

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ASFALTİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Mehmet YILMAZ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Necati KULOĞLU

MAYIS-2011

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASFALTİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Mehmet YILMAZ

(05115202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Mayıs 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Necati KULOĞLU (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN (İ.Ü)

Doç. Dr. Ömer KELEŞOĞLU (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Baha Vural KÖK (F.Ü)

MAYIS-2011

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında kıymetli katkılarını ve engin hoşgörüsünü esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Necati KULOĞLU'na, tezimin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Baha Vural KÖK'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez süresince her türlü desteğini esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e, laboratuvar konusunda derin bilgisinden yararlandığım laboratuvar teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e, kırılma mekaniği konusunda desteklerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ragıp İNCE'ye, malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen TKİ Silopi Kontrol Müdürü Sayın Adil TUNÇ ve Başmühendis Sayın Dindar AGİTOĞLU'na, KGM 8. Bölge Müdürlüğü Asfalt Başmühendisliği Bitüm Şube Şefi Sayın Hüseyin ÖZPOLAT'a, meteorolojik verilerin temininde yardımlarını esirgemeyen Elazığ Meteoroloji Bölge Müdür Yardımcısı Sayın İsmail BAŞGÜN'e, sayısal görüntü işleme konusunda yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Abdulkadir ŞENGÜR'e, istatistik konusunda yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Nurhan HALİSDEMİR'e ve Sayın Arş. Gör. Esra PAMUKÇU'ya, olumlu telkinleriyle motive eden KGM Teknik Araştırma Daire Başkanı Sayın Ahmet Gürkan GÜNGÖR'e ve adını sayamadığım tezime emeği geçen bütün arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Maddi yönden tezimi destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi (FÜBAP) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Özellikle tezim nedeniyle yıllardır ihmal ettiğim eşim ve kızıma, eğitimim için her zaman destek olan anneme ve babama sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet YILMAZ
Elazığ - 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ	XVII
KISALTMALAR	XIX
1. GİRİŞ	1
2. DOĞAL ASFALTİK MADDELERİN ÖZELLİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI	4
2.1. Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Bulunan Asfaltik Maddelerin Özellikleri ...	9
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI	14
4. YÜKSEK PERFORMANSLI ASFALT KAPLAMA (SUPERPAVE) TASARIM YÖNTEMİ	23
4.1. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi	24
4.1.1. Superpave Bağlayıcı Deneyleri	30
4.1.1.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)	30
4.1.1.2. Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)	31
4.1.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi	32
4.1.1.4. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi	33
4.1.1.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi	36
4.1.1.6. Direkt Çekme Deneyi (DTT)	38
4.2. Superpave Karışım Tasarımı	39
4.2.1. Tasarım Agregada Gradasyonu Seçimi	39
4.2.2. Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı	42
4.2.3. Deneme Karışımlarının Değerlendirilmesi	48
4.2.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriklerinin Tespit Edilmesi	52
5. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA MEYDANA GELEN YAŞLANMA	53
6. ÇALIŞMADA BSK NUMUNELERİNE UYGULANAN DENEY YÖNTEMLERİ	57
6.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	57
6.2. Nem hasarına karşı dayanım deneyi (AASHTO T 283)	58
6.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi	61
6.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	63
6.5. Tekrarlı Sünme Deneyi	67
6.6. Kırılma Mekanığı Yaklaşımlarıyla BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi	72
6.7. Sayısal Görüntü İşleme Yöntemi	85
7. DENEYSEL ÇALIŞMA	87
7.1. Elazığ İçin Uygun Bağlayıcının Seçilmesi	88

7.2.	Bitümlü Bağlayıcı Deney Sonuçları	92
7.3.	Agregaların Fiziksel Özellikleri	97
7.4.	Superpave Sistemine Göre Hacimsel Karışım Tasarımının Yapılması	98
7.4.1.	Deneme Agrega Gradasyonlarında Hazırlanan Karışımların Değerlendirilmesi	106
7.4.2.	Saf Karışımın Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi	113
7.4.3.	Asfaltit İçeren Karışımların Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi	118
7.5.	Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları	121
7.5.1.	Kısa Dönem Yaşlandırılmış Karışım Numunelerinin Marshall Deney Sonuçları	121
7.5.2.	Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışım Numunelerinin Marshall Deney Sonuçları	127
7.5.3.	Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Marshall Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	133
7.6.	Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları	136
7.6.1.	Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları	138
7.6.2.	Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları	142
7.6.3.	Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	146
7.7.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları	148
7.7.1.	Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin ITSM Deney Sonuçları	149
7.7.2.	Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin ITSM Deney Sonuçları	153
7.7.3.	Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların ITSM Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	156
7.8.	İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	158
7.8.1.	Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	159
7.8.2.	Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	178
7.8.3.	Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	194
7.8.4.	Rijitlikle Yorulma Ömrü Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi	197
7.9.	Dinamik Sünme Deney Sonuçları	200
7.9.1.	Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Dinamik Sünme Deney Sonuçları	201
7.9.2.	Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Dinamik Sünme Deney Sonuçları	210
7.9.3.	Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Dinamik Sünme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	218
7.10.	Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi	225
7.10.1.	LEKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti (EN 12697-44)	228
7.10.2.	EPKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti (J-İntegral Yöntemi)	235
7.10.3.	Çatlak İlerleyişinin Görüntü Analizi İle Tespit Edilmesi	260

7.10.4.	Çatlak İlerlemesi Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi	270
7.11.	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	274
8.	SONUÇLARIN İSTATİSTİKSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ	278
8.1.	Marshall Deney Sonuçlarının Modellenmesi	278
8.2.	Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçlarının Modellenmesi	281
8.3.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçlarının Modellenmesi	282
8.4.	İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçlarının Modellenmesi	283
8.5.	Tekrarlı Sünme Deney Sonuçlarının Modellenmesi	287
8.6.	Kırılma Tokluğu Deney Sonuçlarının Modellenmesi	289
8.7.	J-İntegral Deney Sonuçlarının Modellenmesi	289
9.	SONUÇLAR	295
KAYNAKLAR		297
ÖZGEÇMİŞ		309

ÖZET

Bu tez çalışmasında Silopi asfaltitinin bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanımının etkisi araştırılmıştır. Silopi asfaltiti %1–5 aralığında 5 farklı oranda kullanılmıştır. Saf ve asfaltit içeren karışımların tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmıştır. Deneyler kısa dönem yaşlandırılmış karışımların yanı sıra uzun dönem yaşlandırılmış karışımlar üzerinde de uygulanmıştır.

Marshall deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça stabilite, Marshall oranı (MQ) ve kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Çekme dayanımı oranı deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça karışımların çekme dayanımı ve çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin arttığı belirlenmiştir. İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda asfaltit oranı arttıkça karışımların rijitliğinin arttığı tespit edilmiştir. İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça yorulma ömrünün arttığı belirlenmiştir. Ayrıca deformasyonun azalması nedeniyle daha gevrek bir kırılmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Tekrarlı sünme deneyi sonucunda asfaltit içeriği arttıkça rezilyans modülü, sünme modülü ve akma sayısı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Kırılma tokluğu deneyleri sonucunda %3 asfaltit içeriğine kadar K_{IC} değerlerinin benzer olduğu, %4 ve %5 asfaltit içeriklerinde bu değerin azaldığı belirlenmiştir. J_c değerlerinden asfaltit içeriği arttıkça karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada J_c deneylerinin görüntüleri alınarak sayısal görüntü işleme prosedürüne tabi tutularak zamanla çatlak ilerleyişi tespit edilmiştir. Ayrıca doğrusal regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişki modellenerek birinci derece denklem haline getirilmiştir.

Deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda asfaltit içeriği arttıkça karışımların kalıcı deformasyona, yorulma çatlaklarına, nem hasarına ve çatlak ilerleyişine karşı dayanımının ve rijitliğinin arttığı fakat karışımlarda daha gevrek kırılmanın görüleceği belirlenmiştir. Hacimsel tasarım göz önünde bulundurulduğunda en uygun asfaltit içeriğinin %3 olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım, Asfaltit, Superpave, Yorulma, Sünme, Kırılma Mekanik.

SUMMARY

Investigation of the Effects of Asphaltite on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt

In this dissertation study, the effects of using Silopi asphaltite in hot mix asphalt as a filler material were investigated. Silopi asphaltite was added into the mixtures at 5 different proportions from 1% to 5%. Designs of both the pure and asphaltite containing mixtures were carried out in accordance with the Superpave method. The tests were applied on short-term aged mixtures as well as long-term aged mixtures.

It was found out that the stability, Marshall Quotient (MQ) and Retained Marshall Stability (RMQ) values increased in parallel with asphaltite content. The tensile strength ratio tests demonstrated that higher asphaltite contents enhanced the tensile strength and the tensile strength ratios (TSR). As a result of the indirect tensile stiffness modulus tests, the positive influence of higher asphaltite content on stiffness of the mixtures was also determined. The indirect tensile fatigue test showed that the fatigue life increased with asphaltite content, in addition to resulting in a more brittle type of cracking due to the reduction in deformation. As a result of the repeated creep tests, it was found that the resilient modulus, creep modulus and flow numbers increased with rising asphaltite content. It was determined from the fracture toughness tests that K_{IC} values were similar in pure and modified mixtures up to 3% of asphaltite content, but decreased at 4% and 5% asphaltite. J_c values displayed that the mixtures possessed higher resistances against crack propagation at higher asphaltite content. In the study, images of the J_c tests were taken and subjected to digital image processing procedure to evaluate crack propagation with time. Finally, the relationships between the variables were modeled by linear regression analysis and stated in first order equations.

In consideration of the test results, it was determined that as the asphaltite content increased, the stiffness and resistance of the mixtures against plastic deformation, fatigue cracks, moisture damage and crack propagation improved, although eventuating in a more brittle cracking in the mixtures. Taking volumetric design into account, it was concluded that the most appropriate asphaltite content in hot bituminous mixtures would be 3%.

