler çerçevesinde iyileştirme önerileri sunulmuştur.

6.1 BSK Tasarım Süreçleri ve Revizyon Gereklilikleri

KTŞ (2023) ile getirilen düzenlemeler kapsamında, asfalt beton karışım tasarımının Marshall Yöntemi ve Superpave Hacimsel Karışım Tasarım Yöntemi (ASHTO M 323, AASHTO R 35) kullanılarak gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Fakat, hali hazırdaki uygulamalarda Marshall yönteminin yaygın kullanımı ve şartnamenin BSK ilgili tasarım kriterlerinin bu yöntemle göre hazırlandığı görülmektedir. Superpave Hacimsel Karışım Tasarım Yöntemine vurgu yapılmakla birlikte, henüz uygulamada kayda değer bir gelişme sağlanamadığı anlaşılmaktadır. Bunda, mevcut laboratuvar altyapısının yenilenmesi ve yeni ekipman eğitimleri için katlanması gerekli maliyetler ve Avrupa Standartlarında (EN) Marshall Yönteminin yer alması etkili olmaktadır.

6.1.1 Numune Hazırlama

Sıkışmış numuneler üzerinde her iki yöntemde de hacimsel tasarım yapılmakla birlikte, sıkıştırma yöntemi açısından farklılık göstermektedir. Karışım tasarım numunelerinin hazırlanması, karışımın saha performansını temsil etmesi açısından büyük önem taşır. Marshall Yönteminde kullanılan darbe kompaktörü, sınırlı saha temsiliyetine sahiptir. Bu yöntem, özellikle büyük dane boyutlu ve düşük sıcaklıkta üretilecek karışımlar için yetersiz kalmaktadır.

Superpave Hacimsel Tasarım Yöntemi, sahada silindirlerle yapılan sıkıştırmayı çok daha iyi temsil eden yağurmalı sıkıştırıcı kullanır. Bu sistemde, $1,25^\circ$ açılı ile dönme hareketi yapan mold içerisindeki karışıma 600 kPa sabit basınç uygulanır. Farklı trafik yüklerine göre $N_{baş}$, N_{tas} ve N_{max} dönme sayılarında sıkıştırma seviyeleri uygulanır. Karışımın maruz kaldığı yağurma etkisi ile mold içindeki agregaların homojen bir şekilde yerleşmesi sağlanır. Bu bağlamda, yağurmalı kompaktör ile hazırlanan karışım numunelerinden elde edilen hacimsel analiz parametreleri daha güvenilir tasarımları netice verecektir. Ayrıca, diğer performans testleri için gerekli karışım numunelerinin hazırlanmasında da yağurmalı kompaktörün kullanılması büyük önem arz etmektedir.

Dolayısıyla, Türkiye’de BSK tasarımında ve üretim kontrol sürecinde Superpave Hacimsel Tasarım Yöntemine geçişin hızlandırılması sağlanmalı ve şartnamelerde zorunlu hale getirilmelidir.

6.1.2 Hacim Analizleri

Asfalt karışım tasarım yöntemlerinin gelişimi incelendiğinde, çoğu yöntem sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan hacimsel analizleri içermektedir. Superpave yönteminde düşük trafikli yollar için sadece hacimsel tasarım (Düzey 1) yapılmakta, orta ve yüksek trafik hacimli yollar içinde ilk aşamayı oluşturmaktadır. BMD yönteminin performans odaklı olan Yaklaşım D haricindeki Yaklaşımları (A, B ve C) hacimsel analizle ilişkilidir. Dolayısıyla, hacimsel analizleri içeren bir karışım tasarım yönteminin benimsenmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir. Çünkü bu hacimsel analizler, tasarım ve üretim kontrolleri için temel kıstasları sunmaktadır. Elbetteki hacimsel tasarım aşaması, performansın belirlenmesine yönelik testlerle desteklenmelidir.

6.1.3 Bitümlü Bağlayıcı

Superpave yöntemi, bitümlü bağlayıcı karakterizasyonu ve BSK tasarımı için bitüm seçimi açısından performans esaslı bir sistem geliştirmiştir. Asfalt kaplamaların performansında önemli bir bileşen olan bitümlü bağlayıcının seçiminde PG sistemi daha dayanıklı ve uzun ömürlü asfalt karışım tasarımlarına olanak sağlamıştır. Türkiye’de ilgili otariteler tarafından özellikle Superpave yönteminin bitüm sınıflandırma sistemi hakkındaki gelişmeler yakından takip edilmiştir. Bu sistemin adaptasyon süreci 2012’de başlamış, bitüm sınıfı seçim haritaları ve performans test cihazlarının bazı bölgelerde kullanıma girmesiyle önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu konudaki çalışmalar, KTŞ’ye entegre edilerek ülke genelinde kalite kontrol ve standardizasyon açısından zemin hazırlamaktadır.

Türkiye’de KGM tarafından 2012 yılında yayımlanan “Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları”, bu alanda önemli bir adımdır. Ancak bu haritalar trafik yükü faktörlerini sınırlı düzeyde kapsamakta ve PG sistemiyle bütünleşik bir yapıya sahip değildir. Dolayısıyla, KGM’nin mevcut bitüm sınıfı haritalarının, Superpave’in trafik hacmi ve trafik hızı temelli revizyon prensipleri ile güncellenmesi önerilir.

Türkiye'deki dört rafineriden temin edilen farklı sınıflardaki bitümler, KGM laboratuvarlarında Superpave yöntemine göre test edilerek PG sınıfları belirlenmiş, böylece uygun bağlayıcı seçimi ve gerekirse modifikasyon ihtiyacı netleştirilmiştir. KTŞ (2023)’teki ilgili bölümlerde verilen bitüm sınıflarının ve modifiye bitüm tablolarının da geleneksel bitüm özelliklerine göre düzenlendiği görülmektedir. Dolayısıyla, penetrasyon esaslı bitüm sınıflandırmadan Superpave PG’de tamamıyla geçilemediği görülmektedir.

Bu sisteme bütünüyle geçiş sağlanmasında, rafinerilerden elde edilen bitüm üretim süreçlerinin, ülke koşulları göz önünde bulundurularak PG sistemine göre düzenlenmesine ve şantiyelerde yapılan üretim kontrol süreçlerine entegrasyonuna yönelik adımların atılması gerekmektedir.

6.1.4 Agrega

KTŞ (2023)’de BSK’larda kullanılan agrega özellikleri büyük oranda TS EN standartlarına göre belirlenmektedir. KTŞ’deki güncellemelerle birlikte, kalite kontrol kriterleri ve limit değerlerinde bazı revizyonlar yapılmakla birlikte mevcut sistem korunmuştur:

- Agregâ özelliklerine ait limit değerler trafik değerine göre farklılaşmaktadır. Bu daha fazla kaynak alternatifi, hatta geri dönüşüm agregalarının kullanımına olanak sağlanması açısından önemlidir.
- Superpave yönteminde, agregâ gradasyonu geleneksel yarı logaritmik gradasyon grafiklerinden farklı olarak 0.45 üstel eğrisi esas alınarak oluşturulan özel bir grafikte belirlenir. Bu grafikte yatay eksen de elek boyutları 0.45 üssüyle, düşey eksen de geçen yüzde yer alır. Grafiğin temel özelliği, maksimum yoğunluk gradasyonunu tanımlayan doğruyu içermesidir; bu doğru, teorik olarak en yoğun (en az boşluklu) gradasyonu temsil eder.
- Superpave yönteminde maksimum ve nominal maksimum agregâ boyutu kavramları tanımlanarak gradasyon tasarımına daha sistematik bir yaklaşım getirilmiştir. Agregâ dağılımının değerlendirilmesinde kullanılan 0.45 üstel eğrisi üzerinde, kontrol noktaları ve sınırlı (yasaklanmış) bölge gibi ilave kavramlar tanımlanmıştır. Bu kavramlar, uygun gradasyonun seçilmesini yönlendirmek ve performans açısından istenmeyen agregâ dağılımlarını önlemek amacıyla kullanılmaktadır.
- KTŞ’de BSK karışımlar (Bitümlü Temel, Binder, Aşınma) için standart tip agregâ karışım gradasyon limitleri belirlenmiştir. Superpave sisteminde ise belirtilen nominal agregâ boyutları için kontrol noktaları için limit değerler oluşturulmuştur. BSK tasarımları için üç farklı deneme gradasyonu oluşturulması esastır.

