

**FİLLER OLARAK KİREÇ KULLANIMININ MODİFİYE
BİTÜMLERLE HAZIRLANAN KARIŞIMLARIN
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İnş. Müh. Erkut YALÇIN
121115101**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma**

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

MAYIS-2014

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİLLER OLARAK KİREÇ KULLANIMININ MODİFİYE
BİTÜMLERLE HAZIRLANAN KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Erkut YALÇIN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :09.05.2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 29.05.2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet YILMAZ
Diğer Jüri Üyeleri :Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ
: Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

ELAZIĞ, 2014

ÖNSÖZ

"Filler Olarak Kireç Kullanımının Modifiye Bitümlerle Hazırlanan Karışımların Performansına Etkisinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma bilim dalında 2012-2014 yılları arasında yüksek lisans tez çalışması olarak hazırlanmıştır.

Yapmış olduğum tez çalışmasında bilgisiyle ve emeğiyle beni yalnız bırakmayan, çalışmalarımızda gerekli ortamı hazırlayarak karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olan ve sadece hocalığıyla değil insani yönüyle de her zaman örnek alacağım değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a öncelikle gönülden teşekkür ederim.

Kendilerinden ders alarak bilgilerinden istifade ettiğim bölümümüzün değerli hocaları Sayın Prof. Dr. Necati KULOĞLU, Doç. Dr. Baha Vural KÖK, Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ hocalarıma ve laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Taçettin GEÇKİL'e şükranlarımı sunarım.

Tezimin özellikle laboratuvar çalışmaları sırasında yardıma her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve yardımına koşan yüksek lisans dönemi arkadaşlarım Arş. Gör. Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU'na ve İnş.Müh. Mustafa AKPOLAT'a emeklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Maddi yönden tezimizi destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (FÜBAP) teşekkür ederim.

Son olarak dualarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Erkut YALÇIN

Elazığ-2014

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
KISALTMALAR	XIII
1. GİRİŞ	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI	4
2.1. Bitüme Eklenen Katkı Maddeleri	10
2.1.1. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	10
2.1.2. Gilsonit	13
2.2. Karışıma Eklenen Katkı Maddeleri	14
2.2.1. Katkı Malzemesi Olarak Sönmüş Kireç Kullanımı	14
2.2.1.1. Kirecin özellikleri	15
2.2.1.2. Sönmüş Kirecin Bitümlü Bağlayıcı ve Karışımlar Üzerindeki Etkisi	16
2.2.1.3. Kirecin Katılma Teknikleri	17
2.3. Literatür Taraması	18
2.3.1. SBS Kullanımı	18
2.3.2. Gilsonit Kullanımı	19
2.3.3. Sönmüş Kireç Kullanımı	22
3. DENEY YÖTEMLERİ	24
3.1. Superpave Tasarım Yöntemi	24
3.1.1. Superpave Bağlayıcı Tasarımı	24
3.1.1.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)	24
3.1.1.2. Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)	25
3.1.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi	26
3.1.1.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi	27

3.1.1.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi.....	28
3.1.2. Superpave Karışım Tasarımı	28
3.2. Karışım Deneyleri.....	29
3.2.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	29
3.2.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi	31
3.2.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi.....	37
3.2.4. Merdaneli Sıkıştırıcı ile Plak Şeklinde Numune Hazırlanması	38
3.2.5. Tekerlek İzi (Kalıcı Deformasyon) Deneyi	40
3.2.5.1. Prosedür A'ya Göre Deneyin Uygulanması.....	41
3.2.5.2. Prosedür B'ye Göre Deneyin Uygulanması	42
3.2.6. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi.....	42
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	45
4.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler	49
4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	58
4.3. Karışımların Dizayn Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi	58
4.4. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler.....	62
4.4.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	62
4.4.2. Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları	67
4.4.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları	71
4.4.4. Tekerlek İzi Deney Sonuçları	74
4.4.5. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	83
5. SONUÇLAR.....	93
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	103

ÖZET

Bu tez çalışmasında filler olarak %2 oranında kireç kullanımının saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, bitüm katkı maddesi olarak stiren-butadien-stiren (SBS), İran Gilsoniti (IG) ve Amerika Gilsoniti (AG) kullanılmıştır. Yapılan Superpave bağlayıcı deneyleri sonucunda bitüm ağırlığınca SBS'ten %4.0, Amerika Gilsoniti'nden %11.0 ve İran Gilsoniti'nden %10.0 oranlarında kullanılmasına karar verilmiştir. Kireç içermeyen karışımlar için tasarım bitüm içerikleri Superpave yöntemine göre belirlenmiştir. Kireç içeren karışımlarda bağlayıcı türüne göre kireç içermeyen karışımlar için belirlenen bitüm içerikleri kullanılmıştır. Hacimsel analiz sonucunda hem kireç içeren hem de kireç içermeyen karışımların şartname kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. Karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım (kalıcı Marshall stabilitesi ve çekme dayanımı oranı), indirekt çekme rijitlik modülü, tekerlek izi dayanımı ve indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan hem kireç hem de bitüm katkı maddelerinin kullanımı ile karışımların stabilitelerinin, nem hasarına karşı dayanımlarının, rijitliklerinin, kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve yorulma ömürlerinin arttığı tespit edilmiştir. Filler olarak kireç kullanımının bitüm katkı maddesi olarak SBS, IG ve AG kullanımı kadar etkin olmadığı belirlenmiştir. Nem hasarına karşı dayanım bakımından en etkin katkının SBS olduğu, stabilite, rijitlik, kalıcı deformasyona karşı dayanım ve yorulma açısından ise Amerika Gilsoniti olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım, Hidrate kireç, Stiren-butadien-stiren, Amerika Gilsoniti, İran Gilsoniti.

SUMMARY

The Assessment of Effects of Hydrated Lime Usage as Filler on the Performance of Mixtures Prepared with Modified Bitumen

In this thesis study, effects of 2% hydrated-lime usage as filler on the performance of hot mix asphalt prepared with pure and modified binders was examined. In the study, styrene-butadiene-styrene (SBS), Iranian Gilsonite (IG) and American Gilsonite (AG) were used as additives in bitumen. After conducting Superpave binder experiments, 4.0% of SBS, 11.0% of American Gilsonite and 10.0% of Iranian Gilsonite in terms of bitumen weight were decided to be used. For mixtures without hydrated lime, design binder contents were determined according the Superpave method. For mixtures containing hydrated lime, binder contents which are specified for mixtures without hydrated lime regarding to binder type were used. Mixtures with and without hydrated lime were identified to satisfy criteria for specification. Mixture samples were subject to Marshall stability and flow, resistance to moisture-induced damage (retained Marshall stability and tensile strength ratio), indirect tensile stiffness modulus, wheel tracking and indirect tensile fatigue tests. Experiment results suggested that stability, resistance to moisture-induced damage and permanent deformation, stiffness, tensile strength and fatigue life of mixtures increased as hydrated lime and bitumen additives were used in mixtures. Hydrated lime usage as filler was identified not to be as effective as usage of SBS, IG and AG as bitumen additive. SBS additive was found to be the most effective in terms of resistance to moisture-induced damage. American Gilsonite was confirmed to be the most effective additive in terms of stability, stiffness, tensile strength and fatigue.

Keywords: Hot mix asphalt, Hydrated-lime, Styrene-butadiene-styrene, American Gilsonite, Iranian Gilsonite.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı	4
Şekil 2.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı	5
Şekil 2.3. SBS'in granül ve toz hali.....	11
Şekil 2.4. SBS türü polimerlerin yapısı	11
Şekil 2.5. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'in yapısı	12
Şekil 2.6. Gilsonit'in kayaç ve işlenmiş görünümü	13
Şekil 2.7. Kirecin kayaç ve toz hali	15
Şekil 3.1. Dönel ince film halinde ısıtma deney (RTFOT) aleti şematik görünüşü	25
Şekil 3.2. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi.....	25
Şekil 3.3. PAV deney aleti	26
Şekil 3.4. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi	27
Şekil 3.5. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi	27
Şekil 3.6. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması	28
Şekil 3.7. Marshall stabilite ve akma aleti	30
Şekil 3.8. Su varlığı altında bitüm/su ara yüzeyinin geri çekilmesi	33
Şekil 3.9. Bitümlü bir malzemede kabarcık ve çukur oluşumu	34
Şekil 3.10. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için..... hazırlanması.....	35
Şekil 3.11. Çekme dayanımı deney düzeneği	36
Şekil 3.12. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği	38
Şekil 3.13. Merdaneli sıkıştırıcı ve numune hazırlanması	40
Şekil 3.14. Tekerlek izi deney aleti	40
Şekil 3.15. Yorulma deney düzeneği	43
Şekil 3.16. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi.....	44
Şekil 4.1. Elazığ için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı	47
Şekil 4.2. Elazığ için bağlayıcı sınıfı seçimi	48
Şekil 4.3. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı	49
Şekil 4.4. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi	55

Şekil 4.30. Kireç içermeyen (a) ve içeren (b) karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı... ilişkisinin karşılaştırılması	87
Şekil 4.31. Yorulma ömrü (N_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi	88
Şekil 4.32. Maksimum yük tekrar sayısı – katkı türü ilişkisi.....	89
Şekil 4.33. N_f (a) ve N_{mak} (b) değerlerindeki deformasyon değerlerinin katkı türü ile..... değişimi	90
Şekil 4.34. Karışımların $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranları	91

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Modifiye bitümün fiziksel özellikleri	6
Tablo 2.2. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	8
Tablo 2.3. Farklı tipteki katkı maddelerinin sağladıkları faydalar.....	9
Tablo 3.1. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları.....	26
Tablo 4.1. Elazığ'ın 27 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri	45
Tablo 4.2. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları	46
Tablo 4.3. Farklı güvenlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları	48
Tablo 4.4. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları.....	51
Tablo 4.5. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları	52
Tablo 4.6. PG 52-Y ve PG 70-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi	54
Tablo 4.7. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları	55
Tablo 4.8. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 4.9. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri.....	59
Tablo 4.10. Filler olarak %2 kireç içeren karışımların hacimsel özellikleri	59
Tablo 4.11. Karışımların çekme dayanımı değerlerinin saf karışıma göre artış yüzdeleri..	69
Tablo 4.12. Tekerlek izi numunelerinin ağırlıkları.	75
Tablo 4.13. Tekerlek izi numuneleri için gerekli agrega ve bitüm miktarları.....	76
Tablo 4.14. Tekerlek izi deney sonuçları	82
Tablo 4.15. Kireç içermeyen karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları	85
Tablo 4.16. Kireç içeren karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları.....	85

SEMBOLLER LİSTESİ

s	: Standart sapma
T_{20mm}	: Yüzeyden 20 mm derinlikteki kaplama tasarım yüksek sıcaklığı
T_{havamaks}	: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı
E	: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi
T_{min}	: Kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı
T_{havamin}	: En düşük 1 günlük ortalama hava sıcaklığı
G*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
V_a	: Hava boşluğu hacmi
G_{mm}	: Asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı
VMA	: Agregalar arası boşluk oranı
VFA	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
d	: Kalıbın çapı
DP	: Filler oranı
h	: Numune yüksekliği
J	: Absorbe su hacmi
B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı
B	: Vakum işleminden önce numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı
S'	: Doymuşluk derecesi
I	: Hava boşluğu hacmi
V	: Numune hacmi
TS	: Çekme dayanımı
P_{mak}	: Kırılmaya neden olan maksimum yük
TS_{yaş}	: Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri
TS_{kuru}	: Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri
ITSM	: İndirekt çekme rijitlik modülü
F	: İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük
H	: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon
L	: Ortalama numune yüksekliği
R	: Poisson oranı
N_f	: Yorulma ömrü
r_f	: Çatlak ilerleme oranı
N_p	: Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı
δ_i	: Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu
N_i, N_f, N_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayıları
δ_i, δ_f, δ_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarları
WTS	: Tekerlek izi artış eğimi

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
AG	: Amerika Gilsoniti
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
İÇYD	: İndirekt Çekme Yorulma Deneyi
IG	: İran Gilsoniti
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basıncılı Yaşlandırma Aleti)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
RMS	: Kalıcı Marshall Stabilitesi
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren
SEBS	: Stiren-Etilen-Butadien-Stiren
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)
TEM	: Transmisyon Elektron Mikrokobu
TSR	: Çekme Dayanımı Oranı
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi

1. GİRİŞ

Orta ve ağır trafikli yollarda, trafik yüklerini taşımak, üst yapıdaki diğer tabakaları çevre koşullarının olumsuz etkilerinden korumak amacıyla yapılan bitümlü sıcak karışımlar (BSK), bitüm ve agreganın ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar, karışım içerisine dağılmış halde bulunan agregaya, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğundan oluşan kompozit bir yapıya sahiptir. Malzemeye bağlı olarak bitümlü sıcak karışımların özellikleri; farklı bağlayıcı-agrega kombinasyonlarının, agregada gradasyonlarının ve modifikasyon tekniklerinin kullanılmasına göre farklılık göstermektedir.

Esnek üstyapı kaplamalarında, artan trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak meydana gelen tekerlek izi, soyulma, çatlama, ondülasyon gibi bozulmaları geciktirerek, bakım ve yenileme gereksinimini daha seyrek aralıklara düşürmek ve kaplama performansını arttırmak amacıyla birçok ülkede, bitümlü bağlayıcılara veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifiye bitümler veya karışımlar elde edilmektedir (Francken, 1998; Nicholls, 1998).

Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddelerinin önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir. Modifiye bitüm üretilmesinde elastomer ve plastomer polimerlerin yanı sıra polimer olmayan kimyasal katkı maddeleri yaygın olarak kullanılabildiği gibi göl asfaltları, kaya asfaltları ve Gilsonitler de doğal katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır.

Bir polimer çeşidi olan stiren-butadien-stiren (SBS) en sık kullanılan katkı malzemesidir (Şengöz ve Işıkyakar, 2008). Yapılan çeşitli çalışmalarda bitüm modifikasyonunda SBS kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona (Kumar vd., 2006; Tayfur vd., 2007), nem hasarına (Kök ve Yılmaz, 2009; Görkem ve Şengöz, 2009) ve yorulma çatlaklarına (Aglan vd., 1993) karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir.

Dünyada doğal asfaltların metamorfozunun ilk aşamasını göl asfaltları temsil ederken en son derecesini ise pirobitümler oluşturmaktadır. Trinidad Göl Asfaltı (TLA) ve Gilsonit, en sık kullanılan doğal asfalt katkı maddeleridir.

Gilsonit, bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip, doğal olarak oluşan katı bir hidrokarbon mineralidir (Hamidi, 1998). Gilsonit, kolay kullanımı ve asfaltla iyi uyumuyla bilinmektedir. Gilsonit, doğada bulunan bir tür asfalt bağlayıcı olması dolayısıyla bitüm içinde hızlı bir şekilde çözölebilmektedir (Liu ve Li, 2008). Amerika'nın Utah eyaletinde ve İran'ın çeşitli bölgelerinde önemli Gilsonit kaynakları bulunmaktadır.

Karışıma eklenen katkı maddeleri genellikle filler malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kireç, siyah karbon, uçucu kül gibi malzemeler BSK'larda filler olarak kullanılabilen katkı maddeleridir (Francken, 1998). Filler yerine belirli oranda kireç kullanılması, BSK'ların nem hasarına karşı dayanımını önemli miktarda arttırmaktadır (Kök ve Yılmaz, 2009). Su, bitüm ve agrega ara yüzeyinde adezyon kaybına neden olur. BSK kaplamalarda erken adezyon kaybı genellikle soyulma olarak tanımlanmaktadır. Adezyon kaybı karışımın bütünlüğünü bozduğundan dolayı mukavemet kaybına neden olmaktadır. Su, kaplanmış agrega ve bitüm filminin ara yüzeyine difüzyon yoluyla girebilir. Su; ayrılma, yer değiştirme, doğal emülsiyon, boşluk basıncı ve hidrolik aşınma gibi 5 farklı şekilde soyulmaya neden olabilir (Behiry, 2013).

Asfalt karışımlarda ortaya çıkan nem hasarının miktarını çeşitli değişkenler etkilemektedir. Bu değişkenlerin bazıları bitümlü sıcak karışımı oluşturan agrega ve bitüm gibi malzemelerle alakalıdır. Etki eden diğer değişkenler ise karışımın tasarımı ve inşası (boşluk oranı, film kalınlığı, drenaj ve geçirgenlik), çevresel faktörler (sıcaklık, kaplamanın yaşlanması ve donma çözünme döngüleri), trafik şartları ve katkı özellikleridir. Bu nem hasarı problemini hafifletmek veya tamamen ortadan kaldırmak için soyulma önleyici katkı maddeleri üzerinde çalışılmıştır. Soyulma önleyici katkılar bitüm ve agrega arasındaki fizyo-kimyasal bağı artırmak ve bitümün yüzey gerilmesini düşürerek bitümün agregayı sarmasını kolaylaştırmak için kullanılmaktadır. Uygulamada kullanılan veya laboratuvarında test edilen katkı maddeleri; geleneksel sıvı katkı maddeleri, metal iyon sürfaktanları, sönmüş kireç ve portland çimentosu, silan bağlama maddeleri ve silikondur (Behiry, 2013).

Önceki saha ve laboratuvar deneyleri sönmüş kirecin karışımlarda çok çeşitli faydalar sağladığını ispatlamıştır. Kireç, bitümün özelliğini bozmadan karışımın düşük sıcaklıktaki kırılma dayanıklılığını iyileştirir. Sönmüş kireç filler malzemesi olarak kullanıldığında bitüm ile reaksiyona girerek mukavemeti artırır. Sönmüş kireç kullanımı ile karışımın nem

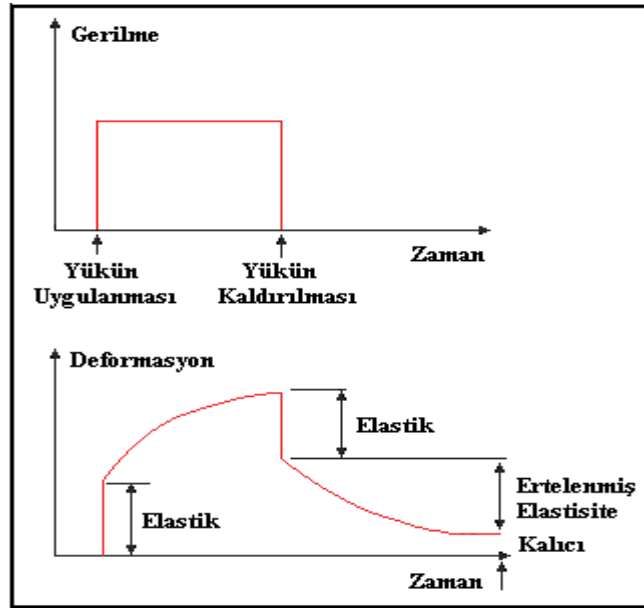
hasarına karşı dayanımının yanı sıra yaşlanma sonucu meydana gelen sertleşmeye karşı dayanımı da artmaktadır (Behiry, 2013).

Doğal asfaltların ve SBS'in bitüm modifikasyonunda, kirecin filler olarak karışım modifikasyonunda kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, SBS'in ve dünyanın çeşitli yerlerinden temin edilen doğal asfaltların bitüm modifikasyonunda, sönmüş kirecin karışım modifikasyonunda birlikte kullanımı detaylı şekilde incelenmiştir. Bu tez çalışmasında SBS, İran gilsoniti (IG) ve Amerika gilsoniti (AG) kullanılarak modifiye bitümler ve karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca aynı karışımlar filler olarak %2 oranında sönmüş kireç kullanılarak hazırlanmıştır. Böylece katkıların hem ayrı ayrı hem de birlikte kullanımı değerlendirilmiştir. Karışım numuneleri üzerinde Marshall Stabilite ve akma, indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM), indirekt çekme yorulma (ITF) ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

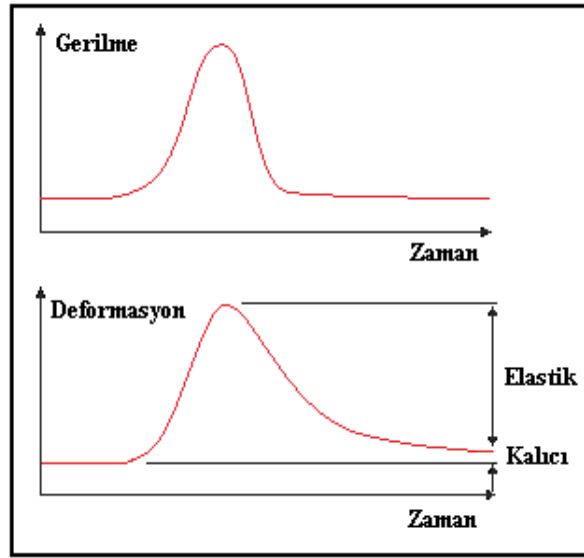
Bitüm, temel olarak hidrokarbonlar ve türevlerini içeren, trikloretilen içerisinde çözülebilen, uçucu olmayan ve ısıtıldığında gittikçe yumuşayan, viskoz bir sıvı veya katı bir madde olarak tanımlanmaktadır. Bitüm, petrolün rafinaj işlemi sırasında elde edilebildiği gibi doğal bir birikinti olarak (Trinidad gölü) veya içerisinde mineral maddelerle birlikte doğal bir şekilde ortaya çıkmış asfaltın bir bileşiği olarak da bulunabilmektedir (Lav ve Lav, 2004). Bitüm, reolojik yapı olarak viskoelastik ve termoplastik özellik göstermektedir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler (Kuloğlu, 2001).

Başta çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımlarının da viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır (Lav ve Lav, 2004). Yük etkisi sonucu bir bitümlü malzemede oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresi ve ısı ile birlikte artar. Bu etki Şekil 2.1 ve 2.2’de gösterilmiştir (Whiteoak ve Read, 2003).



Şekil 2.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 2.1, basit bir akma testinde bitümlü malzemenin davranışını göstermektedir. Uygulanan yükle meydana gelen deformasyon, yükleme kaldırılınca kadar, zamanla tedrici bir deformasyon artışından sonra bir anlık elastik davranış gösterir. Deformasyondaki zamanla meydana gelen değişim, malzemenin viskoz davranışından dolayıdır. Yükün kaldırılmasıyla, anlık elastik deformasyon ve zamanla bazı ilave elastik deformasyonlar da oluşur. Bu "gecikmeli geri dönüş" olarak bilinir. Sonuç olarak, malzemenin viskoz davranışından dolayı bir miktar kalıcı deformasyon söz konusudur.



Şekil 2.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranış (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 2.2’de bir bitümlü karışımda, hareketli trafik yükleri nedenleriyle meydana gelen deformasyon davranışları görülmektedir. Burada, elastik davranışın iki bileşenini (ani ve gecikmeli elastik davranış) birbirinden ayırmak mümkün değildir. Ancak, küçük kalıcı deformasyon ve daha büyük elastik deformasyon söz konusudur. Şekil 2.2’de gösterilen, tek yüklemeyle meydana gelen küçük kalıcı deformasyon, üstyapıdaki bir kaç milyon yükleme sonucunda büyük bir yığılma ile yüzey deformasyonuna yani oluklanmaya neden olur. Hava sıcaklığının yüksek olduğu durumda ve trafiğin yavaş hareket ettiği ya da durduğu yerlerde neden daha fazla deformasyon meydana geldiği bu şekilde açıklanabilir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), bitümlü sıcak karışım kaplama tabakalarında yaygın olarak görülen tekerlek izi ve çatlak şeklindeki bozulmaları geciktirmek ve kaymaya karşı direnci artırarak trafik güvenliğini sağlamak amacıyla, Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi’ni hazırlamıştır. KGM tarafından belirtilen modifiye bitüm teknik şartname limitleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Modifiye bitümün fiziksel özellikleri (TS EN 14023, 2010).

Sıra No	DENEY ADI	STANDARDI	BİRİMİ	PMB 58-28	PMB 64-28	PMB 70-16	PMB 70-22	PMB 70-28	PMB 76-16	PMB 76-22	PMB 76-28	PMB 82-16	PMB 82-22
1	PENETRASYON(25 °C, 150 gr, 5 sn.)	TS EN 1426	0,1 mm	90-150 (8)	40-100 (5)	45-80 (4)	45-80 (4)	45-80 (4)	25-55 (3)	25-55 (3)	25-55 (3)	25-55 (3)	25-55 (3)
2	YUMUŞAMA NOKTASI	TS EN 1427	°C	≥ 45 (8)	≥ 50 (8)	≥ 60 (6)	≥ 60 (6)	≥ 55 (7)	≥ 65 (5)	≥ 65 (5)	≥ 60 (6)	≥ 70 (4)	≥ 70 (4)
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÜKTİLİTE ^a (25°C, 5cm/dk)	TS EN 13589	J	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)
4	ELASTİK GERİ DÖNME ^b (25 °C)	TS EN 13398	%	≥ 80 (2)	≥ 80 (2)	≥ 60 (4)	≥ 70 (3)	≥ 80 (2)	≥ 60 (4)	≥ 70 (3)	≥ 80 (2)	≥ 60 (4)	≥ 70 (3)
5	PARLAMA NOKTASI	TS EN ISO 2592	°C	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)
6	ÖZGÜL AĞIRLIK	TS EN 15326	g/cm ³	1,0-1,1									
7	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G*/sinδ >1 kPa)	Yenileme Sıcaklığı TS EN 14770	°C	≥ 58	≥ 64	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 76	≥ 76	≥ 76	≥ 82	≥ 82
8	DEPOLAMA STABİLİTESİ ^c	TS EN 13399											
8.1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI	TS EN 1427	°C	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)
8.2	PENETRASYON FARKI	TS EN 1426	0,1 mm	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)
9	DÖNMELİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ ^d	TS EN 12607-1											
9.1	KÜTLE DEĞİŞİMİ		%	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 0,8 (4)	≤ 0,8 (4)	≤ 0,8 (4)	≤ 0,5 (3)	≤ 0,5 (3)
9.2	YUMUŞAMA NOKTASINDAKİ ARTMA	TS EN 1427	°C	≤ 8 (2)									
9.3	YUMUŞAMA NOKTASINDAKİ AZALMA		°C	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 2 (2)	≤ 2 (2)
9.4	KALICI PENETRASYON	TS EN 1426	%	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 45 (4)	≥ 45 (4)	≥ 45 (4)	≥ 40 (3)	≥ 40 (3)
9.5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ DSR (G*/sinδ >2,2 kPa)	Yenileme Sıcaklığı TS EN 14770	°C	≥ 58	≥ 64	> 70	≥ 70	≥ 70	≥ 76	≥ 76	≥ 76	≥ 82	≥ 82
10	RTFOT+PAV İle Yaşlandırılmış Modifiye Bitüme Yapılan Deneyler	TS EN 14760											
10.1	DSR (G*/sinδ <5000 kPa)	Yenileme Sıcaklığı TS EN 14770	°C	≤ 19	≤ 22	≤ 31	≤ 28	≤ 25	≤ 34	≤ 31	≤ 28	≤ 37	≤ 34
10.2	KİRİŞ EĞİLME REOMETRESİ (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği (S≤300 MPa, m>0,300)	Sıcaklık TS EN 14771	°C	≤ -18	≤ -18	≤ -6	≤ -12	≤ -18	≤ -6	≤ -12	≤ -18	≤ -6	≤ -12

^aBu koşul gerekli olduğu zaman aranacaktır.

^bSadece elastomerik katkılarda aranacaktır.

^cModifiye bitüm depolanmadan kullanılacaksa, depolama stabilitesi deneyinin yapılması zorunlu değildir.

^dYüksek vizkoziteli modifiye bitümlerde RTFOT deneyi 163 °C'den daha yüksek (180 °C'yi geçmeyen sıcaklıkta yapılabilecektir.

TFO deneyi idarenin izni ile RTFOT yerine kullanılabilir.

Not: 1,2,4,9.1,9.2,9.4 sıra nolu deneylerin şantiyede yapılması zorunludur. Parantez içindeki ifadeler TS EN 14023 standardındaki o değere ait sınıfı göstermektedir.

Ayrıca, kullanılan modifiye bitümden yılda en az iki kez numune alınarak tabloda belirtilen tüm deneyler yapılacaktır.

Kaplamaların farklı performans parametrelerine herhangi bir olumsuz etkide bulunmadan oluşabilecek bozulmaları engellemek yada geciktirerek kaplamanın servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Katkı maddesi bitüme katılarak “modifiye bitüm”, katkı maddesi asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılarak, “modifiye karışım” elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Bu açıdan, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır (İlcalı, 2001). Karışımın modifikasyonunda ise katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma vs. gibi sorunlarla karşılaşılmamakta; ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü elde ederek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi uygun olmamaktadır.

Bilindiği gibi bağlayıcı özelliklerin belirlenmesinde uygulanan test yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan test yöntemlerine göre daha uygun ve daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Karışıma yönelik testlerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı test ekipmanlarına gereksinim duyulmaktayken karışım deneyleri üstyapı işleyişinin belirlenmesi ve değerlendirilmesinde daha temsili olmaktadır (İlcalı, 2001).

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitümün kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 2.2’de verilmiştir (İlcalı, 2001).

Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve karışımlar konusundaki çalışmalarda son yıllarda polimerler temel alınarak; polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırma yapılmaktadır. Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri Tablo 2.3’te gösterilmiştir.

Tablo 2.2. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (Ilıcalı, 2001).

Tip	Özellikler	Modifiyerin Bağlayıcı Kıvamına Etkisi
1. Filler	- Mineral Filler Taş Tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kül - Karbon Siyahı - Sülfür	Sertleştirme
2. Genleştirici (Ekstender)	- Sülfür - Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER - Doğal Kauçuk - SBR - SBS - Dönüştürülmüş Kauçuk	-
4. Plastik		Sertleştirme
5. Bileşim		-
6. Fiber	- Doğal: Asbest Taş Yünü - Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7. Oksidan	Manganez Tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	- Kurşun Karışımları - Karbon - Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	- Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları - Doğal Asfaltlar	Yumuşatma ve Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	- Aminler - Kireç	Yumuşatma

Tablo 2.3. Farklı tipteki katkı maddelerinin sağladıkları faydalar (Bahia vd., 2001).

Katkı türü	Sınıfı	Bozulma türlerine karşı faydaları				
		Kalıcı deformasyon	Yorulma çatlağı	Düşük ısı çatlağı	Nem hasarı	Yaşlanma
Fillerler	Karbon siyahı	X				X
	Mineral: <i>Hidrate kireç</i>	X				X
	<i>Uçucu kül</i>	X				
	<i>Portlant çimentosu</i>	X				
Genleştiriciler	Sülfür	X	X	X		
	Ağaç lignini				X	
Polimerler-Elastomerler	Stiren butadien di-blok SB	X		X	X	
	Stiren butadien tri-blok/radyalblok(SBS)	X	X	X		
	Stiren butadien kauçuk lateks SBR	X		X		
	Polikloropiren lateks	X	X			
	Doğal kauçuk	X				
Polimerler-Plastomerler	Etilen vinil asetat (EVA)	X	X			
	Etilen akrilat (EA)	X				
	Poliisobütilen	X				
	Polietilen (düşük ve yüksek yoğunluklu)	X		X		
	Polipropilen	X				
Öğütülmüş lastik	Farklı boyutlar, işlemler ve aşamalar	X	X	X		
Oksidanlar	Manganez bileşenleri	X				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			X		
	Parafinikler/balmumu			X		
	Doğal Asfaltlar: <i>Trinidad</i>	X	X	X	X	
	<i>Gilsonit</i>	X			X	
Soyulma önleyiciler	Aminler: <i>Amidoaminler</i>				X	
	<i>Poliaminler</i>				X	
	Poliamidler				X	
	Hidrate kireç				X	
	Organo metalikler				X	
Fiberler	Polipropilen	X	X	X		
	Polyester	X		X		
	Fiberglas					
	Çelik	X	X	X		
	Güçlendirme	X	X	X		
	Doğal: <i>Selüloz</i>	X				
	<i>Mineral</i>	X				
Antioksidanlar	Karbamatlar: <i>Kurşun</i>			X		X
	<i>Çinko</i>			X		X
	Karbon siyahı	X				X
	Kalsiyum tuzları					X
	Hidrate kireç				X	X
	Fenoller					X
	Aminler				X	X

2.1. Bitüme Eklenen Katkı Maddeleri

Günümüzde bitümün ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla mineral, organik, doğal ve endüstriyel kökenli katkıları yaygın olarak kullanılmaktadır (Bardesi ve Brule, 1999).