Key Words: Hot Mix Asphalt, Asphaltite, Superpave, Fatigue, Creep, Fracture Mechanics

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Doğal bitümler, yer yağı ve kömürlerin sınıflandırılması	5
Şekil 2.2. Atabaska katranlı kumu	6
Şekil 2.3. Trinidad göl asfaltı	7
Şekil 2.4. Dünyadaki asfaltik madde cinsleriyle Güneydoğu Anadolu'daki filonların CS ₂ 'de çözünürlük derecelerinin kıyaslanması	11
Şekil 3.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı	14
Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı	15
Şekil 3.3. Suriye El-Beşiri katranlı kumunun doğal hali ve ayrıştırılmış hali	21
Şekil 4.1. Superpave karışım tasarım yönteminin yapısı	24
Şekil 4.2. Uygulama bölgesi sıcaklıklarına göre güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi	25
Şekil 4.3. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi	30
Şekil 4.4. PAV deney aleti	32
Şekil 4.5. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi	33
Şekil 4.6. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi	33
Şekil 4.7. Numunenin silikon kalıba doldurulması ve üst plağa yerleştirilmesi	34
Şekil 4.8. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri	34
Şekil 4.9. Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği	35
Şekil 4.10. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi	36
Şekil 4.11. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti	37
Şekil 4.12. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması	37
Şekil 4.13. Sünme oranının belirlenmesi	38
Şekil 4.14. DDT deneyinin uygulanışı	39
Şekil 4.15. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu	40
Şekil 4.16. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri	41
Şekil 5.1. Bitümün yaşlanma indisindeki değişimin zamanla ilişkisi	54
Şekil 5.2. BSK numunelerinin uzun dönem yaşlandırılması	56
Şekil 6.1. Marshall stabilite ve akma aleti	57
Şekil 6.2. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması	59
Şekil 6.3. Çekme dayanımı deney düzeneği	60
Şekil 6.4. ITSM deney düzeneği	62
Şekil 6.5. Yorulma deney düzeneği	66
Şekil 6.6. Temsili deformasyon - yük tekrerrür sayısı ilişkisi	66
Şekil 6.7. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi	69
Şekil 6.8. Tekrarlı sünme deney düzeneği	70
Şekil 6.9. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi	71
Şekil 6.10. Akma sayısının bulunmasında karşılaşılan zorluklar	71
Şekil 6.11. Akma sayısının bulunması	72
Şekil 6.12. Kırılma modları	74
Şekil 6.13. BSK'lara uygulanan lineer elastik kırılma mekaniği deneyleri	75

Şekil 6.14.	Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri (a) Tek çentikli kiriş eğilme deneyi (b) Yarım daire eğilme deneyi (c) Disk şeklinde numune çekme deneyi	77
Şekil 6.15.	SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon diyagram türleri (a) -10°C veya 1°C sıcaklıktaki elastik kırılma (b) 15°C sıcaklıktaki plastik göçme (uzama sertleşmesi yok) (c) 25°C veya daha yüksek sıcaklıkta oluşan uzama sertleşmesi	77
Şekil 6.16.	Y_I değerinin belirlenmesi	78
Şekil 6.17.	Yarım daire eğilme deney düzeneği	79
Şekil 6.18.	Numuneye çentik açılması	80
Şekil 6.19.	Görüntü işleme için verilerin elde edilmesi	85
Şekil 7.1.	Silopi asfaltitinin konkasörde kırılmadan önce ve sonraki hali	88
Şekil 7.2.	Elazığ için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı	90
Şekil 7.3.	Elazığ için bağlayıcı sınıfı seçimi	92
Şekil 7.4.	Bitümlü bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları	94
Şekil 7.5.	Karışım-1 agrega gradasyon eğrisi	99
Şekil 7.6.	Karışım-2 agrega gradasyon eğrisi	99
Şekil 7.7.	Karışım-3 agrega gradasyon eğrisi	100
Şekil 7.8.	Cooper yoğurmalı sıkıştırıcı	104
Şekil 7.9.	Karışım-1 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması	107
Şekil 7.10.	Karışım-2 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması	108
Şekil 7.11.	Karışım-3 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması	109
Şekil 7.12.	Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri	115
Şekil 7.13.	Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin asfalt içeriği ile değişimi	116
Şekil 7.14.	Karışım numunelerinin $N_{maks.}$ 'da %5,27 bitüm içeriğindeki yoğunluk Eğrileri	118
Şekil 7.15.	K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle stabilite değerlerinin değişimi .	124
Şekil 7.16.	K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle akma değerlerinin değişimi	125
Şekil 7.17.	K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle marshall oranı değerlerinin değişimi	126
Şekil 7.18.	Kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarının asfaltit içeriğiyle RMS değerlerinin değişimi	126
Şekil 7.19.	YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle stabilite değerlerinin Değişimi	130
Şekil 7.20.	YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle akma değerlerinin değişimi	131
Şekil 7.21.	YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle marshall oranı değerlerinin Değişimi	132
Şekil 7.22.	YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle RMS değerlerinin değişimi	132
Şekil 7.23.	Marshall stabilitesi-asfaltit içeriği ilişkisi	133
Şekil 7.24.	Marshall stabilitesi yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle Değişimi	134
Şekil 7.25.	Akma değeri-asfaltit içeriği ilişkisi	135
Şekil 7.26.	Marshall oranı-asfaltit içeriği ilişkisi	135
Şekil 7.27.	Kalıcı marshall stabilitesi-asfaltit içeriği ilişkisi	136

Şekil 7.28.	K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle çekme dayanımı değerlerinin değişimi	141
Şekil 7.29.	K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle çekme dayanımı oranlarının değişimi	141
Şekil 7.30.	YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle çekme dayanımı değerlerinin değişimi	145
Şekil 7.31.	Uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarının asfaltit içeriğiyle TSR değerlerinin değişimi	145
Şekil 7.32.	Çekme dayanımı-asfaltit içeriği ilişkisi	146
Şekil 7.33.	Yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi	147
Şekil 7.34.	Çekme dayanımı oranı-asfaltit içeriği ilişkisi	148
Şekil 7.35.	Asfaltit içeriği ve sıcaklık ile ITSM değerlerinin değişimi	152
Şekil 7.36.	Asfaltit içeriği ve sıcaklığın değişimi İle ITSM değerlerinin değişimi	153
Şekil 7.37.	20°C’de ITSM-asfaltit içeriği ilişkisi	156
Şekil 7.38.	30°C’de ITSM-asfaltit içeriği ilişkisi	157
Şekil 7.39.	40°C’de ITSM-asfaltit içeriği ilişkisi	157
Şekil 7.40.	Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü	159
Şekil 7.41.	KDY numunelerin 300 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	167
Şekil 7.42.	KDY numunelerin 375 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	167
Şekil 7.43.	KDY numunelerin 450 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	168
Şekil 7.44.	Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) - asfaltit içeriği ilişkisi	169
Şekil 7.45.	Yorulma ömrü (N_f) - asfaltit içeriği ilişkisi	169
Şekil 7.46.	Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) - asfaltit içeriği ilişkisi	170
Şekil 7.47.	Maksimum yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi	171
Şekil 7.48.	N_i değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi	172
Şekil 7.49.	N_f değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi	173
Şekil 7.50.	N_{mak} değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi	173
Şekil 7.51.	$N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi	174
Şekil 7.52.	$N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi	175
Şekil 7.53.	Karışımların yorulma ömür diyagramları	177
Şekil 7.54.	UDY numunelerin 300 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	185
Şekil 7.55.	UDY numunelerin 375 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	185
Şekil 7.56.	UDY numunelerin 450 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	186
Şekil 7.57.	UDY numunelerin çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı- asfaltit içeriği ilişkisi	186
Şekil 7.58.	UDY numunelerin yorulma ömrü - asfaltit içeriği ilişkisi	187
Şekil 7.59.	UDY numunelerin çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi	188
Şekil 7.60.	UDY numunelerin maksimum yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi ..	188

Şekil 7.61.	UDY numunelerin N_i değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi	189
Şekil 7.62.	UDY numunelerin N_f değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi	190
Şekil 7.63.	UDY numunelerin N_{mak} değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi	191
Şekil 7.64.	UDY numunelerin $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi	191
Şekil 7.65.	UDY numunelerin $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi	192
Şekil 7.66.	UDY karışımların yorulma ömür diyagramları	193
Şekil 7.67.	UDY önce ve sonrasında saf ve %5 asfaltit içeren karışımın gerilme – yorulma ömrü ilişkisi	197
Şekil 7.68.	Karışımların ITSM değerlerinin sıcaklıkla değişimi	198
Şekil 7.69.	ITSM – yorulma ömrü ilişkisi	199
Şekil 7.70.	Uzun dönem yaşlandırılmış karışımların ITSM – yorulma ömrü ilişkisi .	199
Şekil 7.71.	Dinamik sünme deneyi sonrasında numunelerin görünüşü	200
Şekil 7.72.	%3 kalıcı birim şekil değiştirmedeki yük tekrar sayıları	205
Şekil 7.73.	%3 ϵ_c değerine kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	206
Şekil 7.74.	%3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	207
Şekil 7.75.	7500 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değişmelerin yük tekrarı ile Değişimi	208
Şekil 7.76.	7500 yük tekrarına kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	209
Şekil 7.77.	7500 darbe tekrarına kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	210
Şekil 7.78.	UDY numunelerin %3 kalıcı birim şekil değiştirmedeki yük tekrar sayıları	214
Şekil 7.79.	UDY numunelerin %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	215
Şekil 7.80.	UDY numunelerin %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	215
Şekil 7.81.	UDY numunelerde 7500 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değişmelerin yük tekrarı ile değişimi	216
Şekil 7.82.	UDY numunelerde 7500 yük tekrarına kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	217
Şekil 7.83.	UDY numunelerde 7500 yük tekrarına kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi	218
Şekil 7.84.	UDY önce ve sonrasında asfaltit içeriği - akma sayısı ilişkisi	219
Şekil 7.85.	UDY önce ve sonrasında 7500 yük tekrarında asfaltit içeriği – kalıcı birim şekil değiştirme ilişkisi	219
Şekil 7.86.	UDY önce ve sonrasında 7500 yük tekrarında asfaltiti içeriği – esneklik modülü ilişkisi	220

Şekil 7.87.	UDY önce ve sonrasında 7500 yük tekrarında asfaltiti içeriği – sünme modülü ilişkisi	221
Şekil 7.88.	Kalıcı birim şekil değiştirme yaşlanma indeksi ($\epsilon_{cu} / \epsilon_c$) değerlerinin yük tekrarı ile değişimi	222
Şekil 7.89.	Esneklik modülü yaşlanma indeksi (E_{ru} / E_r) değerlerinin yük tekrarı ile değişimi	223
Şekil 7.90.	Sünme modülü yaşlanma indeksi (E_{cu} / E_c) değerlerinin yük tekrarı ile değişimi	224
Şekil 7.91.	Numunelerin uzun dönem yaşlandırılması ve kesilmesi	225
Şekil 7.92.	Deney numunelerinin bir kısmı ve değişik yükseklikte çentiğe sahip Numuneler	226
Şekil 7.93.	Yarım daire eğilme deney düzeneği	226
Şekil 7.94.	Hızı ayarlanabilir Marshall cihazının dijital göstergesi	227
Şekil 7.95.	Numunelerde görülen intergranüler ve transgranüler kırılmalar	227
Şekil 7.96.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri	231
Şekil 7.97.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri	231
Şekil 7.98.	Asfaltit içeriği ile kırılma tokluğu (K_{IC}) ilişkisi	232
Şekil 7.99.	Asfaltit içeriği ile maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) ilişkisi	232
Şekil 7.100.	Kırılma tokluğu yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	234
Şekil 7.101.	Maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	235
Şekil 7.102.	1 cm çentiğe sahip numunelerin yük deformasyon ilişkisi	236
Şekil 7.103.	Maksimum yük - asfaltit içeriği ilişkisi	240
Şekil 7.104.	Maksimum yük anındaki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi	240
Şekil 7.105.	Maksimum yüke kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan-asfaltit içeriği ilişkisi	241
Şekil 7.106.	Maksimum yükten yük boşalınca kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan - asfaltit içeriği ilişkisi	242
Şekil 7.107.	Yükün boşaldığı andaki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi	243
Şekil 7.108.	Yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan - asfaltit içeriği ilişkisi	243
Şekil 7.109.	Karışımların J_c değerleri	244
Şekil 7.110.	UDY numunelerin maksimum yük - asfaltit içeriği ilişkisi	249
Şekil 7.111.	UDY numunelerin maksimum yükteki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi	250
Şekil 7.112.	UDY numunelerin maksimum yüke kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan - asfaltit içeriği ilişkisi	250
Şekil 7.113.	UDY numunelerin maksimum yükten yük boşalınca kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan - asfaltit içeriği ilişkisi	251
Şekil 7.114.	UDY numunelerin yükün boşaldığı andaki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi	252
Şekil 7.115.	UDY numunelerin yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan – asfaltit içeriği ilişkisi	252
Şekil 7.116.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin J_c değerleri	253