Agregâ gradasyon sisteminin KTŞ’ne entegre edilmesi sağlanmalıdır. KTŞ’de yer alan gradasyon limitlerinin Superpave agregâ gradasyon sistemi çerçevesinde değerlendirilerek gerekli revizyonlar yapılmalıdır.

6.1.5 Performans Kriterleri

Performans esaslı testlerin en büyük avantajı, karışımı oluşturan malzemelerin özelliklerinden ziyade, elde edilen asfalt karışımının gerçek saha koşullarındaki davranışına odaklanmasıdır. Bu sayede, sıcaklık dalgalanmaları ve yoğun trafik gibi zorlu çevresel koşullara karşı daha dayanıklı ve uzun ömürlü kaplamaların tasarlanması mümkün olmaktadır. Geleneksel yöntemler olan Marshall ve benzeri deneyler, kolay uygulanabilirlik ve düşük maliyet açısından avantaj sağlasa da, günümüzün gelişmiş yol mühendisliği beklentilerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır.

KTŞ (2023)’de BSK tasarım kriterleri incelendiğinde Marshall tasarım yöntemi ile belirlenen

hacimsel parametreler, Marshall stabilite ve akma kriterleri yer almaktadır. KTŞ'lerde yapılan güncellemelerle karışımların trafik yükleri ve çevresel etkiler altındaki performansının belirlenmesine yönelik olarak;

- LCPC ve HWTT cihazları ile gerçekleştirilen tekerlek izi direnci test kriterleri,
- Su hasarı direncinin belirlenmesine yönelik İndirekt Çekme Mukavemeti ve İndirekt Çekme Oranı test kriterleri eklenmiştir.

Superpave sisteminin temelini oluşturan performans temelli testler, Avrupa'daki EN 12697 serisi standartlarla da büyük ölçüde paralellik göstermektedir. Avrupa normlarına uyum süreçleri ile Bitümlü Karışımlarla ilgili hususlar TS EN 13108 ve TS EN 12697 standartları ile son halini almıştır. Bu standartlar, önceki bölümlerde bahsedildiği üzere bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon ve çatlaklara karşı direncinin belirlenmesine yönelik test yöntemlerini kapsamaktadır. Bu test sistemlerinin bazıları KGM Merkezi Üstyapı ARGE Laboratuvarı envanterinde bulunmaktadır. Fakat, yukarıda belirtilen tekerlek izi testleri haricinde bu test yöntemlerinin BSK tasarımlarına entegrasyonunun sağlanamadığı görülmektedir. KTŞ halen büyük ölçüde ampirik temelli yaklaşımlara dayanmakta ve tasarım sürecinde Marshall yöntemi esas alınmaktadır. Özellikle tasarım kriterleri içerisinde çatlama direnci performansının belirlenmesine yönelik hiçbir deney yöntemi yer almamaktadır. Bu durum, TS EN 12697 ile belirtilen performans esaslı deney yöntemlerinin test ve analiz süreçlerinde karşılaşılan zorluklara bağlanabilir.

6.1.6 Trafik Miktarı

BSK kaplamalarının saha performansı, yalnızca kullanılan malzemenin kalitesi ve yapım yöntemlerine değil, aynı zamanda yolun karşılaşıacağı trafik yükü ve hızına da doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, karışım tasarımında trafik yüküne göre sınıflandırma yapılması, kaplamanın hizmet süresi boyunca beklenen performansı sunabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Superpave tasarım sistemi, trafik parametrelerini karışım tasarımının temel bileşenlerinden biri olarak ele alır. Bu sistemde: tasarımda kullanılan trafik hacmi genellikle 20 yıllık ESAL cinsinden tanımlanır. Tablo 6.1'deki sınıflandırmaya göre PG sisteminde bitümün derecesi belirlenmektedir. Ayrıca, trafik hızının çok düşük olduğu (<20 km/s) ya da araçların sıkça durduğu (örneğin trafik lambaları veya yokuşta bekleme gibi) durumlarda, karışımın yüksek

sıcaklıkta deformasyona karşı dayanımını artırmak amacıyla bitümün yüksek sıcaklık PG derecesi bir veya iki kademe yükseltilmektedir.

Tablo 6.1: Superpave sisteminde trafiğe bağlı sınıflandırma

Trafik Sınıfı	ESAL (Eşdeğer Dingil Yüğü)
Çok Hafif	< 0.3 milyon
Hafif	0.3 – 3 milyon
Orta	3 – 10 milyon
Ağır	10 – 30 milyon
Çok Ağır	> 30 milyon

Türkiye’de karışım tasarım sürecinde trafik etkisi kısmen dikkate alınmaktadır. Özellikle Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) 2012 yılında yayımladığı “Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları”, bölgesel sıcaklık verileriyle birlikte trafik bilgilerini de gözeterek uygun bitüm sınıfının belirlenmesini hedeflemektedir. Ancak bu haritalarda trafik yükü sınıflandırması oldukça sınırlı kalmakta; trafik hızı göre PG sınıfı düzenlemesi dikkate alınsa da ESAL değeri gibi bir parametre doğrudan değerlendirme ölçütü olarak kullanılmamaktadır. Ayrıca, agrega özelliklerine ait limit değerler trafik değerine göre farklılaşmaktadır. Böylelikle, daha fazla kaynak alternatifi, hatta geri dönüşüm agregalarının kullanımına olanak sağlanmaktadır. Tablo 6.2’deki gibi trafik yüküne göre uygulanacak farklı tasarım sıkıştırma sayıları verildi.

Tablo 6.2: Superpave tasarımında uygulanacak sıkıştırma sayıları

Trafik Seviyesi	N _{ini} (başlangıç)	N _{des} (tasarım)	N _{max} (maksimum)
< 0.3 milyon ESAL	6	50	75
3–10 milyon ESAL	8	100	160
> 30 milyon ESAL	10	125	205

Avrupa’da asfalt karışımı tasarımı genellikle EN 13108 ve EN 12697 standartlarına göre yapılmakta olup, trafik sınıflandırması doğrudan değil, deformasyon türü ve trafik yoğunluğuyla ilişkili olarak dolaylı şekilde dikkate alınmaktadır. EN 12697-22 (tekerlek izi), EN 12697-24 (yorulma direnci) ve EN 12697-33 (laboratuvar sıkıştırma) gibi testlerle trafik yükü ve performans ilişkisi değerlendirilir. Bazı ülkeler (örneğin Almanya, Fransa), trafik sınıflarını tanımlayarak karışım tasarımına entegre etmiş ve bu sınıflara özel karışım türleri geliştirmiştir. Aynı zamanda, Fransa’da asfalt karışımı tasarımı, Tablo 3.2’de görüleceği gibi trafik miktarına göre 0’dan 4’e kadar seviyelere ayrılmış sistematik bir yaklaşıma

dayanmaktadır. EN 13108-1 standardıyla uyumlu olan bu sistemde, Seviye 0–2 ampirik, Seviye 3–4 ise temel mühendislik yaklaşımına dayalıdır. Böylece trafik ve çevresel koşullara uygun, performansa yönelik karışım tasarımı sağlanmaktadır. Superpave yönteminde tanımlanan tasarım düzeyleri de aynı mantıkla tanımlanmıştır.

Türkiye’de, ağır taşıt trafiğinin günlük 1000 aracın üzerine çıkması durumunda BSK uygulaması zorunlu kılınmıştır. KTŞ’de trafik yüküne göre karışım tasarım sürecinin sistematik olarak optimize edilmesine yönelik bir yaklaşım benimsenmemiştir. KGM, İl Özel İdareleri ve Belediyeler gibi uygulayıcı kurumların, trafik yükü ölçümleri ve öngörülerini doğrultusunda uygun karışım tasarım yöntemlerini kullanabileceği dinamik sistemler geliştirilmelidir.