Kullanılacak en uygun katkı maddesinin seçiminde aranan tek kriter katkının bitüme veya karışıma sağlayacağı performans değildir. Bunun yanında katkı maddesinin üretiminde çevresel uyumu ve ekonomik olması gibi faktörler de katkının seçiminde gözönünde bulundurulmak zorundadır. Bu gibi nedenlerden dolayı SBS gibi endüstriyel olarak üretilen polimer kökenli katkı maddelerinin yanında doğal asfaltlar da BSK'lerde katkı maddesi olarak yaygın olarak kullanılmış ve kullanıma uygunluğu açısından üzerlerinde birçok çalışma yapılmıştır.

Doğal asfaltlar, hidrokarbonlar ve aromatik moleküllere sahip parçacıklardan oluşan katı yada yarı katı karışımlardır. Doğal asfaltlar, genel olarak karbon ve hidrojenden oluşmasına rağmen nitrojen, hidrojen, sülfürün yanı sıra az miktarda demir, nikel ve vanadyum gibi metaller de içermektedir. Hidrokarbonlar, hidrojen ve karbon atomlarından oluşan moleküller olup kömürden (en ağır), ham petrole ve metana (en hafifi) kadar değişik şekillerde organik bileşik formundadırlar. Doğada, hidrokarbonlar hidrokarbon olmayan maddelerle kompleks karışım formunda olup bu karışımlar sahip oldukları atomik hidrojen-karbon (H/C) ve oksijen-karbon (O/C) oranlarına ve içerdikleri nitrojen, oksijen, sülfür ve metal miktarlarına göre ayrılmaktadırlar. Bu karışımlardan biri doğal bitümlerdir (Meyer ve Witt, 1990).

Amerika'nın Utah eyaletinden, İran'ın çeşitli bölgelerinden çıkarılan Gilsonit, Trinidad ve Tobago'da bulunan göl asfaltı, Kanada'nın Atabaska Bölgesinden temin edilen katranlı kum, Suriye'de El-Beşiri bölgesinde ve Endonezya'da Buton adasında bulunan katranlı kum BSK'lar da çeşitli şekillerde kullanılmış ve olumlu sonuçlar vermiş doğal asfaltlardır.

2.1.1. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)

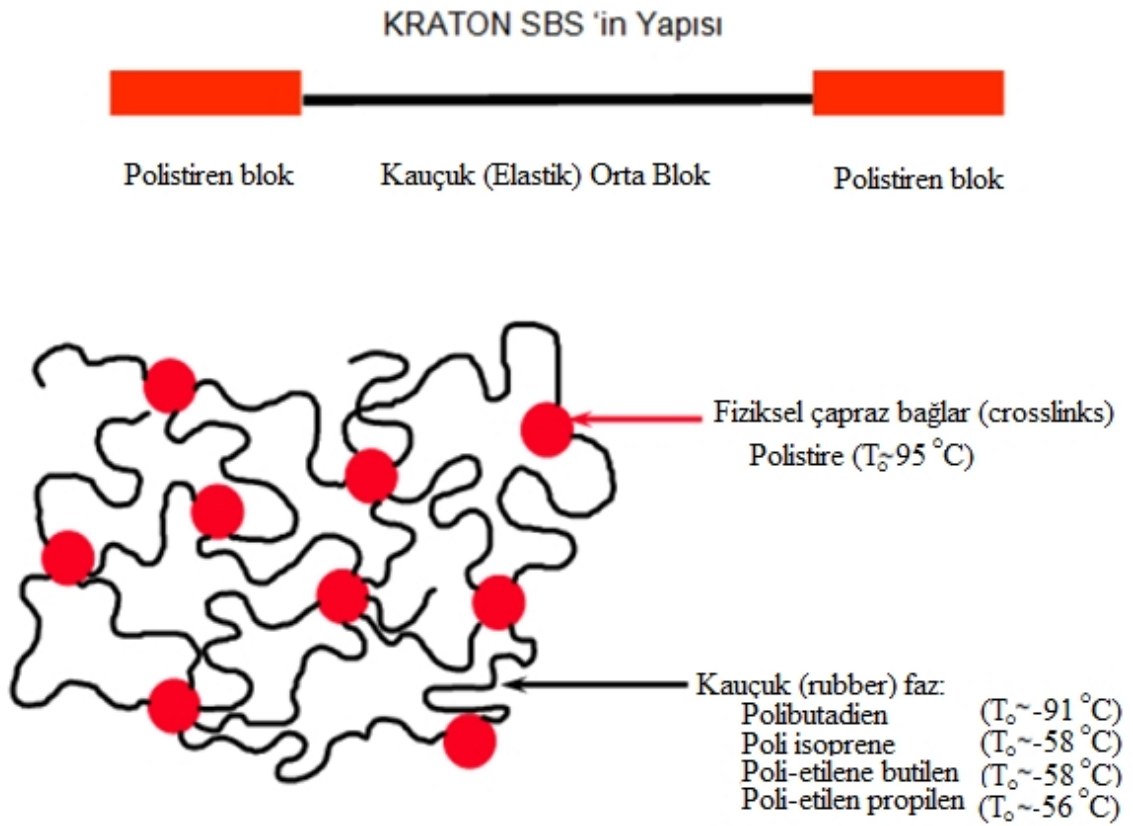
SBS, stiren-butadien-stiren blok kopolimerinin kısaca adlandırılmasıdır. Termoplastik elastomer veya stirenik blok kopolimerler, Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulan Shell Firması'nda çalışan Dr. N. Reginald Legge tarafından bulunmuştur. Stirenik kopolimerler SBS, SIS ve SEBS olarak üç ana bölüme ayrılırlar. Burada bitüm ile en iyi bağ kurabilen

SBS kopolimeri seçilmiştir. SBS bitümlü bağlayıcıların ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan granül veya toz halinde bulunabilen polimer bir katkı türüdür (Şekil 2.3).



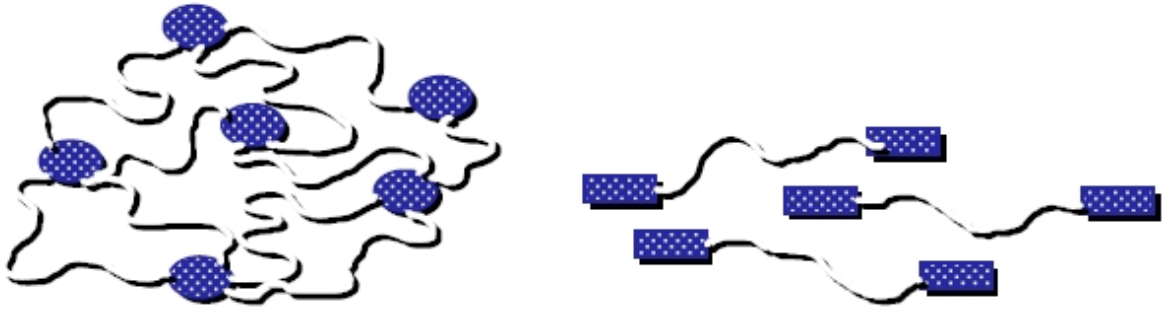
Şekil 2.3. SBS'in granül ve toz hali

Kraton D 1101 ticari ismine sahip SBS'in yapısı Şekil 2.4'te görüldüğü üzere lineer bir yapıya sahiptir.



Şekil 2.4. SBS türü polimerlerin yapısı

Karayolu uygulamalarında SBS bitüme, bitümün ağırlıkça yüzdesi olarak, %2 ile %6 arasında karıştırılabilir (Lu ve Isacson, 1997). Bu karışım esasen fiziksel bir karışım olup SBS ve bitüm arasında kimyasal bağ oluşmaz, yani depolama stabilitesi düşüktür. SBS'in bitümle karışımı temel olarak bir çözünme olayıdır. Bu çözünme olayı 180-190°C'de oluşmaktadır (Ilıcalı vd., 2001). SBS bitüm içindeki kendine benzeyen yapıları içine alarak hacminin 10 katına kadar şişmektedir. Böylece %5 oranında SBS, bitüme katıldığında, %50'si polimer fazı olan bir karışım elde edilmektedir. Bitüm içinde ısıtıldığında SBS ağ yapısından sıyrılarak akıcı hale gelmekte ve bitümle kolayca karışmaktadır. Karışımın yumuşama noktasının altına inildiğinde ise üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşmaktadır (Şekil 2.5). Bu yapı karışıma vulkanize kauçuk kadar sağlamlık vermektedir.



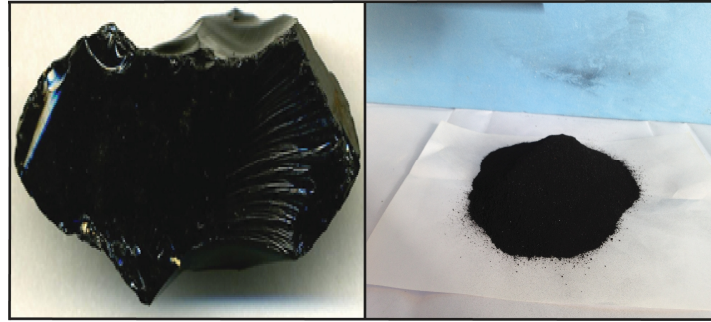
Şekil 2.5. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'in yapısı

Bitümlü bağlayıcı ve karışımı deformasyon ve mekanik yüklere karşı daha dayanıklı hale getiren bu maddeler ağır taşıt trafiğinin ve ağır statik yüklerin bulunduğu, yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere ihtiyaç duyulan kaplamalar için kullanılmaktadır.

SBS sıcak bölgelerde gerekli servis kabiliyetini ve şartname gereksinimlerini karşılamak amacıyla geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. SBS modifiyeli bitümlerde modifikasyonun etkili şekilde oluşabilmesi; SBS konsantrasyonu, bitümün kimyasal yapısı ve karıştırma süresi gibi birçok faktöre bağlıdır. Yapılan bir çok çalışma sonucunda SBS'in karışımın düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir (Cortizo vd., 2004; Tayfur vd., 2007; Vlachovicova vd., 2007; Isacson ve Zeng, 1997; Shuler ve Douglas, 1990; Won ve Ho, 1994).

2.1.2. Gilsonit

Gilsonit, genellikle birbirine paralel dikey damarlar halinde yerin derinliklerinde bulunmaktadır. Kütle halindeki Gilsonit obsidiyen mineraline benzer görünümde, oldukça parlak, siyah renkli, çentikli bir kırılma yüzeyine sahip ve çizgisi kahverengi olan bir bitümlü maddedir (Şekil 2.6). Kırılgan bir yapıya sahip olmasından dolayı kolaylıkla ezilebilir ve koyu kahverengi toz halini alır (URL-1, 2014).



Şekil 2.6. Gilsonit'in kayaç ve işlenmiş görünümü (URL-1, 2014).

Gilsonit'in özgül ağırlığı 1.03 ile 1.10 arasında değişmektedir ve Mohs skalasına göre sertliği 2'dir. %10–20 sabit C, %0 - 2 O₂ ve eser halde mineral madde içerir. 120°C ile 175°C arasında erir. Karbon sülfürde çözünürlük derecesi %98-100'dür. Gilsoniti diğer doğal asfaltlardan ayıran özellikleri yüksek asfaltten içermesi, organik çözücülerde yüksek çözünürlüğe sahip olması, yüksek saflık derecesine sahip olması, molekül ağırlığı yüksek olması ve yüksek nitrojen içeriğine sahip olmasıdır (Nakoman, 1977).

Sert bir doğal asfalt olan Gilsonit, asfaltum ya da uintaite olarak ta isimlendirilir ancak genellikle ticari olarak Gilsonit ismiyle bilinir. Katkı maddesi olarak kullanılmasının yanında çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda da değerlendirilmektedir. Gilsonit aromatik ve alifatik çözücülerde çözünebilir. Petrol ürünleriyle çok iyi uyum sağlamasından dolayı genellikle daha yumuşak petrol asfaltlarının sertleştirilmesinde kullanılır. Gilsonit'in asfalt karışımlarına kolaylıkla karıştırılması ve uyumlu olması gibi özellikleriyle diğer modifiyerlerden farklı avantajlar sağlamaktadır (URL-1, 2014).

Gilsonit'in bitüme ilave edilmesiyle bitümün penetrasyonu azalmakta, viskozitesi artmakta ve bunun sonucunda daha sert modifiye bitüm üretilmektedir. Gilsonit genel olarak iki yolla kaplama inşaatında kullanılabilir. Bitüme önceden ilave edilebildiği gibi

fabrikada ön karıştırma esnasında agregalarla karıştırılarak da kullanılabilir (Bardesi ve Brule, 1999).

Gilsonit BSK modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri arasında hidrokarbonlar sınıfına giren bir reçinedir. Bitüm modifikasyonunda sıklıkla kullanılan SBS polimeriyle kısmen yada tamamen yer değiştirerek karışımlar için önemli bir maliyet düşüşü getirmektedir (Davis ve Clyde, 1989). Gilsonit modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar, modifiye edilmemiş bitümlerle hazırlanan karışımlara göre daha yüksek stabiliteye, daha düşük deformasyona ve sıcaklık hassasiyetine bunun yanında suyun sebep olduğu soyulmaya karşı daha yüksek dirence sahip olmaktadır (URL-2, 2014).

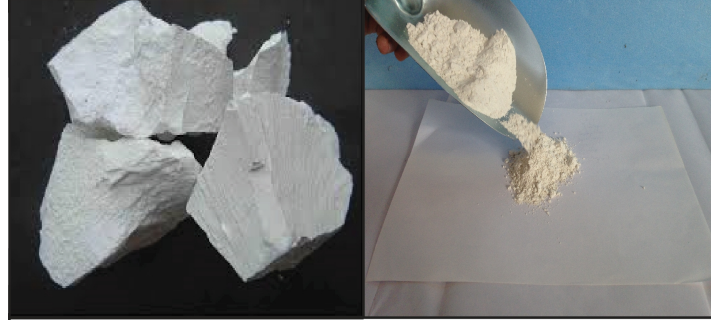
Dünyada bulunan Gilsonit yataklarına örnek olarak Utah (A.B.D.), Oregon (A.B.D.), Talaxa (Vera Cruz, Meksika) ve Ukhta (Archangel, Rusya) zuhurları verilebilir (Nakoman, 1977). İran'da dünyada çok sayıda ve zengin Gilsonit yataklarına sahip bir yer olup başlıca Zagros dağlarında bulunan Kermanşah, Luristan ve İlam eyaletlerinde Gilsonit madenleri bulunmaktadır (Ameri vd., 2011).

2.2. Karışıma Eklenen Katkı Maddeleri

Karışıma eklenen katkı maddeleri genellikle filler malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, kireç, siyah karbon, atık lastik, atık mermer gibi malzemeler BSK'larda filler olarak kullanılabilen katkı maddeleridir (Francken, 1998; Geçkil, 2008).

2.2.1. Katkı Malzemesi Olarak Sönmüş Kireç Kullanımı

20. yüzyılın başında hızlı gelişen kimya ve demir çelik endüstrisi ile çok büyük miktarlarda kireç kullanılmaya başlanmıştır. Kirecin inşaat endüstrisi, tarım ve çevre sektörlerinde gün geçtikçe artan kullanımı, kireç üretim yerlerinin yaygınlığının, kullanım yerlerine yakınlığının, üretim teknolojisinin geliştirilmesinin ve bu sayede fiyatının diğer rakip kimyasallara oranla ucuz olmasının bir sonucudur. Birçok kimyasal prosesin ana girdisi olması, kimyasallarla çabuk reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyesinden uzaklaştırılması, pahalı kimyasalların geri kazanılmasındaki rolü, organik canlılar için besi maddesi olması, ucuzluğu ve kolay bulunması gibi nedenler bu malzemenin yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır (Kılıç ve Anıl, 2006). Kayaç halinde ve sönmüş kireç Şekil 2.7'de görülmektedir.



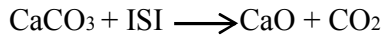
Şekil 2.7. Kirecin kayaç ve toz hali

2.2.1.1. Kirecin özellikleri

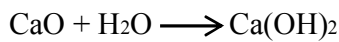
Kirecin hammaddesi olan kireçtaşı ve kalker, genellikle kalsiyum karbonattan (CaCO_3) oluşur. İçindeki kalsiyum karbonat oranını baz alarak yapılan sınıflandırmaya göre kireçtaşı cinsleri şöyle sıralanır (MÖİKR, 2001):

- | | |
|---|--|
| 1. Çok yüksek kalsiyumlu kireçtaşı (KT) | : CaCO_3 : min. % 97 |
| 2. Yüksek kalsiyumlu KT | : CaCO_3 : min. % 95 |
| 3. Yüksek karbonatlı KT | : $(\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3)$: min. %95 |
| 4. Kalsitik KT | : MgCO_3 : % 5 |
| 5. Magnezyumlu KT | : MgCO_3 : % 5-20 |
| 6. Dolomitik KT (Dolomit) | : MgCO_3 : % 20-40 |
| 7. Yüksek magnezyumlu dolomit | : MgCO_3 : % 20-46 |

Kireç, en az %90 CaCO_3 içeren kireçtaşının kireç fırınlarında 900-1000 °C'in üzerinde kalsinasyonu sonucunda kalsiyum oksite dönüşmesiyle elde edilir.



Kalsiyum oksidin yaygın olarak kullanılan adı sönmemiş kireçtir. Kalsiyum oksit, suyla reaksiyona sokulması sonucunda kalsiyum hidroksite veya ticari adıyla sönmüş kirece dönüşür:



Kirecin hammaddesi olan ve doğada bol miktarda bulunan kireçtaşı, karbonatlı tortul kayaç ve fosiller için kullanılan genel bir deyim olup, yapısında prensip olarak kalsiyum karbonat veya kalsiyum karbonat/magnezyum karbonat bileşikleri (CaCO_3 / MgCO_3) kombine halde bulunur. Bunun yanı sıra içinde değişik oranlarda demir, alüminyum, silisyum, kükürt gibi safsızlıklara da rastlanabilir. Dünya’da çok değişik formasyon ve tiplerde kireçtaşı mevcuttur. Bunlar orijin, jeolojik formasyon, mineralojik yapı, kristal yapısı, kimyasal bileşim, renk ve sertlik özelliklerine göre sınıflandırılır (Örneğin tebeşir, marn, traverten gibi). Kireç;

- Portland çimento ve beton yapımında hammadde komponenti;
- İnşaat harç ve sıvalarında bağlayıcı;
- Demir-çelik endüstrisinde safsızlaştırıcı;
- Gaz beton endüstrisinde bağlayıcı;
- Çevre denetiminde arıtma kimyasalı;
- Asitli toprakların rehabilitasyonunda pH dengeleyicisi;
- Çeşitli kimyasal maddelerin elde edilmesinde ara reaksiyon kimyasalı veya nihayi ürün komponenti;
- Yol zemin inşaatlarında stabilizatör ve asfalt yapımında aşınmaya karşı katkı maddesi olarak pek çok alanlarda kullanılır (Şengül, 2011).

2.2.1.2. Sönmüş Kirecin Bitümlü Bağlayıcı ve Karışımlar Üzerindeki Etkisi

Çeşitli yöntemlerle bitümlü sıcak karışımlara katılabilen ve filler gibi inert bir madde olmayıp karışım içinde faydalı reaksiyonlara girebilen sönmüş kireç, asfalt çimentosunun polar molekülleriyle reaksiyona girerek soyulmayı önlemede etkili olmaktadır. Bu moleküller, kireçle reaksiyona girdiğinde artık suya ilgi duymayan ve çözünmeyen tuzlar oluşturur (Petersen vd., 1987). Ayrıca, sönmüş kireç parçacıklarının karışım içerisinde dağılması ile karışım daha rijit ve sağlam olmaktadır. Mekaniksel olarak asfalt-agrega bağının kırılması yönünde risk azaltıcı etki etmekte ve ortamda su olsa dahi bu anlamda olumlu etki göstermektedir.

Kimyasal olarak, sönmüş kireç güçlü bir alkali malzemedir. Büyük oranda nötürleştirme gücüne sahiptir. Kireçteki kalsiyum; agregaya yüzeyindeki hidrojen, sodyum ve potasyum ile yer değiştirir. Kalsiyumca zengin yüzeyler, uzun zincirli organik asitlerle tepkimeye girerek suya karşı dirençli (yalıtılmış) yüzeyler oluşturur. Genellikle, %1-2

oranında sönmüş kireç, doğrudan doğruya harç (slurry) formunda uygulanır (Crandall ve Finke, 1961).

2.2.1.3. Kirecin Katılma Teknikleri

Sönmüş kireç, sıcak karışımlara çeşitli biçimlerde katılabilmektedir. Genel bir kural olarak; uygulanma oranı karışımın ağırlığı cinsinden %1 oranındadır. Soyulma potansiyelinin yüksek olduğu durumlarda kullanılan miktar artırılabilir. Kirecin bitümlü sıcak karışımlara ilave etme yöntemleri içerisinde yaygın olarak kullanılanlar aşağıda belirtilmektedir (Aksoy ve Ağar, 2002).

- **Kuru Yöntem**

Karışım ağırlığına bağlı olarak belirli oranda sönmüş kireç mineral fillere karıştırılır. Eklenen kirecin kaybı düşünülerek modifikasyona gerek duyulmaktadır. Son yıllarda, ince malzeme kaybı düşünülerek ASTEC tarafından önerilen çift kutu mikseri (double barrel mixer) ince malzemeleri etkin bir biçimde karıştırılabilmek amacıyla kullanılmaktadır.

- **Nemli Agregaya Uygulanma Biçimi**

Bu yöntemde, doygun kuru yüzey koşulunu sağlayan agreganın ihtiyaç duyduğu kireç belirlenerek (yaklaşık olarak %2-3 düzeyinde) karıştırılmaktadır. Kuru yöntemde ulaşılan kaplanmadan daha fazla bir agregaya yüzey kapallılığı oluşturmak amacıyla kireç nemli agregaya yüzeyine uygulanmaktadır. Agregaya yapışmamış bulunan kireç karışım içerisinde dağılarak tanımlanan diğer özelliklerin iyileşmesine neden olmaktadır. Sönmüş kirecin sıcak karışımlara katıldığı bu “nemli kuru” denilebilen yöntem, göreceli olarak basittir, ancak ilave su için gerekecek işlemler üretimi bir ölçüde yavaşlatmaktadır.

- **Slurry Yöntem**

Bu yöntemde, kireç ve suyun karıştırılmasıyla oluşan harç formu kullanılır. Bu harç, agreganın belli bir ölçüsü olarak uygulanır. Kaba agregaya yüzeylerinin üst düzey kaplanmasını sağlamaktadır. Harç uygulandıktan sonra, agregaya ya doğrudan doğruya plente taşınır veya belirli bir süre agregayla kirecin reaksiyona girmesi için depo edilir. Kireç agregaya bağlandığı için geri kalan karışımda kirecin en az dağıldığı karıştırma türüdür.

2.3. Literatür Taraması

Son yıllarda hız kazanan modifiye bitüm ve modifiye karışım çalışmaları, farklı katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki performans etkilerini tespit etme konusunda yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda karışıma ilave edilen sönmüş kireç, bitüme ilave edilen SBS ve Gilsonit kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

2.3.1. SBS Kullanımı

Walkering ve Vank yapmış oldukları çalışmada, SBS ve EVA polimerleri ile modifiye edilmiş bitümler kullanmışlardır. Hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde 40°C ve 50°C’de statik ve dinamik sünme deneyleri ile tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Her iki sıcaklıkta yapılan sünme deneyleri arasında tatmin edici bir ilişki olduğu, dinamik sünme ve tekerlek izi deney sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir (Walkering ve Vank, 1992).

SBS katkı maddesinin bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrü üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmada SBS’in bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir (Aglan vd., 1993).

Yapılan çalışmada stiren-butadien-stiren içeren modifiye bitümlerin düşük sıcaklık özellikleri geleneksel metotlar, dinamik mekanik analizler (DMA) ve kiriş eğme reometresi kullanarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan her üç yöntemde de SBS’in bağlayıcı parametrelerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir (Lu ve Isacsson, 1998).

Jion-Shiuh Chen ve ekibi yapmış olduğu çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS kullanmış ve bağlayıcının morfolojik ve reolojik özelliklerini transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve dinamik kayma reometresi kullanarak araştırmışlardır. SBS içeriğinin artışı ile kopolimerin yavaş yavaş baskın faz olduğu belirlenmiştir. Polimer faz artıka DSR deneyinden elde edilen tekerlek izi parametresinin arttığı belirlenmiştir (Jion-Shiuh Chen vd., 2002).

Orta ve yüksek sıcaklıklarda elastomer modifiye asfalt karışımların dinamik mekanik özelliklerinin irdelendiği çalışmada, SBS ve SEBS (stiren-etilen / butadien-stiren) olmak üzere iki tip elastomerik katkı maddesi üç farklı oranda kullanılmıştır. Polimer modifikasyonun yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşum direncini, orta sıcaklıklarda yorulma direncini artırmada etkili olduğu, SEBS’in bağlayıcının tekerlek izi direncini

SBS'den daha fazla iyileştirdiği, bununla beraber SBS'in orta sıcaklıklarda bağlayıcının yorulma direncini iyileştirmede daha etkili olduğu belirlenmiştir (Mostafa vd., 2003).

Tıǧdemir ve Kalyoncuoğlu, SBS katkılı bitümlü sıcak karışımların plastik deformasyon davranışını incelemişlerdir. Aşınma tabakası dizaynına uygun olarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde dinamik plastik deformasyon deneyleri yapılarak SBS polimer ilavesinin plastik deformasyona olan etkileri incelenmiştir. Polimer yüzdesine bağlı olarak plastik deformasyon direncinde bir artış olduğu yani plastik deformasyon değerinin azaldığı görülmüştür (Tıǧdemir ve Kalyoncuoğlu, 2005).

Kumar ve ekibi yapmış olduğu çalışmada SBS ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanarak modifiye bitümler hazırlamışlardır. Bu modifiye bitümlerle hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uygulanan deneyler sonucunda her iki katkı maddesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımı önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir (Kumar vd., 2008).

Yılmaz ve Kök, bitüm modifikasyonunda SBS kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada Tüpraş rafinesinden temin edilen 100/150 penetrasyonlu bitüme üç farklı oranda (%2, %4 ve %6) SBS ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçlarından, SBS oranı arttıkça bağlayıcı rijitliklerinin arttığı dolayısıyla işlenebilirliğin azaldığı belirlenmiştir. Dinamik kayma reometresi (DSR) sonuçlarından artan SBS içeriği ile tekerlek izine karşı dayanım parametresinin arttığı belirlenmiştir (Yılmaz ve Kök, 2008).

2.3.2. Gilsonit Kullanımı

Sudan kaynaklanan bozulmaların ve ağır taşıt trafiğinin fazla olduğu Norveç'in Oslo kentindeki yollarda 1970'lerin başında bitümlü sıcak karışımlarda katkı maddesi olarak Gilsonit kullanılmıştır. Gilsonit kullanılması ile karışımların rijitliği artmış, sudan kaynaklanan bozulmalar azalmış, yolların servis ömrü önceki döneme göre iki kat artmıştır. Ayrıca Gilsonit kullanımının karışımı sertleştirmesine rağmen düşük ısı çatlaklarına neden olmadığı belirlenmiştir (Widyatmoko ve Elliott, 2008; Dokken ve Evensen, 2010).

Huang ve ekibi yapmış oldukları çalışmada kaba agregaları önce Gilsonitle kaplamış daha sonra bu malzemeyle BSK numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan BSK numuneleri üzerine dinamik modül, tekerlek izi, indirekt çekme dayanımı, yorulma ve nem hasarına karşı dayanım deneyleri uygulanmıştır. Kaba agreganın öncelikle Gilsonit ile

kaplanmasının BSK'ların performansını önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir (Huang vd., 2006).

Prapaitrakul ve ekibi, Amerika'nın Utah eyaletinde çıkarılan Gilsonit'in %45 oranında reçine, yüksek oranda yaşlanmayı ve soyulmayı önleyici kimyasallar içerdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca Amerika'nın Utah eyaletinde çıkarılan Gilsonit'in bütün agrega türleriyle çok iyi uyum sağladığı belirlenmiştir (Prapaitrakul vd., 2005).

Ameri ve diğerleri, İran'ın Kermanshah bölgesinden temin edilen Gilsonit'i bitüm modifikasyonunda kullanmışlardır. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar üzerinde yorulma ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Bitüm ağırlığınca %12 oranında Gilsonit kullanımı ile modifiye bitümlerin daha yüksek $G^*/\sin\delta$ ve $G^*.\sin\delta$ değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Gilsonit modifiyeli bitümle hazırlanan karışımların daha yüksek elastik modüle, yorulma ömrüne, tekerlek izi direncine sahip olduğu belirlenmiştir (Ameri vd., 2011-a).

Hamidi yapmış olduğu çalışmada Gilsonit kullanımı ile bitümlü bağlayıcının penetrasyonunun azaldığını ve yumuşama noktasının arttığını belirlemiştir. %4 ve %8 Gilsonit ile hazırlanan modifiye bağlayıcılar içeren karışımlar üzerinde uygulanan deneyler sonucunda Gilsonit'in BSK'ların stabilitesini ve tekerlek izine karşı dayanımlarını önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir. İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda katkı maddesi olarak Gilsonit kullanımının 25°C sıcaklıkta rijitliği önemli oranda arttırmasına rağmen 35 ve 45°C sıcaklıkta Gilsonit'in önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Hamidi, 1998).

Yoğun trafiğin hakim olduğu bölgelerde kalıcı deformasyonu azaltmak amacıyla Avustralya'nın New South Wales bölgesinde kaplama tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımlarda katkı maddesi olarak toplam karışım ağırlığının %0.25'i oranında Gilsonit kullanılmıştır. Rutin kontrollerde (yapımı takip eden 6, 12 ve 24 ay) Gilsonit'in kalıcı deformasyonu önemli oranda azalttığı belirlenmiştir (URL-3, 2014).

Gilsonit'in katkı malzemesi olarak kullanıldığı Amerika'nın New Jersey ve Washington eyaletlerinde yapılan uygulamalarda Gilsonit sırasıyla bitüme ağırlıkça %8 ve %10 oranlarında ilave edilmiştir. Yapılan incelemelerde kaplamanın servis ömrünün iki yıl arttığı belirlenmiştir (URL-3, 2014).

Ana bağlayıcı olarak farklı İran bitümlerinin kullanıldığı çalışmada farklı katkıların bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, Gilsonit, bitüm ağırlığınca %2, %4, %7, %10 ve %13 oranlarında kullanılmıştır. Elde

edilen sonuçlardan Gilsonit oranı arttıkça bağlayıcıların viskozitesinin, yumuşama noktasının ve kompleks modülünün arttığı, faz açısı ve penetrasyonun azaldığı belirlenmiştir (Aflaki ve Tabatabae, 2009).

İran Gilsonit'i ve öğütülmüş atık araç lastiği (CR) ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık performansları BBR deneyi ile incelenmiştir. Gilsonit, bitüme ağırlıkça %2, %7, %13 oranlarında, öğütülmüş araç lastiği ise ağırlıkça %10, %14, %16 oranlarında ilave edilerek 6 farklı numune elde edilmiştir. BBR deneyleri 5 farklı sıcaklıkta (-6, -12, -18, -24, -30°C) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları düşük sıcaklıklarda öğütülmüş araç lastiğinin Gilsonit'e göre daha iyi performans sergilediğini göstermiştir (Hajikarimi vd., 2013).

Suo ve Wong yapmış oldukları çalışmada Gilsonit modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK, normal BSK ve taş mastik asfalt numuneleri üzerinde indirek çekme yorulma deneyi uygulamışlardır. Deneye tabi tutulan karışımlar içerisinde en yüksek yorulma dayanımına Gilsonit modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin sahip olduğunu belirlemişlerdir. Çatlak oluşuktan sonra ise kontrol karışımlarının Gilsonit modifiyeli karışımlardan daha yüksek dayanım sergilediği belirlenmiştir (Suo ve Wong, 2009).