Şekil 7.117. Maksimum yük yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi	255
Şekil 7.118. Maksimum yükteki deformasyon yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi	256
Şekil 7.119. Maksimum yüke kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi	256
Şekil 7.120. Maksimum yükten sonra yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi	257
Şekil 7.121. Yük boşaldığı andaki deformasyon yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi	258
Şekil 7.122. Toplam alan yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi ...	259
Şekil 7.123. Kritik gerinim açığa çıkma hızı yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	259
Şekil 7.124. KDY ve 1 cm çentik içeren numunelerin farklı sürelerdeki çatlak görüntüleri	261
Şekil 7.125. UDY ve 1 cm çentik içeren numunelerin farklı sürelerdeki çatlak Görüntüleri	261
Şekil 7.126. 1 cm. çentik yüksekliğine sahip KDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi	262
Şekil 7.127. 2 cm. çentik yüksekliğine sahip KDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi	262
Şekil 7.128. 3 cm. çentik yüksekliğine sahip KDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi	263
Şekil 7.129. 4. dakika sonundaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	264
Şekil 7.130. Yük boşaldığı andaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	265
Şekil 7.131. 1 cm. çentik yüksekliğine sahip UDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi	266
Şekil 7.132. 2 cm. çentik yüksekliğine sahip UDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi	267
Şekil 7.133. 3 cm. çentik yüksekliğine sahip UDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi	267
Şekil 7.134. UDY numunelerin 4. dakika sonundaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	268
Şekil 7.135. Yük boşaldığı andaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	269
Şekil 7.136. YI_{CA} değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	270
Şekil 7.137. $r_p - J_c$ ilişkisi	271
Şekil 7.138. $r_f - J_c$ ilişkisi	271
Şekil 7.139. $r_p - K_{ic}$ ilişkisi	272
Şekil 7.140. $r_f - K_{ic}$ ilişkisi	272

TABLOLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Türkiye'deki asfaltitlerin kimyasal özellikleri	12
Tablo 3.1. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	17
Tablo 3.2. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladıkları faydalar	16
Tablo 4.1. Karışım tasarım seviyeleri için önerilen tasarım trafik değerleri	23
Tablo 4.2. Superpave bağlayıcı performans seviyeleri	26
Tablo 4.3. Bağlayıcıya uygulanan Superpave bağlayıcı deneyleri ve amaçları	27
Tablo 4.4. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi	28
Tablo 4.4. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi (Devamı)	29
Tablo 4.5. Taşıt hızlarına ve trafik hacmine göre bağlayıcı performans seviyesinin düzeltilmesi	27
Tablo 4.6. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları	31
Tablo 4.7. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri ...	36
Tablo 4.8. Superpave karışım gradasyonları	41
Tablo 4.9. Superpave karışım gradasyon limitleri	42
Tablo 4.10. Taşıt sayısına göre sıkıştırma parametreleri	46
Tablo 4.11. Superpave VMA gereksinimleri	48
Tablo 4.12. Superpave VFA gereksinimleri	48
Tablo 4.13. Superpave hacimsel karışım tasarım kriterleri	52
Tablo 5.1. Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmasına neden olan faktörler	53
Tablo 6.1. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması ...	65
Tablo 7.1. Elazığ'ın 24 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri	89
Tablo 7.2. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları	88
Tablo 7.3. Farklı yöntemlere göre hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları	91
Tablo 7.4. Bitümlü bağlayıcı deney sonuçları	93
Tablo 7.5. Dönel viskozite deney sonuçları	94
Tablo 7.6. Orijinal ve RTFOT yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları	95
Tablo 7.7. PAV yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları	95
Tablo 7.8. PAV yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcıların BBR deney sonuçları	96
Tablo 7.9. PG 64-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi	97
Tablo 7.10. Kalker agregasının fiziksel özellikleri	98
Tablo 7.11. Başlangıç deneme karışımları	98
Tablo 7.12. Deneme karışımlarının özgül ağırlıkları	101
Tablo 7.13. Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları	105
Tablo 7.14. Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları	105
Tablo 7.15. Karışım-1 numunelerinin %5,207 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	106
Tablo 7.16. Karışım-2 numunelerinin %5,109 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	108
Tablo 7.17. Karışım-3 numunelerinin %5,305 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	109
Tablo 7.18. Deneme karışımlarının Nini ve Ndes'deki %Gmm değerleri	109
Tablo 7.19. Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti	110

Tablo 7.20.	Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri	112
Tablo 7.21.	Farklı asfalt içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri	113
Tablo 7.22.	Karışım numunelerinin %4,77 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	113
Tablo 7.23.	Karışım numunelerinin %5,27 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	114
Tablo 7.24.	Karışım numunelerinin %5,77 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	114
Tablo 7.25.	Karışım numunelerinin %6,27 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	114
Tablo 7.26.	Karışım numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri	115
Tablo 7.27.	Karışımların %5,27 tasarım asfalt bağlayıcı içeriğindeki özellikleri	117
Tablo 7.28.	Kontrol karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri	117
Tablo 7.29.	Numunelerin Nmaks.'da %5,27 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	117
Tablo 7.30.	Karışım numunelerinin Nmaks.'da %5,27 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri	118
Tablo 7.31.	Asfaltit içeren ve saf karışımların hacimsel tasarım sonuçları ve şartname limitleri	120
Tablo 7.32.	Marshall deneylerinde kullanılan karışım numunelerinin isimlendirilmesi	121
Tablo 7.33.	Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış numunelerin (K) Marshall deney sonuçları.....	122
Tablo 7.34.	Kısa dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin (KŞ) Marshall deney sonuçları	123
Tablo 7.35.	Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış numunelerin (YK) Marshall deney sonuçları	128
Tablo 7.36.	Uzun dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin (YKŞ) Marshall deney sonuçları	129
Tablo 7.37.	Çekme dayanımı oranı deneyinde kullanılan karışım numunelerinin isimlendirilmesi	137
Tablo 7.38.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	139
Tablo 7.39.	Kısa dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	140
Tablo 7.40.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	143
Tablo 7.41.	Uzun dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	144
Tablo 7.42.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları	150
Tablo 7.42.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı)	151
Tablo 7.43.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları	154
Tablo 7.43.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı)	155

Tablo 7.44.	Yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi	158
Tablo 7.45.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları	161
Tablo 7.45.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)	162
Tablo 7.46.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları	163
Tablo 7.46.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)	164
Tablo 7.47.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları	165
Tablo 7.47.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)	166
Tablo 7.48.	Yorulma deneyinden elde edilen değerler	177
Tablo 7.49.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları	179
Tablo 7.49.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)	180
Tablo 7.50.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları	181
Tablo 7.50.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)	182
Tablo 7.51.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları	183
Tablo 7.51.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)	184
Tablo 7.52.	UDY numunelerin yorulma deneylerinden elde edilen değerler	194
Tablo 7.53.	Yorulma deneylerinden elde edilen yaşlanma indeksleri	196
Tablo 7.54.	Karışımların 25 °C'deki ITSM değerleri	198
Tablo 7.55.	UDY karışımların 25 °C'deki ITSM değerleri	199
Tablo 7.56.	KSY numunelerin dinamik sünme deney sonuçları	202
Tablo 7.57.	KSY numunelerin akma sayısı sonuçları	203
Tablo 7.58.	UDY numunelerin dinamik sünme deney sonuçları	212
Tablo 7.59.	UDY numunelerin akma sayısı sonuçları	213
Tablo 7.60.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları	229
Tablo 7.61.	Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları	230
Tablo 7.62.	Kısa dönem yaşlandırılmış 1 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin J-integral deney sonuçları	237
Tablo 7.63.	Kısa dönem yaşlandırılmış 2 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin J-integral deney sonuçları	238
Tablo 7.64.	Kısa dönem yaşlandırılmış 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin J-integral deney sonuçları	239
Tablo 7.65.	Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin J_c değerleri	244
Tablo 7.66.	Uzun dönem yaşlandırılmış 1 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin J-integral deney sonuçları	246

Tablo 7.67. Uzun dönem yaşlandırılmış 2 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin J-integral deney sonuçları	247
Tablo 7.68. Uzun dönem yaşlandırılmış 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin J-integral deney sonuçları	248
Tablo 7.69. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin J_c değerleri	253
Tablo 7.70. Karışımların farklı zamanlardaki çatlak alanları	264
Tablo 7.71. UDY Karışımların farklı zamanlardaki çatlak alanları	268
Tablo 7.72. r_p ve r_f ile J_c arasındaki bağıntılar	273
Tablo 7.73. r_p ve r_f ile K_{Ic} arasındaki bağıntılar	273
Tablo. 7.74. Deney sonuçları	274
Tablo. 7.74. Deney sonuçları (Devamı)	275
Tablo 8.1. Stabilitate modelinin özeti	279
Tablo 8.2. Akma modelinin özeti	279
Tablo 8.3. MQ modelinin özeti	280
Tablo 8.4. RMS modelinin özeti	280
Tablo 8.5. TS modelinin özeti	281
Tablo 8.6. TSR modelinin özeti	281
Tablo 8.7. Değişkenler arasındaki korelasyonlar	282
Tablo 8.8. Modelin özeti	283
Tablo 8.9. N_i , N_f , N_p , N_{mak} değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar	284
Tablo 8.10. N_i , N_f , N_p , N_{mak} modellerinin özeti	284
Tablo 8.11. δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar	285
Tablo 8.12. δ_i , δ_f ve δ_{mak} modellerinin özeti	286
Tablo 8.13. r_p ve r_f değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar	286
Tablo 8.14. r_p ve r_f modellerinin özeti	287
Tablo 8.15. Dinamik sünme deney sonuçlarına ait modellerin özeti	288
Tablo 8.16. Kırılma tokluğu deney sonuçlarına ait modellerin özeti	289
Tablo 8.17. Maksimum yük değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar	290
Tablo 8.18. Maksimum yük modellerinin özeti	290
Tablo 8.19. δ_{mak} ve δ_{son} değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar	291
Tablo 8.20. δ_{mak} ve δ_{son} modellerinin özeti	292
Tablo 8.21. Alan ₁ , Alan ₂ ve Alan ₃ değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar	293
Tablo 8.22. Alan ₁ , Alan ₂ ve Alan ₃ modellerinin özeti	293
Tablo 8.23. J_c modellerinin özeti	294