6.2 BMD Yöntemi Kapsamındaki Değerlendirmeler

Asfalt karışımlarının performansını saha koşullarında daha doğru şekilde değerlendirmeyi amaçlayan BMD yöntemi, hacimsel kriterlere göre yapılan tasarımlardan gerçek saha bozulmalarını simüle eden performans testleri esas alınarak gerçekleştirilen tasarım yaklaşımlarını kapsamaktadır. BMD yöntemi, geleneksel tasarım yaklaşımlarındaki bazı adımları muhafaza etse de, performans testlerini doğrudan tasarım sürecine entegre etmesiyle ayrılmaktadır. Bu entegrasyon sayesinde karışımlar, yalnızca hacimsel parametrelere göre değil, gerçek servis koşullarında gösterecekleri performansa göre de analiz edilip iyileştirilebilmektedir. AASHTO PP 105-20 standardında, karışım tasarımında performans testlerinin entegrasyon düzeyi ve hacimsel kriterlere bağlılık derecesine göre tanımlanan dört BMD yaklaşımı (A–D) tanımlanmaktadır.

- Yaklaşım A: Mevcut hacimsel standartlara tam uyum ve ardından performans testleri ile doğrulama (en tutucu, en az yenilikçi).
- Yaklaşım B: Hacimsel uyuma bağlı kalmakla birlikte performansa dayalı bitüm içeriği optimizasyonuna izin verir.
- Yaklaşım C: Hacimsel kriterlerde esneklik sağlayarak performansa öncelik verir (orta düzey yenilik potansiyeli).
- Yaklaşım D: Yalnızca performans testlerine dayalı, tamamen yenilik odaklı ve hacimsel sınırlamaları olmayan yaklaşımdır (en yenilikçi).

BMD yöntemleri, karışım tasarımına saha performansını esas alarak esneklik ve gerçekçilik

kazandırmakta, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve ekonomik malzeme kullanımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

BMD yöntemi, henüz evrensel düzeyde yaygınlık kazanmamış olmakla birlikte, özellikle ABD’de çeşitli eyaletlerde farklı uygulama yaklaşımlarıyla pilot düzeyde hayata geçirilmeye başlanmıştır. Illinois, Louisiana, New Jersey, Texas ve Virginia gibi eyaletler, performans testlerini içeren teknik şartnameler geliştirirken; birçok eyalet de (örneğin Florida, Georgia, Ohio vb.) BMD’yi araştırma ve tasarım süreçlerine entegre etmeye yönelik çalışmalar yürütmektedir. Bu eyaletlerdeki uygulamalar incelendiğinde Yaklaşım A’nın en çok tercih edilen yaklaşım olduğu görülmektedir. ABD dışında ise, başta İtalya olmak üzere İngiltere, Almanya ve Hollanda gibi Avrupa ülkelerinde BMD’ye yönelik akademik ve kurumsal ilgi artmakta; bu ülkelerde yöntemin ulusal şartlara uygunluğu araştırılmaktadır.

KTŞ’nin yapılandırılmasında AASHTO standartları esas alındığından ve Avrupa normları uyum süreçleri doğrultusunda ilgili standartlar şekillendiğinden ülkemizde BSK tasarımlarında halen Marshall yöntemi esas alınmaktadır. Bununla beraber, tekerlek izi ve su hasarı gibi belirlenmesine yönelik bazı performans deneyleri şartnamede yer almaktadır. Dolayısıyla, bu tasarım süreci mevcut haliyle BMD’nin Yaklaşım A tanıma kısmen uymaktadır. Fakat, KTŞ’de çatlama direncine yönelik performans testleri ve ilgili kriterler yer almamaktadır. Tablo 3.18’de belirtilen BMD performans esaslı test yöntemleri, eyaletlerdeki yaygın kullanımları ve Avrupa şartnameleri uyumu çerçevesinde değerlendirilerek aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

- KTŞ’de çatlama direncinin belirlenmesine yönelik herhangi bir test kriterinin olmaması eksiklik olarak görülmektedir. BMD yönteminde farklı çatlak oluşum mekanizmalarının tespitinde kullanılan deneyler incelendiğinde,
 - I-FIT testi, tüm çatlama mekanizmaların tahmininde etkili, ekonomik ve güvenilir bir yöntemdir. Deneyden elde edilen Esneklik İndeksi (FI) ile performans öngörüsü sunmaktadır. Laboratuvar ortamında kolay uygulanabilirliği ve pratik geri bildirim sağlaması sayesinde karışım tasarımında ve kalite güvencesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Dolayısıyla, bu testin KTŞ’ye entegrasyonu için öncelik verilmelidir.
 - BMD performans testleri arasında düşük maliyetli, hızlı ve pratik uygulanabilirliği sayesinde asfalt karışımlarının çatlama direncini değerlendirmede öne çıkan diğer bir deney IDEAL-CT testidir. Özellikle Alabama, Missouri, Virginia ve Kentucky

gibi eyaletlerde yaygın olarak kullanılmakta olup, mevcut laboratuvar altyapısına küçük düzenlemelerle entegre edilebilmektedir. Sadece ara sıcaklık çatlama dayanımını ölçmesi bir sınırlılık oluşturmakla birlikte, genel performans öngörüsü açısından etkilidir. Aynı deney düzeneği ile kalıcı deformasyon direnci testti olan IDEAL-RT gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla, IDEAL-CT deneyine entegrasyon için öncelik verilmesi önerilmektedir.

- SCB testi, düşük ve orta sıcaklıklarda çatlamalara karşı asfalt karışımlarının dayanımını değerlendirmede etkili ve pratik bir yöntemdir. Kırılma dayanımı ve enerji salınımı gibi kritik parametreleri sunmasıyla tasarım sürecinde değerli bilgiler sağlar. Ancak, sınırlı saha temsil yeteneği nedeniyle, testin saha verileriyle desteklenerek ve diğer testlerle birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir. TS EN 12697-44 standardıyla örtüşen SCB testi, çatlama direnci kriteri olarak KTŞ’de yer almalıdır.
- Ayrıca BMD performans testleri arasında, termal ve yansıma çatlak analizleri için DCT ve OT testleride gerçekleştirilmektedir. Bu testlerin özellikle numune hazırlığı test sıcaklığı ve deney prosedürlerinin titizlikle yürütülmesi gerekmektedir.
- Düşük sıcaklık çatlama direnci için Dolaylı Çekme Deney sisteminde uygulanan Sünme Uyumluluğu ve Dayanım Testi ile N_{Flex} Faktörü testi görece daha basit deneylerdir.
- Kiriş Eğilme Yorulma Testi ve Doğrudan Çekme Döngüsel Yorulma Testi tekrarlı yükler altındaki yorulma çatlama sürecinin belirlenmesi uygulanmaktadır. Bu testler, Avrupa normları çerçevesinde sırasıyla TS EN 12697-24 ve TS EN 12697-26 standartları kapsamına alınmıştır. Testler saha ve yükleme koşullarını daha iyi temsil eden test sistemleri yüksek maliyet, uzun test süreci ve daha kompleks veri analizlerini gerektirmektedir.
- BMD yönteminde kalıcı deformasyonun belirlenmesi için yaygın olarak, HWTT ve APA testleri kullanılmaktadır. KTŞ (2023)’de tasarım kriterleri arasında HWTT testti (TS EN 12697-22) yer almaktadır. BMD kapsamında kalıcı deformasyonun belirlenmesinde HT-IDT ve IDEAL-RT testleride uygulanmaktadır. Bu testler HWTT’ testtine göre ekipman maliyeti ve test süresi açısından daha avantajlı olduğundan KTŞ’ye entegrasyonu değerlendirilmelidir. Ayrıca, FN ve SSR testleri için yüksek maliyet ve karmaşık test süreci söz konusu olsada değerlendirilmelidir.

- Nem hasarı direncinin belirlenmesi için BMD’de belirtilen ve yaygın olarak kullanılan TSR testi (AASHTO T 283), KTŞ’de yer almaktadır. BMD’de bu performans kriteri olarak koşullandırılmış numuneler üzerinde HWTT testi’de önerilmektedir. Dolayısıyla, TSR test sonuçlarının, HWTT testi ile desteklenmesi daha güvenilir tasarımları netice verecektir.