İran'ın 3 farklı bölgesinden (Kermanşah, İlam ve Luristan) elde edilen 5 Gilsonit numunesinin kullanıldığı bir çalışmada PG 58-22 ve PG 64-22 performans dereceli 2 çeşit saf bitüme ağırlıkça farklı yüzdelerde (%4, %8 ve %12) Gilsonit ilave edilmesiyle modifiye bitümler hazırlanmıştır. Elde edilen modifiye bitümlerin Superpave yöntemine göre düşük, orta ve yüksek sıcaklık performansları değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda Gilsonit kullanımı ile bitümlerin orta ve yüksek sıcaklık performanslarının önemli derecede arttığı görülmüştür. Gilsonit içeriklerinin artmasıyla bu iyileşmenin devam ettiği tespit edilmiştir. Gilsonit, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarında olumlu etki göstermesine rağmen düşük sıcaklık performanslarında olumsuz bir etkiye sahip olduğu ve modifiye bitümlerdeki Gilsonit içeriğinin artmasıyla beraber düşük sıcaklık performanslarının düştüğü ortaya çıkmıştır (Ameri vd., 2011-b).

Kök ve diğerleri yapmış olduğu çalışmada Amerika Gilsoniti'nin SBS ile birlikte kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Gilsonit ve SBS'in tek başına kullanıldığı numuneler ve Gilsonit ile SBS'in farklı oranlarda bir arada kullanılmasıyla elde edilen numuneler üzerine aynı reolojik testler (DSR ve RV) uygulanmıştır. Bitüm modifikasyonunda Gilsonit ve SBS kullanımının bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını ($G^*/\sin\delta$) artırdığı fakat SBS'in daha etkin olduğu belirlenmiştir. İki katkı maddesi aynı bağlayıcıda

karıştırıldığında Gilsonit/SBS oranına göre %1 SBS'in yerine yaklaşık %3-4 Gilsonit'in gerektiği ortaya çıkmıştır (Kök vd., 2011).

2.3.3. Sönmüş Kireç Kullanımı

Özen, yapmış olduğu çalışmada filler olarak kireç ve bitüm modifikasyonunda SBS kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon dayanımı üzerindeki etkilerini dinamik sünme ve tekerlek izi deneyleri ile belirlemiştir. Filler olarak %2 oranında hidrate kireç ve bitüm modifikasyonunda %5 SBS kullanılmıştır. Hem kirecin hem de SBS'in bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımını önemli oranda arttırdığı, kireç ve SBS kullanımının daha etkin olduğu tespit edilmiştir (Özen, 2010).

Hesami ve ekibi yapmış oldukları çalışmada ılık asfalt karışımlarda filler olarak hidrate kirecin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada ılık asfalt katkı maddesi olarak Sasobit ve Asphamin kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan kirecin ılık asfaltlarda da nem hasarına karşı dayanımı arttırmak için kullanılabileceği belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile ılık asfalt karışımlarda agrega ile bitüm arasındaki bağın bozulması için daha fazla enerjinin gerekeceği belirlenmiştir (Hesami vd., 2013).

Şengül ve ekibi yapmış oldukları çalışmada hidrate kirecin bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada hidrate kireç filler olarak 3 farklı oranda (%2, %4 ve %6) kullanılmıştır. Ayrıca bitüm modifikasyonunda SBS kullanılmıştır. Kalıcı deformasyona karşı dayanım; dinamik sünme ve Marshall oranı yaklaşımlarıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan kireç kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının arttığı, kireç oranının artması ile kalıcı deformasyonun da azaldığı tespit edilmiştir (Şengül vd., 2012).

Zou ve ekibi, yapmış oldukları çalışmada hidrate kirecin bitümlü sıcak karışımların kırılmaya karşı dayanımlarına etkilerini incelemiştir. Çalışmada hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış karışımların kırılmaya karşı dayanımları değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda hidrate kirecin özellikle koşullandırılmış karışımlarda bitümlü sıcak karışımların çatlak oluşumuna karşı dayanımlarını önemli oranda iyileştirdiği belirlenmiştir (Zou vd., 2013).

1999 yılında Polonya'nın Kielce bölgesindeki çeşitli yollarda kireç içeren taş mastik asfalt karışımlar uygulanmıştır. Bu kaplamalar, 2011 yılına kadar iyi bir performans

sergilemiştir. 2011 yılında bu yollardan alınan karotlardan bitüm geri elde edilmiş ve bir kısım deneylere tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda bitüme karışmış olan kirecin adeziv özellik gösterdiği ayrıca bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını geciktirdiği tespit edilmiştir (Iwanski ve Mazurek, 2013).

Kök ve Yılmaz, mineral filler yerine karışımın ağırlıkça %2'si oranında kireç kullanmış, sonuçta kirecin BSK'ların nem hasarına karşı dayanımını önemli miktarda arttırdığını tespit etmişlerdir (Kök ve Yılmaz, 2009).

Bitümlü kaplamalarda soyulma önleyici katkı olarak sönmüş kireç kullanılan çalışmada; kirecin bitümün erken yaşlanmasını geciktirdiği ve böylece adezyon mekanizmasını iyileştirdiği ortaya koyulmuştur. Ayrıca bitümlü sıcak karışımlarda sönmüş kireç kullanılması ile oksidatif sertleşmenin azaldığı belirlenmiştir (Crandall ve Finke, 1961).

Lee ve Mun yapmış oldukları çalışmada farklı yöntemlerle kireç kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon ve yorulmaya karşı dayanımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda kireç kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona ve yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımı önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir (Lee ve Mun, 2012).

Porkinson, yapmış olduğu çalışmada filler olarak kireç kullanılması durumunda kaplamanın dayanımının önemli ölçüde arttığını, kireç içeren karışımların trafik etkisiyle oluşan yükleri dağıtma bakımından kireç içermeyen karışımlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini, kireç kullanımı ile karışımların kalıcı deformasyona ve düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımlarının arttığını belirlemiştir (Porkinson, 1997).

Behiry yapmış olduğu çalışmada kireç içeren ve farklı hava boşluklarına sahip karışımların mühendislik özelliklerini incelemiştir. Hava boşluk miktarının artması ile kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca rijitlik modülü değerleri de hava boşluğu %4'den %6'ya çıktığı zaman %10 oranında azalmıştır. İndirekt çekme dayanımı deney sonuçlarından boşluk oranı ve doygunluk derecesinin artmasıyla çekme dayanımı değerlerinin önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. Doygunluk derecesinin %50'den %80'e çıkması ile çekme dayanımı %21 oranında azalmıştır. Kireç kullanımı, MQ değerlerini saf karışıma göre %100'e kadar arttırmıştır. Ayrıca kireç kullanımı ile kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir (Behiry, 2013).

3. DENEY YÖTEMLERİ

3.1. Superpave Tasarım Yöntemi

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) karışım tasarım yönteminde bitümler, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmışlardır. Bu tür bitümlere performans sınıfı (Performance Grade) bitüm adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Bununla beraber, Superpave yöntemi, asfaltın rafineriden çıkışından kaplama olarak hizmet verinceye kadar geçen süre içerisindeki oksidasyon yaşlanmasını da dikkate almakta ve asfalt deneylerinde bu durum simüle edilmektedir. Superpave bitüm deneyleri, malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili özelliklerini ölçmektedir. Bu deneyler bitümün; yaşlanma, işlenebilirlik, tekerlek izi oluşumu, yorulma ve termal etkilere karşı performanslarının belirlendiği bir seri deneyler grubudur (Öztürk ve Çubuk, 2004).

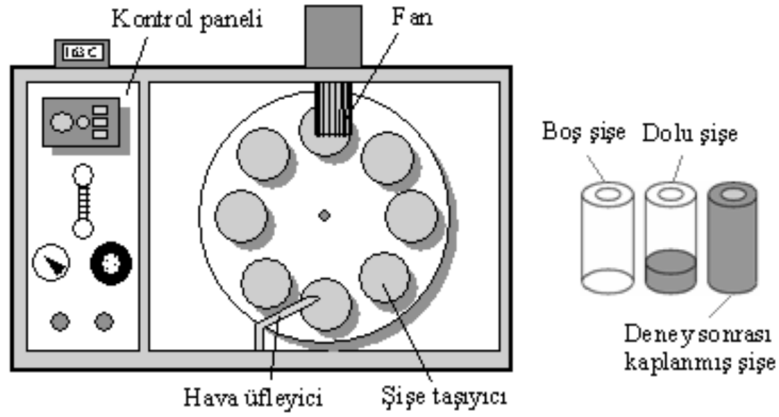
3.1.1. Superpave Bağlayıcı Tasarımı

Superpave yönteminde bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmasını temsil etmesi amacıyla dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ve uzun dönem yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla basınçlı yaşlandırma aleti (PAV) deneyleri kullanılmaktadır. Bağlayıcıların işlenebilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla dönel viskozimetre (RV), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla kırılgan eğme reometresi (BBR) ve yüksek sıcaklık dayanımlarını belirlemek amacıyla dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi uygulanmaktadır.

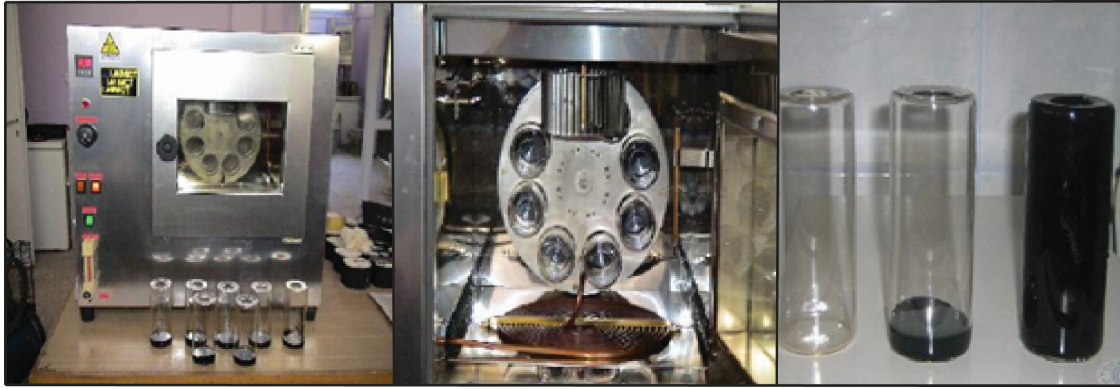
3.1.1.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuvarında RTFOT (dönel ince film halinde ısıtma deneyi) ile simüle edilmektedir. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik 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 şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2).



Şekil 3.1. Dönel ince film halinde ısıtma deney (RTFOT) aleti şematik görünüşü



Şekil 3.2. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi

3.1.1.2. Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)

Basınçlı yaşlandırma aleti (PAV), kaplamanın servis ömrü boyunca bağlayıcılarda meydana gelen uzun dönemli sertleşme özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. PAV deneyi, RTFO deneyinden elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFO deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre

değişen (90–100 ve 110°C) belirli bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları Tablo 3.1’de verilmiştir. Deney aleti ise Şekil 3.3’te görülmektedir.

Tablo 3.1. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

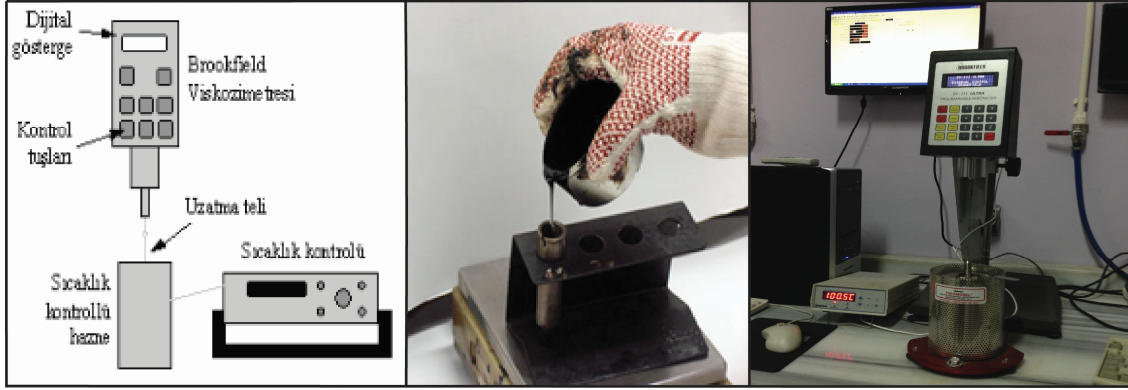
Bağlayıcı Sınıfları	PAV Deney Sıcaklığı (°C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100-110
PG 76-Y	100-110
PG 82-Y	100-110



Şekil 3.3. PAV deney aleti

3.1.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

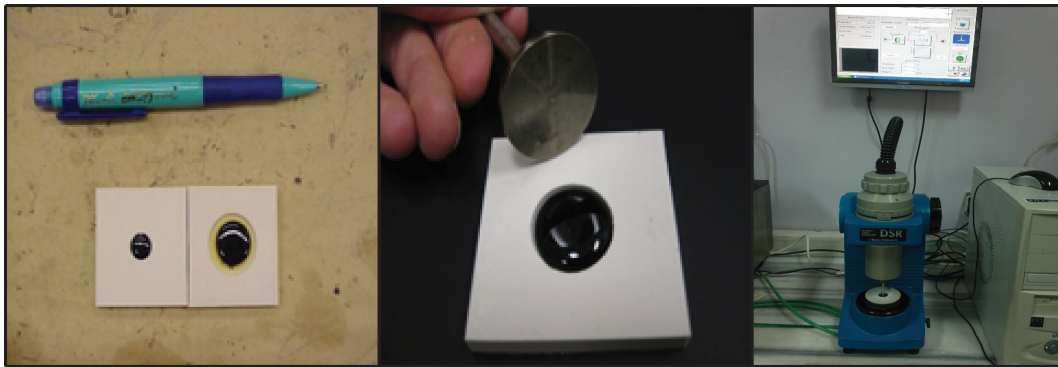
Dönel vizkozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 3.4). Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C’deki viskozite değeri 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmamalıdır (Petersen vd., 1994).



Şekil 3.4. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi

3.1.1.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

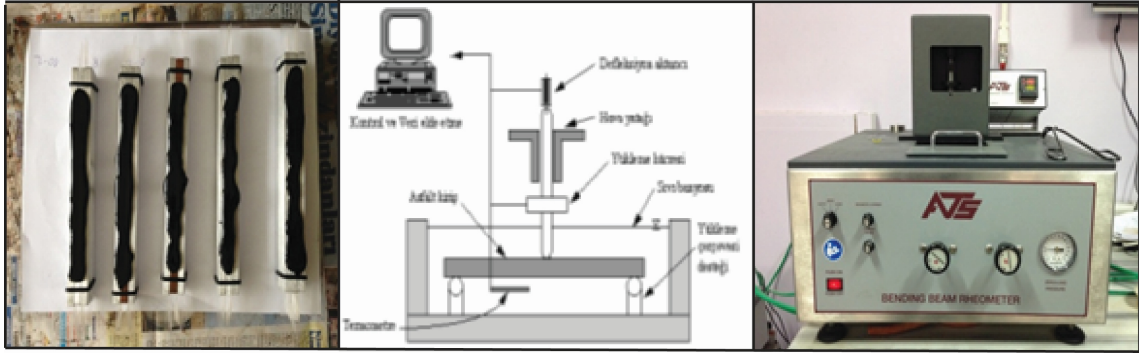
Dinamik kayma reometresi deneyi, bağlayıcıların yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliktedir. Deneylerde kullanılan DSR deney aleti Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi

3.1.1.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Termoplastik özelliğinden dolayı bitüm, düşük sıcaklıklarda rijit (katı) özellik göstermektedir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinin amacı, düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak belirlenememesinden dolayı belirli bir sıcaklıkta sabit yük altında bağlayıcının ne kadar defleksiyon yapacağını tespit etmektir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bu deney için PAV deneyinden elde edilen yaşılandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. BBR deney aleti Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması

3.1.2. Superpave Karışım Tasarımı

Superpave karışım tasarım yöntemi, kendi kriterlerini sağlayan uygun agrega ve bitümlü bağlayıcı malzemelerinin seçilmesini içermektedir. Karışım tasarım işlemleri, Superpave agrega gradasyon kriterlerini sağlayan farklı agrega deneme karışımlarını hazırlayarak, bu deneme karışımlarını bitümlü bağlayıcı ile karıştırmak ve bu sıcak karışımları kısa dönem yaşılandırmaya tabi tutmak, yaşılanmış numuneleri sıkıştırmak ve agrega deneme karışımlarının hacimsel özelliklerini analiz ederek en iyi agrega deneme karışımını tasarım agrega gradasyonu olarak seçmek ve seçilen tasarım agrega gradasyonu için gerekli olan tasarım bitüm içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli bitüm içeriklerinde karışım numunesi hazırlayarak sıkıştırmaktır.

Superpave tasarım yönteminde agrega gradasyonu seçildikten sonra tahmini bitüm içeriğinde, tahmini bitüm içeriğinin % 0.5 ve % 1.0 üstündeki yüzdelerde ayrıca tahmini bitüm içeriğinin % 0.5 altında olmak üzere en az dört ayrı bitüm içeriğinde, her bitüm

içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmaktadır. Bu dört bitüm içeriği, Superpave karışım tasarım yöntemi için minimum gereksinimdir. Hazırlanan BSK numuneleri kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulduktan sonra önceden belirtilen şekilde sıkıştırma sıcaklıklarında yoğurmalı pres ile tasarım yoğurma sayısında (N_{des}) sıkıştırılmaktadır. Yukarıda belirtilen şekilde hava boşluğu yüzdesi (V_a), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), bitümle dolu boşluk yüzdesi (VFA), filler oranı (DP), $\%G_{mm}@N_{ini}$, $\%G_{mm}@N_{des}$ değerleri belirlenmekte ve bu değerler ile bitüm içeriği grafikleri çizilmektedir. Hava boşluğu yüzdesi (V_a) – Bitüm içeriği grafiğinden %4 boşluğa tekabül eden bitüm içeriği tasarım bitüm içeriği olarak seçilmektedir. Diğer grafiklerde bu bitüm içeriğine karşı gelen değerler alınarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmakta ve uygunluğu tespit edilmektedir. Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım bitüm içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (N_{maks}) sıkıştırılmakta ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmaktadır.

3.2. Karışım Deneyleri

3.2.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

BSK numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34 standardına göre uygulanmıştır. Stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Standarda göre öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilmektedir. Daha sonra numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 40 ile 60 dakika arasında bekletilmektedir. Kırma çenesi ise $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda 30 dakika veya $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilmelidir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesine ortalananak biçimde yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yüke ulaşıldığı andaki deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 sn içerisinde deney bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63.5 mm olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki bağıntı yardımıyla tespit edilmektedir.

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (3.1)$$

Burada c, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu sayede stabilite ve akma değerleri belirlenmektedir. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılmaktadır. Daha sonra geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalamadan sapma miktarları belirlenmektedir. Eğer aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune serisi iptal edilmekte ve yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır.

Marshall stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir (Zoorob ve Suparma, 2000; Hınıslioğlu ve Ağar, 2004; Çolak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2008).

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemlerinden biri kalıcı Marshall stabilitesi yöntemidir. Kalıcı Marshall stabilitesi yönteminde numuneler $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır (Aksoy vd., 2005; URL-4, 2014). 24 saat 60°C suda bekletilen numunelerin stabilite değerinin normal stabilite değerine oranlanması ile kalıcı Marshall stabilitesi belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değerinin yüksek olması bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olacağını göstermektedir.

3.2.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi

Bitüm ile agrega arasındaki adezyon, uzun vadede kaplamanın performansının yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biridir. Bitüm ile agrega arasına giren su adezyonun azalmasına dolayısıyla BSK kaplamalarda erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına etki eden faktörler (Behiry, 2013);

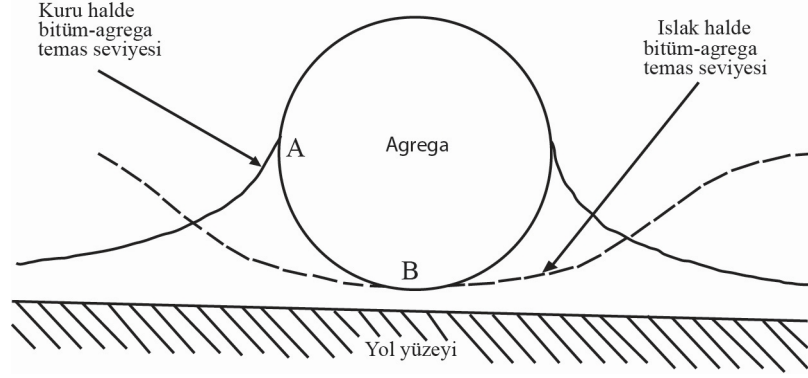
- a) Hem kaba hem de ince agreganın türü karışımda meydana gelebilecek nem hasarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Granit, çakıl taşı gibi agregalar ve silisyum içeren tipteki malzemeler neme karşı hassastırlar ve bitümlü sıcak karışımda birlikte kullanıldığı zaman soyulmaya meyillidirler. Kireçtaşı gibi diğer agregalar nem hasarına karşı daha hassastırlar. Bazı durumlarda soyulmanın çoğunluğu karışımın kaba agrega kısmında meydana gelir. Bazı durumlarda ince agrega neme daha hassastır ve karışımın bu kısmında daha fazla soyulma meydana gelir.
- b) İkinci faktör ham petrolün kaynağı ve asfalt çimentosunun üretiminde kullanılan rafineri sürecidir. Çoğu asfalt çimentoları nem hasarı açısından nispeten etkisizdir. Asfalt çimentoları soyulma derecesi bakımından kendi aralarında çok fazla fark göstermezler. Diğer bir deyişle asfalt çimentosunun kaynağı agrega türünden çok daha az etkindir.
- c) Üçüncü faktör asfalt beton karışımının özelliğidir. Sıkıştırma derecesinin etkilediği karışımın permabilitesi ve hava boşluğu seviyesi, asfalt çimentosu ve agrega gradasyonu gibi özellikler suyun doygunluk seviyesini ve drenajını kontrol ettikleri için önemlidir. Boşluk oranı %6'nın üzerinde olan karışımlarda daha yüksek nem hasarı meydana gelir. Hava boşluk seviyesi %15 ile %25 arasında olan açık

gradasyonlu karışımlar suyun drenajına izin verdiği için nem hasarı açısından istisnadırlar.

- d) Asfalt film kalınlığı karışımın durabilitesini etkilediği için bitümlü sıcak karışımın nem hassasiyeti karakteristikleri üzerinde etkiye sahiptir. Kalın filmler siyah esnek karışımlar olarak ilişkilendirilmekte olup durabil olarak bilinirler. Diğer taraftan kahverengimsi olarak ilişkilendirilen ince filmler sökölme ve çatlamaya yatkın kırılğan karışımlar olup kaplamanın servis ömrünün önemli ölçüde ksalmasına sebep olurlar. Asfalt film kalınlığı fazla olan karışımlar, ince asfalt film kalınlığına sahip karışımlardan suyun zararlı etkilerine karşı daha az hassastır.
- e) Çevresel şartlar ve trafik, karışımlarda soyulma miktarını etkiler. Yağmur ve kar yağışının fazla olduğı yerlerde genel olarak daha fazla nem hasarı meydana gelmektedir. Trafığın tipi ve hacmi önemli değişkenlerdir. Trafik ağırlaştıkça ve kamyon hacmi attıkça soyulma miktarı daha da artar.

Bitümlü karışımlarda bitümün çözölme mekanizmasını saptamak amacıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bitümlü karışımlarda adetif ve kozetif olmak üzere iki tür çözölme söz konusudur. Agreg a temiz ve kuru, karışım sızdırmaz özellikte ise, çözölme kozatif olacaktır. Ancak, su varlığı altında, bozulma türü hemen hemen her durumda, bitümün agreg a üzerinden soyulması sonucu adezyon kaybı şeklinde gerçekleşecektir. Çeşitli çözölme mekanizmaları aşağıda verilmiştir (Lav ve Lav, 2004).

• **Yer değıştirme:** Yer değıştirme teorisi üç fazlı bitüm/agrega/su sisteminin termodinamik dengesi göz önüne alınarak oluşturulur. Bir bitüm/agrega ara yüzeyine su girmesi durumunda ortaya çıkan yüzey enerjileri ele alındığında, bitümün agreg a yüzeyi boyunca geri çekildiğı görölmektedir. Şekil 3.8, bitüm tabakası içerisine gömölmüş bir agreg a parçacığını göstermekte olup A noktası sistem kuru olduğındaki pozisyonu temsil etmektedir. Su ile temas halinde, pozisyon kayar ve yeni ara yüzey, hareket ederek B noktasına ulaşır. Bu yeni denge pozisyonu kullanılan bitümün tür ve vizkozitesine bağılı olarak değışen bir temas açısına sahiptir.

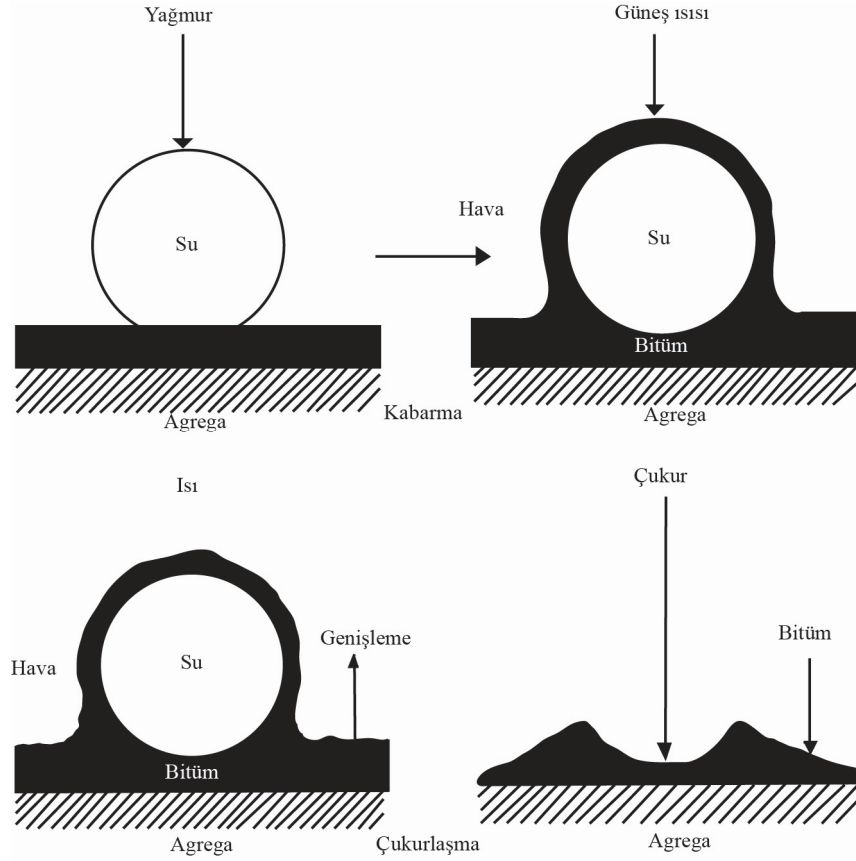


Şekil 3.8. Su varlığı altında bitüm/su ara yüzeyinin geri çekilmesi (Lav ve Lav, 2004).

- **Ayrılma:** Bitüm ve agregaya, bitüm tabakası üzerinde açık bir kırılma ya da süreksizlik görülmemesine karşın, ince bir su tabakası veya toz ile birbirinden uzaklaştırıldığında ayrılma ortaya çıkmaktadır. Bitüm tabakası agregayı tamamen kuşatmasına karşın ortada yapışkan bir bağ olmadığından bitüm agregaya yüzeyinden kolayca soyulur. Bu işlem tersine de olabilir, yani su ortamdan çıktığında bitüm agregaya yeniden yapışabilir. Bitüm ve agregaya arasına su girmesi için ikinci bir bağ çözülme mekanizmasının ortaya çıkması gerekmektedir.

- **Bitüm tabakasının yırtılması:** Bitüm agregayı, kaplanan tabakanın en ince olduğu keskin kenar ve pürüzler dahil olmak üzere tamamen örttüğünde bitüm tabakasının yırtılması ortaya çıkmaktadır. Suyun agregaya yüzeyine erişmek için bitüm içerisinden sızabildiği kanıtlanmıştır. Su bu hareketi, buhar ya da sıvı halde gerçekleştirebilir. Bu tür bir süreç başladığında su, bitümle agregaya arasına yayılarak birbirlerinden ayrılır. Suyun bitüm filmine sızma ve ayırma hızı bitümün vizkositesine, agregaya yüzeyinin doğal yapısına, bitüm tabakasının kalınlığına ve yüzey aktif maddeleri gibi diğer bileşenler ile filler malzemesinin varlığına bağlıdır. Bitüm filminin agregaya yüzeyinden belirli miktarda ayrılması gerçekleşince, dingil yükleri tarafından üretilen gerilmeler filmi kolayca yırtacak ve bitüm geri çekilecek, ıslanmış agregaya yüzeyleri ortaya çıkacaktır.

- **Kabarcıklanma ve çukurlaşma:** Kaplamadaki bitümün sıcaklığı arttığında, bitümün vizkositesi azalacaktır. Bu arada yağmur yağmış ise, Şekil 3.9’da gösterildiği gibi bitüm, su damlacıklarının kenarlarından süzülerek bir kabarcık oluşturacaktır. Eğer sıcaklık artarsa, bu kabarcık genişler ve sonuçta agregaya yüzeyine su erişimine olanak sağlayacak bir çukur oluşturur.



Şekil 3.9. Bitümlü bir malzemede kabarcık ve çukur oluşumu (Lav ve Lav, 2004).

• **Hidrolik aşınma:** Hidrolik aşınma, kaplama yüzeyinde görülmekte olup, araç lastiklerinin suya doygun bir kaplama yüzeyinde hareketinden kaynaklanmaktadır. Araç lastiğinin önünde bulunan su kaplama boşluklarına doğru itilir. Geçiş sırasında ise, araç lastiği bu suyu emer. Bu nedenle yüzeydeki boşluklar basınç ve çekme gerilmelerine bir çevrim şeklinde sürekli olarak maruz kalacaklarından kaplama yüzeyindeki bitüm agregadan ayrılacaktır. Eğer suda toz ve silt bulunuyorsa bunların aşındırıcı etkisi ayrılma işlemini hızlandıracaktır.

• **Boşluk suyu basıncı:** Ayrılma mekanizması açık gradasyonlu veya iyi sıkıştırılmamış karışımlarda büyük önem taşımaktadır. Bu tür karışımlarda malzeme dingil yükleri altında sıkıştıkça içinde su hapsolabilmektedir. Malzeme su geçirmez hale gelince dingil yükleri etkisiyle boşluk suyu basınçları oluşur. Bu durumda, bitüm/agrega ara yüzeyi çevresince çözülmeye yol açan kanallar ortaya çıkar. Hapsolan suya daha yüksek sıcaklıkların etkimesi durumunda gerilmeler büyüyerek su geçişini ve sonucunda çözülmeyi hızlandıracaktır. Düşük sıcaklıklarda ise buz oluşumu aynı derecede hasar verir.

- **Kimyasal çözülme:** Bitüm tabakası içerisinde nüfus eden su agrega yüzeyinde çift su tabakası oluşturabilmektedir. Su varlığı, hafif şekilde negatif yüklü bitümün karşısında agrega yüzeyinin negatif yüzey yükü taşımasına sebep olur. Bu durumda, iki negatif yükün etkileşimi sonucunda itme kuvveti ortaya çıkar. Agrega yüzeyine daha fazla su geldikçe bitüm tabakasının agregadan çözülmesi de hızlanır.