SEMBOLLER LİSTESİ

σ	: Standart sapma
n	: Örnekteki toplam gözlem sayısı
x_{ort}	: Örnekteki toplam gözlem sayısının aritmetik ortalaması
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
M_1	: RTFO deneyinde yaşlanmadan önceki ağırlık
M_2	: RTFO deneyinde yaşlanmadan sonraki ağırlık
ε_t	: Direkt çekme deneyinde uzama miktarı
G^*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
P_1, P_2, P_N	: Her bir agrega grubunun ağırlıkça yüzdesi
G_1, G_2, G_N	: Her bir agrega grubunun hacim ve zahiri özgül ağırlığı
V_{ba}	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
P_b	: Bağlayıcı yüzdesi
P_s	: Agrega yüzdesi
G_b	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
V_a	: Hava boşluğu hacmi
V_{be}	: Efektif bağlayıcı hacmi
S_n	: Agrega karışımındaki nominal maksimum elek boyutu
P_{bi}	: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi
W_s	: Agreganın ağırlığı
W_b	: Toplam agrega ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı
G_{mm}	: Asfalt karışımın maksimum özgül ağırlığı
G_{mb}	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
$P_{0,075}$	: Karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agrega karışımındaki ağırlıkça yüzdesi
G_b	: Asfaltın özgül ağırlığı
G_{se}	: Agrega karışımın efektif özgül ağırlığı
VMA	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
VFA	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
W_m	: Numunenin ağırlığı
γ_{su}	: Suyun yoğunluğu
V_{mx}	: Numunenin hesapla bulunan hacmi
d	: Kalıbın çapı
h_x	: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği
C	: Düzeltme faktörü
$G_{mb}(\text{ölçülen})$	: Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı
$G_{mb}(\text{tahmini})$	: Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı
$G_{mb}(\text{düz.})$	: Herhangi bir yoğunurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı
DP	: Filler oranı
h	: Numune yüksekliği
J	: Absorbe su hacmi

B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı
B	: Vakum işleminden önce numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı
S'	: Doygunluk 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
S_m	: 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
k₁ ve k₂	: Malzeme karakteristikleri
r_p	: Çatlak ilerleme oranı
N_p	: Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı
δf	: Bozulma anında toplam deformasyon
δi	: Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu
ε_c	: Toplam plastik eksenel birim şekil değiştirme
ε_r	: Toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme
E_c	: Sünme modülü
E_r	: Rezilyans modülü
G	: Numunenin başlangıç yüksekliği
L1	: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı
L2n	: n darbe sayısındaki maksimum deplasman
L3n	: (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman
A	: Numunenin kesit alanı
K_{IC}	: Kritik gerilme şiddet çarpanı
τ	: Kayma gerilmesi
a	: Yarı çatlak uzunluğu
ΔW	: Maksimum düşey deformasyon
ε_{mak}	: Maksimum birim şekil değiştirme
J_c	: Kritik gerinim açığa çıkma hızı
U	: Maksimum yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan
b	: Yarım daire eğilme deneylerinde numune kalınlığı
P₂₅	: Bitümün 25 ⁰ C'deki penetrasyon değeri
T_{YN}	: Yumuşama noktası
K	: Kısa dönem yaşlandırılmış numune
KŞ	: Kısa dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numune
YK	: Uzun dönem yaşlandırılmış numune
YKŞ	: Uzun dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numune
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
R²	: Belirtme katsayısı

KISALTMALAR

BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basıncılı Yaşlandırma Aleti)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
DDT	: Direct Tensile Tester (Doğrudan Çekme Deneyi)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
ETDY	: Eşdeğer standart tek dingil yükü
TSR	: Çekme Dayanımı Oranı
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
UMATTA	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)
İÇYD	: İndirekt Çekme Rijitlik Modülü
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği
EPKM	: Elastik-Plastik Kırılma Mekanikliği
SCB	: Semi-Circular Bending (Yarım Daire Eğilme)
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
PI	: Penetrasyon İndeksi
SGC	: Superpave Gyrotory Compactor (Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcı)
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
ITSM_{KDY}	: Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin ITSM Deney Sonuçları
ITSM_{UDY}	: Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin ITSM Deney Sonuçları
YI_{ITSM}	: ITSM Sonuçlarının Yaşlanma İndeksi
UDY	: Uzun Dönem Yaşlandırılmış

1. GİRİŞ

Canlıların veya eşyaların bir yerden başka bir yere nakledilmesine ulaştırma denilmektedir. Bir ülkenin kalkınmasında ve ilerlemesinde önemli bir yere sahip olan ulaştırma sistemleri karayolu, demiryolu, havayolu, deniz ulaşımı ve boru hatları olmak üzere beş dala ayrılmaktadır. Karayolu taşımacılığı, Ülkemizde yük ve yolcu taşımada en çok kullanılan ulaşım türüdür. Yük ve yolcu taşımalarının yaklaşık %95'inin karayolu ile yapıldığı Ülkemizde, 2011 Karayolları Genel Müdürlüğü verilerine göre 64.865 km karayolu ağı bulunmaktadır (URL-1, 2011). Karayolu ağının %94,4'ü (61.206 km) bağlayıcı olarak bitümlü malzemelerin kullanıldığı esnek üstyapı şeklinde tasarlanıp uygulanmıştır. Karayolu üstyapılarında bağlayıcı olarak bitüm kullanılması, 1835 yılında Fransa'da Seyssel doğal asfaltları ile başlamıştır (Uluçaylı, 1975).

Esnek üstyapılar; alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Taşıt lastikleri ile temas eden ve üstyapının en pahalı kısmı olan kaplama tabakaları; sathi kaplamadan bitümlü sıcak karışıma (BSK) kadar değişik yöntemlerle yapılabilmektedir. Sathi kaplamalar bir veya birden fazla tabaka halinde uygulanabilmekte olup uygun temel üzerine uygulanan bitüm daha sonra da agreganın serilip sıkıştırılması şeklinde yapılmaktadır. Bitümlü sıcak karışım ise en pahalı ve en dayanıklı kaplama türüdür. BSK'lar sabit bir tesiste agrega ve bitümüm ısıtılması ve karıştırılması, daha sonra uygulama yerine taşınarak belirli bir sıcaklıkta sıkıştırılması şeklinde uygulanmaktadır. BSK'larda kohezyon, bitümlü bağlayıcı tarafından karşılanırken agrega ise karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcı ayrıca agrega tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini arttırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. Ülkemizde otoyollar, devlet ve il yollarında toplam 12.277 km BSK kaplamalı yol bulunurken, il ve devlet yollarında toplam 48.929 km sathi kaplamalı yol bulunmaktadır (URL-1, 2011). Son yıllarda sathi kaplamalı yolların standardını yükseltmek amacıyla BSK yapımı ön plana çıkmaktadır.

Kaplama yapısının proje ömrü boyunca hizmet verebilmesi, kaplama tabakalarını laboratuarda uygun şekilde tasarlamak ile mümkündür. Uygulama bölgesi iklim ve coğrafi şartları dikkate alınarak bağlayıcı ve kaplama tasarımı yapmak, böylece kaplamanın

rehabilitasyon ve yeniden yapım ihtiyaçlarını geciktirmek amacıyla Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, standart bağlayıcı deneylerinin yerine bağlayıcı performans deneyleri kullanılmaktadır. Ayrıca bitümlü sıcak karışımların arazideki sıkıştırılmasını laboratuvar ortamına yansıtmak amacıyla yoğurmalı pres kullanılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcılarda sıcaklık ve çevresel etkiler sonucu yaşlanma meydana gelmektedir. Yaşlanma, bitümlü bağlayıcının dolayısıyla BSK'nın sertliğinin artmasına neden olmaktadır. Superpave yönteminde, plentte hazırlama ve araziye taşınma süresince karışımda meydana gelen kısa dönem yaşlanma tasarım sırasında numunelere uygulanmaktadır. Kısa dönem yaşlanmanın yanı sıra servis ömrü süresince BSK kaplamalarda uzun dönem yaşlanma da meydana gelmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen yaşlanma, BSK'ların arazideki davranışını doğrudan etkilediğinden üzerinde önemle durulması gereken bir konudur.

Esnek styapıların performansını arttırmak amacıyla BSK'larda katkı maddeleri kullanılmaktadır. BSK'larda bağlayıcı görevi gören bitüm gibi katkı maddeleri de genellikle yurtdışından ithal edildiğinden bu durum milli kaynakların yurtdışına çıkışına neden olmaktadır. BSK'larda kullanılan katılardan biri de doğal asfaltlardır. Yapılan çeşitli çalışmalarda doğal asfaltların bitümlü sıcak karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanıldığında olumlu sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Doğal asfaltlar metamorfoz (başkalaşım) derecelerine göre sınıflandırılmaktadır. Metamorfoz derecesi arttığa bitümün yapısı değişmekte akıcı halden katı hale dönüşmektedir. Dünyada metamorfozun ilk aşamalarını gl asfaltları temsil ederken en son derecesini ise pirobitümler oluşturmaktadır. Ülkemizin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan asfaltik madde kaynakları sınıflandırmada asfaltit ile pirobitüm arasında yer almasına rağmen bu malzemeler asfaltit olarak isimlendirilmektedir. Ülkemizde yaklaşık 82 milyon ton asfaltit rezervi bulunmaktadır. Bu rezervin 44,5 milyon tonu görünür niteliktedir. Ekonomik kalınlıkta filon tipi asfaltit yatakları şırnak ve Silopi'de bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında doğal asfaltların BSK'ların performansı üzerindeki olumlu etkileri göz önünde bulundurularak yerli kaynak olan Silopi asfaltiti BSK'larda katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Böylece ithal katkı maddelerine alternatif olarak yerli doğal bir malzemenin kullanılabilirliği belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca asfaltitin farklı bir sektörde kullanılabilirliğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasında alınan olumlu sonuçlar

ışığında bu katkı malzemesinin kullanılmasının bölge ekonomisine fayda sağlayacağı düşünölmektedir.

Silopi asfaltiti, karıştırma sıcaklığında dahi katı halde olan bir malzeme olduğundan çalışmada filler olarak kullanılmıştır. Karışım tasarımı Superpave şartnamesine göre yapılmış, optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numuneler kısa ve uzun dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Numunelere uygulanan çeşitli BSK performans deneyleri ile asfaltitin kullanılabilirliğinin yanı sıra arazide uygulanması durumunda servis süresince performans değişimi incelenmiştir.