Yukarıda belirtilen BMD performans testlerinden bazıları Asfalt Karışımı Performans Test Cihazı (Asphalt Mixture Performance Tester-AMPT) test sistemi ile gerçekleştirilmektedir. AMPT cihazında farklı test modülleri (SCB, OT, DTCFT, SSR, FN vd.) ile asfalt karışımların hem elastiklik (çatlama direnci) hem de kalıcı deformasyon (tekerlek izi) davranışları belirlenebilmektedir. Tekrarlı trafik yükleri ve çevresel koşulların ileri düzeyde simüle edildiği testlerden elde edilen veriler, saha performansı ile doğrudan ilişkilendirilebilmektedir. Bu sistem, Superpave sisteminde geliştirilen performans esaslı bazı karışım deneylerini içerdüğinden, hassas deneysel süreçleri ve veri analizlerini gerektirmektedir.

BMD’yi sadece geleneksel hacimsel tasarımı merkezinde tutan Yaklaşım A olarak düşünmemek, yenilik odaklı performans esaslı tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi önemlidir. Bu sayede, saha performansına dayalı daha esnek ve gerçekçi bir yaklaşım benimsenerek hem sürdürülebilirliğe katkı sağlanacak hem de malzeme kullanımında daha ekonomik alternatifler geliştirilebilecektir.

6.3 Performans Esaslı Tasarım Yaklaşımlarının Uygulama Altyapısı ve Kurumsal Hazırlık Açısından Değerlendirilmesi

Performans esaslı asfalt karışım tasarımı sistemlerinin başarıyla uygulanabilmesi, yalnızca teknik bilgilerin mevcut olmasıyla değil, aynı zamanda bu sistemlerin desteklenmesini sağlayacak altyapı, kurumsal yapı ve insan kaynağı yeterliliği ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle Türkiye gibi geniş yol ağına ve farklı iklim bölgelerine sahip ülkelerde, yeni bir sistemin uygulanabilirliği çok boyutlu bir değerlendirme gerektirir. Bu bağlamda, Superpave, BMD ve benzeri sistemlerin entegrasyonu için aşağıdaki ana başlıklar etrafında kapsamlı bir hazırlık süreci yürütülmelidir:

- Pilot Uygulama Projeleri ve Kademeli Geçiş Planlaması:
Performans esaslı sistemlere geçiş, ani ve genel bir değişimle değil; kademeli, kontrollü

ve izlenebilir şekilde gerçekleştirilmelidir. Bu bağlamda; farklı trafik seviyeleri ve iklim bölgelerini temsil eden pilot uygulama projeleri seçilmelidir. Bu projelerde eski yöntem ve performans esaslı tasarımlar paralel olarak uygulanmalı ve performansları izlenmelidir. Bu projelerden elde edilen veriler, şartname güncellemelerine ve sistem iyileştirmelerine girdi olarak kullanılmalıdır. Performans esaslı karışım tasarımı, bağlayıcı ve karışım testlerinin tasarım ve kontrol süreçlerinde yapılmasını gerektirir. Dolayısıyla, bu testler öncelikle konu hakkında proje yürüten üniversite laboratuvarlarına ve ilgili kurumların araştırma merkezlerinin altyapılarına temin edilmelidir. Şartname entegrasyonlarına karar verilen deneylerin KGM bölge bazında yaygınlaştırılmasına çalışılmalıdır.

- Şartname ve mevzuatlarda gerekli düzenlemelerin yapılması:

Türkiye’de güncel KTŞ, Superpave karışım tasarım yönteminin uygulanabileceği vurgulansada, ilgili kısımlar büyük ölçüde ampirik temelli Marshall yöntemi esas alınarak oluşturulmuştur. Dolayısıyla, performans esaslı test ve tasarım yöntemlerinin sektörde yaygınlık kazanmasını önemli ölçüde sınırlamaktadır. KTŞ’de, Superpave esaslı performans tasarım sistemlerine yönelik ayrı ve alternatif bir tasarım bölümü oluşturulmalı, teknik altyapısı açıkça tanımlanmalıdır. Hatta, Marshall yöntemi KTŞ’den çıkarılmalıdır. BMD yönteminde performans testleri ile TS EN 12697 standartları karşılaştırılarak KTŞ’ye entegre edilmelidir. Deney standartları, tasarım kriterlerine, kabul sınırlarına ve yapım ve kontrol aşamaları şartnamede açıklanarak uygulayıcılara yol gösterici bir yapı sağlanmalıdır.

- Teknik personel eğitimi ve sürekli mesleki gelişim sağlanması:

Yeni deney sistemlerinin uygulanabilirliğinin önündeki en önemli engellerden biri de uzman personel eksikliğidir. Superpave ve BMD yöntemlerinden entegre edilecek performans deneylerinin doğru bir şekilde uygulanması ve test sonuçlarının değerlendirilmesi için teorik bilgi ve pratik deneyimli işgücü sağlanmadır. Dolayısıyla, üniversitelerin inşaat mühendisliği bölümlerinde asfalt laboratuvar eğitimlerine performans testleri entegre edilmelidir. KGM, belediyeler, özel sektör ve akademi iş birliğinde mesleki eğitim programları ve hizmet içi eğitimler yürürlüğe konulmalıdır.

- Veri tabanı, yazılım ve sayısal sistem entegrasyonu:

Performans esaslı tasarım sistemleri, geleneksel yöntemlerden farklı olarak, yüksek hacimli saha ve laboratuvar verilerinin dijital ortamda işlenmesini zorunlu kılar. Bu verilerin modelleme yazılımlarına (örneğin Pavement ME Design) entegre edilmesi, hem karışım hem de üstyapı davranışının çok boyutlu değerlendirilmesini mümkün

kılar. Superpave ve BMD gibi performans esaslı yöntemlerin veri altyapısı, servis ömrü boyunca farklı iklim koşulları ve trafik yüklemeleri altında karayolu üstyapısını modelleyen üstyapı yapısal tasarım yazılımları (Örn. Pavement ME Design) ile uyumlu çalışmaktadır. Böylelikle, daha dinamik ve güvenilir üstyapı tasarımlarına olanak sağlamaktadır.

Türkiye açısından öncelikli adım, ülkenin farklı iklim bölgelerine uygun yerli PG sınıflandırma veri tabanlarının geliştirilmesidir. Buna ek olarak, çeşitli trafik yüklemeleri altında elde edilen saha performansına dayalı veriler toplanarak, temsil gücü yüksek referans senaryoları oluşturulmalıdır. Karayolları Genel Müdürlüğü ile üniversiteler arasında kurulacak iş birliği sayesinde, Türkiye'nin özgün iklim, trafik ve performans koşullarını yansıtan yazılım modülleri ya da özel tasarlanmış yazılım paketleri geliştirilmelidir.

Karışım seviyesinde yapılan performans testleri ise karışımın mühendislik özelliklerini doğrudan ortaya koyan daha gelişmiş sistemlerle yürütülmektedir. Bu sistemlerin başında AMPT cihazı gelmektedir. AMPT ile yapılan başlıca testler şunlardır:

- Dinamik Modül Testi (E):* Karışımın farklı sıcaklık ve frekanslarda rijitliğini belirler. Bu değerler, Pavement ME Design gibi yazılımlarda yapısal performans tahmininde kullanılır.
- Akış Numarası (Flow Number): Kalıcı deformasyon eğilimlerini ölçer; tekerlek izi potansiyelinin doğrudan tahmin edilmesini sağlar.
- Çekme-Yorulma Testleri: Tekrarlı yükler altında karışımın çatlama eğilimi analiz edilir.

AMPT cihazı sayesinde karışımların hem elastik hem de kalıcı deformasyon davranışları belirlenebilmekte, bu veriler saha performansı ile doğrudan ilişkilendirilebilmektedir. Örneğin: Türkiye'de özellikle bölgesel iklim verilerinin detaylandırılması, trafik yükü ölçümlerinin hassaslaştırılması ve bu verilere göre PG sınıfı bitüm kullanımı gibi uygulamaların yaygınlaştırılması, performans testlerinin etkinliğini artıracaktır. Ayrıca, üniversite ve araştırma laboratuvarlarının AMPT gibi ileri sistemlerle donatılması, mühendislik tabanlı karışım tasarımlarını yaygınlaştıracaktır. Bu bölüm için aşağıdaki şekilde bir tablo önerilebilir: Türkiye'deki karışım tasarım süreci, Superpave ve BMD prensipleriyle aşamalı olarak güncellenmeli; başlangıçta laboratuvar altyapısı güçlendirilerek pilot uygulamalarla yaygınlaştırma sağlanmalıdır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karayolu ulaşımının giderek artan önemi ve trafik yüklerinin yükselmesi, asfalt karışım tasarımında performans esaslı ve uygulanabilir yöntemlere duyulan ihtiyacı artırmıştır. Superpave gibi gelişmiş yöntemlerin karmaşıklığı ve maliyeti, daha basit ve ekonomik testlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Ülkemizde ise halen ampirik yöntemler kullanılmakla birlikte, performansa dayalı yeni yaklaşımların adaptasyonu için çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında, BSK tasarım yöntemlerindeki gelişmeler ve performans testlerini esas alan BMD tasarım yaklaşımları çerçevesinde Türkiye’de uygulanan tasarım süreçleri değerlendirilmiştir. Ülkemiz koşullarına uygun, ekonomik ve pratik bir performans temelli BSK tasarım yönteminin geliştirilmesine katkı sağlayacak öneriler sunulmuştur.