Superpave yönteminde bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla AASHTO T 283 standardında yer alan prosedür uygulanmaktadır. Bu deney bir performans deneyi olmamakla birlikte karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ayrıca kullanılan katkının etkisini incelemeye kullanılmaktadır. Bu deney prosedüründe 7 ± 0.5 hava boşluğuna sahip olacak şekilde en az 6 adet numune yoğurmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Standart Superpave numune hazırlama yöntemine göre tek fark kısa dönem yaşlandırma sırasında numunelerin 16 saat süresince 60°C sıcaklıkta ardından 2 saat süresince karıştırma sıcaklığına sahip etüvde bekletilmesidir. Hazırlanan numuneler eşit hava boşluğuna sahip olacak şekilde iki gruba ayrılmakta, birinci grupta bulunan numuneler koşullandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Koşullandırma işlemi uygulanacak numuneler saf su içeren piknometre içerisine konularak 10-26 in.Hg. (13-67 kPa) vakum uygulanmaktadır. Vakum işlemi numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar devam etmektedir. Vakum işleminden sonra boşlukların su ile dolma oranı %70'ten az olması durumunda vakum işlemine devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise tahribat olması nedeniyle bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır (AASHTO T 283, 2003). Piknometre ve vakum aleti Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenmektedir.

$$J = B' - B \quad (3.2)$$

J : Absorbe su hacmi (cm³)

B' : Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

$$S' = J / I * 100 \quad (3.3)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (3.4)$$

S' : Doygunluk derecesi (%)

I : Hava boşluğu hacmi (cm³)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm³)

Vakum işleminden sonra numuneler plastik film (streç film) ile kaplanmakta ve ağzı kapanabilen ve uygun hacimdeki plastik torbalara (buzdolabı poşeti gibi) konularak torbanın içine 10 ml su konularak torbanın ağzı kapatılmaktadır (Şekil 3.9). Standarda göre numunelerin öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat ardından 60°C suda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürenin ardından numuneler poşet ve plastik filminden çıkarılmaktadır. Hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numuneler 25°C'deki suda 2 saat bekletilmekte ve 50 ± 2 mm/dakika hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Çekme dayanımı deney düzeneği

Deneyden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmiştir. Formülde TS çekme dayanımı (kPa), P_{mak} kırılmaya neden olan maksimum yük (kN), t ortalama numune yüksekliği (m), d numune çapını (m) ifade etmektedir. Çekme dayanımı oranı (TSR) ise koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin ($TS_{yaş}$) koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerine (TS_{kuru}) oranlanması ile belirlenmektedir. Superpave şartnamesine göre bu değer minimum %80 olması istenmektedir.

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (3.5)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (3.6)$$

3.2.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir. İndirekt çekme modunda ölçülen rijitlik modülü, elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şeklidir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Diametral deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

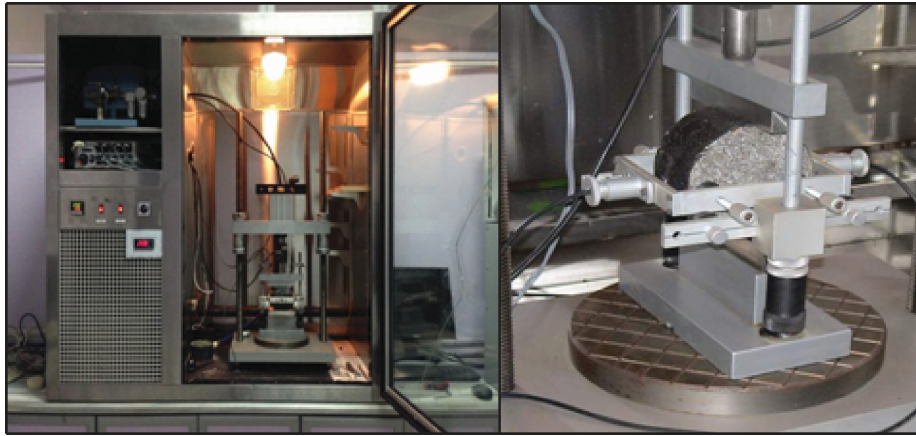
Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 20°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, tahmini poisson oranı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi ve yük artış süreleri, tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, önce numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5

darbe uygulanmaktadır. Bu deney BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız bir deney olup rijitlik modülü (S_m , MPa) formül 3.7 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = \frac{F(R + 0.27)}{LH} \quad (3.7)$$

Bu formülde; F , maksimum dikey yük (N); H , 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm); L , ortalama numune kalınlığı (mm); R ise poisson oranıdır (0.35). Deneyde Şekil 3.12'deki test düzeneği kullanılmıştır.

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. İki değer arasında %10'dan fazla sapma olması durumunda numune bir kez daha 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. Aralarında %10'dan az sapma olan iki değer ortalama alınarak numunenin ITSM değeri belirlenmektedir.



Şekil 3.12. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği

3.2.4. Merdaneli Sıkıştırıcı ile Plak Şeklinde Numune Hazırlanması

Doğrudan numuneleri deneye tabi tutmak veya deney numunesinin keserek elde etmek amacıyla hazırlanan plak şeklindeki bitümlü sıcak karışımların sıkıştırılmasında EN 12697-33 standardında tanımlanan yöntemler kullanılmaktadır.

Bu standartta belirtilen yöntemlerde belirli bir ağırlıktaki bitümlü karışım numunesi, kontrollü sıkıştırma enerjisi uygulanarak veya belirlenen hacim ve dolayısıyla boşluk oranına ulaşıncaya kadar sıkıştırılmaktadır. Standart pnömatik lastik metodu, çelik silindir

(merdaneli pres) metodu ve parça plak metodu (sliding plate) olmak üzere üç farklı yöntemi açıklamaktadır.

Numunenin kalıpta sıkıştırılmasını sağlayan cihaz; ileri geri kontrollü, kendi kendine ilerleyebilen statik olarak numuneyi sıkıştıran dönen tekerlek veya elle kontrol edilen silindir veya silindirin etkisini simule eden ve numuneye statik yük uygulayan silindir parçasından oluşmaktadır. Belirli bir hacimde veya hava boşluğunda numuneler hazırlanacaksa titreşimli sıkıştırıcı veya tabla kullanılabilir. Cihaz, aşağıda belirtilen F statik yükünü uygulayabilmelidir:

$$\frac{F}{l * 2D} \geq 10^{-5} \quad (3.8)$$

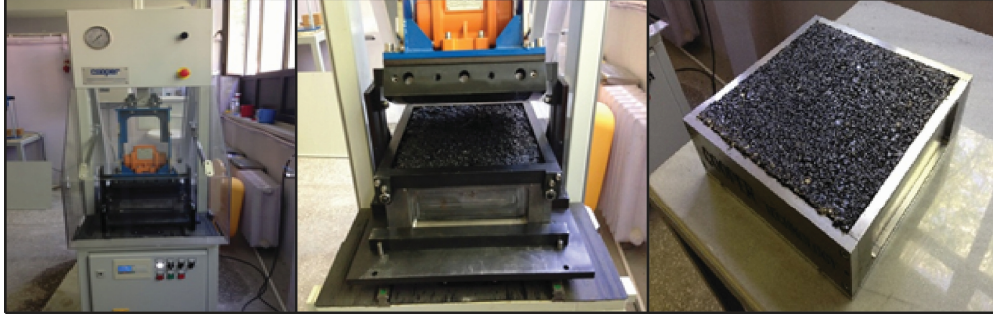
Burada, F tekerlek veya silindire uygulanan statik yük (kN) l, kalıbın iç genişliği (mm), D, silindir veya tekerleğin çapıdır (mm). Çelik silindirin çapı 400 ile 1100 mm aralığında olmalıdır. Çelik silindirin 10-50 aralığında bir geçiş sayısı sonucu istenen yoğunluğa veya hava boşluğuna ulaşılmaktadır. Eğer plak şeklindeki numuneler kontrollü sıkıştırma enerjisi ile çelik silindir kullanılarak hazırlanıyorsa silindirin genişliği, kalıbın iç genişliğinden (10±5 mm) daha küçük olmalıdır. Kullanılacak malzeme miktarı bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı (G_{mm}), kalıbın iç boyutları (L ve l), numunenin kalınlığı (e), boşluk içeriği (V_a) yardımıyla aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir:

$$M = 10^{-6} * L * l * e * G_{mm} * \left(\frac{100 - V_a}{100} \right) \quad (3.9)$$

Burada, M numune ağırlığı (kg), L kalıbın iç uzunluğu (mm), l kalıbın iç genişliği (mm), e numunenin son yüksekliği (mm), G_{mm} bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlık (gr/cm^3), V_a numunenin boşluk oranıdır (%). Kalıba $M \pm \% 0.1$ gr malzeme konulur. Eğer imkan varsa kalıbın içinde malzeme kürekle dağıtılır ve böylece segregasyon engellenmiş olur. Köşelerdeki malzemeye sıkıştırmaya başlamadan bastırılarak tesviyesi yapılmalıdır.

Sabunlu solüsyon hafifçe silindire sıkılır veya malzeme ile silindir arasına bir film tabakası yerleştirilir. Sıkıştırma işlemine harekete ara verilmeksizin düzgün bir yüzey elde

edilinceye kadar devam edilir. Gerekli sayıdaki geçiş tamamlanıncaya kadar sıkıştırmaya devam edilir. Plak şeklinde hazırlanan numuneler ve merdaneli sıkıştırıcı şekil 3.13'te verilmiştir.



şekil 3.13. Merdaneli sıkıştırıcı ve numune hazırlanması

3.2.5. Tekerlek İzi (Kalıcı Deformasyon) Deneyi

EN 12697-22 standardında tanımlanan bu deney hem laboratuvarıarda üretilen hem de arazide kaplamadan alınan numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Tekerlek izi deneyi sabit sıcaklıkta belli bir yük uygulayan tekerleğın numune üzerinde tekrarlı geçişler yapmasıyla gerçekleştirilmektedir. Deney sonucunda oluşan tekerlek izi derinliğı BSK'ların deformasyon oluşumuna karşı dayanımlarını göstermektedir. Tez çalışmasında kullandığımız tekerlek izi deney aleti standartta belirtilen küçük boy tipteki cihaz sınıfına girmektedir (şekil 3.14).



şekil 3.14. Tekerlek izi deney aleti

Standarda göre tekerleğin dış çapı 200-205 mm arasında olmalıdır. Tekerlek desenli olmamalı ve genişliği 50 ± 5 mm olmalıdır. Tekerleğin üzerindeki kauçuk lastik kalınlığı 20 ± 2 mm olmalıdır. Normal deney şartlarında numunenin yüzeyinden ölçülen tekerleğe uygulanacak yük (P) Newton biriminde aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmektedir:

$$P = \left[\left(700 \frac{w}{50} \right) \pm 10 \right] \quad (3.10)$$

Tekerleğin hareket mesafesi 230 ± 10 mm ve her 60 sn'deki yük tekrar frekansı $26,5 \pm 1$ olmalıdır. Cihaz ayarlanan sıcaklığı ± 1 °C hassasiyetle sağlayabilmelidir. Deney numuneleri, kendi kalıbında EN 12697-32 veya EN 12697-33 standardına göre hazırlanmalıdır. Deneylerde kullanılacak aynı seriye ait iki numunenin hacim özgül ağırlığı arasındaki fark ortalama hacim özgül ağırlıktan % 1'den fazla farklı olmamalıdır.

Küçük cihazlarda kullanılacak numunelerin yüksekliği arazide uygulanacak kalınlıkta hazırlanmalı ya da agrega boyutuna göre yaklaşık olarak aşağıda belirtilen kalınlıklarda olmalıdır.

- En büyük dane boyutu 8 mm den küçük karışımlar için 25 mm
- Dane boyutu 8-16 mm arasında olan karışımlar için 40 mm
- Dane boyutu 16-22 mm arasında olan karışımlar için 60 mm
- Dane boyutu 22-32 mm arasında olan karışımlar için 80 mm

Hazırlanan numunelerin her bir kenarının ortasından yükseklikleri ölçülmelidir. Nominal kalınlık 50 mm veya daha az ise dört ölçüm arasındaki fark 2.5 mm den fazla, nominal kalınlık 50 mm den fazla ise dört ölçüm arasındaki fark % 5'ten fazla olmamalıdır. Tekerleğin hareket edeceği bölgeye master tutulmalı ve yükseklik farkı 2 mm den fazla olan numune varsa deneylerde kullanılmamalıdır.

Hazırlanan numuneler deney sıcaklığında nominal numune kalınlığı 60 mm den az ise 4 saatten, 60 mm den fazla ise 6 saatten az olmayacak ve 24 saati geçmeyecek şekilde koşullandırılmalıdır.

3.2.5.1. Prosedür A'ya Göre Deneyin Uygulanması

Otomatik deplasman ölçüm cihazı ile deformasyonlar belirlenecek ise; hareket halinde iken başlangıçtaki düşey deplasman ölçülür ardından her 25 ± 1 devir teker geçişinde

tekerleğin traversin orta noktasında yük uygulanan alanın orta noktasından 10 mm içerden ölçüm yapılmaktadır. Deney 1000 devir tekerlek geçişine kadar yada tekerlek izi 15 mm'ye ulaşıncaya kadar devam ettirilmektedir.

3.2.5.2. Prosedür B'ye Göre Deneyin Uygulanması

Başlangıçtaki düşey deplasman tespit edildikten sonra ilk bir saatte en az 6-7 defa, sonra en fazla 500 devirde bir ölçüm yapılır. Tekerleğin düşey pozisyonu numune profilinin ortalama değeri olarak tanımlanır. Düşey pozisyon, traversin orta noktasındaki yükleme alanının merkezindeki yaklaşık ± 50 mm lik numune kısmında yaklaşık olarak eşit aralıklı en az 25 noktadan ölçülmektedir. Tekerleğin düşey pozisyonu deneyi durdurmadan ölçülebilmektedir. Deney, 10.000 devir tekerlek geçişine veya tekerlek izi derinliği 20 mm oluncaya kadar devam etmektedir. Tekerlek izi artış eğimi (mm/10³ devir) aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

$$WTS = \frac{(d_{10.000} - d_{5.000})}{5} \quad (3.11)$$

Burada;

WTS ; Tekerlek izi artış eğimi (mm/10³ devir)

d_{10.000} ve d_{5.000} ; 5.000 ve 10.000 yük tekrarı sonrasındaki tekerlek izi derinliği (mm).

Ortalama tekerlek izi artış eğimi iki numuneden elde edilen değerlerin ortalamasından elde edilmektedir. Eğer deney 10.000 yük tekrarından önce bitmişse, ortalama tekerlek izi artış eğimi tekerlek izi derinliği eğrisinin en az 2.000 yük tekrarı sonundaki lineer kısmından hesaplanmaktadır.

3.2.6. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır. Bu mikro hasarlar uzun dönemde yorulma çatlağı olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır (Francken, 1998). Yorulma

çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve yükten kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır (Kök, 2007). Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma kaplamanın belirli bir oranda yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

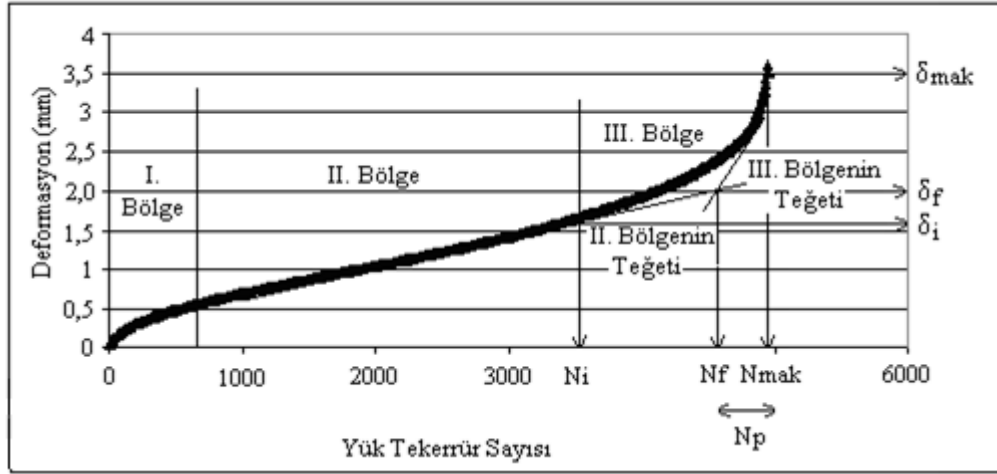
İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı yada araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. Silindir şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

Gerilme kontrollü İndirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 3.15’de deney düzeneği görülmektedir. ITSM deneyinde olduğu gibi deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.



Şekil 3.15. Yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 3.16'da temsili olarak görüldüğü gibi yük tekrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır (Subagio vd., 2003; Aragao vd., 2010).



Şekil 3.16. Temsili deformasyon - yük tekrür sayısı ilişkisi

Çatlak ilerleme oranı (r_f), yorulma ömrü değerinden maksimum yük tekrar sayısına kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili formül aşağıda verilmiştir (Subagio vd., 2003). Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_f = \frac{N_p}{\delta_{\max} - \delta_f} \quad (3.12)$$

Burada;

r_f : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

$\delta_{f\max}$: Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon (mm)

δ_f : Yorulma ömründeki (N_f) toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada, ana bağlayıcı olarak Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 sınıfı saf bağlayıcı kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak SBS, Amerika ve İran Gilsoniti kullanılmıştır. Bağlayıcı ve karışım tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmıştır.

Çalışmada uygulama bölgesi olarak coğrafi konumu 38°17' ile 39°11' enlemleri arasında bulunan Elazığ ili seçilmiştir. Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen son 27 sene içerisindeki her yılın ardı ardına en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklığı değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. 2011 yılı yüksek sıcaklık verileri cihazlardan kaynaklanan problem nedeniyle Meteoroloji Bölge Müdürlüğü tarafından belirlenememiştir. Bu nedenle 2011 yılı yüksek sıcaklık değerleri hava sıcaklık tahminleri kullanılarak belirlenmiştir (URL-5, 2014).

Tablo 4.1. Elazığ'ın 27 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri

Tarih	Yüksek Sıcaklık (°C)							Tarih	Düşük Sıcaklık (°C)
	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün		
03.08.1987– 09.08. 1987	36.0	35.5	37.6	38.1	40.1	40.0	39.0	27.01.1987	-10.8
21.08.1988–27.08. 1988	35.0	36.3	36.3	35.5	36.5	36.6	34.7	22.01.1988	-8.7
25.07.1989–31.07. 1989	35.0	35.4	36.0	36.7	37.5	38.0	36.2	04.01.1989	-11.2
16.07.1990–22.07. 1990	37.7	35.0	37.2	37.6	40.4	40.4	36.0	11.01.1990	-15.8
30.07.1991–05.08.1991	38.2	38.0	36.0	36.4	39.8	39.0	39.2	07.02.1991	-14.6
11.08.1992–17.08. 1992	33.0	34.2	34.2	36.8	37.0	35.2	34.4	10.02.1992	-19.1
18.07.1994–24.07. 1993	34.5	36.8	39.4	40.2	40.2	40.0	38.0	16.02.1993	-18.6
10.07.1994–16.07. 1994	37.0	37.4	37.8	38.8	38.4	37.4	35.4	06.12.1994	-15.3
01.08.1995–07.08. 1995	36.0	36.2	37.0	37.6	37.0	35.4	35.6	23.01.1995	-10.4
10.07.1996–16.07. 1996	37.0	37.8	37.8	38.4	38.8	37.4	36.2	03.02.1996	-10.4
29.07.1997–04.08.1997	35.0	33.2	36.0	35.8	35.4	36.6	36.6	06.02.1997	-13.0
15.07.1998–22.07. 1998	39.0	39.6	39.8	37.9	38.5	40.1	39.7	19.01.1998	-10.3
30.07.1999–05.08.1999	35.0	35.2	35.8	37.3	38.8	38.8	37.3	21.02.1999	-8.0
26.07.2000–01.08.2000	38.3	39.4	39.8	40.7	42.2	41.8	40.0	22.01.2000	-16.5
25.07.2001–31.07. 2001	40.0	41.4	40.5	39.6	39.3	38.0	40.1	22.02.2001	-11.4
28.07.2002–03.08.2002	35.4	36.0	36.,	36.3	36.5	36.8	35.2	26.12.2002	-17.7
05.08.2003–11.08. 2003	35.5	33.2	35.0	39.2	35.6	37.0	37.2	23.02.2003	-14.4

Tablo 4.1. Elazığ’ın 27 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri (devamı)

Tarih	Yüksek Sıcaklık (°C)							Tarih	Düşük Sıcaklık (°C)
	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün		
27.07.2004–02.08.2004	36.0	36,0	36,6	37.3	38.3	39.0	38.5	09.01.2004	-12.4
25.07.2005–31.07. 2005	37.6	37.3	37.3	39.6	38.6	38.8	37.8	27.01.2005	-10.0
11.08.2006–17.08. 2006	39.2	40.6	41.2	40.6	40.2	40.2	38.7	22.01.2006	-13.0
25.07.2007–31.07. 2007	39.6	39.2	37.2	37.7	37.4	38.0	37.8	01.02.2007	-11.6
20.07.2008–26.07. 2008	38.8	39.0	38.4	39.2	40.0	39.4	37.6	03.02.2008	-13.2
14.08.2009–20.08. 2009	33.4	34.2	35.4	37.0	37.2	35.6	33.8	02.01.2009	-10.6
27.07.2010–02.08. 2010	39.0	40.0	39.4	39.6	40.0	39.6	39.8	27.01.2010	-9.0
27.07.2011–02.08. 2011	38.0	38.0	40.0	39.0	39.0	39.0	40.0	13.02.2011	-7.3
23.07.2012–29.07. 2012	40.5	41.1	40.3	39.6	40.1	39.9	39.3	03.02.2012	-12.3
11.07.2013–17.07. 2013	35.9	35.5	35.7	36.2	36.8	37.9	37.3	11.01.2013	-10.7

Buna göre, son 27 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (189 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (27 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması, aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir. Hesaplanan yüksek ve düşük hava sıcaklıklarının ortalama değeri ve standart sapması Tablo 4.2’de verilmiştir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ort})^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

Burada;

σ : Standart sapma,

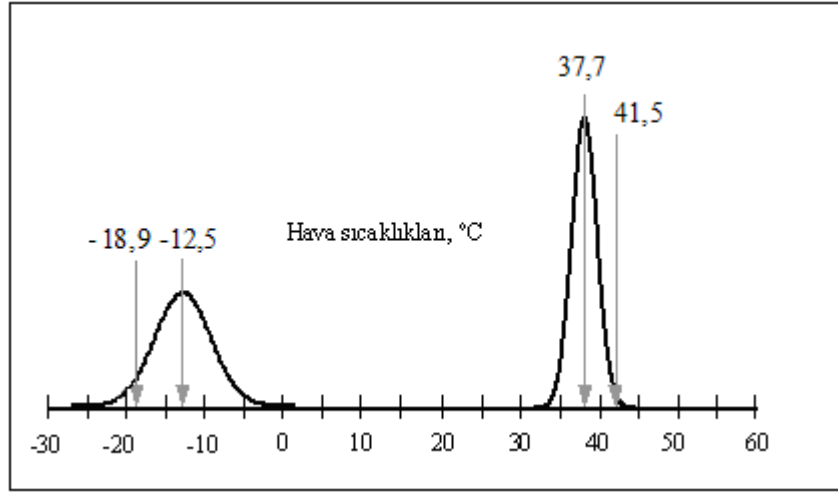
n : Örnekteki toplam gözlem sayısını,

x_{ort} : Örnekteki toplam gözlem sayısının aritmetik ortalamasıdır.

Tablo 4.2. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları

Hesaplamalar	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	37.7	-12.5
Standart Sapma (°C)	1.9	3.2

27 yıllık süre içerisindeki ardı ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıklarının ortalaması ve en düşük bir günlük sıcaklık değerlerinin ortalamasından %50 güvenilirlik için sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Sıcaklık değerlerinin standart sapmaları (σ) kullanılarak %98 güvenilirlik için sıcaklık değerleri (ortalama+2 σ) belirlenmiştir. Şekil 4.1’de, uygulama bölgesine ait Tablo 4.2’de verilen düşük ve yüksek hava sıcaklık değerleri kullanılarak bir frekans dağılım eğrisi temsili olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. Elazığ için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı

Superpave yönteminde, bitümlü bağlayıcı sınıfının seçilmesinde kullanılacak tasarım sıcaklığı olarak kaplama sıcaklığı alındığından, Elazığ için ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı esas alınarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek tasarım sıcaklığı ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklık esas alınarak kaplama yüzeyindeki düşük tasarım sıcaklığı SHRP yöntemine göre %50 güvenilirlikte aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20mm} = (T_{havamaks} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78$$

$$T_{20mm} = (37,7 - 0,00618 \times 38,44^2 + 0,2289 \times 38,44 + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 = 58,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{min} = T_{havamin} = -12,5 \text{ } ^\circ\text{C' dir.}$$

Yukarıda SHRP yöntemi ile %50 güvenilirlik derecesinde hesaplanmış kaplama tasarım sıcaklıklarının %98 güvenilirlik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20mm\%98} = T_{20mm\%50} + 2S_{maks} = 58,2 + 2 \times 1,9 = 62,0^{\circ}\text{C},$$

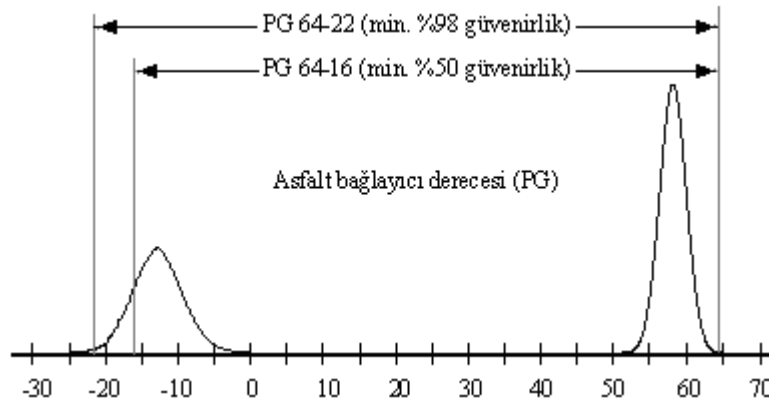
$$T_{min\%98} = T_{min\%50} + 2S_{min} = -12,5 + 2 \times (-3,2) = -18,9^{\circ}\text{C}$$

Yukarıda hava sıcaklıkları verilen uygulama bölgesinin hesaplanan tasarım sıcaklıklarının %50 ve %98 güvenirlilik değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Farklı güvenlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları

% 50 Güvenirlilik ($^{\circ}\text{C}$)				% 98 Güvenirlilik ($^{\circ}\text{C}$)			
$T_{havamaks}$	T_{20mm}	$T_{havamin}$	T_{min}	$T_{havamaks}$	T_{20mm}	$T_{havamin}$	T_{min}
37.7	58.2	-12.5	-12.5	41.5	62.0	-18.9	-18.9

Tablo 4.3'te, SHRP yöntemine göre uygulama bölgesi için %50 güvenirlikte hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 58.2°C , düşük sıcaklık değeri -12.5°C 'dir. Bu güvenirlilik değeri için seçilecek olan bağlayıcı sınıfı PG 64-16 olacaktır. Aynı yöntemle %98 güvenirlilik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 62.0°C , düşük sıcaklık değeri -18.9°C olduğundan uygulama bölgesi için bağlayıcı sınıfı PG 64-22 olarak seçilmiştir. Elazığ için seçilen bu bağlayıcı sınıfının güvenirlilik derecesine göre sıcaklık dağılım grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Elazığ için bağlayıcı sınıfı seçimi

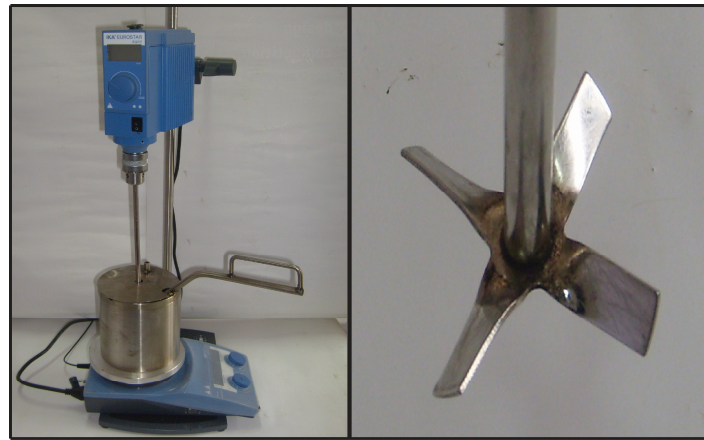
Elazığ ili için 20 yıllık tasarım trafiği tahmininin 0.3 – 3 milyon eşdeğer standart dingil yükü aralığında olduğu ve trafiğin düşük hızda (<50 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre, tasarım trafiğinin 0.3 – 3 milyon eşdeğer standart dingil yükü aralığında ve trafiğin düşük hızda olması durumunda bağlayıcının yüksek sıcaklık

derecesinin 1 derece arttırılması gerektiğinden Elazığ için belirlenen tasarım kriterlerindeki bağlayıcı sınıfı PG 70–22 olarak seçilmiştir.

4.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Tez çalışmasında katkı malzemesi olarak filler yerine %2 oranında hidrate kireç, bitüm modifikasyonunda SBS, Amerika ve İran Gilsoniti kullanılmıştır. Çalışmada ana bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda SBS'in bitüm ağırlığına %2-6 aralığında kullanılabileceği belirtilmiştir (Lu ve Isacson, 1997). Bu nedenle SBS oran bu aralığın ortası olan %4 olarak belirlenmiştir. Amerika ve İran Gilsoniti oranlarını belirlemek bitüm ağırlığının farklı oranlarında katkı maddeleri (Amerika Gilsoniti (AG) ve İran Gilsoniti (IG)) saf bitüme ilave edilerek karıştırılmıştır. Karıştırma prosedürü aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir:

- a. Saf bitüm sıcaklığı 135°C olan bir etüv içerisinde bir saati geçmeyecek şekilde eriyinceye kadar bekletilmiştir.
- b. Yaklaşık 400 gr saf bitüm karıştırıcının haznesine aktarılmıştır. Belirlenen orana göre katkı maddesi hesaplanmış ve hazırlanmıştır.
- c. Karıştırıcı haznesi hot-plate'e yerleştirilmiş ve overhead karıştırıcı için ayarlamalar yapılarak karıştırma işlemine başlanmıştır.
- d. Karıştırma işleminde Şekil 4.3'te görülen dört bıçaklı karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırma başladıktan sonra 5 dakika içerisinde katkı maddesi bitüme ilave edilmiştir.



Şekil 4.3. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı

e. Karıştırma sıcaklığı olarak 180°C seçilmiştir. Saf bitüm ve katkı maddesi 1000 rpm dönme hızında 1 saat süresince karıştırılmıştır.

f. Hazırlanan modifiye bitüm cam behere aktarılmıştır. Karıştırmada kullanılan prosedür her seferinde aynı şekilde uygulanmış böylece karıştırma prosedürünün deney sonuçlarına etki etmesi engellenmiştir.

Çalışmada öncelikle %4.0 oranında SBS bitümlü bağlayıcıya ilave edilerek modifiye bitüm hazırlanmış ve hazırlanan modifiye bitüm numuneleri bağlayıcı deneylerine tabi tutulmuştur. Tablo 3.5'te görüldüğü üzere %4.0 SBS ile hazırlanan modifiye bitümün performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin Elazığ için uygun olan değeri (PG 70-Y) sağladığı tespit edilmiştir. Ardından farklı oranlarda İran ve Amerika Gilsoniti saf PG 52-28 bağlayıcısına ilave edilmiş ve hazırlanan numunelere DSR deneyi uygulanarak performans seviyesi yüksek sıcaklık değerleri belirlenmiştir.

Çeloğlu, yapmış olduğu tez çalışmasında bitüm modifikasyonunda İran ve Amerika Gilsoniti'nden yaklaşık %10.0 kullanılması durumunda bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değerlerinin PG 70 olduğunu ayrıca modifiye bitümlerin $G^*/\sin \delta$ değerlerinin birbirine yakın olduğunu belirlemiştir. Bu nedenle öncelikle %10.0 İran ve Amerika Gilsoniti kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmış ve modifiye bitümler DSR deneyine tabi tutulmuştur. %10.0 AG ile hazırlanan modifiye bitümün performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 70 olduğu fakat $G^*/\sin \delta$ değerinin referans bağlayıcı olan %4.0 SBS modifiyeli bitüme göre düşük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle %11.0 ve %12.0 AG içeren modifiye bitümler hazırlanarak DSR deneylerine tabi tutulmuştur. AG ile hazırlanan modifiye bitümlere uygulanan DSR deneylerinden en uygun AG içeriğinin %11.0 olduğu belirlenmiştir.