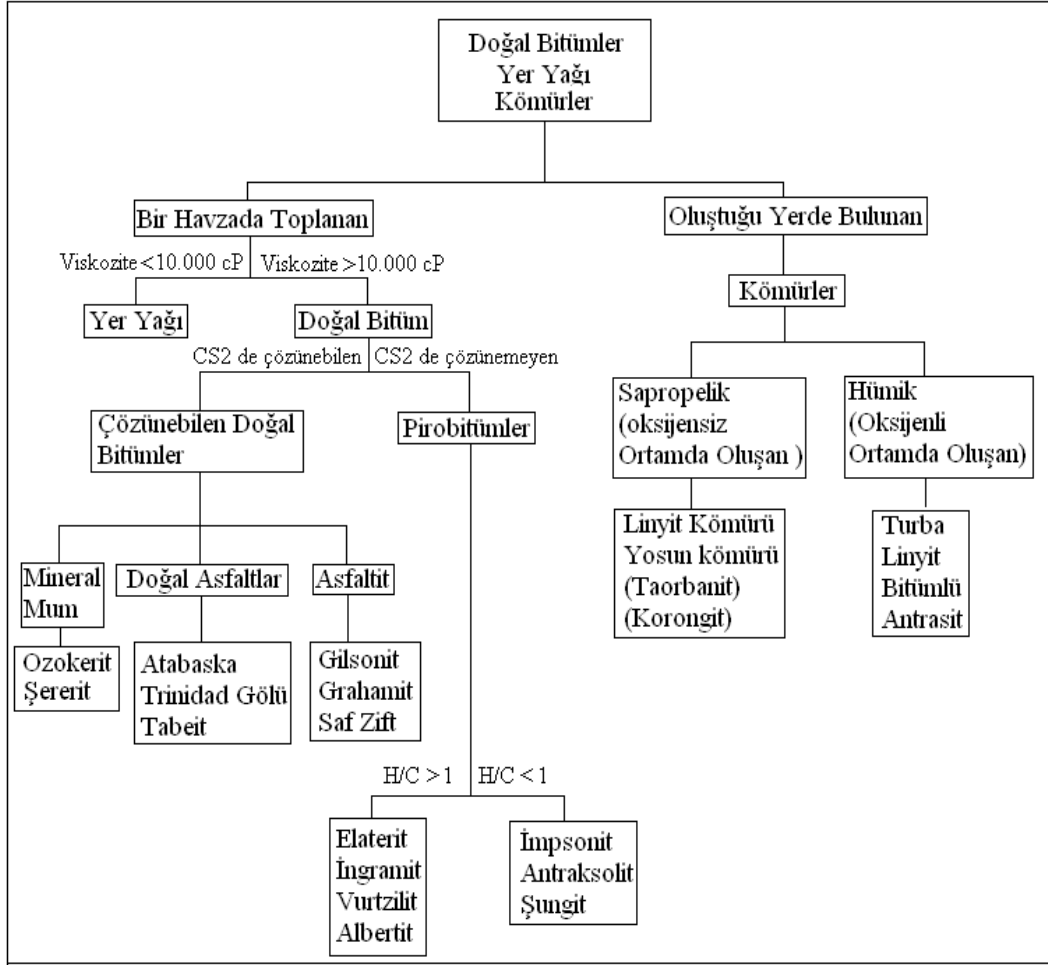
2. DOĞAL ASFALTİK MADDELERİN ÖZELLİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

Bitüm ve türevi malzemeler Orta Doğu'da tarih öncesi dönemlerde dahi kullanılmış olan malzemelerdir. Arkeolojik bölgelerde yapılan çalışmalar sonucu M.Ö. 4000 tarihlerinde bitümün çatı ve sandallarda yalıtım amacıyla kullanıldığı belirlenmiştir. M.Ö. 3200 ve M.Ö. 2500 tarihleri arasında bitümlü malzemeler; harç, kaplama, yalıtım, su kanalları ve eklenti yerlerinde kullanılmıştır (Abraham, 1960; Forbes, 1964; Bilkady, 1984). Bitümün kaynağı petrol sızıntıları ya da doğal asfalt depolarıdır.

Türkiye'nin birçok yerinde doğal asfalt kaynakları bulunmaktadır. Asfaltik madde bulunan bölgelerle ilgili detaylı çalışmalar cumhuriyetin ilk yıllarında (1925–1945) yapılmıştır. Buna rağmen Osmanlı İmparatorluğu'nun son dönemlerinde Mardin Harbol asfaltit yatakları bilinmekte olup bol karbon içeren yüksek kalorili Harbol asfaltitlerinin Dicle üzerinde Musul-Bağdat arasında işleyen vapurlarda kömür olarak kullanıldığı bilinmektedir (Uluçaylı, 1975).

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 ağırı), 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 and Witt, 1990).

Bu kompleks karışımlar fiziki olarak karbon disülfür (CS₂) benzeri organik solventlerde çözünebilirliklerine erime veya yumuşama noktalarına göre ayrılmaktadır. Doğal bitüm, yer yağı ve kömürlerin genel bir sınıflandırılması Şekil 2.1'de verilmiştir (Sah, 2007).



Şekil 2.1. Doğal bitümler, yer yağı ve kömürlerin sınıflandırılması (Sah, 2007).

Bu sınıflandırmada yer alan;

Ozokerit: Koyu sarı, kahverengi veya siyah renkte olan, yumuşama noktası 55-110°C arasında olan, özgül ağırlığı 0,85-0,95 aralığında olan mineral bir parafin mumudur. Gazolin, benzin ve neftyağında çözünen ozokerit Hazar Denizi etrafında ve kumtaşı içerisinde Utah bölgesinde bulunmaktadır (URL-2, 2011).

Şerit: Beyazımsı gri, sarı, yeşil veya açık kırmızı renkte bulunan, kırılgan, tatsız, kokusuz, 44°C’de eriyen, alkol ve eterde eriyebilen, bozulma olmadan ayrıştırılabilen, 92°C’de kaynayan bir hidrokarbondur (URL-2, 2011).

Atabaska katranlı kumu: Adından da anlaşılacağı üzere petrol ve kumdan oluşmaktadır. Katranlı kumlar dünyadaki petrolün 2/3'ünü oluştururken bu katranlı kumun %88'i Kanada da bulunmaktadır. Atabaska katranlı kumu; %83 silika kum, %10'u bitüm, %4 su ve %3 kilden oluşmaktadır. Atabaska katranlı kumundan 1 varil petrol elde edilebilmesi için yaklaşık 2 ton katranlı kumun işlenmesi gerekmektedir. Atabaska katranlı kumu ile ilgili resimler Şekil 2.2'de verilmiştir. Atabaska katranlı kumuna benzer bir malzeme Suriye'nin El-Beşri bölgesinde ve Endonezya'nın Buton adasında bulunmaktadır (Katz, 2011).



Şekil 2.2. Atabaska katranlı kumu (Katz, 2011).

Trinidad Göl Asfaltı: Kanada katranlı kumu gibi içerisinde kum içeren bir malzemedir. Bu malzeme Trinidad ve Tobago'da bulunmakta olup göl çevresinden elde edilen bu malzemede %54 oranında bitüm bulunmaktadır. Trinidad göl asfaltı içerisinde bulunan agrega çok incedir. Trinidad göl asfaltında bulunan bitümün yumuşama noktası 68-78°C arasında olup bitümün adezyon özelliği çok yüksektir (Widyatmoko ve Elliott, 2008). Trinidad göl asfaltıyla ilgili resim Şekil 2.3'te verilmiştir (URL-3, 2011).

Tabeit: Amerika'da bulunan Tabby Kanyonu'nda bulunan yataktan elde edilen katı asfaltın bir marka ismidir. Trinidad göl asfaltına göre daha yumuşak olan bu asfalt yüksek oranda karbon disülfürde çözünebilmektedir. Tabeit'te Trinidad göl asfaltına göre daha az mineral agrega bulunmaktadır (Chilingarian ve Yen, 1978).



Şekil 2.3. Trinidad göl asfaltı (URL-3, 2011).

Gilsonit: Oldukça parlak, siyah renkli, çentikli bir kırılma yüzeyine sahip, çizgisi kahverengi olan bir bitümlü maddedir. Sertliği 2'dir. Özgül ağırlığı 1,03 ilâ 1,10 arasında değişmektedir. % 10–20 sabit C, % 0 - 2 O₂ ve eser halde mineral madde içerir. 120° ile 175°C arasında erir. Karbon sülfürde çözünürlük derecesi % 98 -100 dür. 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). Benzer maddeler İran'da da bulunmakta olup İran'dan ülkemize asfaltit ithalatı olmaktadır.

Grahamit: Oldukça parlak siyah renkli olan grahamitin tozu açık kahverengi olup sertliği 2 den 3'e kadar gidebilir. Özgül ağırlığı içindeki mineral maddelerin miktarına göre 1,15 ile 1,20 arasında değişmektedir. Kimyasal olarak % 35–55 sabit C, % 0–2 O₂, % 1–50 mineral madde içerir. Erime derecesi 175 ile 315°C arasındadır. Karbon sülfürdeki çözünürlük derecesi % 45–100 arasında değişmektedir. Grahamit dünyada Ritchie (Batı Virjinya, A.B.D.), Pushmataha (Oklahoma, A.B.D.), Impson, Atoka-ve Loko, Talaxca (Vera Kruz, Meksika), Bah'ra Honda (Küba), San Fernando (Trinidat), Mendoza (Arjantin) zuhurları ile tanınmaktadır (Nakoman, 1977).

Saf Zift (Glance pitch): Donuk siyah renkli, çentikli bir kırılma yüzeyi gösteren, çizgisi kahverengi bir bitümlü madde olan saf ziftin sertliği 2, özgül ağırlığı ise 1,10 -1,15 arasında olup kimyasal bileşimi % 20–35 C, % 0–2 H, % 1–5 mineral maddeden oluşmaktadır. 120 ile 175°C arasında erir. Karbon sülfürde çözünürlük derecesi % 95–100'dür. Dünya'da bilinen saf zift zuhurlarını şöyle sıralamak mümkündür: Barbados adası (Batı Hint adaları), Taleran (Küba), Chapapote ve Papantla (Vera Cruz, Meksika), Emery

(Utah, A.B.D.), Neuquen (Arjantin), Tournai (Kolombiya), Bentheim (Batı Almanya), Port Kunda (Estonya), Hasbaya (Suriye), Abu Gir (Irak), Ufa (Rusya) (Nakoman, 1977).

Elaterit: İri yapılı, şekilsiz, koyu kahverengi olan, yumuşak ve elastikten, sert ve kırılgan özelliğe kadar geniş bir aralıkta reolojik davranış gösteren, mum alevinde bozunmaya uğramadan eriyebilen aynı zamanda liverit olarak isimlendirilen metamorfik bir hidrokarbon yapısıdır (URL-2, 2011).

Ingramit: Pirobitüm çeşidi olan ingramit ile ilgili en önemli yatak Utah'ta bulunmaktadır (Bell ve Hunt, 1963).

Vurtzilit: Parlak siyah renkli bir bitümlü maddedir. Tozu açık kahverengidir. Sertliği 2–3, özgül ağırlığı ise 1,05–1,07 arasında değişir. Kimyasal bileşimi % 5–25 sabit C, % 0–2 O₂ ve % 1–10 mineral madde olarak saptanmıştır. Vurtzilit ısıtılınca erimez. Karbon sülfürdeki çözünürlük derecesi % 5-10'dur (Nakoman, 1977).

Albertit: Bu bitümlü maddenin rengi kahverengiden siyaha kadar değişebilmektedir. Kırılma yüzeyi zaman zaman çentikli olabilir. Parlak veya donuk bir dış görünüşü vardır. Tozu kahverengi-siyahtır. Sertliği 2, özgül ağırlığı 1,07–1,10 arasındadır. % 25–50 sabit C, % 0–3 O₂ ve % 1–10 mineral madde içerir. Isıtılınca erimez. Karbon sülfürde çözünürlük derecesi % 2–10'dur (Nakoman, 1977).

İmpsonit: Siyah renklidir. Donuk bir dış görünüşü vardır. Tozu siyah, kırılma yüzeyi ise çentiklidir. Sertliği 2 ile 3 arasında değişmekle birlikte özgül ağırlığı 1,10'den 1,25'e kadar yükselebilir. Kimyasal bileşimi %50–85 sabit C, %0–3 O₂ ve %1–10 mineral maddedir. Karbon sülfürdeki çözünürlük derecesi son derece az olup en fazla % 6'ya ulaşabilmektedir (Nakoman, 1977).