Geleneksel tasarım yöntemleri (Marshall, Hveem vb.) artan trafik yükleri ve çevresel zorluklar karşısında yetersiz kalmıştır. Bu bağlamda geliştirilen Superpave sistemi, gelişmiş bağlayıcı sınıflandırması ve sıkıştırma teknikleri ile önemli ilerlemeler sağlamış; ancak performans testlerinin zorluğu nedeniyle uygulamada genellikle hacimsel tasarımla sınırlı kalmıştır. Bu durum, saha koşullarını daha doğru yansıtan ve uygulanabilirliği yüksek yeni performans testlerine dayalı yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymuştur. BMD yöntemi, yenilikçi malzemelere açık, saha performansına odaklı ve uzun vadeli dayanımı esas alan bir karışım tasarım yaklaşımı sunarak hem çatlama hem de deformasyona karşı denge sağlar, geleneksel hacimsel yaklaşımlara göre daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler üretir.

KTŞ (2023) ile birlikte Türkiye’de BSK tasarımına yönelik şartnamelerde performansa dayalı göstergelere, yenilikçi bağlayıcılara ve geri dönüştürülmüş malzeme kullanımına yönelik adımlar atılmıştır. Ancak, bu gelişmelerin küresel eğilimlerle uyumlu şekilde ilerleyebilmesi için mevcut şartnamelerin daha kapsamlı ve bütüncül şekilde güncellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. KTŞ (2023), Superpave yöntemine kapı aralasa da, uygulamada hâlen Marshall yöntemi ağırlıktadır. Bunun başlıca nedenlerinin; mevcut altyapı ve personel uyumsuzluğu, yeni ekipman gereksinimi ile artan maliyetler ve Marshall yönteminin halen EN standartlarında yer almasıdır.

Marshall ve Superpave yöntemleri her ne kadar hacimsel tasarım yapsa da sıkıştırma yöntemleri açısından farklılık göstermektedir. Marshall yöntemi, darbe kompaktörü ile sınırlı

saha temsiliyeti sunarken, Superpave yöntemi saha sıkıştırmasını daha iyi temsil eden yoğunmalı kompaktörü kullanır. Bu sayede daha güvenilir ve gerçekçi hacimsel tasarım verileri elde edilir. Ayrıca performans testleri için gerekli numunelerin hazırlanmasında da bu yöntem önem taşır. Bu nedenle, Türkiye’de BSK tasarım ve üretim kontrol süreçlerinde Superpave yöntemine geçiş hızlandırılmalı ve şartnamelerde zorunlu hale getirilmelidir.

Asfalt karışım tasarımında çoğu yöntem, sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan hacimsel analizlere dayanır. Superpave ve BMD gibi modern yöntemlerde de hacimsel analizler temel bir aşamadır. Bu nedenle, hacimsel analizleri içeren bir yöntemin benimsenmesi yerinde olacağı düşünülmektedir. Ancak, hacimsel analiz, performans testlerini esas alan bir tasarım sürecinin ön aşamasını teşkil etmelidir.

2012 yılında KGM tarafından yayımlanan “Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları”, Superpave bitüm sınıflandırma sistemin adaptasyonunda önemli bir başlangıç olmakla birlikte trafik yükü faktörlerini sınırlı düzeyde dikkate almakta ve PG sistemiyle tam uyumlu değildir. Bu nedenle, mevcut haritaların Superpave sisteminin trafik hacmi ve hız temelli revizyon ilkeleri doğrultusunda güncellenmesi gerekmektedir.

Türkiye'deki rafinerilerden temin edilen bitümler Superpave yöntemiyle test edilip PG sınıfları belirlenmiş olsa da, KTŞ (2023) hâlâ geleneksel, penetrasyon esaslı bitüm sınıflandırmasına dayalı düzenlemeler içermektedir. PG sistemine tam geçişin sağlanabilmesi için, rafinerilerdeki bitüm üretim süreçlerinin ülke koşullarına uygun şekilde yeniden yapılandırılması ve bu sistemin şantiye üretim kontrollerine entegre edilmesi gerekmektedir.

Superpave yönteminde, agrega limit değerlerinin trafik değerine göre farklılaşması, daha fazla kaynak seçeneği ve geri dönüşüm agregalarının kullanımına imkân tanıyarak esneklik ve sürdürülebilirlik sağlar. KTŞ’de BSK karışımları için standart tip agrega gradasyonları için limitler belirlenirken, Superpave yöntemi seçilen nominal agrega boyutu için üç farklı deneme gradasyonu oluşturulmasını öngörür.

KTŞ (2023) kapsamında BSK agrega özelliklerinin bazı limit değerlerde revizyonlar yapılmasına rağmen mevcut sistem büyük ölçüde korunmuştur. KTŞ’de yeralan gradasyon limitlerinin Superpave agrega gradasyon sistemi çerçevesinde değerlendirilerek gerekli revizyonlar yapılma ve agrega gradasyon sisteminin KTŞ’ye entegre edilmesi sağlanmalıdır.

KTŞ (2023) kapsamında halen BSK tasarımında Marshall yöntemine dayalı hacimsel

parametreler ve stabilite-akma kriterleri kullanılmaktadır. Bazı güncellemelerle şartnameye tekerlek izi direnci (LCPC, HWTT) ve su hasarı direnci (İndirekt Çekme Mukavemeti) test kriterleri eklenmiştir. Superpave'in performans temelli bazı testleri, Avrupa EN 12697 standartlarıyla paralellik göstermekte olup, KGM ARGE laboratuvarında mevcuttur. Ancak, bu performans testlerinin BSK tasarımına entegrasyonu sağlanamamıştır. Bu testlerin uygulamadaki zorluklarına bağlı olarak çatlama direnci testlerinin şartnamede yer almadığı görülmektedir.

Türkiye'de ağır taşıt trafiği günlük 1000 aracı aştığında BSK kullanımı zorunlu olmasına rağmen, KTŞ'de trafik yüküne göre karışım tasarımı sistematik olarak optimize edilmemiştir. Uygulayıcı kurumlar için trafik verilerine dayalı uygun karışım tasarım yöntemlerini seçebilecek dinamik sistemler geliştirilmelidir.

BMD yöntemi, asfalt karışımlarının saha performansını daha doğru yansıtmak için hacimsel kriterlerin yanı sıra gerçek bozulmaları simüle eden performans testlerini tasarım sürecine entegre eder. AASHTO PP 105-20 standardında dört BMD yaklaşımı (A-D) yer alır; A en tutucu, D ise tamamen performansa dayalı yenilikçi yöntemdir. Bu yöntemler, tasarıma esneklik ve gerçekçilik kazandırırken sürdürülebilirlik ve ekonomik malzeme kullanımını da destekler.

BMD yöntemi henüz evrensel ölçekte yaygın olmasa da, ABD'de birçok eyalette pilot uygulamalarla hayata geçirilmeye başlanmıştır. Illinois, Louisiana, New Jersey, Texas ve Virginia gibi eyaletler performans testlerini içeren şartnameler geliştirirken, Florida, Georgia ve Ohio gibi eyaletler de BMD'yi araştırma ve tasarıma entegre etmektedir. ABD'de en çok Yaklaşım A tercih edilmektedir. Avrupa'da ise İtalya, İngiltere, Almanya ve Hollanda gibi ülkelerde BMD'ye ilgi artmakta ve ulusal şartlara uyumu araştırılmaktadır.