%10.0 IG ile hazırlanan modifiye bitüm üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda modifiye bitümün performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 70 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca %10.0 IG ile hazırlanan modifiye bitümün $G^*/\sin \delta$ değerinin %4.0 SBS ile hazırlanan bağlayıcının 70°C sıcaklıktaki $G^*/\sin \delta$ değerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarını kontrol etmek amacıyla İran Gilsoniti'nden %9.0 ve %11.0 oranlarında da kullanılarak DSR deney sonuçları %4.0 SBS ile hazırlanan bağlayıcının DSR deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. DSR deney sonuçlarından çalışmanın geri kalanında %4.0 SBS ($MB_{4.0\%SBS}$), %11.0 AG ($MB_{11.0\%AG}$) ve %10.0 IG ($MB_{10.0\%IG}$) kullanılmasına karar verilmiştir. DSR deney sonuçlarından IG'nin AG'ye göre daha etkin olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların Çeloğlu tarafından bulunan sonuçlarla uyum

gösterdiği tespit edilmiştir (Çeloğlu, 2013). Koşullandırılmamış modifiye bitümlerin DSR deneylerinden elde edilen değerler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Katkı türü	Katkı içeriği (%)	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)					Performans
		Sıcaklık (°C)					Seviyesi
		52	58	64	70	76	
PG 52-28		1.803	0.858				PG 52
SBS	4.0	-	5.163	2.543	1.279	0.574	PG 70
AG	10.0	-	4.727	2.311	1.136	0.512	PG 70
	11.0	-	5.602	2.693	1.334	0.611	PG 70
	12.0	-	6.047	2.893	1.381	0.678	PG 70
IG	9.0	-	4.285	2.144	1.093	0.475	PG 70
	10.0	-	5.232	2.665	1.291	0.598	PG 70
	11.0	-	5.476	2.809	1.395	0.723	PG 70

Katkı oranları belirlendikten sonra saf ve belirlenen oranlarda katkı içeren modifiye bitümler dönel ince film halinde ısıtma deneyine (RTFOT) tabi tutularak kısa dönem yaşlandırılmışlardır. TS EN 12607-1'e uygun olarak yapılan RTFOT deneyinde, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe yatay eksen etrafında 75 dakika süresince dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. PAV deneyinde RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılara 100°C sıcaklıkta 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmıştır. Basıncılı yaşlandırma deney aleti bölümümüzde bulunmadığından PAV deneyi İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yapılmıştır. Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde DSR, uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde BBR deneyleri uygulanarak saf ve modifiye bağlayıcıların performans seviyeleri belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda uygulanan DSR ve BBR deneylerinden elde edilen değerler Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları

DSR deney sonuçları				
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)			
	PG 52-28	MB _{4.0%} SBS	MB _{11.0%} AG	MB _{10.0%} IG
52	1.803	-	-	-
70	-	1.279	1.334	1.291
G*/sin δ (kPa) RTFOT kalıntısı (Şartname limiti min. 2.2 kPa)				
52	14.460	-	-	-
70	-	7.318	8.163	8.769
G*.sin δ (kPa) PAV kalıntısı (Şartname limiti maks. 5000 kPa)				
16	2578	-	-	-
28	-	1158	1754	1746
BBR deney sonuçları				
Sıcaklık (°C)	m-değeri (Şartname limiti min. 0.300)			
	PG 52-28	MB _{4.0%} SBS	MB _{11.0%} AG	MB _{10.0%} IG
-12	-	0.310	0.310	0.305
-18	0.514	0.278	0.405	0.723
-24	0.587	0.258	0.250	0.531
Sünme sertliği (Mpa) (Şartname limiti maks. 300 MPa)				
-12	-	80.4	134.0	86.0
-18	182.6	125.1	389.9	359.3
-24	364.3	228.6	433.7	599.0
Performans seviyesi (PG)				
	52–28	70–22	70–22	70–22

Tablo 4.5'te görüldüğü üzere RTFOT kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının 52°C sıcaklıkta ve modifiye bitümlerin 70°C sıcaklıkta şartname limiti değeri olan 2200 Pa değerini sağladıkları belirlenmiştir. Orijinal ve RTFOT kalıntısı numuneler üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 52-Y, modifiye bitümlerin ise PG 70-Y olduğu belirlenmiştir.

Bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesini belirlemek amacıyla saf bağlayıcının PAV kalıntısı üzerinde 16°C sıcaklıkta, modifiye bitümlerin PAV kalıntıları üzerinde ise 28°C sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. DSR deneyleri sonucunda

PAV kalıntılarının hepsinin $G^* \cdot \sin \delta$ şartname limitini (maks. 5000 kPa) şartını sağlamıştır.

Ayrıca -12, -18 ve -24°C sıcaklıklarda PAV kalıntıları üzerinde BBR deneyleri uygulanmıştır. BBR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının -24°C sıcaklıkta, modifiye bitümlerin ise bütün bağlayıcıların -18°C sıcaklıklarda m-değeri ve sünme sertliği şartname limitlerini sağladığı belirlenmiştir. Tablo 4.6’da verilen PG 52-Y ve PG 70-Y bağlayıcılarına ait Superpave şartname kriterleri dikkate alındığında saf bağlayıcının performans seviyesinin PG 52-28, modifiye bağlayıcıların performans seviyelerinin ise PG 70-22 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen modifiye bitümlerin Elazığ için uygun olan bağlayıcı kriterlerini (PG 70 – 22) sağladığı tespit edilmiştir.

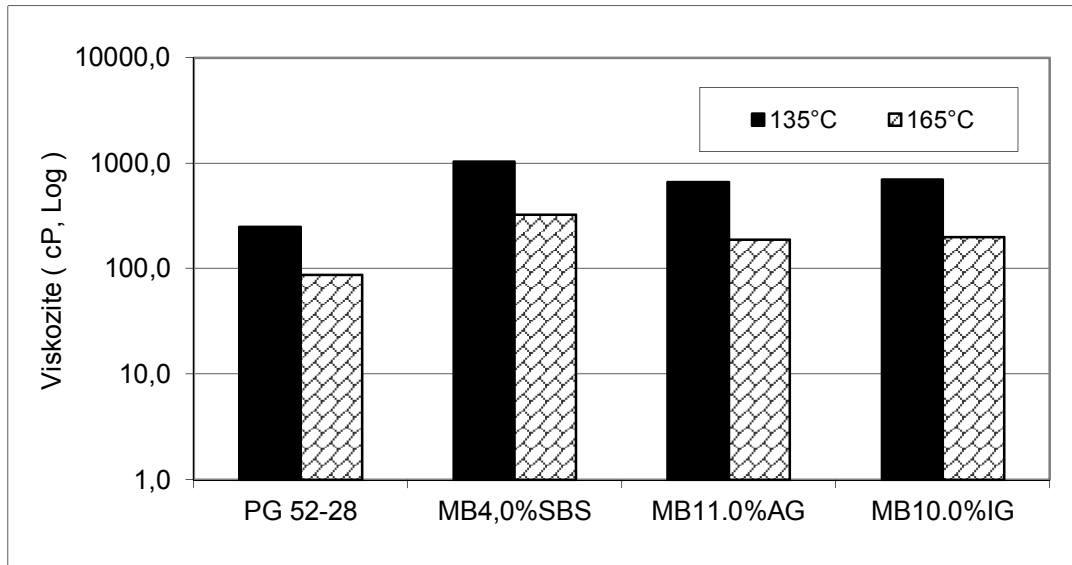
Tablo 4.6. PG 52-Y ve PG 70-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi (McGennis vd., 1994).

PERFORMANS SINIFI	PG 52-							PG 70-					
	10	16	22	28	34	40	46	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 52							< 70					
Minimum KaplamaTasarım Sıcaklığı, °C	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORJİNAL BAĞLAYICI													
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230												
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135												
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	52							70					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI													
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1.00												
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	52							70					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI													
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90							100					
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	25	22	19	16	13	10	7	34	31	28	25	22	19
Fiziksel Sertleşme,	Rapor												
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

Saf ve modifiye bitümlere 135°C ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozimetre deneyleri uygulanmıştır. Viskozite deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.7’de verilmiştir. 135°C ve 165°C sıcaklıktaki bağlayıcıların viskozite değerleri Şekil 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.7. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları

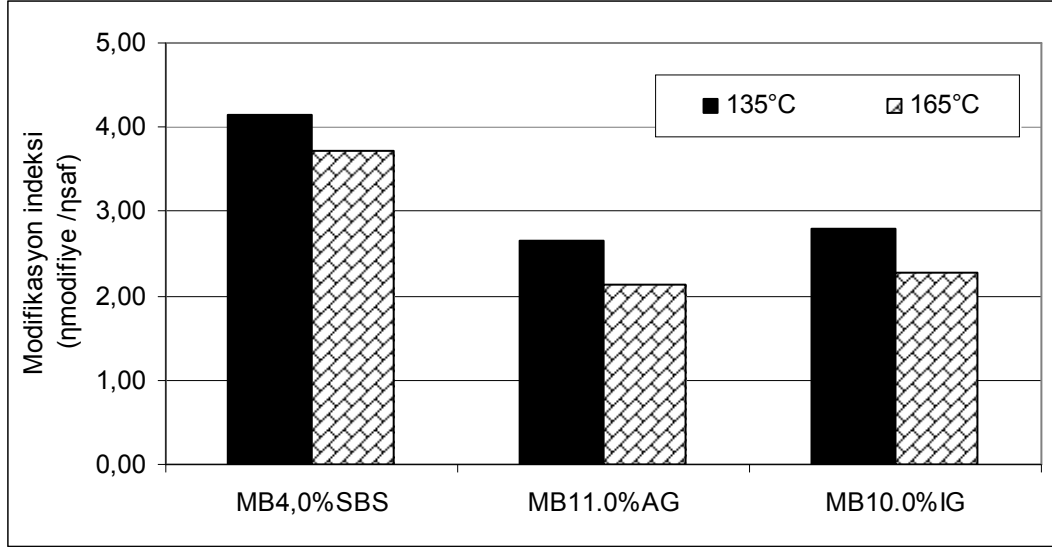
Özellik	Standart	PG 52-28	MB _{4,0%} SBS	MB _{11,0%} AG	MB _{10,0%} IG
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM	250.0	1038.0	662.5	700.0
Viskozite (cP, 165°C)	D4402	87.5	325.0	187.5	200.0
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$, 135°C)	-	1.00	4.15	2.65	2.80
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$, 165°C)	-	1.00	3.71	2.14	2.29
Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	-	146–154	171–173	165–168	166–168
Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	-	124–135	166–168	157–161	159–162



Şekil 4.4. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.4’te görüldüğü üzere bütün bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri Superpave şartname limiti olan maks. 3000 cP değerini sağlamıştır. Katkı kullanımı ile bütün sıcaklıklarda viskozite değerleri artmıştır. Modifiye bitümlerin viskozite değerlerinin

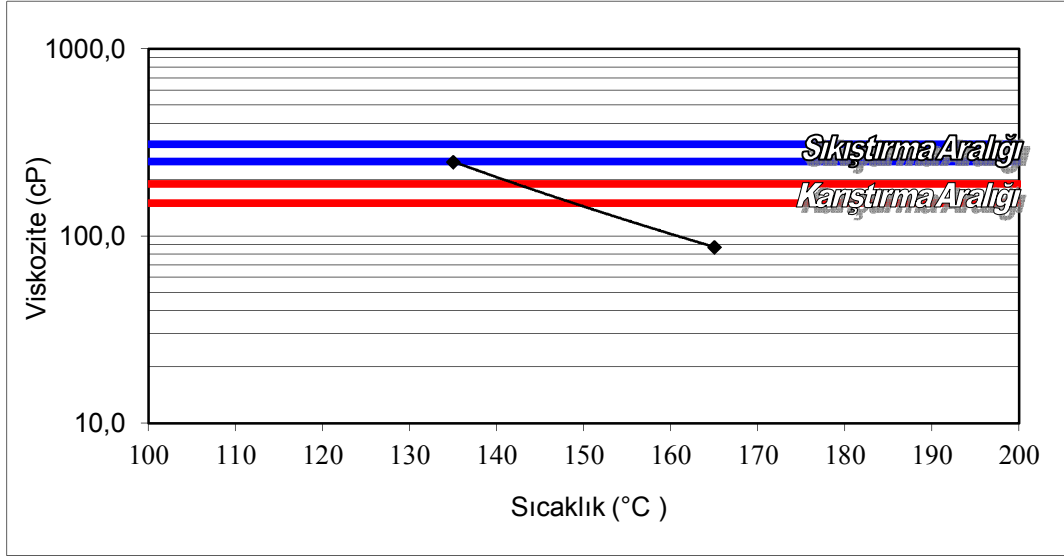
saf bağlayıcının viskozite değerine oranlanması ile belirlenen modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$) değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Modifikasyon indeksi değerlerinin sıcaklıkla değişimi

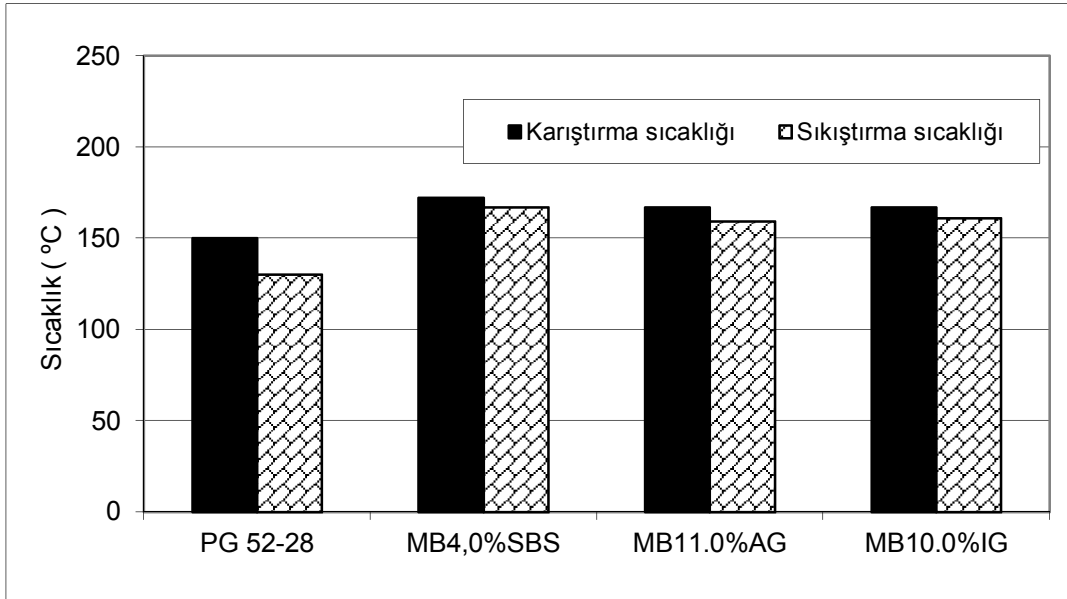
Modifikasyon indeksi değerleri incelendiğinde bütün sıcaklıklarda viskozite değerini en fazla arttıran katkının SBS olduğu, en az oranda arttıran katkının ise AG olduğu tespit edilmiştir. AG ve IG'nin viskozite değerleri üzerinde benzer etkiye sahip oldukları belirlenmiştir.

Bitümlü bağlayıcıların plentte agregayla karıştırılırken ve bitümlü sıcak karışımların arazide sıkıştırılırken yeterli işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmiştir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Örnek olarak saf bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını gösteren viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Saf bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Tablo 4.7’de verilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının ortalamasının katkı türü ile değişimi Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı gerekmiştir. Bu durum katkı kullanımı ile bağlayıcının performansı artmasına rağmen agregayla karıştırma ve BSK’nın sıkıştırılması sırasında daha yüksek sıcaklık

gerekeceğini dolayısıyla plentte hazırlama sırasında daha fazla enerji gerekeceğini göstermektedir.

4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Çalışmada agregası olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Deneylerde agregası karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış olarak kullanılmıştır. Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olan Superpave agregası gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agregası yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (15 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100 mm) bağılı olarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı tespit edilmiştir. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	Mineral Agregası			Şartname Sınırı
		Kaba	İnce	Filler	
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma kaybı), (%)	ASTM C-131	25.4	-	-	Maks. 35
Aşınma kaybı (Mikro deval), (%)	ASTM D 6928	13.3			Maks. 15
Sağlamlık (Na ₂ SO ₄ ile Donma kaybı), (%)	ASTM C-88	4.9	-	-	Maks. 10
Kaba Agregası Köşeliliği, (%)	ASTM D-5821	98/96	-	-	Min. 95/90
Yassı ve Uzun Daneler, (%)	ASTM D-4791	3	-	-	Maks. 10
Metilen Mavisini (gr/kg)	EN 933-9		1.0		Maks. 1.5

4.3. Karışımların Dizayn Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi

Çalışmada bütün bağlayıcılar için filler olarak kalker kullanılan karışımların ayrı ayrı tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir. Çalışmada bölümümüzde önceden yapılmış olan çalışmalarda kullanılan gradasyon kullanılmıştır (Yılmaz, 2011; Çeloğlu, 2013). Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.9. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri

Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü			
		PG 52-28	MB%4.0SBS	MB%11.0AG	MB%10.0IG
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	4.67	4.90	4.80	4.85
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	3.98	4.08	4.04	3.97
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14.24	14.11	14.17	14.06
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	72.01	71.07	71.52	71.79
Filler oranı (Dp)	0.8–1.6	1.30	1.34	1.32	1.33
%Gmm@Nini. = 8 (%)	max. 89	85.23	84.94	85.38	85.45
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	96.02	95.92	95.96	96.03
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	max. 98	97.81	96.84	97.63	97.67

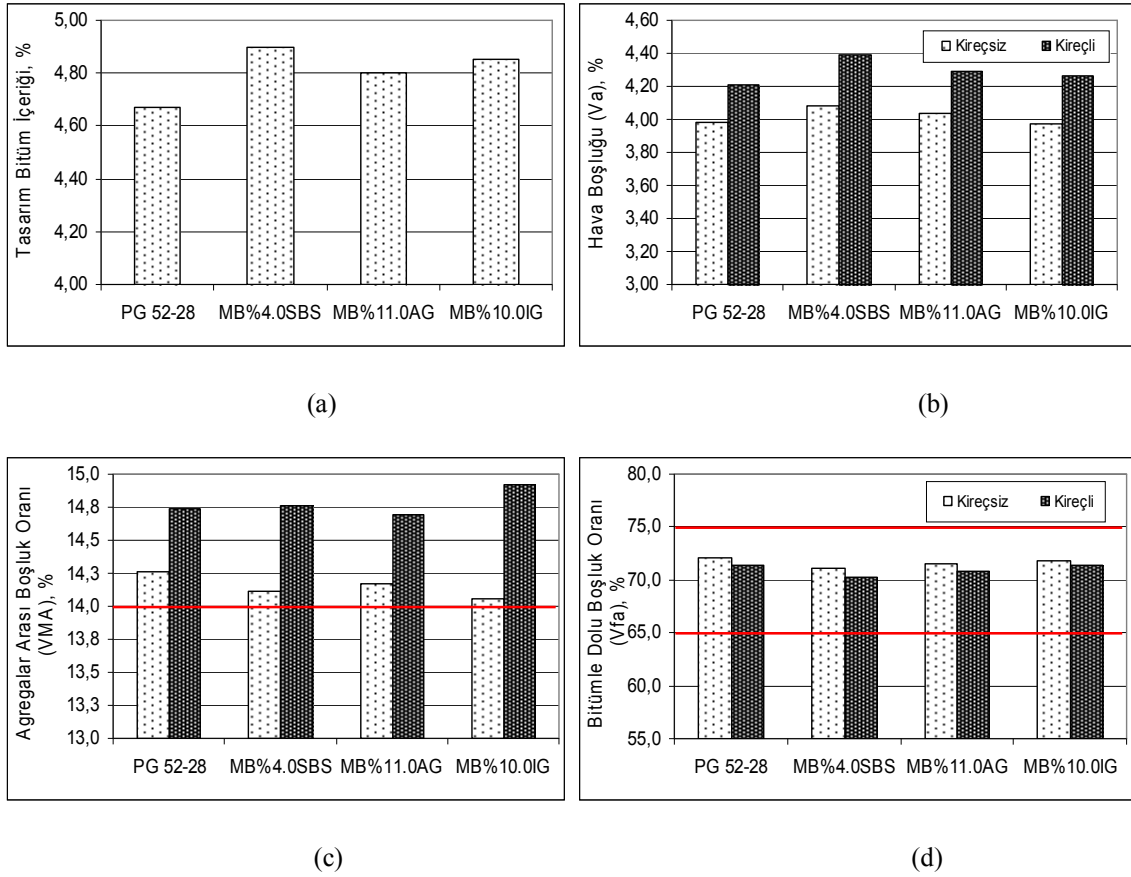
Ayrıca çalışmada aynı bağlayıcılar ve filler olarak %2 kireç kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Filler yerine agrega ağırlığınca %2 kireç içeren karışımların tasarım bitüm içeriği kullanılan bağlayıcının tamamen kalker ile bulunan değeriyle aynı alınmıştır. Kireç içeren karışımlar için belirlenen tasarım bitüm içeriklerinde 3 adet numune hazırlanmış ve hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.10’da görülmektedir.

Tablo 4.10. Filler olarak %2 kireç içeren karışımların hacimsel özellikleri

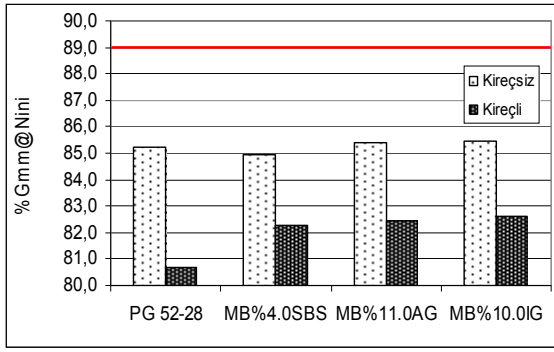
Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü			
		PG 52-28	MB%4.0SBS	MB%11.0AG	MB%10.0IG
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	4.67	4.90	4.80	4.85
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	4.21	4.39	4.29	4.26
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	Min. 14.0	14.74	14.76	14.69	14.92
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	71.41	70.30	70.81	71.42
Filler oranı (Dp)	0.8–1.6	1.26	1.27	1.28	1.24
%Gmm@Nini. = 8 (%)	max. 89	80.71	82.25	82.46	82.64
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	95.79	95.61	95.71	95.74
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	max. 98	97.36	97.14	97.22	97.38

Tabloda görüldüğü üzere aynı bitüm içeriğinde hidrate kireç kullanımı ile karışımların boşluk oranı artmıştır. Bunun nedeni hidrate kirecin boyutunun fillere göre daha düşük olması nedeniyle yüzey alanının artmasıdır. Kireç kullanılması durumunda agrega yüzeyini ıslatmak için daha fazla bitüm gerekmektedir. Fakat elde edilen sonuçlar Superpave ve Karayolları Teknik Şartnameleri ile karşılaştırıldığında kireç kullanılan bütün karışımların şartname kriterlerini karşıladığı belirlenmiştir.

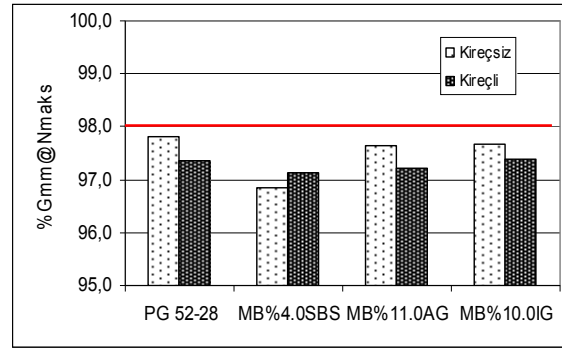
Bitümlü sıcak karışımların tasarım bitüm içerikleri ve hacimsel özellikleri Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Karışımların hacimsel özellikleri



(e)



(f)

Şekil 4.8. Karışımların hacimsel özellikleri (devamı)

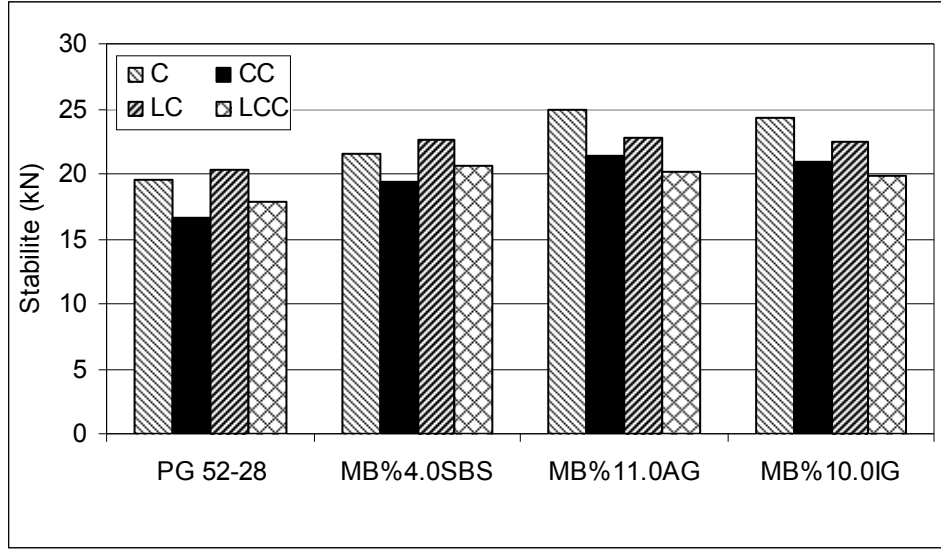
Şekil 4.8(a)'da görüldüğü üzere en düşük tasarım bitüm içeriğine saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde ise en düşük tasarım bitüm içeriğine MB%11.0AG modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların, en yüksek tasarım bitüm içeriğine ise MB%4.0SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.8(b) incelendiğinde kireç içermeyen karışımların hava boşluğu oranlarının tasarıma uygun olarak %4'e yakın olduğu belirlenmiştir. Kireç içeren karışımlarda boşluk oranının %4'den fazla olduğu, fakat şartname kriterlerini sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 4.8(c)'de görüldüğü üzere bütün karışımların tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerlerinin Superpave şartname kriterini sağladığı, 14'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerine MB%10.0IG ile hazırlanan karışımın, en yüksek VMA değerine ise saf bitüm ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Kireç içeren karışımlarda Va değerleri arttığından VMA değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Şekil 4.8(d)'de bütün karışımların VFA değerlerinin şartname sınırları arasında (%65-75) olduğu görülmektedir. Kireç içeren karışımlarda Va değerleri fazla olduğundan VFA değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Fakat bütün karışımların VFA değeri şartname kriterlerini sağlamıştır. Şekil 4.8(e)'de görüldüğü üzere bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nini değerlerinin %89'dan az olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.8(f)'de bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nmaks değerlerinin %98'den az olduğu görülmektedir.

4.4. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Çalışmada tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır.

4.4.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

PG 52-28 saf bitümü ve MB%4.0SBS, MB%11.0AG, MB%10.0IG modifiye bitümleri kullanılarak tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi ile nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi deneyi uygulanmıştır. Bütün karışımlar belirlenen tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanmıştır. Numuneler ayrıca koşullandırma işlemine tabi tutulmuştur. Normal Marshall stabilite ve akma deneyinde numuneler TS EN 12697-34 standardına göre 60°C suda 40 dakikada bekletilmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerini belirlemek amacıyla numuneler 60°C suda 24 saat bekletilmiş daha sonra Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada 60°C suda 24 saat bekletilen numuneler “koşullandırılmış” olarak adlandırılmıştır. Koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall stabilite değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekilde tamamen kalker kullanılan ve koşullandırılmayan karışımlar “C”, tamamen kalker kullanılan ve koşullandırılan numuneler “CC”, filler olarak %2 kireç kullanılan ve koşullandırılmayan numuneler “LC” ve filler olarak %2 kireç kullanılan ve koşullandırma işlemine tabi tutulan numuneler “LCC” olarak isimlendirilmiştir.

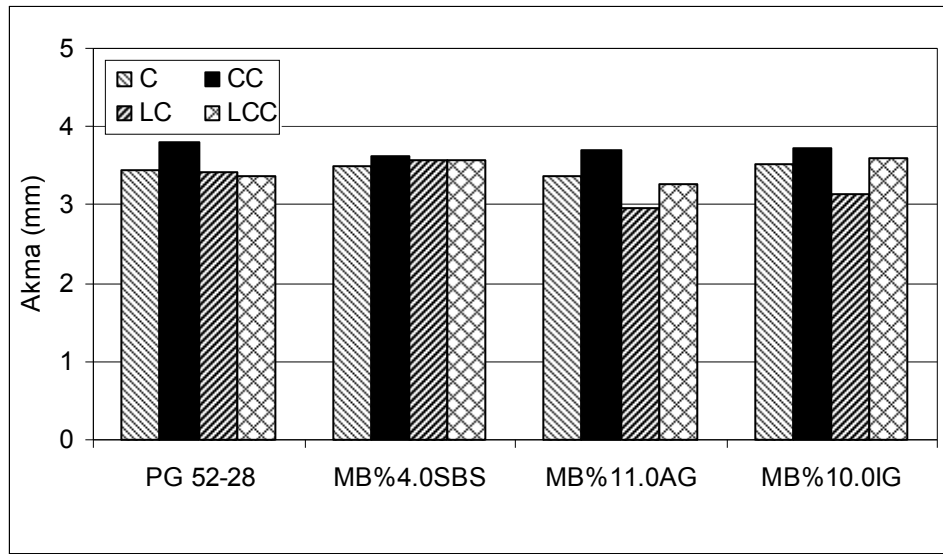


Şekil 4.9. Karışımların stabilite değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere koşullandırma işlemi nedeniyle karışımların stabilite değerleri azalmıştır. Ayrıca kireç kullanımı ile saf ve SBS modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda koşullandırma işleminden önce ve sonra stabilite değerleri artmıştır. IG ve AG modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlarda kireç kullanımı ile stabilite değeri azalmıştır. Buna rağmen koşullandırılmış filler olarak %2 kireç içeren, MB%11.0AG ve MB%10.0IG modifiyeli bitümleri ile hazırlanmış karışımların stabilite değerlerinin koşullandırılmamış filler olarak tamamen kalker kullanılan saf bağlayıcı ile hazırlanmış karışımların stabilite değerinden yaklaşık %2.2 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış karışımlarda PG 52-28 ve MB%4.0SBS bağlayıcıları ile hazırlanan karışımlarda filler olarak %2 kireç kullanımı ile stabilite değerleri sırasıyla %3.6 ve %5.5 oranlarında artmıştır. Koşullandırılmış karışımlarda ise %7.8 ve %6.4 oranlarında artmıştır. MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan koşullandırılmamış karışımlarda filler olarak %2 oranında hidrate kireç kullanılması durumunda stabilite değerleri sırasıyla %8.8 ve %8.1 oranlarında azalmıştır. Koşullandırılmış karışımlarda ise stabilite değerleri %5.8 ve %4.9 oranlarında azalmıştır.