Antraksolit: Kanada'nın Sudbury bölgesindeki damardan elde edilen asfaltik malzemedir (URL-2, 2011).

Şungit: Sert, siyah, düzensiz, içerisinde %98'den fazla karbon içeren pirobitüm çeşididir (URL-2, 2011).

2.1. Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Bulunan Asfaltik Maddelerin Özellikleri

Güneydoğu Anadolu'daki asfaltik maddeler bulundukları yere, jeolojik formasyona ve metamorfoz derecesine bağlı olarak birbirinden çok farklı karakter göstermektedirler. Asfaltik maddelerin petrolün metamorfoz denilen değişikliğe uğramasıyla oluştuğu bilinmektedir (Alp, 1997). Bu değişimde zaman, ısı, basınç gibi etkilerin rolü olmuştur. Metamorfozun ilerleme derecesine bağlı olarak petrolden değişik karakterde asfaltik madde cinsleri oluşmaktadır. Petrol, önce yumuşak doğal asfaltlara, sert asfaltlara, sonra asfaltitlere ve en son asfaltik pirobitümlere kadar metamorfoz derecesine bağlı olarak değişmektedir. Asfaltik pirobitümler metamorfozun en son kademesini temsil etmektedirler.

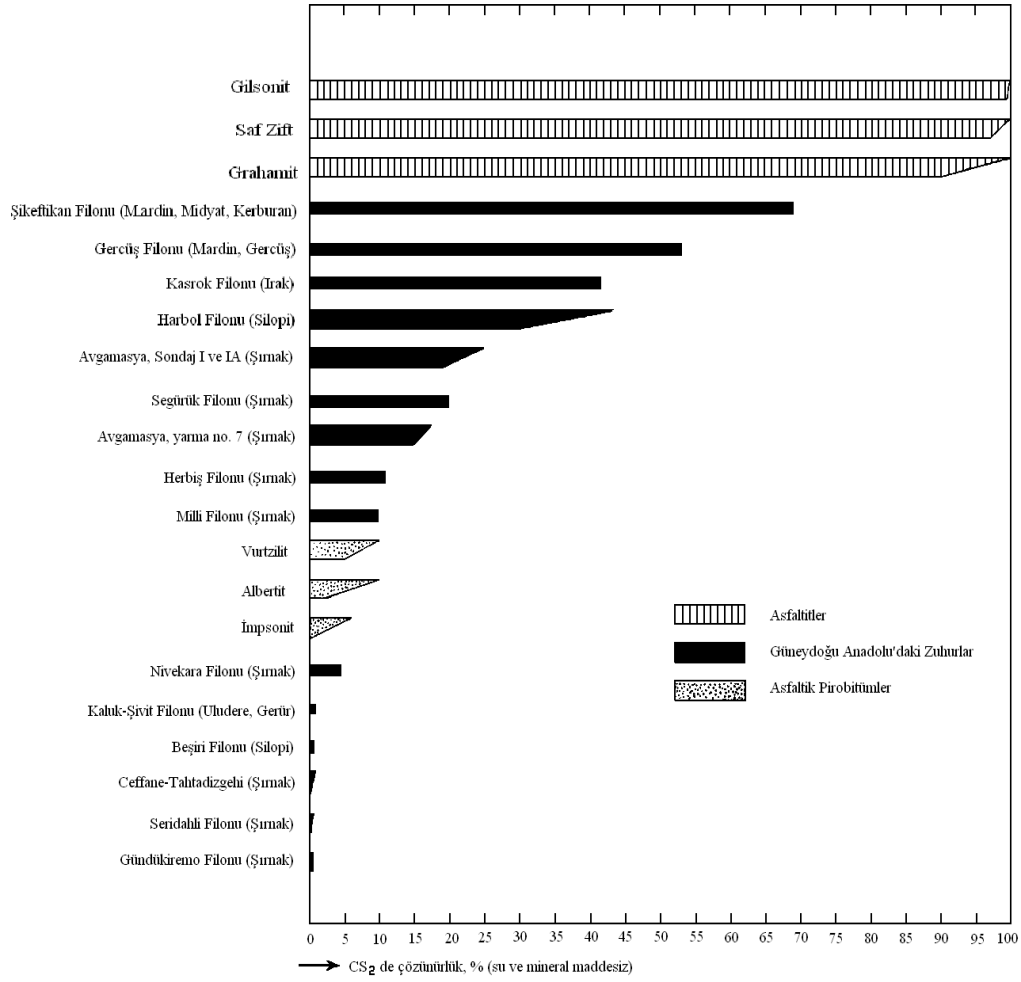
Tabii asfaltlar, koyu renkli, değişik sertlikte, nispeten uçucu olmayan, esas itibariyle hidrokarbonlardan müteşekkil, oksijenli bileşikleri ve kristalleşen parafinleri ihtiva etmeyen veya çok az ihtiva eden, ısıtılınca eriyebilen, karbon sülfürde büyük oranda çözünen ve suda çözünmeyen maddelerdir. Asfaltitler, koyu renkli, nispeten sert ve uçucu olmayan katı maddelerdir. Esas itibariyle hidrokarbonlardan müteşekkil olup, oksijenli bileşikleri ve kristalleşen parafinleri ihtiva etmezler veya çok az ihtiva ederler. Isıtılınca güç erirler, erime noktaları yüksektir (yaklaşık 120-315°C), karbon sülfürde çözünürler, sulfonasyon mahsulleri suda çözünmez. Asfaltik pirobitümler ise koyu renkli, nispeten sert, uçucu olmayan katı maddelerdir. Esas itibariyle hidrokarbonlardan müteşekkil olup, oksijenli bileşikleri ihtiva etmezler veya çok az ihtiva ederler, ısıtılınca erimezler ve karbon sülfürde çözünmezler (Orhun, 1969; TMMOB, 1976).

Dünyadaki asfaltik madde cinsleri incelendiğinde asfaltitler yüksek erime noktasıyla karakterize edilirler (takriben 120–315°C), tabii asfaltlar ise takriben 15–160°C arasında yumuşarlar. Mohs cetveli sertliği tabii asfaltlar için 1 veya daha aşağı olduğu halde, asfaltitlerde 2-3 arasında değişmektedir. Tabii asfaltların penetrasyonu 0–350 arasında değişir, bu değer asfaltitler için takriben 0–5 civarındadır.

Asfaltitlerle asfaltik pirobitümlerin en önemli ayırıcı karakteristikleri ısı etkisi ile eriyebilme ve karbon sülfürde çözünebilme özeliğidir. Asfaltitler ısı etkisi ile eriyebilirler ve karbon sülfürde çözünebilirler (gilsonit % 99-100, saf zift % 97-100 ve grahamit %90-100). Metamorfozun son kademesini temsil eden asfaltik pirobitümler ise, ısıtılınca erimezler ve karbon sülfürde çok az çözünürler (vurtzilit % 5-10, albertit % 2-10, impsonit eser ile %6). Bundan dolayı, asfaltitten asfaltik pirobitüme tedricî geçiş kademelerindeki

asfaltik maddeler için, karbon sülfürdeki çözünürlüğün metamorfoz derecesiyle ilgili olduğu neticesine varılmıştır. Türkiye'deki asfaltik maddelerin CS₂'deki çözünürlük oranları Şekil 2.4'te verilmiştir (Orhun, 1969).

Asfaltik pirobitümlerle asfaltik olmayan pirobitümleri (turb, linyit, taşkömürü vb.) birbirinden ayırmak için en güvenilir yöntem içerdikleri oksijen miktarlarıdır. Orijini petrol olan tabii asfalt, asfaltit ve asfaltik pirobitüm gibi bitümlü maddeler çok az miktarlarda oksijenli bileşikler (takriben % 3 e kadar oksijen) ihtiva ettikleri halde, asfaltik olmayan pirobitümler (turb, linyit, taşkömürü vb.) kömürleşmenin ilerleme derecesine göre değişen daha yüksek miktarlarda (takriben % 3-44) oksijen ihtiva ederler. Oksijen miktarı genel olarak önemli miktarda mineral madde ihtiva eden malzemelerin kül teşkil eden bileşiklerinin yanma esnasında ağırlıkça değişmesiyle belirlenen farktan hesaplanır. Güneydoğu Anadolu'nun değişik bölgelerinden çıkarılan asfaltik maddelerde hesaplanan oksijen miktarı, su ve mineral maddesiz esasta % 0,1 ile % 3,0 arasında değişmektedir.



Şekil 2.4. Dünyadaki asfaltik madde cinsleriyle Güneydoğu Anadolu'daki filonların CS₂'de çözünürlük derecelerinin kıyaslanması (Orhun, 1969).

1964–1967 yılları arasında MTA isteğiyle R.F. Lebküchner ve ekibi tarafından Şırnak bölgesi etüt edilmiş ayrıca asfaltik madde bulunabileceği tahmin edilen 17200 km² lik bir alan araştırılmıştır (Lebküchner, 1969). Yapılan etüt ve sondajlarla yaklaşık 82 milyon ton asfaltit rezervi belirlenmiştir. Bu rezervin 44,5 milyon tonu görünür niteliktedir. Ekonomik kalınlıkta filon tipi asfaltit yatakları Şırnak ve Silopi'dedir. Asfaltitler; teshinde, boya, vernik, oto lastiği, elektrik yalıtımı, batarya koruyucuları, genişletilmiş kauçuk, zemin karoları, su geçirmez kabloların yapımında ve benzeri çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Şengüler, 2007). Güney Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan iki asfaltit sahasının önemli özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir (DPT, 2001).

Tablo 2.1. Türkiye'deki asfaltitlerin kimyasal özellikleri (DPT, 2001).

Sahalar	Nem (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Uçucu Madde (%)	Alt ısı değeri (kcal/kg)
Şırnak	6,0	31,0	4,5	39,0	5.330
Silopi	6,0	31,0	4,0	30,0	5.310

Şırnak asfaltit sahaları ve etüt bilgileri aşağıda verilmiştir (Şengüler, 2007).

Harbul Filonu: Filon ile ilgili çalışmalara 1940 yıllarında başlanmış ancak sondajlı çalışmalara 1976 yılında geçilmiştir. 1976–84 yılları arasında sık, dik ve eğik olmak üzere toplam derinliği 10387,30 m olan 46 adet sondaj yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda ortalama 300 m derinliğe kadar olan kesim için toplam 25.765.000 ton (görünür+muhtemel) rezerv hesaplanmıştır.

Silip Filonu: Harbul filonunun 1 km doğusunda yer alan filonda 1982–86 yılları arasında dik ve eğik olmak üzere toplam derinliği 5112,70 m olan 22 adet sondaj yapılmıştır. Diğer filonlardan farklı bir yataklanma şekli olan Silip filonunda toplam 4.406.314 ton (görünür +muhtemel) rezerv belirlenmiştir.

Üçkardeşler Filonu: Harbul filonunun 4 km batısında yer alan filonda 1980–84 yılları arasında sık, dik ve eğik olmak üzere toplam derinliği 10584,10 m olan 54 adet sondaj yapılmıştır. 1985–86 yıllarında yapılan 5 adet eğik sondaj ile filonda yapılan sondaj derinliği 11527,50 m ye ulaşmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda filonda toplam 20.352.000 ton (görünür+muhtemel) rezerv belirlenmiştir.