KTŞ (2023) halen Marshall yöntemi esaslı ampirik bir tasarım yaklaşımı benimsemekte, tekerlek izi ve su hasarı gibi bazı performans testleri şartnamede yer almakla birlikte, çatlama direnci için herhangi bir test ve kriter bulunmamaktadır. BMD'nin Yaklaşım A tanımıyla kısmen uyumlu olan mevcut tasarım sistemi, performans esaslı test yöntemleri açısından iyileştirmeye ihtiyaç duymaktadır.

BMD yönteminde farklı çatlak oluşum mekanizmalarının tespitinde kullanılan deneyler

incelendiğinde, özellikle I-FIT, IDEAL-CT, SCB gibi ekonomik ve pratik testlerin KTŞ'ye entegrasyonu öncelikli olarak araştırılmalıdır. Ayrıca, SCB testi TS EN 12697-44 standardıyla örtüşmektedir.

DCT ve OT testleri, termal ve yansıma çatlaklarının analizinde kullanılırken; düşük sıcaklık çatlama direncinin değerlendirilmesinde ise daha basit yapısıyla Sünme Uyumluluğu ve N_{Flex} Faktörü testleri öne çıkmaktadır. Yorulma çatlamlarının belirlenmesine yönelik Kiriş Eğilme ve Doğrudan Çekme Döngüsel Yorulma testleri ise yüksek maliyetli, uzun süreli ve karmaşık veri analizleri gerektiren ancak saha koşullarını daha iyi yansıtan gelişmiş yöntemlerdir. Bu testler, Avrupa normları çerçevesinde sırasıyla TS EN 12697-24 ve TS EN 12697-26 standartları kapsamına alınmıştır.

KTŞ (2023)'de tasarım kriterleri arasında BMD'de yaygın olarak kullanılan HWTT testti (TS EN 12697-22) yer almaktadır. BMD kapsamında kalıcı deformasyonun değerlendirilmesinde kullanılan HT-IDT ve IDEAL-RT testleri, HWTT'ye kıyasla daha düşük ekipman maliyeti ve kısa test süresi gibi avantajlar sunduğundan, KTŞ'ye entegrasyonları önerilmektedir. FN ve SSR testleri ise yüksek maliyet ve karmaşık test veri analiz süreçlerine rağmen kalıcı sahanın temsilinde daha gerçekçi performans tahminleri için KTŞ entegrasyonunda dikkate alınmalıdır.

BMD kapsamında nem hasarının belirlenmesinde yaygın şekilde kullanılan TSR testi KTŞ'de yer almakta, ancak TSR testinin HWTT ile desteklenmesinin daha güvenilir ve dayanıklı karışım tasarımları için önemli olduğu düşünülmektedir.

AMPT cihazı, BMD'de belirtilen performans testlerini (SCB, OT, DTCFT, SSR, FN vd.) gerçekleştirebilmektedir. Tekrarlı trafik yükleri ve çevresel koşulları simüle edebilmesi sayesinde, elde edilen veriler saha performansını daha gerçekçi yansıtmaktadır.

BMD'nin performansa odaklanan yenilikçi tasarım yaklaşımlarının (C ve D) benimsenmesi yönünde gerekli çalışmalar yapılmalıdır. Böylece, gerçek saha koşullarını daha iyi yansıtan, esnek ve uygulanabilir bir tasarım anlayışıyla hem sürdürülebilirlik desteklenmiş olur hem de malzeme kullanımı açısından daha ekonomik ve verimli çözümler geliştirilebilir.

Performans esaslı asfalt karışım tasarım sistemlerinin etkin şekilde uygulanabilmesi; yalnızca

teknik yeterlilikle değil, aynı zamanda altyapı, mevzuat, insan kaynağı ve dijital entegrasyon gibi çok boyutlu hazırlıklarla mümkündür. Türkiye gibi farklı iklim ve trafik koşullarına sahip ülkelerde bu sistemlerin uygulanabilirliği için pilot projelerle kademeli geçiş planlanmalı, KTş güncellenerek performans testlerine yer verilmeli, uzman personel yetiştirilmelidir. Ayrıca, veri tabanları ve sayısal modelleme altyapısı yerli koşullara uygun biçimde geliştirilmeli; üniversite, kamu ve özel sektör iş birliğiyle ulusal ölçekte sürdürülebilir bir sistem kurulmalıdır.



KAYNAKLAR

- Adhikari, S. ve You, Z. (2010). Fatigue evaluation of asphalt pavement using beam fatigue apparatus. *The Technology Interface Journal*, 10(3): 1–10.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Geçkil, T. (2008). Appropriate binder selection to application region according to Superpave system: Bingöl example. *Journal of Engineering and Natural Science*, 25(4): 338–348.
- Al Kaaf, K. ve Ibeabuchi, V. T. (2023). Marshall asphalt mix and superior performance asphalt mix in Oman: A comparative study. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(6): 12258–12263.
- Al-Khayat, H., Newcomb, D. E., Zhou, F. ve Van Deusen, D. (2021). Evaluation of the Minnesota asphalt mixtures based on balanced mix-design approach. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(3): 04021045.
- Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Lambros, J., El Khatib, A., Singhvi, P., Khan, T. ve Doll, B. (2015). Testing protocols to ensure performance of high asphalt binder replacement mixes using RAP and RAS. *Illinois Center for Transportation*, Seri No: 15-017.
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt mix design methods* (7. Baskı). USA: Asphalt Institute.
- Batioja-Alvarez, D., Lee, J. ve Haddock, J. E. (2019). Understanding the Illinois flexibility index test (I-FIT) using Indiana asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2673(6): 337–346.
- Beckemeyer, P. (2023). *Evaluation of the Rapid Rutting Test and High Temperature Indirect Tensile Test for practical use in asphalt mix design, quality assurance, and quality control*. Doktora Tezi, University of Missouri, Columbia.
- Bennert, T., Fee, F., Sheehy, E., Blight, R. ve Sauber, R. (2011). Implementation of performance-based HMA specialty mixtures in New Jersey. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists – Proceedings of the Technical Sessions*, 80: 719–740.
- Bennert, T., Haas, E. ve Wass, E. (2018). Indirect tensile test (IDT) to determine asphalt mixture performance indicators during quality control testing in New Jersey. *Transportation Research Record*, 2672(28): 394–403.
- Bennert, T., Haas, E., Ericson, C. ve Wass Jr, E. (2019). *Evaluation of overlay tester test procedure to identify fatigue cracking prone asphalt mixtures* (No. CAIT-UTC-NC57). Rutgers University, Center for Advanced Infrastructure and Transportation.
- Blab, R. (2013). Performance-based asphalt mix and pavement design. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 2(1): 21–38.
- Bonaquist, R. (2013). *Flow number as a discriminating HMA mixture property: Project brief* (No. 0092-09-01). Wisconsin Department of Transportation.

- Brown, E. R., Kandhal, P. S. ve Zhang, J. (2001). *Performance testing for hot mix asphalt*. NCAT Raporu, 01-05.
- Bukowski, J., D'Angelo, J. ve Harman, T. (2002). *Superpave asphalt mixture design workshop*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Buttlar, W. G., Urrea-Contreras, L., Jahangiri, B., Rath, P. ve Majidifard, H. (2020). *Support for balanced asphalt mixture design specification development in Missouri*. Missouri Department of Transportation.
- Button, J. W., Chowdhury, A. ve Bhasin, A. (2004). *Design of TxDOT asphalt mixtures using the Superpave gyratory compactor* (No. FHWA/TX-05/0-4203-1). Texas Transportation Institute, Texas A&M University System.
- Chen, C., Taylor, A. ve Moore, N. (2023). *Validation of Rapid Rutting Test procedures using plant mixtures*. National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn University. Erişim adresi: <https://www.eng.auburn.edu/> (Erişim tarihi: 28 Temmuz 2025).
- Chkaiban, R. (2021). *Influence of balanced mix design on asphalt mixture decision making, predicted pavement performance, traffic diversion, and user costs*. Doktora Tezi, University of Nevada, Reno.
- Christensen, D. W. ve Bonaquist, R. F. (2004). *Evaluation of indirect tensile test (IDT) procedures for low-temperature performance of hot mix asphalt* (Vol. 530). Transportation Research Board.
- Coffey, G. P. (2023). *Simple and practical tests for rutting evaluation of asphalt mixtures in the balanced mix design process*.
- Cooper, A. (2020). Rutting and IDEAL RT testing. Erişim adresi: <https://www.balancedmixdesign.com/> (Erişim tarihi: 28 Temmuz 2025).
- Costa, R. F. (2021). *Balanced mix design of asphalt mixtures for intersections*. Yüksek Lisans Tezi, University of Nevada, Reno.
- Cox, B. C., Smith, B. T., Howard, I. L. ve James, R. S. (2017). State of knowledge for Cantabro testing of dense graded asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10): 04017174.
- Dave, E. V., Oshone, M., Schokker, A. ve Bennett, C. E. (2019). *Disc shaped compact tension (DCT) specifications development for asphalt pavement*.
- Diefenderfer, S. D. ve Bowers, B. F. (2019). Initial approach to performance (balanced) mix design: The Virginia experience. *Transportation Research Record*, 2673(2): 335–345.