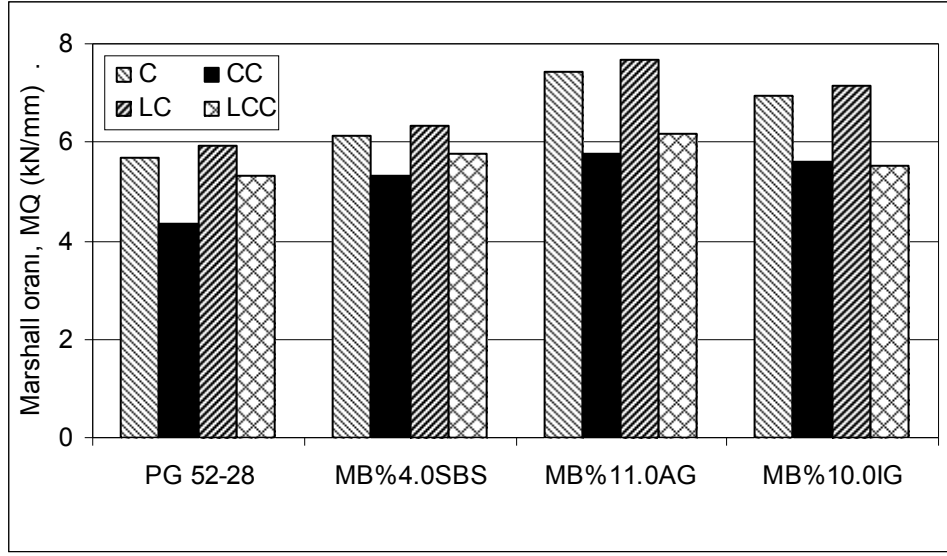
C, CC, LC karışımlarında en yüksek stabilite değerine MB%11.0AG ile hazırlanan karışımın, LCC durumunda ise MB%4.0SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük stabilite değerlerine bütün durumlarda PG 52-28 bağlayıcısıyla hazırlanan karışımlar sahip olmuştur. MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG modifiye bitümleri ile hazırlanan ve filler olarak tamamen kalker kullanılan karışımların

stabilite değerleri saf karışıma göre sırasıyla %9.8 , %27.8 ve %24.6 oranlarında artmıştır. Saf karışım ile modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların stabilite değerleri arasındaki en büyük fark koşullandırılmış ve kireç içermeyen karışımlarda olmuştur. CC karışımlarında MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG modifiye bitümleri ile hazırlanan ve filler olarak tamamen kalker kullanılan karışımların stabilite değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %17.0, %28.9 ve %26.5 oranlarında artmıştır. Ayrıca koşullandırma sonrasında katkı maddelerinin etkinliği artmıştır. Akma değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Karışımların akma değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

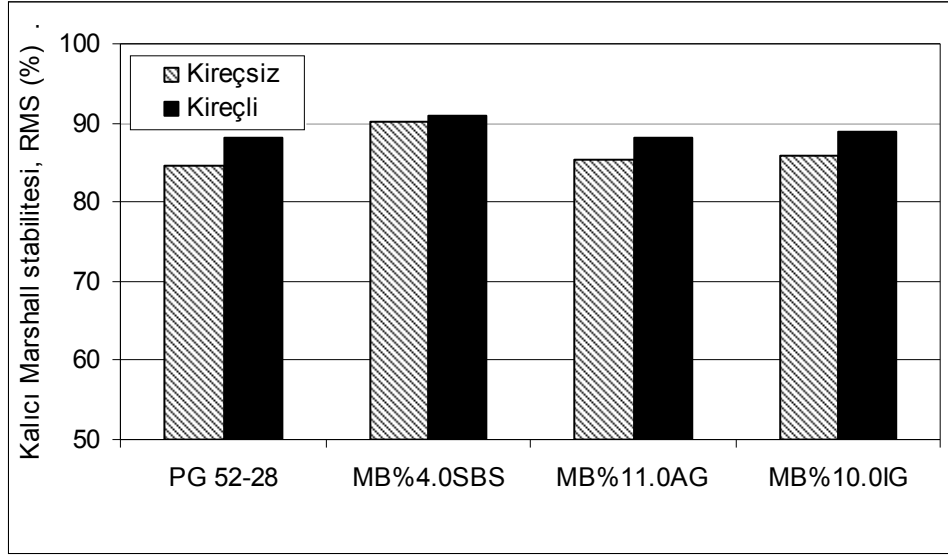
Karışımların akma değerleri incelendiğinde (Şekil 4.10) akma değerlerinin koşullandırma nedeniyle genel olarak arttığı belirlenmiştir. C ve LCC karışımlarında en yüksek akma değerine MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların, CC durumunda ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımın, LC durumunda ise MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile genel olarak akma değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. En düşük akma değerlerine ise C karışımlarında MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların, CC karışımlarında MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımların, LC ve LCC karışımlarında ise MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Marshall stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall oranı (MQ) değerlerinin değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Karışımların Marshall oranı değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Şekil 4.11’de görüldüğü üzere koşullandırma nedeniyle Marshall oranı (MQ) değerleri azalırken kireç kullanımı ile artmıştır. Bütün durumlarda en düşük Marshall oranı değerine PG 52-28 ile hazırlanan karışımların, en yüksek değere ise MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Etkinliği en az olan katkının ise SBS olduğu tespit edilmiştir. Saf karışıma göre MQ değerlerindeki en büyük artış filler olarak tamamen kalker kullanılan ve koşullandırılmış karışımlarda tespit edilmiştir. CC karışımlarında MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG modifiye bitümleri ile hazırlanan ve filler olarak tamamen kalker kullanılan karışımların Marshall oranı değerleri saf karışıma göre sırasıyla %22.9, %32.5 ve %29.5 oranlarında artmıştır. En az artış ise koşullandırılmış ve filler olarak %2 hidrate kireç içeren karışımlarda gözlenmiştir. LCC karışımlarında MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG modifiye bitümleri ile hazırlanan ve filler olarak %2 oranında kireç kullanılan karışımların Marshall oranı değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %8.3, %16.2 ve %4.3 oranlarında artmıştır.

Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinin katkı türü ile değişimi ise Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Karışımların RMS değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinin görüldüğü Şekil 4.12 incelendiğinde hem kireçli hem de kireçsiz karışımlarda en yüksek kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerine MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımların, en düşük RMS değerine ise PG 52-28 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. PG 52-28, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların RMS değerlerinin hem kireç içeren hem de içermeyen karışımlarda birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Marshall deneyleri sonucunda Stabilite açısından en üstün katkının C, CC, LC durumlarında AG, LCC durumunda ise SBS olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile stabilite değerleri saf ve SBS katkılı karışımlarda artarken AG ve IG katkılı karışımlarda azalmıştır. Akma değerlerinin katkı kullanımı ile düzenli şekilde değişmediği, kireç kullanımı ile genel olarak azaldığı tespit edilmiştir. MQ değerleri bakımından en yüksek değere MB%11.0AG modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların, en düşük değere ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu, kireç kullanımı ile MQ değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların kalıcı deformasyona karşı diğer karışımlara göre daha iyi performans sergileyeceğini, filler olarak kireç kullanımının bu önemli özelliği arttıracaklarını göstermektedir. RMS değerlerinden nem hasarına karşı dayanımı en yüksek karışımın MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile nem hasarına karşı dayanım artmıştır.

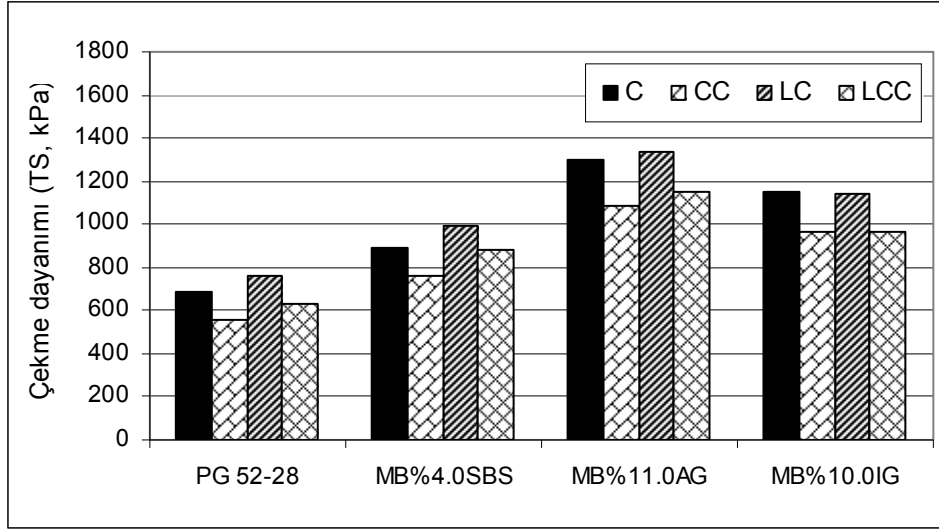
Marshall deneyinin tanımlandığı EN 12697-34 standardına göre üç numunenin Marshall stabilite değerleri arasındaki farkın ortalamadan %15, akma değerleri arasındaki farkın

ortalamadan %20 az olması deneyin geçerli olduğunu göstermektedir. Bütün karışımların bu şartları sağladığı, yapılan deneylerin geçerli olduğu tespit edilmiştir.

4.4.2. Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları

Bağlayıcı olarak PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%10.0IG} ve MB_{%11.0AG} ile tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde AASHTO T 283 standardına göre çekme dayanımı oranı deneyi uygulanmış böylece karışımların nem hasarına karşı dayanımları belirlenmiştir. PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%10.0IG} ve MB_{%11.0AG} ile hazırlanan her bir karışım türü için 7 ± 0.5 boşluk oranında 6 adet numune hazırlanmıştır. AASHTO T 283 standardına uygun olarak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak numuneler hazırlanırken 40 devirlik sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımların kısa dönem yaşlandırılmasında numuneler 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında iki saat bekletilmiştir. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ardından numunelerin hacimsel özellikleri belirlenerek boşluk oranları birbirine yakın olacak şekilde gruplandırılmıştır. Karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının %70-80 oranında suyla dolması sağlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler streç film ile kaplanmış, içerisinde 10 ml. su bulunan poşetlere konularak poşetlerin ağzı iyice kapatılmıştır. Numuneler -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiş ardından 60°C'deki suda 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler poşetten ve streç filminden çıkarılmış ve 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek kırılmıştır. Koşullandırılmamış numuneler de 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakika'lık (50.8 mm/dk) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Filler olarak %2 oranında hidrate kireç içeren karışımlar da yukarıda belirtilen prosedüre göre hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Maksimum yük değerleri yardımıyla çekme dayanımı değerleri Formül 3.5 kullanılarak, çekme dayanımı oranları ise Formül 3.6 kullanılarak belirlenmiştir.

Karışımların çekme dayanımı değerleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekilde tamamen kalker kullanılan ve koşullandırılmayan karışımlar "C", tamamen kalker kullanılan ve koşullandırılan numuneler "CC", filler olarak %2 kireç kullanılan ve koşullandırılmayan numuneler "LC" ve filler olarak %2 kireç kullanılan ve koşullandırma işlemine tabi tutulan numuneler "LCC" olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 4.13. Karışımların çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere kireç içeren ve içermeyen karışımlarda en düşük çekme dayanımı değerine PG 52-28 ile hazırlanan karışımların en yüksek çekme dayanımı değerine ise MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Etkinliği en az olan katkının SBS olduğu tespit edilmiştir. Filler olarak tamamen kalker ve bağlayıcı olarak MB%4.0SBS, MB%10.0IG ve MB%11.0AG kullanılan koşullandırılmamış karışımlarda çekme dayanımı değeri saf karışıma göre sırasıyla %30.5, %68.1 ve %89.7 oranında artmıştır. Koşullandırma sonrasında ise MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımın PG 52-28 ile hazırlanan karışıma göre %36.0, MB%10.0IG ile hazırlanan karışımın %73.1 ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımın %94.1 oranında çekme dayanımı değerleri artmıştır. Elde edilen sonuçlardan koşullandırma sonrası katkı maddelerinin daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Koşullandırılmamış, filler olarak %2 oranında hidrate kireç içeren ve MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımın çekme dayanımı değerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışıma göre %30.7, MB%10.0IG ile hazırlanan karışımın %50.6 ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımın %76.3 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Filler olarak %2 oranında kireç içeren koşullandırılmış filler olarak %2 oranında hidrate kireç içeren ve bağlayıcı olarak MB%4.0SBS, MB%10.0IG ve MB%11.0AG kullanılan karışımlarda çekme dayanımı değeri saf karışıma göre sırasıyla %40.0, %53.9 ve %82.1 oranında artmıştır. Kireç içermeyen karışımlarda olduğu gibi kireç içeren karışımlarda da koşullandırma sonrasında katkı türlerinin etkinliği artmıştır.

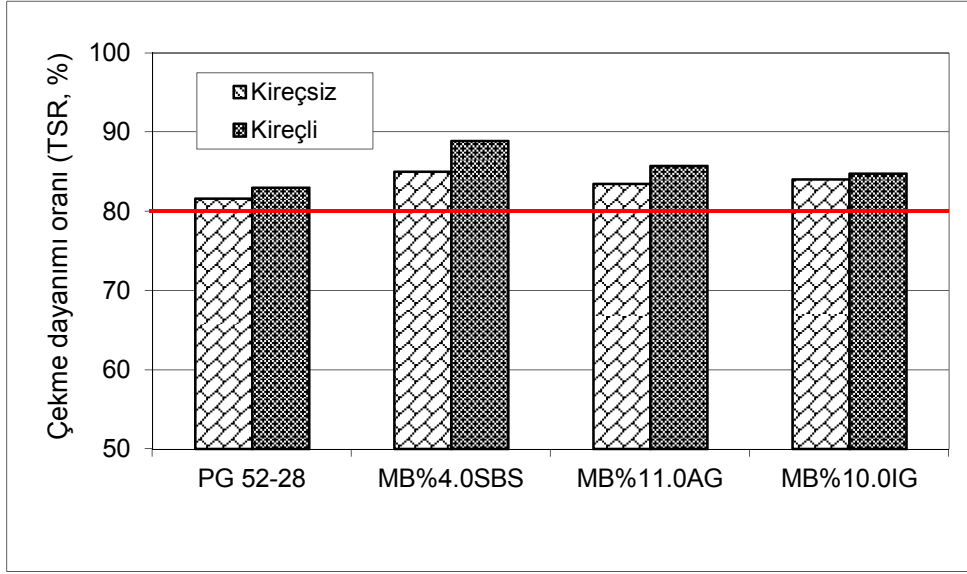
Karışımların çekme oranı değerlerinin bağlayıcı modifikasyonunda SBS, IG ve AG kullanımı ve filler olarak %2 kireç kullanılması durumundaki artış miktarları aşağıda Tablo 4.11’de görülmektedir.

Tablo 4.11. Karışımların çekme dayanımı değerlerinin saf karışıma göre artış yüzdeleri

Bağlayıcı türü	Saf karışıma göre artış oranı (%)	
	Tamamen kalker	
	Koşullandırılmamış	Koşullandırılmış
MB%4.0SBS	30.5	36.0
MB%10.0IG	68.1	73.1
MB%11.0AG	89.7	94.1
	%2 Hidrate kireç +%4 Kalker	
	Koşullandırılmamış	Koşullandırılmış
MB%4.0SBS	30.7	40.0
MB%10.0IG	50.6	53.9
MB%11.0AG	76.3	82.1

Tablo 4.11’de görüldüğü üzere MB%4.0SBS ile filler olarak %2 oranında kireç kullanılan karışımların tamamen kalker kullanılan karışımlara göre daha etkin olduğu belirlenmiştir. MB%10.0IG ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımlarda tamamen kalker kullanılmasının kireç kullanımına göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerine oranlanması ile nem hasarına karşı bitümlü sıcak karışımların dayanımının bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen TSR değerleri Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.14. Karışımların çekme dayanımı oranlarının katkı kullanımı ile değişimi

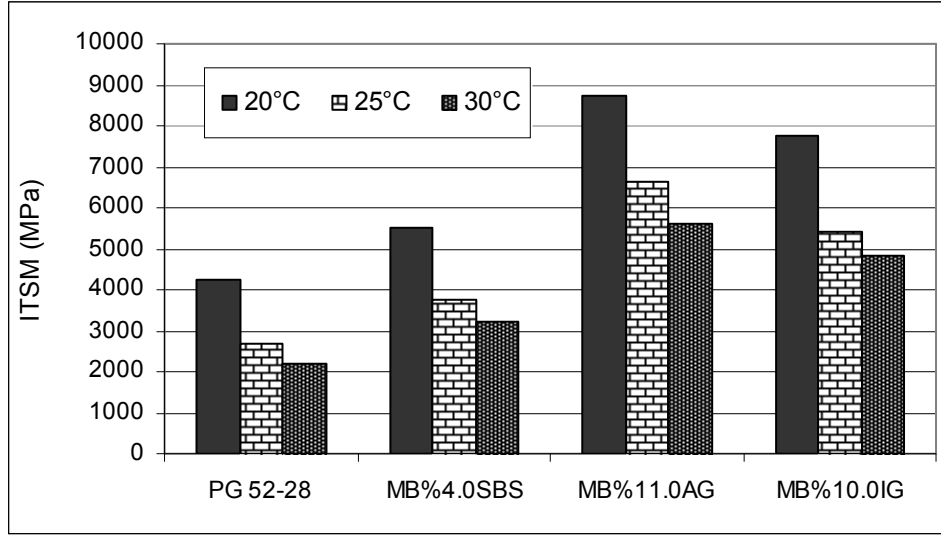
Şekil 4.14'te görüldüğü üzere bütün karışımların Superpave kriteri olan %80 sınırını aştığı belirlenmiştir. Bitüm modifikasyonunda katkı kullanımı ile karışımların nem hasarına karşı dayanımı artmıştır. Ayrıca kireç kullanımı ile bütün karışımların nem hasarına karşı dayanımları artmıştır. Hem kireç içeren hem de tamamen kalker filler ile hazırlanan karışımlar içerisinde en yüksek çekme dayanımı değerine MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımların, en düşük çekme dayanımı değerine ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Çekme dayanımı oranı açısından etkinliği en az olan katkının filler olarak tamamen kalker içeren karışımlarda MB%11.0AG, filler olarak %2 kireç içeren karışımlarda ise MB%10.0IG katkısının olduğu tespit edilmiştir. Filler olarak tamamen kalker kullanılan ve MB%4.0SBS, MB%10.0IG ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımlarda TSR değerinin kontrol karışımlarına göre sırasıyla %4.2, %3.0 ve %2.3 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Filler olarak %2 oranında kireç kullanılan karışımlarda MB%4.0SBS, MB%10.0IG ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların TSR değerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışıma göre sırasıyla %7.2, %2.2 ve %3.3 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. İran ve Amerika gilsoniti ile hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde bu iki katkı ile hazırlanan karışımların TSR değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. TSR değerlerinden MB%4.0SBS kullanılarak hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımının en fazla olacağı, PG 52-28 ile hazırlanan karışımların ise en az olacağı, MB%10.0IG ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının benzer olduğu söylenebilmektedir.

Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığında SBS ve kireç kullanılan karışımlardan elde edilen sonuçların Kök ve Yılmaz tarafından yapılan çalışmayla uyumlu olduğu belirlenmiştir (Kök ve Yılmaz, 2009). Ayrıca filler olarak tamamen kalker kullanılan ayrıca AG ve IG ile hazırlanan karışımlardan elde edilen sonuçların Çeloğlu tarafından yapılan çalışmaya yakın olduğu belirlenmiştir (Çeloğlu, 2013).

4.4.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

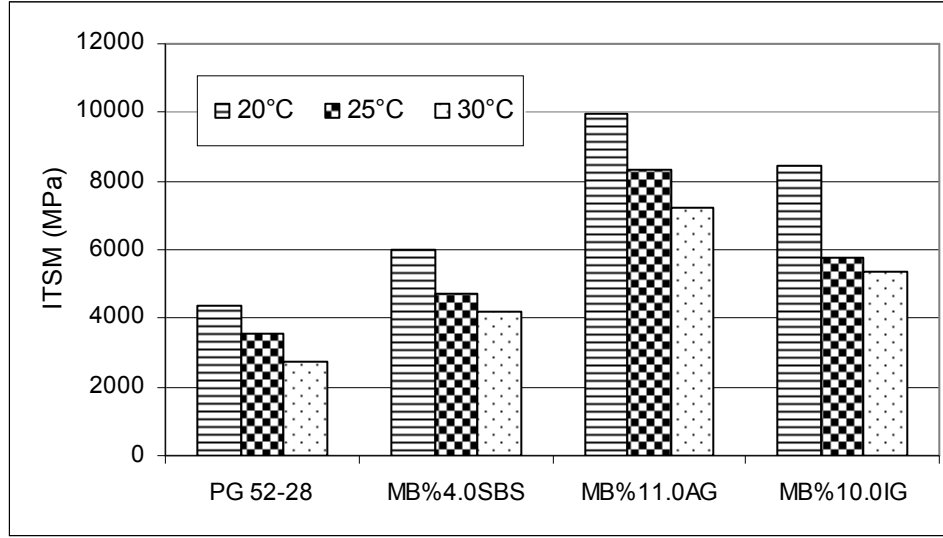
Bağlayıcı olarak PG 52-28 ve MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG kullanılarak hazırlanan karışımlar üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanmıştır. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan ITSM deneylerinde Marshall stabilite deneylerinde kullanılacak numuneler kullanılmıştır. Deneylerde PG 52-28 ve MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile kireç kullanılan ve kullanılmayan numunelerden üç adet numune deneye tabi tutulmuştur. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik yükler karşısında bitümlü sıcak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi ise 124 ms olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5 µm olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde 5 µm deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu Formül 3.7 kullanılarak belirlenen ITSM değerlerinin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Deneyde poisson oranı 0.35 olarak alınmıştır. Ayrıca sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla deneyler 20°C, 25°C ve 30°C sıcaklıklarda yapılmıştır.

Katkı türü ve sıcaklıkla kireç içermeyen numunelerin ITSM değerlerinin değişimi Şekil 4.15'te verilmiştir.



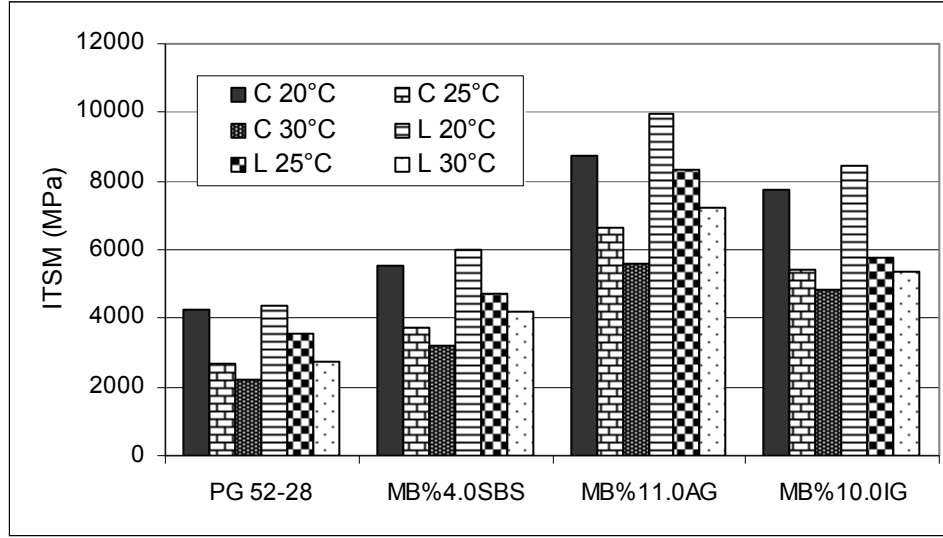
Şekil 4.15. Kireç içermeyen karışımların farklı sıcaklıklardaki ITSM değerleri

Kireç içermeyen karışımların ITSM değerlerinin katkı çeşidi ve sıcaklık ile değişimi incelendiğinde (Şekil 4.15) katkı kullanımı ile ITSM değerleri artarken sıcaklığın artışı ile ITSM değerlerinin azaldığı görülmektedir. ITSM değerleri içerisinde en düşük değerlere bütün sıcaklıklarda PG 52-28 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde en yüksek değere MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların, en düşük ITSM değerine ise MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık arttıkça katkıların etkinlikleri artmıştır. MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımların ITSM değerlerinin 20, 25 ve 30°C sıcaklıklarda saf karışıma göre 1.30, 1.38 ve 1.47 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların ITSM değerlerinin 20, 25 ve 30°C sıcaklıklarda ITSM değerinin saf karışıma göre 2.05, 2.46 ve 2.55 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların ise saf karışıma göre 1.81, 2.00 ve 2.19 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Filler olarak %2 oranında hidrate kireç içeren numunelerin ITSM değerlerinin değişimi ise Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Kireç içeren karışımların farklı sıcaklıklardaki ITSM değerleri

Filler olarak %2 oranında kireç içeren numunelerde kireç içermeyen numunelerde olduğu gibi sıcaklık arttıkça ITSM değerleri azalırken katkı kullanımı ile bu değerler artmıştır. Kireç içermeyen karışımlarda olduğu gibi kireç içeren karışımlarda da ITSM değerleri içerisinde en düşük değerlere bütün sıcaklıklarda PG 52-28 ile hazırlanan karışımların, en yüksek değere ise MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. 20°C sıcaklıkta MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin saf karışıma göre sırasıyla 1.37, 2.28 ve 1.93 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 25°C sıcaklıkta MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin saf karışıma göre sırasıyla 1.33, 2.33 ve 2.61 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 30°C sıcaklıkta ise MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin saf karışıma göre sırasıyla 1.52, 2.16 ve 1.93 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın 20°C sıcaklıktan 30°C sıcaklığa yükselmesi ile PG 52-28, MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların ITSM değerleri sırasıyla 1.58, 1.42, 1.38 ve 1.58 kat azalmıştır. Bu sonuçlardan sıcaklıktan en fazla ve en az etkilenen karışımların sırasıyla PG 52-28 ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar kireç içermeyen numunelerde de gözlenmiştir. Kireç içeren ve içermeyen numunelerin ITSM değerlerinin katkı kullanımı ve sıcaklık ile değişimi Şekil 4.17’de görülmektedir. Şekilde kireç içermeyen karışımlar “C” ile kireç içeren karışımlar ise “L” ile gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Kireç içeren ve içermeyen karışımların ITSM değerlerinin katkı türü ve sıcaklıkla değişimi

Şekilde görüldüğü üzere kireç kullanımı ile bütün karışımların ITSM değerleri artmıştır. Kireç kullanımı ile PG 52-28 ile hazırlanan karışımın ITSM değeri 20°C sıcaklıkta %2.5, 25°C sıcaklıkta %32.0 ve 30°C sıcaklıkta %25.9 daha yüksek çıkmıştır. MB%4.0SBS ile hazırlanan ve kireç kullanılan karışımların ITSM değerleri 20, 25 ve 30°C sıcaklıklarda kireç içermeyen karışımlara göre sırasıyla %8.0, %26.9 ve %30.4 daha yüksek çıkmıştır. MB%11.0AG ile hazırlanan ve kireç içeren karışımlarda 20, 25 ve 30°C sıcaklıklarda %13.9, %25.2 ve %28.7 daha yüksek çıkmıştır. MB%10.0IG ile hazırlanan karışımlarda ise ITSM değerleri sırasıyla %8.9, %6.9 ve %11.0 daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlardan kirecin en az bağlayıcı olarak MB%10.0IG ile hazırlanan karışımlara fayda sağladığı belirlenmiştir.

4.4.4. Tekerlek İzi Deney Sonuçları

Çalışmada tekerlek izi dayanımı deneyi, EN 12697-22 standardının B prosedürüne göre yapılmıştır. Çalışmada numuneler %4 boşluk oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Karışımlarda kullanılan agreganın maksimum dane boyutu 19 mm olduğundan numune yüksekliği 60 mm olarak seçilmiştir. Kullanılacak malzeme miktarı bitümlü sıcak karışımların maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm), kalıbın iç boyutları (l ve L), numune kalınlığı (e), boşluk oranına (V_a) göre Formül 3.9 kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada 30.5 x 30.5 cm boyutlarında kalıp kullanılmıştır. %4 boşluk oranı için kullanılacak karışım ağırlıkları Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12. Tekerlek izi numunelerinin ağırlıkları.

Katkı Türü		Boşluk oranı (%)	Numune yüksekliği (mm)	Kalıp boyutu (cm)	Karışım hacmi (cm ³)	G_{mm} (kg/m ³)	$M_{kar.}$ (kg)
KİREÇSİZ	PG 52-28	4	60	30.5x30.5	5581.5	2.400	12.85978
	MB%4.0SBS					2.411	12.91872
	MB%11.0AG					2.406	12.89193
	MB%10.0IG					2.409	12.90800
KİREÇLİ	PG 52-28					2.391	12.81155
	MB%4.0SBS					2.402	12.87049
	MB%11.0AG					2.398	12.84906
	MB%10.0IG					2.396	12.83834

Karışım ağırlıkları belirlendikten sonra tasarım bitüm içeriklerine uygun olarak agrega ve bitüm ağırlıkları belirlenmiştir. Agrega ve bitüm ağırlıkları Formül (4.2) ve (4.3) yardımıyla belirlenmiştir.

$$M_{ag.} + \frac{M_{ag.} * TBİ}{P_{ag.}} = M_{kar.} \quad (4.2)$$

$$M_{bitüm} = M_{kar.} - M_{ag.} \quad (4.3)$$

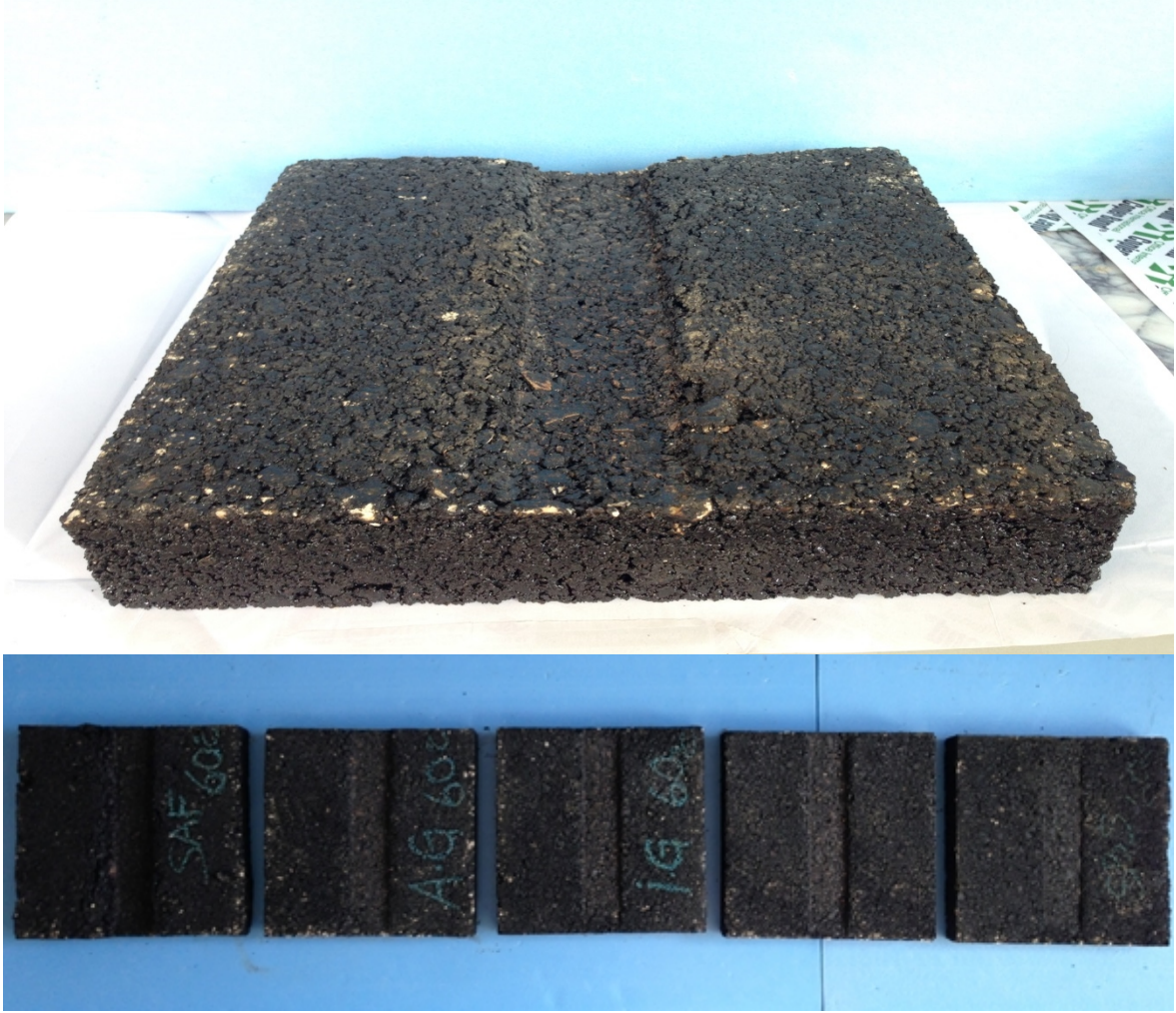
Formülde M_{ag} agrega ağırlığını (kg), TBİ, tasarım bitüm içeriğini (%), P_{ag} karışımdaki agrega yüzdesini, M_{kar} ise karışım ağırlığını (kg), $M_{bitüm}$ ise bitüm ağırlığını (kg) göstermektedir. Yukarıda verilen bağıntılar yardımıyla belirlenen, karışımlar için gerekli agrega ve bitüm miktarları Tablo 4.13'te verilmiştir.