İspindoruk Filonu: Filonda 1972–74 yılları arasında 11 adet yarma ve 2 adet eğik sondaj yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda 100 m derinlik için toplam 1.100.000 ton (görünür+muhtemel+mümkün) rezerv belirlenmiştir.

Rutkekurat Filonu: Silopi'nin kuzeyinde Cudi dağında yer alan filonda sondajlı çalışma yapılmamıştır. Yapılan 7 adet yarma ile 800 m yayılım ve 50 m derinlik için 1.000.000 ton mümkün asfaltit rezervi belirlenmiştir.

Uludere Ortasu Filonu: Filondaki çalışmalar 1982 yılında prospeksiyon (maden araştırma işlemi) ile başlamıştır. 1984 yılında dik ve eğik olmak üzere 12 adet sondaj ve 12 adet yarma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda toplam 604.985 ton asfaltit rezervi belirlenmiştir.

Avgamasya Filonu: Asfaltit filonu üzerindeki çalışmalar, 1964–1983 yılları arasında kesikli olarak sürdürülmüştür. Bu yıllarda toplam 208 adet sondaj yapılmıştır. Sondajlı çalışmaların 137 adedi (1677,85 m) sığ sondaj olup; asfaltit ön aramaları, işletme vb. amaçlara yönelik olarak yapılmıştır. Diğer 71 adedi (dik, eğik, derin; 11060,95 m) arama ve rezerv amaçlı olarak yapılmıştır. Rezervi 8.154.000 tondur.

Segürük Filonu: Filona ait çalışmalar 1964–1965 yıllarında prospeksiyon ile başlamıştır. 1966–1967 yıllarında 1/2000 ölçekli harita alımı, yarma (10 adet), sığ sondaj (25 adet) (554,85 m), dik sondaj (3 adet) (285,5 m) ve eğimli sondaj (4 adet) (442,9 m) çalışmaları ile devam etmiştir. 1988 yılında TKİ Kurumu adına ücretli olarak 12 adet sondaj (1177,3 m) gerçekleştirilerek toplam sondaj sayısı 44' e ve toplam derinlik 2460,55 m ye ulaşmıştır. Rezervi 1.000.000 tondur.

Milli Filonu: Filon üzerindeki çalışmalara 1964 yılında başlanmış ve aralıklarla çalışmalar 1974 yılına kadar sürmüştür. Bu sürede filon üzerinde 23 yarma ve 10 adet eğik sondaj gerçekleştirilmiştir. Rezervi 6.500.000 tondur.

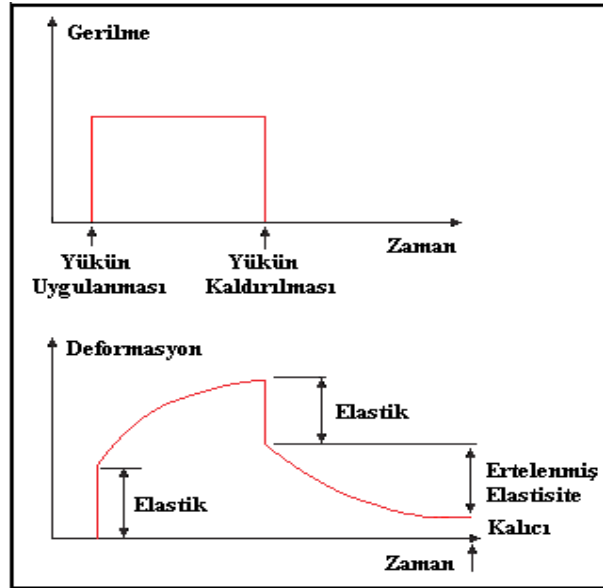
Karatepe Filonu: Filon üzerindeki çalışmalar 1972–74 yılları arasında aralıklı olarak yapılmıştır. 24 adet yarma ve toplam derinliği 307,3 m olan 4 adet eğik sondaj gerçekleştirilmiştir. Rezervi 5.000.000 tondur.

Nivekara Filonu: Çalışmalar 1972–74 yılları arasında yapılmıştır. Bu süre içerisinde 22 adet yarma ve toplam derinliği 529,6 m olan 6 adet eğik sondaj gerçekleştirilmiştir. Rezervi 2.000.000 tondur.

Seridahli Filonu: Filon üzerindeki çalışmalar 1972–86 yılları arasında yapılmıştır. Bu süre içerisinde 23 adet yarma ve toplam derinliği 1452,8 m olan 9 adet eğik sondaj gerçekleştirilmiştir. Rezervi 6.067.000 tondur.

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

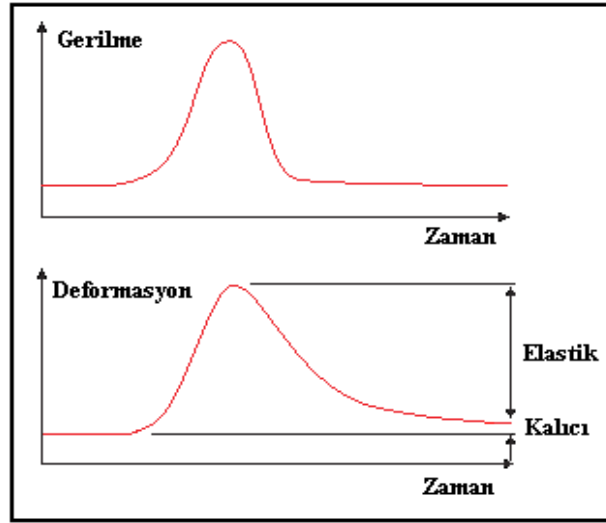
Bitüm, reolojik yapı olarak viskoelastik ve termoplastik özellik göstermektedir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük 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 karışımlarında viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır (Lav ve Lav, 2004). Genel olarak, kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir (Whiteoak ve Read, 2003).



Şekil 3.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi; yükün etki etmesiyle oluşan ani deformasyonu, yük kaldırılınca kadar dereceli olarak artan deformasyon takip etmektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin viskoelastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte

ve zamanla 'ertelenmiş elastisite' adı verilen bir kısım geri dönüşüm daha meydana gelmektedir. Sonuçta, geri kazanılamayan ve doğrudan viskoz davranışın sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.



Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 3.2’de, bitümlü sıcak karışımların (BSK) hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon - zaman grafiğinde, her ne kadar yükün etkisinden önce ve sonra deformasyon değerleri aynı gibi görülse de çok küçük miktarlarda da olsa kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için tanımlanan küçük deformasyonlar, milyonlarca tekerlek yükü tekrarı sonucunda kaplama yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır.

Kaplamaların farklı performans parametrelerine olumsuz etkide bulunmadan oluşan bozulmaları engellemek yada geciktirerek kaplama servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı kullanımı genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar;

- Katkı maddesi bitüme katılarak, 'modifiye bitüm' elde edilir.
- Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan karışıma katılarak, 'modifiye karışım' elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm üzerinde çeşitli standart test yöntemleri uygulayarak bağlayıcı özelliklerindeki değişikliklerin tespit edilmesi mümkündür. Bu sayede, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle

ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması ve taşınması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (İlcalı, 2001).

Karışımın modifikasyonundaysa, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma gibi sorunlarla karşılaşmamaktadır. Ancak bu durumda da karışımdan özelliği değişen bitümü alarak özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılamamaktadır.

Bilindiği gibi, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standart deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede yapılabilmektedir. Karışıma yönelik deneylerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı deney ekipmanlarına gereksinim duyulmaktadır (İlcalı, 2001).

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 3.1’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 sınıflandırmada yapılmaktadır. Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerini ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladıkları faydalar (Whiteoak ve Read, 2003).

Modifiyer	Kalıcı Deformasyon	Termal Çatlama	Yorulma Çatlağı	Nem Hasarı	Yaşlanma
Elastomerler	+	+	+		+
Plastomerler	+				
İşlenmiş Kauçuk		+	+		
Siyah Karbon	+				+
Kireç					+
Sülfür	+				
Kimyasal Modifiyerler	+				
Antioksidanlar					+
Hidrate Kireç				+	+

Tablo 3.1. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (İlcalı, 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 Özütü)	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

Karışıma eklenen katkı maddeleri genellikle filler malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kireç, siyah karbon, atık lastik, atık mermer gibi malzemeler BSK'larda filler olarak kullanılabilen katkı maddeleridir (Francken, 1998). 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). Karaşahin ve Terzi, atık mermer tozunu BSK numunelerde filler olarak denemiş ve mermer tozunun filler malzemesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir (Karaşahin ve Terzi, 2007). Cao, atık lastiği doğrudan karışıma eklemiş, kauçuk ve siyah karbon muhteva

eden atık lastiğin bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona düşük sıcaklıklarda ise çatlak oluşumuna karşı olumlu etkiye sahip olduğunu belirlemiştir (Cao, 2007).

Yukarıdaki tabloda yer almamasına rağmen doğal asfaltlar da BSK'larda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Amerika'nın Utah eyaletinden 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'larda çeşitli şekillerde kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Silopi asfaltının BSK'larda kullanımı üzerine bugüne kadar yapılmış çok az çalışmaya rastlanmıştır.

Amerika'nın Utah eyaletinde çıkarılan gilsonit, %45 oranında reçine, yüksek oranda yaşlanmayı önleyici ve soyulmayı önleyici kimyasallar içermekte olup bütün agrega türleriyle çok iyi uyum sağlamaktadır (Prapaitrakul vd., 2005).

Sönmez ve ekibi, Trinidad göl asfaltı ve gilsoniti de içeren sekiz farklı katkı maddesini BSK'larda denemiştir. Çalışmada Trinidad göl asfaltı, bitüm oranının %24'ü kadar kullanılırken gilsonit bitüm oranının %10'u oranında kullanılmıştır. İçerisinde polimerlerde bulunan sekiz farklı katkı maddesinin incelendiği çalışmada BSK numuneleri üzerinde Marshall stabilite deneyi, indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü, statik ve tekrarlı sünme deneyi ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan olumlu yönde en fazla fayda sağlayan katkıların gilsonit, elvaloy ve olexobitin olduğu belirlenmiştir. Trinidad göl asfaltı ise kullanılan katkılar içerisinde orta sıralarda yer almıştır (Sönmez vd., 2005).

Hamidi, gilsoniti bitüm modifikasyonunda kullanmış, gilsonitin bitümlü bağlayıcının penetrasyonunu azalttığını ve yumuşama noktasını arttırdığını belirlemiştir. %4 ve %8 gilsonit ile hazırlanan modifiye bağlayıcılar içeren karışımlar üzerinde uygulanan Marshall stabilite ve tekerlek izine karşı dayanım deneyleri ile gilsonitin 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 gilsonitin önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir (Hamidi, 1998).

Norveç'in Oslo kentinde 1970'lerin başında sudan kaynaklanan bozulmaların olduğu tespit edilmiş ve bu kentte bulunan ağır taşıt trafiğinin fazla olduğu bölgelerde gilsonit BSK'larda katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Gilsonit eklenmesi ile daha rijit bir

karışım elde edilmiştir. Gilsonit içeren karışımların beklenen kaplama ömrünü iki kat arttırdığı ayrıca nem hasarını önemli oranda azalttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda gilsonit kullanımının karışımı sertleştirmesine rağmen düşük ısı çatlaklarına neden olmadığı belirlenmiştir (Widyatmoko ve Elliott, 2008; Dokken ve Evensen, 2010).