- Diefenderfer, S. D., Habbouche, J., & Boz, I. (2023). *Balanced mix design for surface mixtures: 2020 field trials* (No. FHWA/VTRC 23-R13). Virginia Transportation Research Council (VTRC).
- Dong, C., Feng, L. ve Xu, Y. (2023). Performance zoning of asphalt pavement and performance grade (PG) of asphalt binder in Karamay: A case study of Xinjiang, China. *Sustainability*, 15(12): 9742.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2016). *Testing for fatigue cracking in the asphalt mixture performance tester*. FHWA-HIF-16-027. Washington, DC, USA.
- Federal Highway Administration (FHWA). (t.y.). *Illinois flexibility index test (I-FIT): Determine the flexibility of your asphalt mixtures*. Erişim adresi: <https://www.fhwa.dot.gov/>
- Global Gilson Company, Inc. (t.y.). *Asphalt pavement analyzer (APA)*. Erişim adresi: <https://www.globalgilson.com/asphalt-pavement-analyzer-apa> (Erişim tarihi: 26 Temmuz 2025).
- Goetz, W. H. ve Schaub, J. H. (1959). Triaxial testing of bituminous mixtures: Technical Report.
- Habbouche, J., Boz, I. ve Diefenderfer, S. D. (2022). Validation of performance-based specifications for surface asphalt mixtures in Virginia. *Transportation Research Record*, 2676(5): 277–296.
- Hall, K. D., Castillo-Camarena, E., Braham, A. F., Parnell, N. ve Richey, A. (2022). *Performance-based asphalt mixture design (PBD) for Arkansas* (No. TRC1802). Arkansas Department of Transportation.
- Hannan, R. A. ve Goetz, W. H. (1959). Testing open-graded bituminous mixtures in the Hveem stabilometer.
- Harder, G. (2015). *Evaluation of laboratory performance tests for cracking of asphalt pavements*. FHWA Cooperative Study, Asphalt Institute, Penn State University. Erişim adresi: <https://www.pa-asphalt.org/> (Erişim tarihi: 26 Temmuz 2025).
- Harman, T., Bukowski, J. R., Moutier, F., Huber, G. ve McGennis, R. (2002). History and future challenges of gyratory compaction: 1939 to 2001. *Transportation Research Record*, 1789(1): 200–207.
- Hajj, E., Hand, A. J., Chkaiban, R. ve Aschenbrener, T. (2019). *Index-based tests for performance engineered mixture designs for asphalt pavements* (No. FHWA-HIF-19-103). Federal Highway Administration.
- Haslett, K. E., Dave, E. V. ve Sias, J. E. (2022). Assessment of asphalt mixture disk-shaped compact tension test indexes for reflective cracking performance. *Journal of Testing and Evaluation*, 50(2): 755–769.

- Hossain, M., Fager, G. ve Maag, R. G. (2016). *Superpave volumetric mixture design and analysis handbook, Volume 1: Mixture design and analysis*.
- Idris, I. I., Sadek, H., Hassan, M., Berryman, C. ve Hossain, M. I. (2020). The effectiveness of using the overlay tester setup to evaluate the performance of asphalt mixtures against reflective cracking. In *Tran-SET 2020* (pp. 173–184). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Islam, M. R., Kalevela, S. A. ve Nesselhauf, S. K. (2019). Sensitivity of the flow number to mix factors of hot-mix asphalt. *Infrastructures*, 4(2): 34.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2006). *Karayolları teknik şartnamesi*. Ankara: KGM.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013). *Karayolları teknik şartnamesi*. Ankara: KGM.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). *Karayolları teknik şartnamesi*. Ankara: KGM.
- Kaya, D. ve Topal, A. (2016). Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri arasındaki farklılıkların ılık karışım asfaltlar açısından incelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2).
- Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Von Quintus, H. ve Moulthrop, J. S. (1994). *Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program*.
- Khedr, S. ve Saady, M. (2023). Development of Superpave regional implementation framework in developing countries with hot and arid climates: Egyptian case study. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01772.
- Kim, Y. R., Ghanbari, A. ve Underwood, S. (2021). *Rutting strain index (RSI) parameter for asphalt balanced mixture design* (No. FHWA-HRT-21-044).
- Kuloğlu, M. (2006). Bitümlü sıcak karışımlarda bitüm film kalınlığının stabilite ve rijitliğe etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Elazığ.
- Leavitt, A., Epps Martin, A. ve Arámbula, E. (2024). Model for evaluating cracking performance of asphalt pavements with field aging based on IDEAL-CT parameters. *Transportation Research Record*, 2678(10): 14–25.
- Leon, L. P., Roopnarine, K., Azamathulla, H. M., Chadee, A. A. ve Rathnayake, U. (2023). A performance-based design framework for enhanced asphalt concrete in the Caribbean region. *Buildings*, 13(7): 1661.
- Lu, Q. ve Harvey, J. T. (2006). Evaluation of Hamburg wheel-tracking device test with laboratory and field performance data. *Transportation Research Record*, 1970(1): 25–44.
- Mandal, T., Hanz, A. J. ve Bahia, H. U. (2019). Challenges in using the Disc-Shaped Compact Tension (DCT) test to determine role of asphalt mix design variables in

cracking resistance at low temperatures. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(11): 1275–1284.

- Mandal, T., Ling, C., Chaturabong, P. ve Bahia, H. U. (2019). Evaluation of analysis methods of the semi-circular bend (SCB) test results for measuring cracking resistance of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(5):, 456–463.
- National Center for Asphalt Technology (NCAT). (2023). *NCAT submits Draft Test Method for HT-IDT to ASTM*. Erişim adresi: <https://eng.auburn.edu/> (28 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.a). Asphalt pavement analyzer – Georgia DOT use case. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.b). Cantabro test for assessing asphalt mixture durability. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (28 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.c). Direct tension cyclic fatigue test. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.ç). Disc-shaped compact tension test. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.d). Flexural bending beam fatigue test. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.e). Flow number test: Summary and practical implications. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (28 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.f). Hamburg wheel-tracking test. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.g). High temperature indirect tension (HT-IDT). Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (28 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.ğ). IDT creep compliance and strength test. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.h). Illinois flexibility index test (I-FIT). Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.ı). Indirect tensile asphalt cracking test (IDEAL-CT). Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.i). Nflex factor. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).

- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.j). Overlay test. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.k). Rapid shear rutting test (IDEAL-RT). Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (28 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.l). Semi-circular bend test (Louisiana method). Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (26 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.m). Stress sweep rutting (SSR) test. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (28 Temmuz 2025).
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (t.y.n). TSR test overview: Insights and applications. Erişim adresi: <https://www.asphaltpavement.org/> (28 Temmuz 2025).
- URL-1. (2014). Türkiye asfalt endüstrisi. Tamyol Asfalt. Erişim adresi: <https://asfalt.tamyol.com.tr/turkiye-asfalt-endustrisi/> (8 Şubat 2014).
- URL-2. (2019). Bitüm, bitümlü kaplamalar ve özellikleri. KYK Yapı Kimyasalları. Erişim adresi: <https://www.kyk.com.tr/blogdetay-bitum-bitumlu-kaplamalar-ve-ozellikleri/> (5 Temmuz 2019).
- URL-3. (2023). Types of asphalt mix design. Gilson Company, Inc. Erişim adresi: <https://www.globalgilson.com/blog/types-of-asphalt-mix-design/> (5 Ekim 2023).
- URL-4. (t.y.). Hveem mix design. Pavement Interactive. Erişim adresi: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/hveem-mix-design/> (28 Temmuz 2025).
- URL-5. (2019). Asphalt Marshall test method. Gilson Company, Inc. Erişim adresi: <https://www.globalgilson.com/blog/asphalt-marshall-test-method/> (6 Kasım 2019).
- URL-6. (2019). Superpave mix design method resource. Gilson Company, Inc. Erişim adresi: <https://www.globalgilson.com/blog/superpave-mix-design-method-resource/> (17 Ekim 2019).
- URL-7. (t.y.). Asfalt tarihi. Türkiye Asfalt Mütahhitleri Derneği – ASMÜD. Erişim adresi: https://www.asmud.org.tr/Asfalt_Tarihi.asp (28 Temmuz 2025).
- Omar, S. M., Sharif, B. M., Ahmed, H. U. ve Abdullah, W. A. (2021). Comparison study between Marshall and Superpave mix design methods. *Halabja University Journal*, 6(1): 348–365.
- Orhan, F. ve Güngör, A. G. (2009). Bitümlü kaplama agregaları ve karışımları ile ilgili Avrupa standartları. 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara.
- Orhan, F. (2012). *Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları*. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi, Ankara.

- Orhan, F. (2014). Karayolları Teknik Şartnamesinde bitümlü kaplamalarla ilgili yenilikler. 6. Uluslararası Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Ankara.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P. ve Doll, B. (2016). Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters. *Construction and Building Materials*, 115: 390–401.
- Öztürk, E. A. (2004). Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: yüksek performanslı asfalt kaplama. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2).
- Pavement Interactive. (t.y.a). Flexural fatigue – pavement tests. Erişim adresi: <https://pavementinteractive.org/> (26 Temmuz 2025).
- Pavement Interactive. (t.y.b). Moisture susceptibility – asphalt tests. Erişim adresi: <https://pavementinteractive.org/> (28 Temmuz 2025).
- Pavement Interactive. (t.y.c). Performance tests for rutting. Erişim adresi: <https://pavementinteractive.org/> (26 Temmuz 2025).
- Pereira, P. ve Pais, J. (2017). Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of a European method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(4): 316–346.
- Rashid, S. M. A., Bennert, T. ve Pezeshki, D. (2015). *Performance testing for HMA quality assurance*. FHWA-NJ-2015-010, Rutgers University.
- Richardson, D. N. ve Lusher, S. M. (2008). *Determination of creep compliance and tensile strength of hot-mix asphalt for wearing courses in Missouri* (No. RI05-052). Missouri Department of Transportation.
- Rodezno, M. C., West, R. ve Taylor, A. (2015). Flow number test and assessment of AASHTO TP 79-13 rutting criteria: Comparison of rutting performance of hot-mix and warm-mix asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2507(1): 100–107.
- Roy, N., Veeraragavan, A. ve Murali Krishnan, J. (2015). Interpretation of flow number test data for asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 168(3): 191–199.
- Rushing, J. F., Little, D. N. ve Garg, N. (2012). Asphalt pavement analyzer used to assess rutting susceptibility of hot-mix asphalt designed for high tire pressure aircraft. *Transportation Research Record*, 2296(1): 97–105.
- Safazadeh, F., Romero, P., Mohammad Asib, A. S. ve VanFrank, K. (2022). Methods to evaluate intermediate temperature properties of asphalt mixtures by the semi-circular bending (SCB) test. *Road Materials and Pavement Design*, 23(7): 1694–1706.

- Sağlık, A., Orhan, F. ve Güngör, A. G. (2012). BSK kaplamalı yollar için bitüm sınıfı seçim haritaları. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şube Müdürlüğü, Ankara.
- Salari, S. ve Rupnow, T. (2024). Literature review of IDEAL-CT and IDEAL-RT test methods for balanced mix design: Research project capsule [23–4B].
- Sebaaly, H., Riviera, P. P., Varma, S., Maina, J. W. ve Santagata, E. (2022). Performance-based assessment of rutting resistance of asphalt mixes designed for hot climate regions. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(7): 2448–2459.
- Skok, E. L., Johnson, E. N. ve Turk, A. (2002). Asphalt pavement analyzer (APA) evaluation.
- Suleiman, N. (2011). *Evaluation of the rut resistance performance of warm mix asphalts in North Dakota* (No. UND 2011-01).
- Tanyıldızı, M. (2022). Karayolları teknik şartnamelerinde esnek yol kaplama geoteknik parametrelerinin karşılaştırılması. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2): 993–999.
- Texas Department of Transportation (TxDOT). (2019). *Tex-248-F: Overlay test*. Erişim adresi: <https://ftp.dot.state.tx.us/> (26 Temmuz 2025).
- Trivellato, S. (2023). Progettazione innovativa dei conglomerati bituminosi: il Balanced Mix Design. Lisans Tezi, Padua University, Civil Engineering Program.
- Tong, B., Habbouche, J., Flintsch, G. W. ve Diefenderfer, B. K. (2023). Rutting performance evaluation of BMD surface mixtures with conventional and high RAP contents under full-scale accelerated testing. *Materials*, 16(24): 7611.
- Vackova, P. ve Valentin, J. (2021, October). Semi-circular Bending (SCB) Test—modified method and new test parameters. In *CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures* (pp. 537-545). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Varma, S., Sebaaly, H., Maina, J. W. ve Al Ghabani, A. (2019). Experimental investigation of Marshall and Superpave mix design methods for rutting criteria. *38th Annual Southern African Transport Conference*.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W. ve Paulino, G. H. (2005). Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental mechanics*, 45(3), 270-277.
- Wang, X., Zhang, J., Li, K., Ding, Y. ve Geng, L. (2021). Cracking analysis of asphalt mixture using semi-circle bending method. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(1): 269-279.
- West, R. ve Yin, F. (2024). BMD Approaches. Balanced Mix Design, Special Report 228. NAPA.

- Xu, S., Peng, G., Zhang, Y., Guo, Y., Suo, Z. ve Xu, Y. (2021). Design Method of asphalt pavement mixture based on performance balance approach. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(2): 04021009.
- Yin, F., Chen, C., West, R., Martin, A. E. ve Arambula-Mercado, E. (2020). Determining the relationship among Hamburg wheel-tracking test parameters and correlation to field performance of asphalt pavements. *Transportation Research Record*, 2674(4): 281-291.
- Yin, F., West, R. C., Xie, Z., Taylor, A. ve Julian, G. (2017). Effects of Loading Rate and Mix Reheating on Indirect Tensile Nflex Factor and Semi-Circular Bend J-integral Test Results to Assess the Cracking Resistance of Asphalt Mixtures. In *NCAT Report 17-09*. AL, USA: Auburn University.
- Yin, F., Garita, J., Taylor, A. ve West, R. (2018). Refining the indirect tensile (IDT) Nflex factor test to evaluate cracking resistance of asphalt mixtures for mix design and quality assurance. *Construction and Building Materials*, 172: 396-405.
- Yin, F. ve West, R., (2021). Balanced Mix Design Resource Guide. *National Center for Asphalt Technology*. National Asphalt Pavement Association(NAPA).
- Yüknü, K., Öztürk, T. ve Komut, M. (2021). *Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı*. Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şube Müdürlüğü. Ankara, Türkiye.
- Zhao, K., Ma, X., Zhang, H. ve Dong, Z. (2022). Performance zoning method of asphalt pavement in cold regions based on climate Indexes: A case study of Inner Mongolia, China. *Construction and Building Materials*, 361: 129650.
- Zhou, F. ve Scullion, T. (2003). *Upgraded overlay tester and its application to characterize reflection cracking resistance of asphalt mixtures* (No. FHWA/TX-04/0-4467-1). Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.
- Zhou, F., Hu, S. ve Scullion, T. (2007). *Development and verification of the overlay tester based fatigue cracking prediction approach* (No. FHWA/TX-07/9-1502-01-8).
- Zhou, F. ve West, K. (2023). Research Pays Off: Indirect Tension Asphalt Cracking Test: Ensuring Asphalt Mix Designs for Durable Pavements. *TR News*, (345).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ahmet ÇALIŞKAN
Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :
Yüksek Lisans Öğrenimi :
Bildiği Yabancı Diller :
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar :
Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi

Tarih : 28/08/2025 (Tez Savunma Tarihi)