Tablo 4.13. Tekerlek izi numuneleri için gerekli agrega ve bitüm miktarları

Katki Türü		TBİ (%)	P _{ag} (%)	M _{kar.} (gr)	M _{ag} (gr)	M _{bitüm} (gr)
KİREÇSİZ	PG 52-28	4.67	95.33	12859.78	12259.2	600.6
	MB%4.0SBS	4.90	95.10	12918.72	12285.7	633.0
	MB%11.0AG	4.80	95.20	12891.93	12273.1	618.8
	MB%10.0IG	4.85	95.15	12908.00	12282.0	626.0
KİREÇLİ	PG 52-28	4.67	95.33	12811.55	12213.3	598.3
	MB%4.0SBS	4.90	95.10	12870.49	12239.8	630.7
	MB%11.0AG	4.80	95.20	12849.06	12232.3	616.8
	MB%10.0IG	4.85	95.15	12838,34	12215.7	622.7

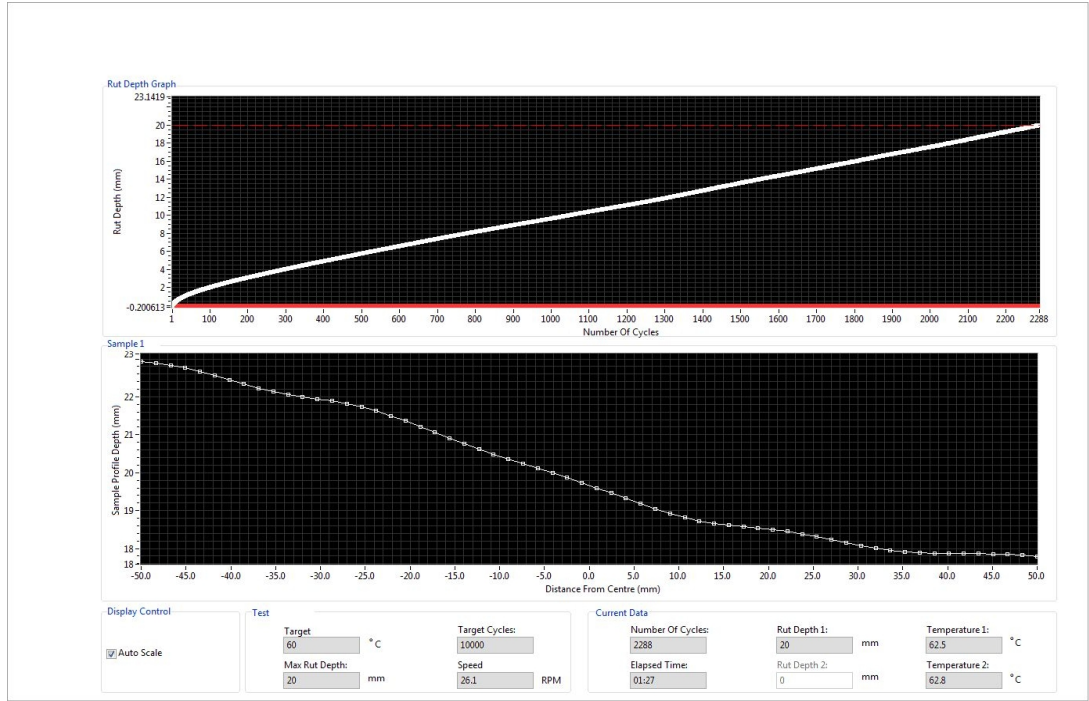
Gradasyona uygun olarak hazırlanan agrega karışımları 3 saat, bitüm ise 2 saat karıştırma sıcaklığında bekletilmiştir. Ardından agrega yüzeyi tam olarak bitümle kaplanıncaya kadar mikser yardımıyla agrega ve bitüm karıştırılmıştır. 30.5x30.5x6 cm boyutlarındaki kalıba ilave yaka takılmış, karışım kalıba doldurulmuştur. Karışım spatula yardımıyla şişlenmiş ardından numunenin yüzeyi düzeltilmiştir. Kalıp ve karışım merdaneli sıkıştırıcıya konulmuş ve pas sayısı cihaza girilmiştir. Sıkıştırma esnasında kalıbın önce öne doğru sonrasında arkaya doğru gidişi bir pas olarak isimlendirilmektedir. Çalışmada 40 pas sayısı kullanılmıştır. Kireç içeren numuneler 40 pas sayısında tam olarak sıkışmadığından ilave 20 pas sıkıştırma daha uygulanmıştır. Çalışmada, karışımlar titreşim kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle basınç sıfırlanmış, iki pas yük verilmeden yapılmış böylece malzemenin tam olarak kalıba yerleşmesi sağlanmıştır. Ardından basınç yavaşça arttırılmış ve 300 PSI yük seviyesine ayarlanmıştır. Pas sayısı arttıkça yük değeri azalmıştır. Yükün sıfır olması karışımın istenen yüksekliğe geldiğini ifade etmektedir. Numunenin sıkıştırma işlemi bittikten sonra numune merdaneli sıkıştırıcıdan çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır. Numune tamamen soğuduktan sonra tekerlek izi deney aletine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. İklimlendirme kabini kapatılarak deney sıcaklığına ayarlanmıştır.

Tekerlek izi deneyinde numuneler 60°C sıcaklıkta deneye tabi tutulmuşlardır. Her bir bağlayıcı türünden iki adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Çalışmada kullanılan numunelerin bazıları ve oluşan tekerlek izi Şekil 4.18’de görülmektedir.

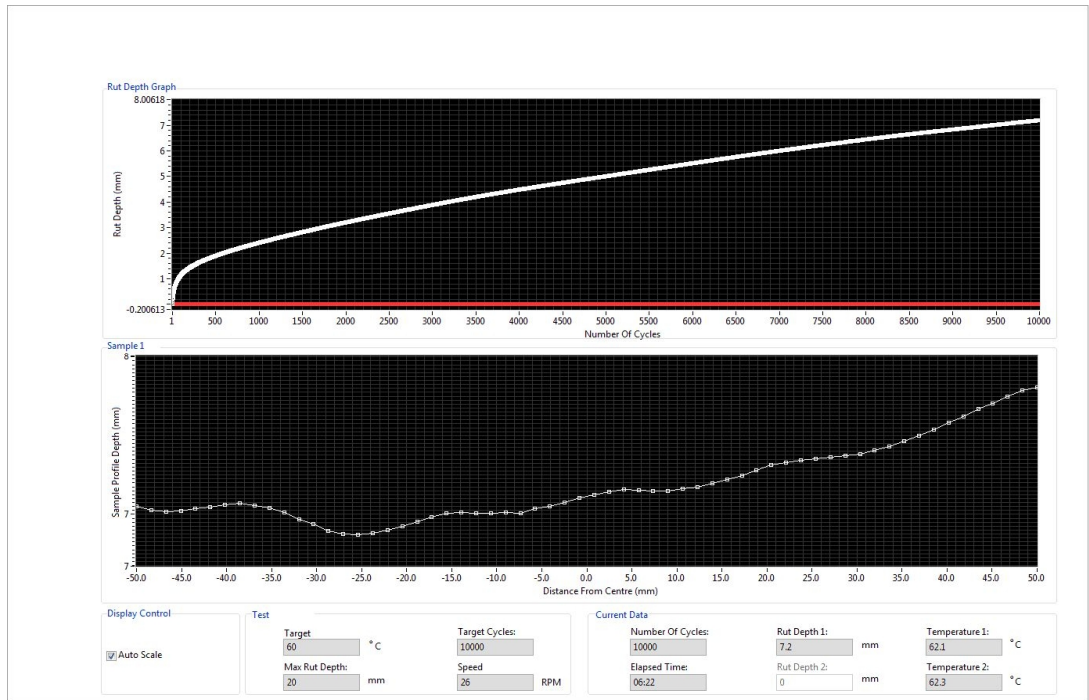


Şekil 4.18. Tekerlek izi oluşumu ve deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmı

Deney sırasında cihaz, numunenin ortasından bir, ortanın solundan ve sağından 13 olmak üzere toplam 27 deformasyon ölçümü yapmıştır. Bu 27 değerın ortalaması tekerlek iz derinliği olarak kaydedilmiştir. Ayrıca yazılım ekranından oluşan tekerlek izi takip edilmiştir. MB%4.0SBS kullanılan kireç içeren ve içermeyen numunelere 60°C sıcaklıkta uygulanan deneylerin deney sonu (10000 devir sonucu) tekerlek izi yazılım ekranı Şekil 4.19’da verilmiştir.



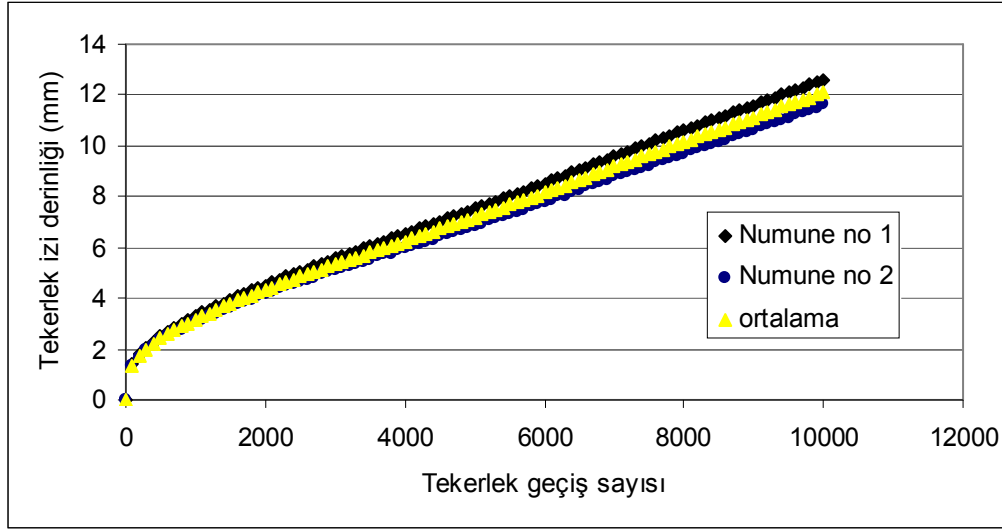
(a)



(b)

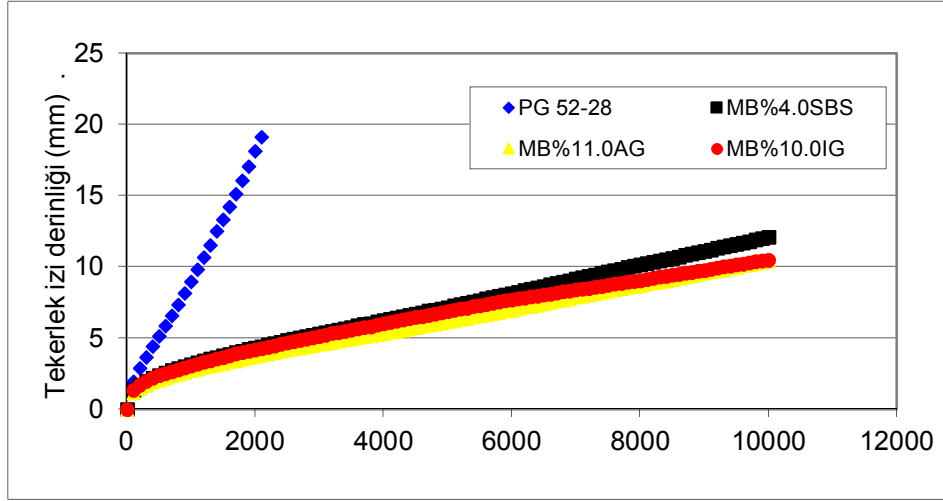
Şekil 4.19. MB%4.0SBS ile hazırlanan kireçsiz (a) ve kireçli (b) numunelerin tekerlek izi deney sonu ekranları

Çalışmada kullanılan iki numunenin sonuçlarının ortalamasından faydalanılarak değerlendirme yapılmıştır. Örnek olarak MB%4.0SBS bağlayıcısı ile hazırlanan ve tamamen kalker kullanılan karışımlara uygulanan numunelerin ve ortalamalarının deformasyon değerlerinin yük tekrarı ile değişimi Şekil 4.20’de verilmiştir.

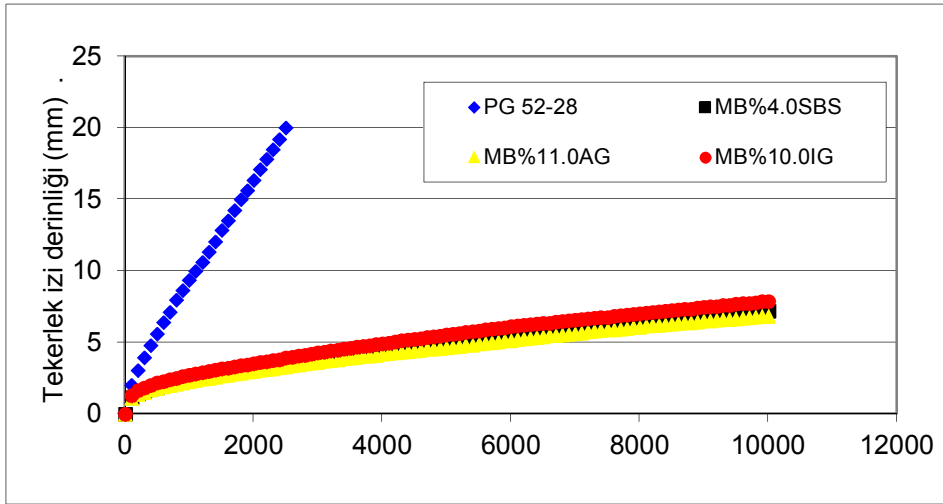


Şekil 4.20. MB%4.0SBS içeren karışımların 60°C deki tekerlek izi deney sonucu

Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan ve filler olarak tamamen kalker kullanılan karışımlara 60°C sıcaklıkta uygulanan tekerlek izi deneylerinden elde edilen kalıcı deformasyon – tekerlek geçiş sayısı grafiği Şekil 4.21’de ve filler olarak %2 hidrate kireç içeren numunelere 60°C sıcaklıkta uygulanan tekerlek izi deneylerinden elde edilen kalıcı deformasyon – tekerlek geçiş sayısı grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir.

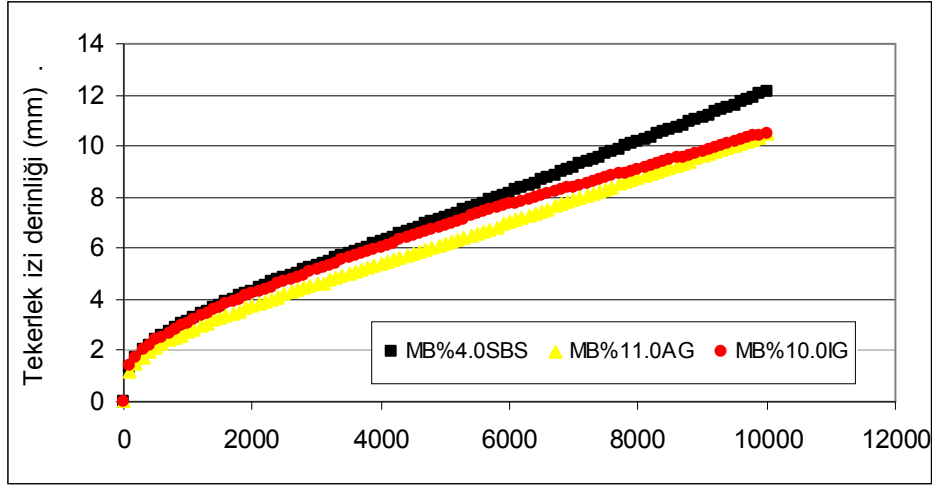


Şekil 4.21. Kireç içermeyen karışımların tekerlek geçişi ile tekerlek izi derinliğinin değişimi

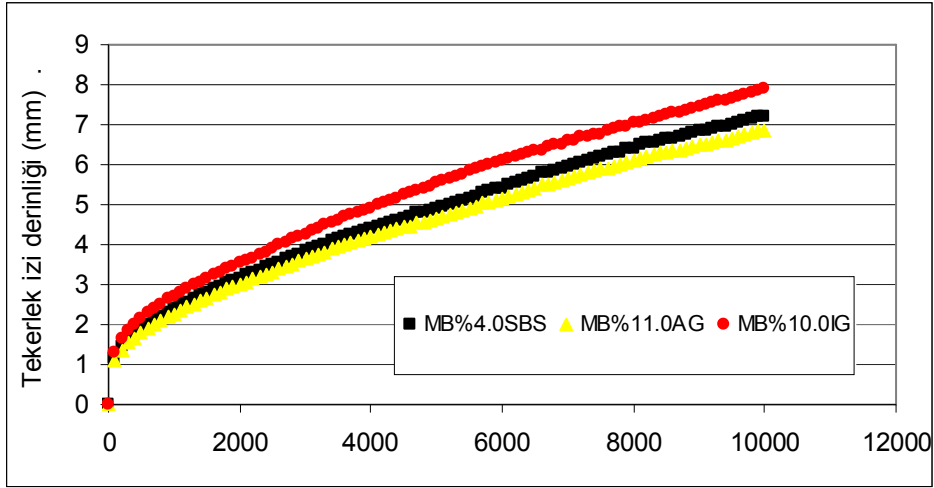


Şekil 4.22. Kireç içeren numunelerin tekerlek geçişi ile tekerlek izi derinliğinin değişimi

Çalışmada 60°C sıcaklıkta PG 52-28 bağlayıcıyla hazırlanan ve kireç içermeyen karışımlarda 2130 tekerlek geçişinde, kireç içeren karışımlarda ise 2290 tekerlek geçişinde 20 mm tekerlek izi derinliği olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle 60°C sıcaklıkta uygulanan deney sonuçlarından 2100 tekerlek geçişi ve 10000 tekerlek geçişi sonucundaki kalıcı deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Bu sıcaklıkta katkı türlerini daha rahat değerlendirebilmek için saf karışım dışındaki karışımların tekerlek izi derinliği – tekerlek geçiş sayısı grafikleri Şekil 4.23'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.23. Modifiye bitümler ile hazırlanan kireç içermeyen (a) ve kireç içeren (b) karışımların tekerlek izi derinliği – tekerlek geçiş sayısı grafiği

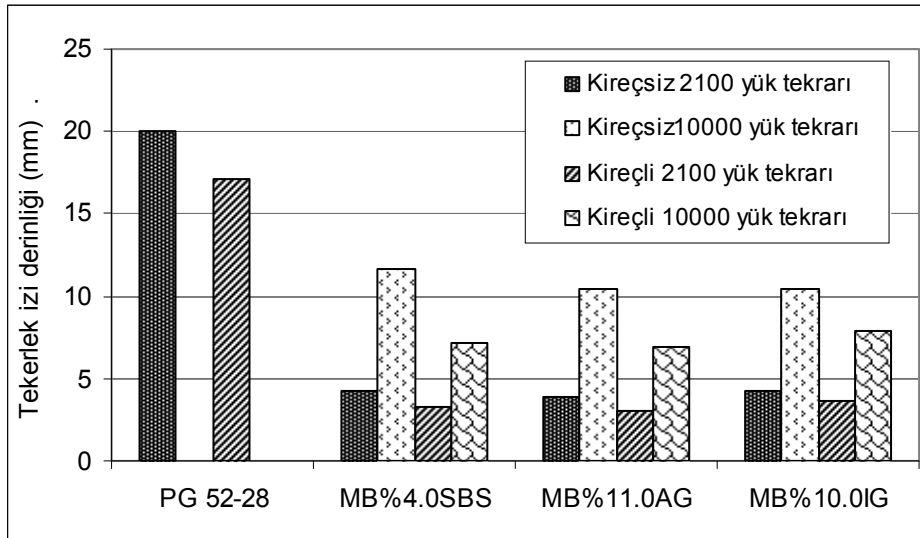
Kireç içeren ve içermeyen karışımlar içerisinde en yüksek tekerlek izi derinliğine saf bağlayıcı kullanılarak hazırlanan karışımların, en az deformasyonun ise MB%11.0AG kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde kireç kullanılmayan karışımlarda en az deformasyondan en fazla deformasyona doğru karışımların MB%11.0AG < MB%10.0IG < MB%4.0SBS modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımlar şeklinde sıralandıkları belirlenmiştir. Kireç içeren karışımlarda ise sıralamanın MB%11.0AG < MB%4.0SBS < MB%10.0IG şeklinde olduğu

belirlenmiştir. Karışımların 2100 ve 10000 tekerlek izi geçişlerindeki deformasyon değerleri Tablo 4.14'te görülmektedir.

Tablo 4.14. Tekerlek izi deney sonuçları

Yük tekrar sayısı		Bağlayıcı Türü			
		PG 52-28	MB%4.0SBS	MB%11.0AG	MB%10.0IG
Kireç içermeyen	2100	20.0	4.26	3.83	4.30
	10000	-	11.61	10.45	10.49
Kireç içeren	2100	17.09	3.23	3.07	3.60
	10000	-	7.22	6.86	7.89

Tablo 4.14'te görülen karışımların 60°C sıcaklıktaki deformasyon değerleri Şekil 4.24'te görülmektedir.



Şekil 4.24. Deneylerden elde edilen farklı tekerlek geçişlerindeki tekerlek izi derinlikleri

60°C sıcaklıkta kireç içermeyen numunelerde 2100 tekerlek geçişi sonucunda MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımlarda PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %78.7, %80.9 ve %78.5 daha az deformasyon meydana gelmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde ise en fazla deformasyon MB%4.0SBS kullanılarak hazırlanan karışımlarda gözlenmiştir. 10000 tekerlek geçişi sonunda MB%11.0AG ve MB%10.0IG kullanılarak hazırlanan karışımların deformasyon değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan

karışımların 10000 yük tekrarı sonundaki deformasyon değerlerinin MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımların deformasyon değerlerine göre sırasıyla %11.1 ve %10.7 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum doğal asfalt kullanımının SBS kullanımına göre daha etkin olduğunu göstermektedir.

Kireç kullanımı ile karışımların tekerlek izi derinlikleri azalmıştır. 2100 tekerlek geçişi sonunda MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan ve kireç içeren karışımların tekerlek izi derinliklerinin saf bağlayıcı kullanılan ve filler olarak %2 oranında kireç içeren karışıma göre sırasıyla %81.1, %82.0 ve %78.8 daha az olduğu tespit edilmiştir. Kireç içermeyen karışımlardan farklı olarak modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde 10000 tekerlek geçişi sonunda en fazla deformasyonun MB%10.0IG ile hazırlanan karışımlarda olduğu belirlenmiştir. 10000 tekerlek geçişi sonunda MB%4.0SBS ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların tekerlek izi derinliklerinin MB%10.0IG ile hazırlanan karışıma göre sırasıyla %9.3 ve %15.0 daha az deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir.

Saf karışımda kireç kullanımı ile 2100 tekerlek geçişi sonunda %14.6 oranında tekerlek izi oluşumu azalmıştır. MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların tekerlek izi derinlikleri kireç kullanımı ile sırasıyla %24.2, %19.8 ve %16.3 oranlarında azalmıştır. 10000 yük tekrarı sonunda ise MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların tekerlek izi derinlikleri kireç kullanımı ile sırasıyla %37.8, %34.4 ve %24.8 oranlarında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan hidrate kirecin bitüm katkılarına göre kalıcı deformasyona karşı dayanım açısından etkinliğinin az olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımının en fazla SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlarda etkin olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan tekerlek izi oluşumuna karşı en mukavemetli karışımın MB%11.0AG ile hazırlanan karışım olduğu, bütün katkıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca kireç kullanımı ile tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımın arttığı fakat kirecin diğer katkılar kadar etkin olmadığı tespit edilmiştir. En etkin bitüm katkı maddesinin AG olduğu tespit edilmiştir.

4.4.5. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

PG 52-28, MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde 375 kPa gerilme seviyesi uygulanmıştır. İndirekt çekme yorulma

deneyleri, 25°C sıcaklıkta uygulanmış olup deneyden önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1.5 sn olarak alınmış bu sürenin 0.124 saniyesi ITSM deneyinde olduğu gibi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1.376 saniye olmuştur. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 4.25'te görülmektedir.



Şekil 4.25. Marshall ve yorulma deneyine tabi tutulan numuneler

İndirekt çekme yorulma deneylerinde numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar tekrarlı yük uygulanmaya devam edilmiştir. Böylece maksimum yük tekrerrür sayısı (N_{mak}) ve maksimum yük tekrerrür sayısındaki deformasyon miktarları (δ_{mak}) belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrisinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesişimlerinden yorulma ömürleri belirlenmiştir. III. Kısımda teğet, eğrinin dönüş yaptığı noktadan itibaren alınmıştır. Excel formatında eğrinin II. ve III. kısımları iki ayrı kısma ayrılmış belirlenen yerlerden geçirilen teğetlerin formülleri belirlenmiştir. İki teğet birbirine eşitlenerek karışımların yorulma ömürleri (N_f) belirlenmiştir. Formül 3.12 kullanılarak III. Bölgede, N_f ile N_{mak} arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları (r_f) belirlenmiştir. Kireç

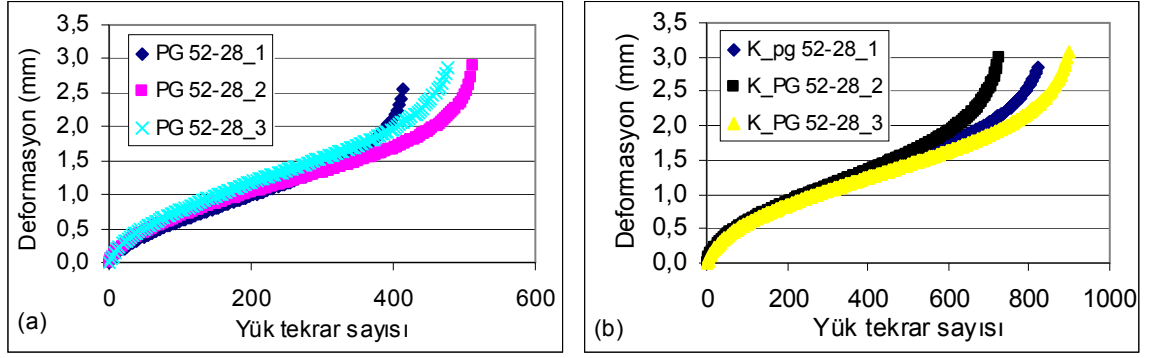
içeren ve içermeyen numunelere 375 kPa gerilme seviyesinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen N_f , N_{mak} , δ_f , δ_{mak} ve r_f değerleri Tablo 4.15 ve 4.16’da verilmiştir. Ayrıca PG 52-28, MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG bitümleri kullanılan, ayrıca kireç içeren ve içermeyen numunelere 375 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–yük tekerrür sayısı ilişkileri Şekil 4.26-4.29’da çizilmiştir.

Tablo 4.15. Kireç içermeyen karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları

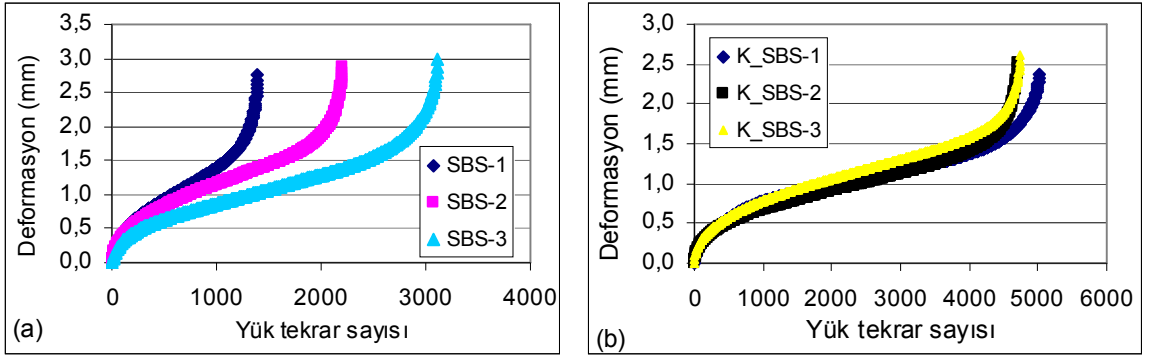
Katkı Türü	Num. No	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f	Katkı Türü	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f
PG 52-28	1	382	1.881	414	2.561	47	MB%11.0AG	8460	2.415	8772	2.793	825
	2	469	2.061	513	2.909	52		8100	2.328	8328	3.202	261
	3	435	2.218	477	2.977	55		8864	2.389	9168	2.934	558
	Ort.	429	2.053	468	2.816	51		8475	2.377	8756	2.976	548
MB%4.0SBS	1	1325	2.029	1395	2.756	96	MB%10.0IG	7380	2.052	7632	3.014	262
	2	2106	2.096	2211	2.868	136		6180	2.500	6396	3.146	334
	3	2952	2.106	3114	2.982	185		7128	2.282	7356	2.978	328
	Ort.	2128	2.077	2240	2.869	139		6896	2.278	7128	3.046	308

Tablo 4.16. Kireç içeren karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları

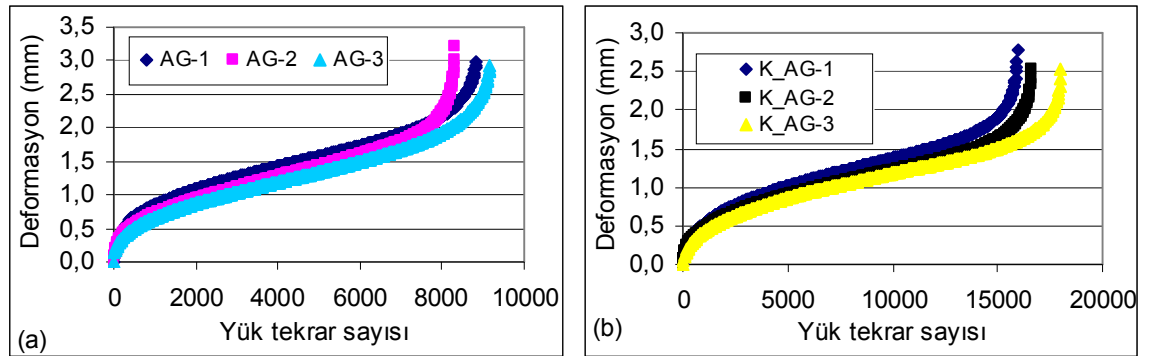
Katkı Türü	Num. No	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f	Katkı Türü	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f
PG 52-28	1	792	2.516	822	2.841	92	MB%11.0AG	15576	2.131	15960	2.774	597
	2	705	2.575	726	2.982	52		16224	1.961	16632	2.522	727
	3	873	2.683	897	3.070	62		17676	2.033	18036	2.538	713
	Ort.	790	2.59	815	2.964	69		16492	2.042	16876	2.611	679
MB%4.0SBS	1	4866	1.914	5022	2.361	349	MB%10.0IG	14400	2.000	14880	2.563	853
	2	4614	1.956	4710	2.521	170		13032	1.568	13368	2.053	693
	3	4644	2.126	4752	2.605	225		12384	1.720	12720	2.21	686
	Ort.	4708	1.999	4828	2.496	248		13272	1.763	13656	2.275	744



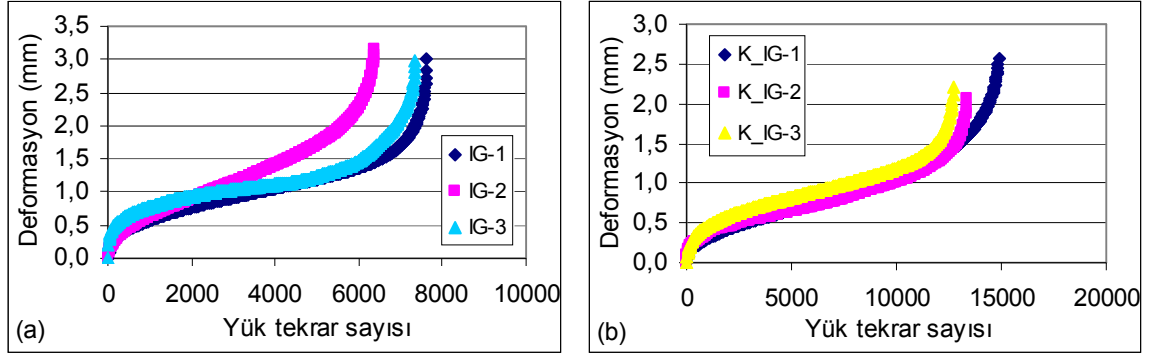
Şekil 4.26. PG 52-28 ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.27. MB%4,0SBS ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

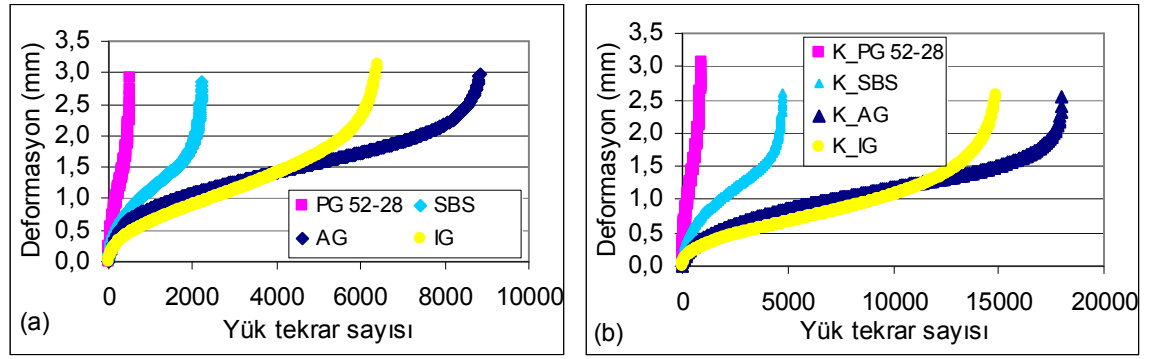


Şekil 4.28. MB%11,0AG ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



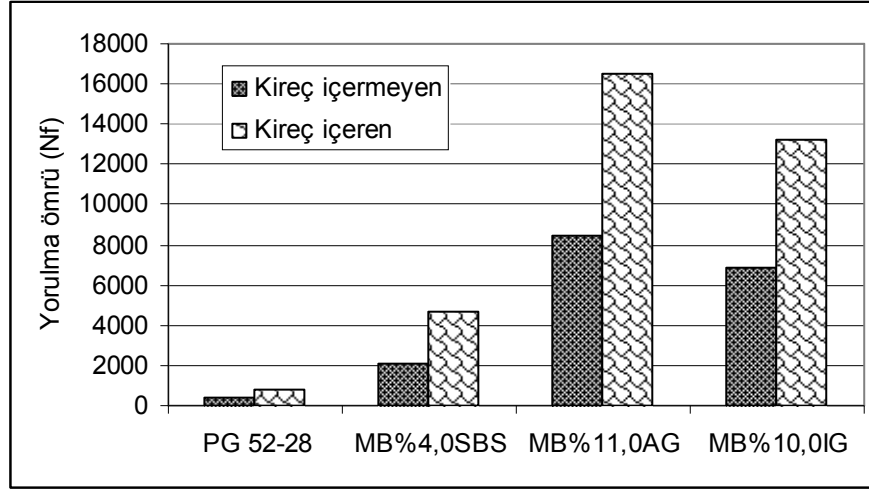
Şekil 4.29. MB%10,0IG ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Bütün karışımların deformasyon değerlerinin yük tekrarı ile değişimine birer örnek Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.30. Kireç içermeyen (a) ve içeren (b) karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisinin karşılaştırılması

Numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük yük tekrar sayısına PG 52-28 ile hazırlanan karışımların, en yüksek yük tekrarına ise MB%11,0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.30). Kireç kullanımı ile yorulma ömürlerinin önemli oranda arttığı tespit edilmiştir. Tablo 4.16’da görülen ortalama yorulma ömrü (N_f) değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 4.31’de verilmiştir.

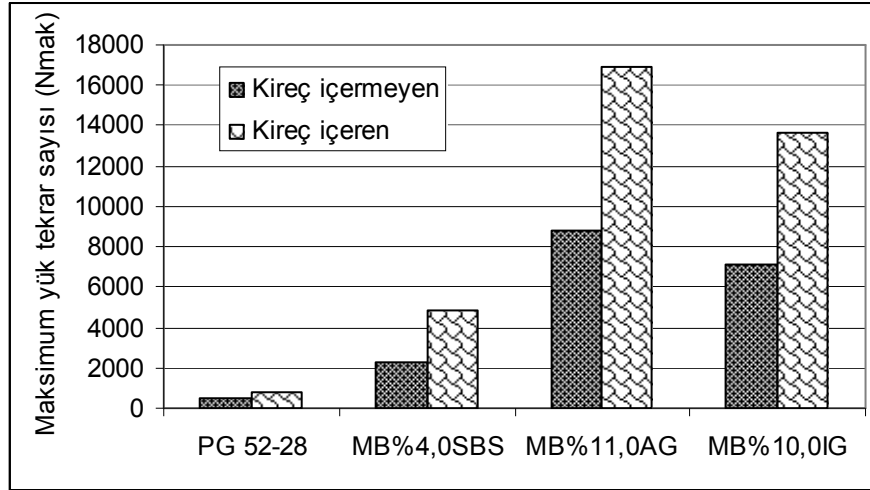


Şekil 4.31. Yorulma ömrü (Nf) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Yorulma ömrü değerleri, yük tekrar sayısı - deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilmiştir. Yorulma ömrü değerleri, hem filler olarak kireç kullanımı ile hem de bitüm katkı maddelerinin kullanımı ile artmıştır. Kireç kullanımı ile PG 52-28, MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG değerleri sırasıyla 1.84; 2.21, 1.95 ve 1.92 kat artmıştır. Bu durum kireç kullanımının yorulma ömrü değerleri üzerinde en fazla MB%4.0SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlarda etkin olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda kireç, en az PG 52-28 ile hazırlanan karışımlarda etkin olmuştur.

Kireç içermeyen karışımlarda MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerleri PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 4.96, 19.77 ve 16.09 kat artmıştır. Kireç içeren karışımlarda ise MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerleri PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 5.96, 20.88 ve 16.80 kat artmıştır. Bu durum hem kireç içeren hem de kireç içermeyen karışımlarda yorulma ömrünün en fazla MB%11.0AG ile hazırlanan karışımlarda olacağını göstermektedir. Kireç içeren karışımlarda modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların yorulma ömür değerlerinin saf karışıma göre artış oranlarının, kireç içermeyen karışımların artış oranlarına göre yükseldiği belirlenmiştir (MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımlarda 4.96 kattan 5.96 kata arttığı gibi). Bu sonuç, bitüm katkı maddelerinin karışımda filler olarak kireç kullanımı ile uyum sağlayacağını ve karışımların yorulma ömürlerini arttıracaklarını göstermektedir. Bunun yanında bitüm katkı maddelerinin hepsinin yorulma ömrü bakımından filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin

olduğunu göstermektedir. Karışımların maksimum yük tekrar sayılarının (N_{mak}) ortalamasının katkı türü ile değişimi Şekil 4.32’de verilmiştir.

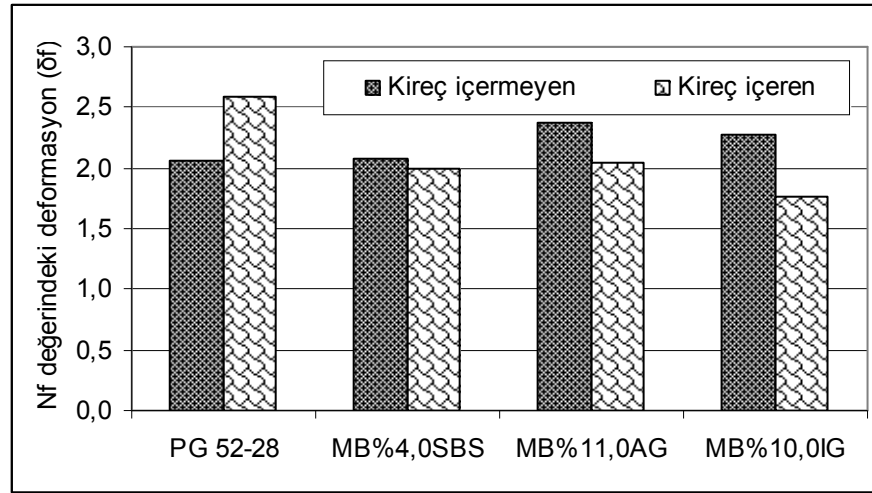


Şekil 4.32. Maksimum yük tekrar sayısı – katkı türü ilişkisi

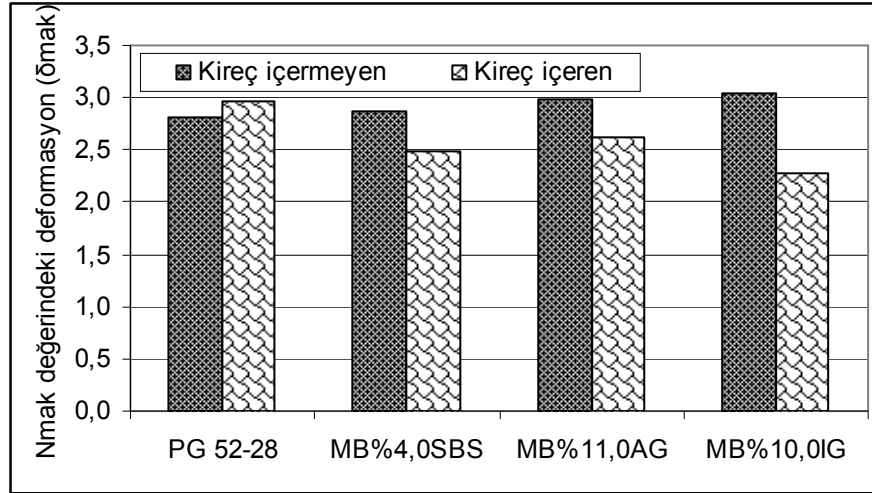
Karışımların maksimum yük tekrar sayıları, yorulma ömürleri ile benzer değişim göstermiştir. Hem filler olarak kireç kullanımı hem de bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımı ile maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. Kireç kullanımı ile PG 52-28, MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların N_{mak} değerleri sırasıyla 1.74, 2.16, 1.93 ve 1.92 kat artmıştır. Yorulma ömrü değerlerinde olduğu gibi maksimum yük tekrar sayısı değerlerinde de kireç kullanımı en fazla MB%4.0SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlarda, en az PG 52-28 ile hazırlanan karışımlarda etkin olduğu tespit edilmiştir.

Yorulma ömrü değerlerinde olduğu gibi hem kireç içeren hem de kireç içermeyen karışımlarda maksimum yük tekrar sayısına en fazla MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile modifiye bitümlerin etkinlikleri artmıştır. N_{mak} değerleri açısından da bütün bitüm katkı maddelerinin filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının (δ_{mak}) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 4.34’de verilmiştir.



(a)

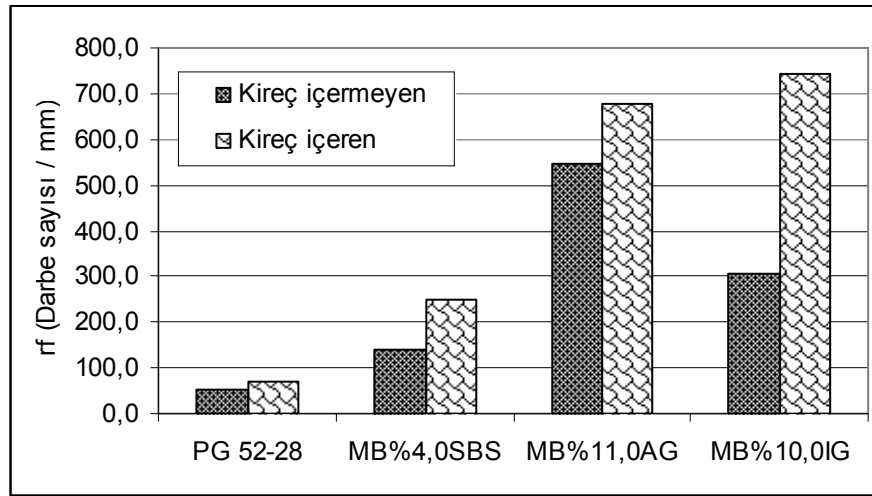


(b)

Şekil 4.33. N_f (a) ve N_{mak} (b) değerlerindeki deformasyon değerlerinin katkı türü ile değişimi

N_f yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerleri incelendiğinde PG 52-28 ile hazırlanan karışım dışındaki diğer karışımlarda filler olarak kireç kullanımı ile deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.33a). Kireç içermeyen karışımlarda en yüksek δ_f değerine MB%11,0AG, en düşük δ_f değerine ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç içeren karışımlarda ise en yüksek δ_f değerine PG 52-28 ile hazırlanan karışımın, en düşük değere ise MB%10,0IG ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kirecin karışımdaki bağlayıcının cinsine göre deformasyon değeri üzerinde farklı etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Maksimum yük tekerrür sayılarındaki deformasyon değerleri (δ_{mak}) incelendiğinde δ_f değerleri ile

uyum sağlandığı belirlenmiştir. Sadece kireç içermeyen karışımlarda maksimum deformasyon değerlerine MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların yanında MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan kireç içermeyen karışımlarda en gevrek davranışı PG 52-28 ile hazırlanan saf karışımın göstereceği, kireç içeren karışımlarda ise MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların göstereceği tespit edilmiştir. Karışımların $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_f) katkı kullanımı ile değişimi Şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.34. Karışımların $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranları

Şekil 4.34'te görülen $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde katkı kullanımı ile r_f değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile çatlak ilerleme oranı değerleri sırasıyla 1.33, 1.78, 1.24 ve 2.41 kat arttığı belirlenmiştir. Bu durum çatlak ilerleme oranı açısından kirecin en fazla MB%10.0IG ile uyum sağladığını göstermektedir.

Kireç içermeyen karışımlarda MB%4.0SBS, MB%11.0AG ve MB%10.0IG ile hazırlanan karışımların çatlak ilerleme oranı değerlerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 2.70, 10.66 ve 5.99 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kireç içeren karışımlarda ise sırasıyla 3.61, 9.89 ve 10.83 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bitüm katkı maddelerinin filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğunu göstermektedir. Ayrıca doğal asfaltların SBS'e göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Yorulma deney sonuçlarından filler olarak kireç kullanımının ve bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının yorulma ömrünü arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca filler olarak kireç kullanımının ve bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının yorulma ömrünü daha da arttırdığı, katkıların birbiri ile uyum sağladığı tespit edilmiştir. Bitüm katkı maddelerinin hidrate kirece göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömrü açısından kireç kullanımının en fazla SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek yorulma ömrü değerlerine hem kireç kullanılan hem de kireç kullanılmayan numunelerde MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Deformasyon değerleri dikkate alındığında PG 52-28 ile hazırlanan karışım dışında diğer karışımlarda kireç kullanımı ile deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri incelendiğinde hem kirecin hem de bitüm katkı maddelerinin karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Doğal asfalt kullanımının SBS'e göre çatlak ilerleyişine karşı dayanımı daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında filler olarak agrega ağırlığının %2'si oranında hidrate kireç kullanımının saf ve stiren-butadien-stiren, Amerika gilsoniti ve İran gilsoniti modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar üzerindeki etkileri çeşitli deneylerle değerlendirilmiştir.

Bağlayıcı deneyleri sonucunda saf bağlayıcının performans seviyesinin PG 52-28 olduğu tespit edilmiştir. Saf bağlayıcıya %4.0 oranında SBS ilave edilmesi durumunda elde edilen modifiye bağlayıcının performans seviyesinin PG 70-22 olduğu tespit edilmiştir. Saf bitüme %11.0 AG ve %10.0 IG ilave edilmesi durumunda %4.0 SBS modifiyeli bitümle benzer $G^*/\sin \delta$ değerleri elde edilmiştir. Bu nedenle çalışmanın geri kalanında %4.0 SBS, %11.0 AG ve %10.0 IG kullanılmasına karar verilmiştir.

Kireç içermeyen karışımların Superpave yöntemine göre tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir. Kireç içeren karışımlar için aynı bağlayıcı için belirlenen bitüm içerikleri kullanılmıştır. Kirecin yüzey alanı kalkere göre fazla olduğundan kireç içeren karışımların boşluk oranının kalker kullanılan karışımlara göre daha fazla olduğu fakat şartname kriterlerini sağladıkları belirlenmiştir.

Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan numuneler üzerinde uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda stabilite değerleri açısından en iyi sonuca koşullandırılmış ve kireç içeren karışımlarda SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımın diğer durumlarda AG modifiyeli bitümle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile stabilite değerleri saf ve SBS katkılı karışımlarda artarken AG ve IG katkılı karışımlarda azalmıştır. MQ değerleri bakımından en yüksek değere MB%11.0AG modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların, en düşük değere ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu, kireç kullanımı ile MQ değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların kalıcı deformasyona karşı diğer karışımlara göre daha iyi performans sergileyeceğini, filler olarak kireç kullanımının bu önemli özelliği arttıracakını göstermektedir. RMS değerlerinden nem hasarına karşı dayanımı en yüksek karışımın MB%4.0SBS ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile nem hasarına karşı dayanım artmıştır.

İndirekt çekme dayanımı değerlerinden kireç içeren ve içermeyen karışımlarda en düşük çekme dayanımı değerine PG 52-28 ile hazırlanan karışımların en yüksek çekme dayanımı değerine ise MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Etkinliği en az olan katkının SBS olduğu tespit edilmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın göstergesi olan çekme dayanımı oranı değerlerinden MB%4.0SBS kullanılarak hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımının en fazla olduğu, PG 52-28 ile hazırlanan karışımların ise en az olduğu, MB%10.0IG ve MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının benzer olduğu belirlenmiştir.

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda hem filler olarak %2 oranında kireç içeren hem de içermeyen numunelerde sıcaklık arttıkça ITSM değerleri azalırken katkı kullanımı ile bu değerler artmıştır. Kireç içermeyen karışımlarda olduğu gibi kireç içeren karışımlarda da ITSM değerleri içerisinde en düşük değerlere bütün sıcaklıklarda PG 52-28 ile hazırlanan karışımların, en yüksek değere ise MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tekerlek izi deney sonuçlarından en mukavemetli karışımın MB%11.0AG ile hazırlanan karışım olduğu, bütün katkıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca kireç kullanımı ile tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımın arttığı fakat kirecin diğer katkıları kadar etkin olmadığı tespit edilmiştir. En etkin bitüm katkı maddesinin AG olduğu tespit edilmiştir.

Yorulma deney sonuçlarından katkıların ayrı ayrı yada birlikte kullanımı ile karışımların yorulma ömürlerinin arttığı belirlenmiştir. Bitüm katkı maddelerinin hidrate kirece göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömrü açısından kireç kullanımının en fazla SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek yorulma ömrü değerlerine hem kireç kullanılan hem de kireç kullanılmayan numunelerde MB%11.0AG ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri incelendiğinde hem kirecin hem de bitüm katkı maddelerinin karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Doğal asfalt kullanımının SBS'e göre çatlak ilerleyişine karşı dayanımı daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir.

Bütün deney sonuçları dikkate alındığında aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar karşılaştırıldığında stabilite, çekme dayanımı, kalıcı deformasyona karşı dayanım ve yorulma açısından en faydalı katkının AG olduğu, nem hasarına karşı dayanım açısından ise SBS olduğu tespit edilmiştir. Kireç kullanımı ile

bitümlü sıcak karışımların stabilite, indirekt çekme dayanımı, nem hasarına ve kalıcı deformasyona karşı dayanım, yorulma ömürlerinin artacağı tespit edilmiştir. Bilindiği üzere kireç bitüm katkı maddelerine göre daha ucuz bir malzemedir. Bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kireç kullanımı ile daha pahalı bitüm katkı maddelerinin daha az oranda kullanılması ekonomik açıdan fayda sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. **AASHTO T283**, 2003. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
2. **ASHTO TP48**, 1997. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
3. **Aflaki, S. ve Tabatabaee, N.**, 2009. Proposals for Modification of Iranian Bitumen to Meet the Climatic Requirements of Iran, *Construction and Building Materials*, **23**, 2141–2150.
4. **Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. ve Rollings, R.**, 1993. Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, *Transportation Research Record*, **1417**, 178-86.
5. **Aksoy, A. ve Ağar, E.**, 2002. Yüksek performanslı bitümlü sıcak karışımlar için sönmüş kirecin kullanımı, IV. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, Balıkesir Üniversitesi, 11-13 Eylül.
6. **Aksoy, A., Samlıoğlu, K., Tayfur, S. ve Özen, H.**, 2005. Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures, *Construction and Building Materials*, **19** (1), 11-18.
7. **Ameri, M., Mansourian, A. ve Ziari, H.**, 2011. Experimental Investigation of the Effect of Gilsonite on Performance of Hot-Mix Asphalt, *Transportation Research Journal*, **1**, 1-8.
8. **Aragao, F.T.S., Lee J., Kim, Y.R. ve Karki, P.**, 2010. Material Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behaviour of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavements, *Construction and Building Materials*, **24** (4), 538-544.
9. **Bardesi, A. ve Brule, B.**, 1999. Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in road pavements, *World Road Association (PIARC)*, pp., 118-120.

10. Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai H., Khatri M.A. ve Anderson, R.M., 2001. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design, *NCHRP report*, 459.
11. Behiry, A.E.A.E., 2013. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures, *Ain Shams Engineering Journal*, **4**, 351-363.
12. Cortizo, M.S., Larsen, D.O., Bianchetto, H. ve Alessandrini, J.L., 2004. Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts, *Polymer Degradation and Stability*, **86**, 275-282.
13. Crandall, R.C. ve Finke, F.L., 1961. A Report On Hydrated Lime For Use In Experimental Hot-Mix Asphaltic Concrete, Texas Highways, September.
14. Çeloğlu M.E., 2013, Farklı doğal asfaltların bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
15. Çolak, K.M., 2006. Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
16. Davis II, Neal, Tooman ve Clyde, E., 1989. New Laboratory Tests Evaluate the Effectiveness of Gilsonite Resin as a Borehole Stabilizer, *J SPE Drilling Engineering*, **4**(1): pp., 47-56.
17. Dokken, K. ve Evensen, T., 2010. <http://www.americangilsonite.com/asphalt—oslo.html> Gilsonite Resin - A Modifier for High Stability Pavements, American Gilsonite Company.
18. Francken, L., 1998. Bituminous Binders and Mixes, London, Rilem Reports, E&FN Spon, p. 352.
19. Geçkil, T., 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
20. Görkem, Ç. ve Şengöz, B., 2009. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, *Construction and Building Materials*, **23**, 2227-2236.
21. Hajikarimi, P., Aflaki, S. ve Hoseini, A.S., 2013. Implementing fractional viscoelastic model to evaluate low temperature characteristics of crumb rubber and gilsonite modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, **49**, 682-687.

22. **Hamidi, H.**, 1998. Stiffness Modulus and Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mix Containing Gilsonite, *Ms Thesis*, Bandung Technology Institute, Bandung, Indonesian.
23. **Hesami, S., Roshani, H., Hamed, G.H. ve Azarhoosh, A.**, 2013. Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt, *Construction and Building Materials*, **47**, 935–941.
24. **Hınışlıoğlu, S. ve Ağar, E.**, 2004. Use of the Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, *Materials Letters*, **58**, 267-271.
25. **Huang, B., Li, G. ve Shu, X.**, 2006. Investigation into Three-Layered HMA Mixtures, *Composites: Part B*, **37**, 679–690.
26. **Isacsson, U. ve Zeng, H.Y.**, 1997. Relationships between bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt, *Construction and Building Materials*, **11**, 83–91.
27. **Ilıcalı, M.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s., İstanbul.
28. **Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 1-3, İstanbul.
29. **Iwanski M. ve Mazurek G.**, 2013. Hydrated lime as the anti-aging bitumen agent, *Procedia Engineering*, **57**, 424 – 432.
30. **Jian-Shiuh Chen, P.E. ve Min-Chih, L.**, 2002. Ming-Shen, S., Asphalt Modified by Styrene- Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, *Journal Of Materials In Civil Engineering*, May/June.
31. **Kılıç, O. ve Anıl M.**, 2006. Kireç Söndürme Şartlarının Söndürülmüş Kireç Kalitesine Etkisi, *Madencilik TMMOB Maden Müh. Odası Dergisi*, **45(1)**, 15-22.
32. **Kuloğlu, N.**, 2001. Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, *TÜBİTAK, Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, **25**, 61-67.
33. **Kumar, P., Chandra, S. ve Bose, S.**, 2006. Strength characteristics of polymer modified mixes, *International Journal of Pavement Engineering*, **7(1)**: 63–71.
34. **Kumar, P., Mehndiratta, H.C. ve Singh, V.**, 2008. “Use of Fly Ash In Bituminous Layer of Pavement”, *Indian Highways*, New Delhi, India, 41-50.
35. **Kök, B.V.**, 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

36. **Kök, B.V. ve Yılmaz, M.**, 2009. The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, **23**, 1999-2006.
37. **Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Güler, M.**, 2011. Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder, *Fuel*, **90**, 3093-3099.
38. **Lav, A.H. ve Lav, M.A.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
39. **Lee S. ve Mun S.**, 2012. Performance based evaluation of lime addition methods in hot mix asphalt, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **39**, 172-179.
40. **Liu, J. ve Li, P.**, 2008. Experimental study on gilsonite-modified asphalt. *Proceeding of the 2008 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, Washington*, 222-228.
41. **Lu, X. ve Isacsson, U.**, 1997. Rheological characterization of styrene-butadienestyrene copolymer modified bitumens, *Journal of Construction and Building Materials*, **11**(1), 23-32.
42. **Lu, X. ve Isacsson, U.**, 1998. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens, *Fuel*, **77**, pp., 961-972.
43. **Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu**, 2001. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri I Çalışma Grubu Raporu., Ankara.
44. **McGennis, R.B., Shuler, S. ve Bahia, H.U.**, 1994. Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, **FHWA-SA-94-069**, 104 p., Washington, DC.
45. **Meyer, R.F. ve Witt, W.**, 1990. Definition and World Resources of Natural Bitumens, *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1-14.
46. **Mostafa A.E., Gerardo W .F. ve Imad L.A.**, 2003. Quantitative effect of elastomeric modification on binder performance at intermediate and high temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, No. 1, February 1, 32-40.
47. **Nakoman, E.**, 1977. Güneydoğu Anadolu Asfaltik Madde Zuhurları, *Madencilik Dergisi*, **16** (6), 41-51.
48. **Nicholls, C.**, 1998. Aspalh Surfacing, E & FN Spon, pp., 68-79.
49. **Özen H.**, 2010. Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples, *Construction and Building Materials*, **25**, 756-765.

50. **Öztürk E.A. ve Çubuk M.K.**, 2004. Gazi üniversitesi mühendislik-mimarlık fakültesi dergisi, Cilt 19, Sayı 2.
51. **Parkinson, D.**, 1997. Five Years of U.K. Thin Surfacing, *Highways & Transportation*, 13-19.
52. **Petersen, J.C., Plancher, H. ve Harnsbergen, P.M.**, 1987. Lime Treatment Of Asphalt To Reduce Age Hardening And Improve Flow Properties, *Proceedings, AAPT*, 56.
53. **Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christensen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R., Antle, C.E. ve Sharma, M.G.**, 1994. Binder Characterization and Evaluation Volume 4: TestMethods, *Strategic Highway Research Program, SHRP A-370*, 197 p., National Research Council Washington, DC.
54. **Prapaitrakul, N., Freeman, T. ve Glover C.J.**, 2005. Analyze Existing Fog Seal Asphalts and Additives: Literature Review, *Texas Department of Transportation, FHWA/TX-06/0-5091-1*, 21 p., USA.
55. **Shuler, S. ve Douglas, I.**, 1990. Improving Durability Of Open-Graded Friction Courses, *Transportation Research Record*, **1259**, 35-41.
56. **Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I. ve Karsaman, R.H.**, 2003. Development of Laboratory Performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in Hot Rolled Asphalt Mix, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **4**, 436-449.
57. **Suo, Z. ve Wong, W.G.**, 2009. Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in Asphalt Concrete Material in Wearing Course, *Construction and Building Materials*, **23**, 462-468.
58. **Şengül, C.E.**, 2011. Sönmüş kireç ile SBS ve elyaf türü katkı maddelerinin SMA karışımların performansı üzerindeki etkileri Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Trabzon, *Doktora Tezi*, 63s.
59. **Şengül, C.E., Aksoy A., İskender E. ve Özen H.**, 2012. Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance, *Construction and Building Materials*, **30**, 139-148.
60. **Şengöz, B. ve Işıkyakar, G.**, 2008. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials*, **22(9)**, 1897-905.
61. **URL-1**, <http://www.asiagilsonite.com/?page=home>, 25.04.2014.

62. URL-2, <http://www.gilsonite.org/index.htm>, 05.05.2014.
63. URL-3, <http://www.americangilsonite.com/> AMG, Gilsonite in Paving Applications American Gilsonite Company, resmi internet sitesi, 05.05.2014.
64. URL-4, http://www.mod.uk/NR/rdonlyres/2AED7CD6-ADE1-46A9-A290-9069A89F32CA/0/spec_13.pdf, Marshall Asphalt for Airfields, Ministry of Defence, Construction Support Team, England, Specification 13, 73 p., 01.05.2014.
65. URL-5, <http://www.havadurumu15gunluk.net/gecmisbilgi/2011-08-15-elazig-havadurumu.html>, 06.05.2014.
66. Tayfur, S., Özen, H. ve Aksoy, A., 2007. Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, *Construction and Building Materials*, **21**(2), 328-337.
67. The Asphalt Institute, 1996. Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), U.S.A., 100p.
68. Tığdemir, M. ve Kalyoncuoğlu, Ş.F., 2005. SBS-Elastomer Katkılı Asfalt Betonu Karışımlarında Plastik Deformasyon Davranışı, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühensiliği Sorunları Kongresi*, Antalya.
69. TS EN 12607-1, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
70. TS EN 12697-34+A1, 2007. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
71. TS EN 14023, 2010. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar - Polimer Modifiye Bitüm Şartnameler İçin Genel Esaslar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
72. Vlachovicova, Z., Wkumbura, C., Stastana, J. ve Zanzotto, L., 2007. Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene-butadiene-styrene copolymer, *Construction and Building Materials*, **21**, 567-577.
73. Walkering, S.D. ve Vonk, W.C., 1992. Cariflex TR in Bitumen for Asphalt Mixes: Improved Elastic Recovery and Higher Performance, Thermoplastic Rubbers Technical Manual, Koninklijke Shell Laboratorium, Amsterdam, Netherlands, April.
74. Widyatmoko, I. ve Elliott, R., 2008. Characteristics of Elastomeric and Plastomeric Binders in Contact with Natural Asphalts, *Construction and Building Materials*, **22**, 239-249.

75. **Whiteoak, D. ve Read, J.**, 2003. The Shell Bitumen Handbook, London, Thomas Telford Ltd., 464 p.
76. **Won, M.C. ve Ho, M.K.**, 1994. Effect of antistrip additives on the properties of polymer-modified asphalt binders and mixtures, *Transportation Research Record*, **1436**, 108–114.
77. **Yılmaz, M. ve Kök, B.V.**, 2008. Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Süperpave Sistemlerine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesine ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. **23**(41), 811-819.
78. **Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E.**, 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, p. 107, Morgantown, West Virginia.
79. **Zou, J., Isola, M., Roque, R., Chun, S., Koh, C. ve Lopp, G.**, 2013. Effect of hydrated lime on fracture performance of asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, **44**, 302–308.
80. **Zoorob, S.E. ve Suparna, L.B.**, 2000. Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), *Cement&Concrete Composites*, **22**, 233-242.

ÖZGEÇMİŞ

Erkut YALÇIN, 1989 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamlamıştır. 2007 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında, 2009 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü de 2012 yılında tamamlamıştır. 2011 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı'ndaki Yüksek lisansını 2013 yılında bitirmiştir. 2012 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Ulaştırma Bilim Dalı'ndaki yüksek lisansına halen devam etmektedir.

2014 yılından Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma ABD'de araştırma görevlisi olarak atanmış olup hala göreve devam etmektedir.