Avustralya'nın New South Wales bölgesinde yoğun trafiğin olduğu bölgelerde kalıcı deformasyonu azaltmak amacıyla gilsonit kullanılmıştır. Gilsonit toplam karışımın %0,25'i oranında kullanılmıştır. Yapımı takip eden 6, 12 ve 24 ay sonra yapılan kontrollerde gilsonitin kalıcı deformasyonu önemli oranda azalttığı belirlenmiştir. Avustralya Asfalt Kaplama Birliği tarafından gilsonit BSK'larda kullanılabilecek katkılar arasında gösterilmektedir (URL-4, 2010).

Amerika'da New Jersey ve Washington eyaletlerinde de gilsonit katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Washington'da yapılan uygulamada gilsonit bitüme ağırlıkça %8 oranında ilave edilmiştir. New Jersey'deki uygulamada ise gilsonit %10 oranında kullanılmış, yapılan incelemelerde kaplamanın servis ömrünün iki yıl arttığı belirlenmiştir (URL-4, 2010).

Huang ve ekibi kaba agregayı önce gilsonitle kaplamış daha sonra bu malzemeyle BSK numunelerini hazırlayarak performanslarını ölçmüşlerdir. Hazırlanan BSK numuneleri üzerinde 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).

Widyatmoko ve Elliott, Trinidad göl asfaltı ile polimer çeşitlerini bitüm modifikasyonunda birlikte kullanmış, hazırladıkları modifiye bağlayıcıların penetrasyon, yumuşama noktası ve dinamik reolojik özellikleri tespit etmişlerdir. Ayrıca saf bitüm gilsonit ile modifiye edilerek diğer bağlayıcılara uygulanan deneylere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan polimer modifiye bitümlere Trinidad göl asfaltı ile bağlayıcının özelliklerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada da gilsonit kullanımının bitümlü bağlayıcının penetrasyonunu azalttığı, yumuşama noktasını arttırdığı ayrıca kompleks modülünü arttırdığı ve faz açısını azalttığı belirlenmiştir (Widyatmoko ve Elliott, 2008).

Aflaki ve Tabatabaee, yedi farklı İran bitümünü gilsonitin de içinde bulunduğu farklı katkılar ile modifiye etmişlerdir. Çalışmada gilsonit ağırlıkça %2, 4, 7, 10 ve 13 oranlarında bitüme ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan gilsonit oranı arttıkça

viskozitenin, yumuşama noktasının ve kompleks modülünün arttığı, faz açısı ve penetrasyonun azaldığı belirlenmiştir (Aflaki ve Tabatabae, 2009).

Suo ve Wong, aşınma tabası olarak uygulanan BSK kaplamalarda oluşan yorulma çatlaklarının ilerleyişini incelemişlerdir. Bu amaçla gilsonit modifiyeli BSK, normal BSK ve taş mastik asfalt numuneleri hazırlanarak indirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan BSK numunelerinin en yüksek yorulma dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir. Fakat çatlak oluşuktan sonra karışımların dayanımları incelendiğinde kontrol karışımlarının gilsonit modifiyeli karışımlardan daha yüksek dayanım sergilediği belirlenmiştir (Suo ve Wong, 2009).

Diğer bir doğal asfalt türü olan katranlı kum dünyada en fazla Kanada'nın Atabaska bölgesinde bulunmaktadır. Anochie-Boateng ve Tutumluer, Atabaska katranlı kumunun kesme gerilmelerine karşı dayanımlarını iki farklı çalışmada incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı oranda bitüm içeren katranlı kum örneği üzerinde çalışılmıştır. 20 ve 30°C sıcaklıklarda yapılan deneyler sonucunda yoğurmalı pres ile sıkıştırılıp kesilen ve direk kesme deneyine tabi tutulan katranlı kum numunelerinin düşük sıcaklıkta daha yüksek sürtünme açısına sahip oldukları belirlenmiştir. Ayrıca düşük oranda bitüm içeren (%9) katranlı kum numunelerinin her iki sıcaklıkta da daha yüksek sürtünme açısına ve daha düşük kohezyon değerine sahip oldukları belirlenmiştir. Üç eksenli basınç deneyleri sonucunda bütün numunelerin sürtünme açılarının sıfır olduğu, kum taneleri arasında herhangi bir temas bulunmadığı belirlenmiştir (Anochie-Boateng ve Tutumluer, 2009(a); Anochie-Boateng ve Tutumluer, 2009(b)).

Endonezya'nın Buton adasında Kabungka ve Lawele bölgelerinde katranlı kum sahaları bulunmaktadır. Farklı çalışmalarda Buton katranlı kumu BSK'larda kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Subagio vd., 2003; Subagio vd., 2005; Siswosoebrotho vd., 2005).

Atabaska, Buton bölgelerinden elde edilen malzemeye benzer bir katranlı kum Suriye'nin El-Beşiri ve Kefria bölgelerinde bulunmaktadır. El-Beşiri katranlı kumu daha yüksek bitüm ve daha düşük kil içeriği nedeniyle yapılan çalışmalarda daha ön plana çıkmaktadır. El-Beşiri bölgesinde bulunan katranlı kumda %15-22 oranında asfalt bulunduğu belirlenmiştir. Çeşitli çalışmalar El-Beşiri katranlı kumunun BSK'larda kullanılabilirliğini ispatlamıştır (Hadidi, 2009; Alfa, 2008; Alfa, 2009; KÖK ve diğ., 2010). Suriye El-Beşiri katranlı kumu ve ayrıştırılmış hali Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Suriye El-Beşiri katranlı kumunun doğal hali ve ayrıştırılmış hali

Ülkemizde bulunan doğal asfaltların karayolu üstyapılarında kullanımı ile ilgili çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Bunun nedeni ülkemizde bitümlü bağlayıcıların karayolu sektöründe kullanımına diğer ülkelere göre geç başlanması ve 1950-70 yılları arasında bitümün düşük fiyatla elde edilmesine bağlanmaktadır. Bu dönemde yapılan yollarda Ülkemizden çıkan petrolden elde edilen bitümlü bağlayıcılar kullanılmış ve ithalata gerek duyulmamıştır (Uluçaylı, 1976). İlerleyen dönemde ise en fazla doğal asfaltların bulunduğu bölge olan Doğu ve Güneydoğu Anadolu'da güvenlik nedeniyle fazla sayıda çalışma yapılamamıştır. 1976 yılı öncesinde doğal asfaltlarla ilgili KGM bünyesinde yapılan çalışmalar yayınlanmadığından kaynak olarak KGM teknik bülteninde bulunan bilgilerden faydalanılmıştır. Şırnak İli Silopi İlçesi Harbol filonundan temin edilen asfaltitten ekstraksiyon sureti ile elde edilen bitüm üzerinde yumuşama noktası, penetrasyon ve düktilite deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda yumuşama noktası değerinin 87-94°C arasında olduğu, penetrasyon ve düktilite değerinin ise 0 olduğu belirlenmiştir. Antakya'nın Şenköy bölgesinden temin edilen doğal asfalt numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucu malzemenin %7-15,5 arasında bitüm içerdiği belirlenmiştir. KGM laboratuvarlarında yapılan etütlerde bu malzeme kırılıp elenerek BSK numunelerinde ince agrega olarak kullanılmış ve özellikle stabilite açısından önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Mardin İli Midyat İlçesi Kerbent Köyü'nde bulunan dört farklı bölgeden temin edilen numuneler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda bitüm oranının %3,81-24,29 arasında, penetrasyon değerlerinin 0-96 mm⁻¹ aralığında, düktilite değerlerinin 0-26 cm. aralığında ve yumuşama noktası değerlerinin 54-99°C arasında olduğu belirlenmiştir. En yüksek bitüm muhteva eden numuneler kullanılarak Marshall briketleri hazırlanmış, Marshall deneyleri sonucunda numunelerin şartname kriterlerini

sağladığı, Batman (70/100) bitümü ile hazırlanan numunelere yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Siirt İli Eruh İlçesi Zivenguk Köyü'nden temin edilen malzemeler üzerinde yapılan deneylerden malzemenin bitüm miktarının %26,21 olduğu, penetrasyon değerinin 54 mm⁻¹, düktilite değerinin 10 cm ve yumuşama noktası değerinin 62°C olduğu belirlenmiştir. Şırnak İli Sigrik Köyü'nden temin edilen malzemeler üzerinde yapılan deneyler sonucu bitüm miktarının %30,31 olduğu, penetrasyon değerinin 15 mm⁻¹, düktilite değerinin 0 ve yumuşama noktası değerinin 131°C olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Finike, İnegöl, Akseki, Gaziantep, Kilis, İncesu, Gediz ve Malatya'da karayolu yapımında kullanılabileceği tahmin edilen fakat gerek ulaşım gerekse miktar bakımından ekonomik olmadığı düşünülen doğal asfaltlar olduğu belirtilmektedir (Uluçaylı, 1976).

Asfaltit, Ülkemizde çıkarılan bölgelerde uzun süre ısınma amacıyla kullanılmıştır. Son dönemde asfaltitler; ısınmada, boya, vernik, otomobil lastiği, matbaa mürekkebi, genleştirilmiş kauçuk, zemin karoları, su geçirmez kablolar, paslanmayı önleyici örtü boyaları yapımında kullanılmaktadır (Şengüler, 2007). Asfaltitte bulunan kükürt oranının yüksek olması (% 4,3-7,9) çevre kirliliğine neden olduğundan birçok şehir merkezinde yakacak olarak kullanımı yasaklanmıştır. Tamamen yerli kaynak olan asfaltitin bünyesinde bulunan bitüm nedeniyle asfalt karışımlarda kullanılmasının, gerek ekonomik gerekse de performans açısından olumlu katkı yapacağı fikri doğrultusunda asfaltit, BSK numunelerinde filler malzemesinin tamamı yerine kullanılmış ve bu numunelerde stabilite değerinin ve boşluk oranının azaldığı belirlenmiştir. Özellikle boşluk oranı açısından asfaltitin daha düşük oranlarda kullanılmasının uygun olabileceği belirtilmiştir (Oruç ve Eren, 2008). Yapılan bu çalışmada asfaltit tek bir oranda kullanılmış ve sadece hacimsel özellikler ve Marshall stabilitesi yönünden değerlendirilmiştir. Tek bir deneyle sadece bir yönden bir malzemeyi değerlendirmenin yeterli olmadığı düşüncesiyle Silopi asfaltiti temin edilmiş ve BSK'ların nem hasarına karşı dayanımları iki farklı yöntemle incelenmiştir (Kuloğlu vd., 2009). Tezin ön çalışması niteliğinde olan bu çalışmada asfaltitin nem hasarı üzerinde önemli bir olumlu etkiye sahip olduğu, ayrıca bitüm ihtiyacını azalttığı belirlenmiştir.

4. YÜKSEK PERFORMANSLI ASFALT KAPLAMA (SUPERPAVE) TASARIM YÖNTEMİ

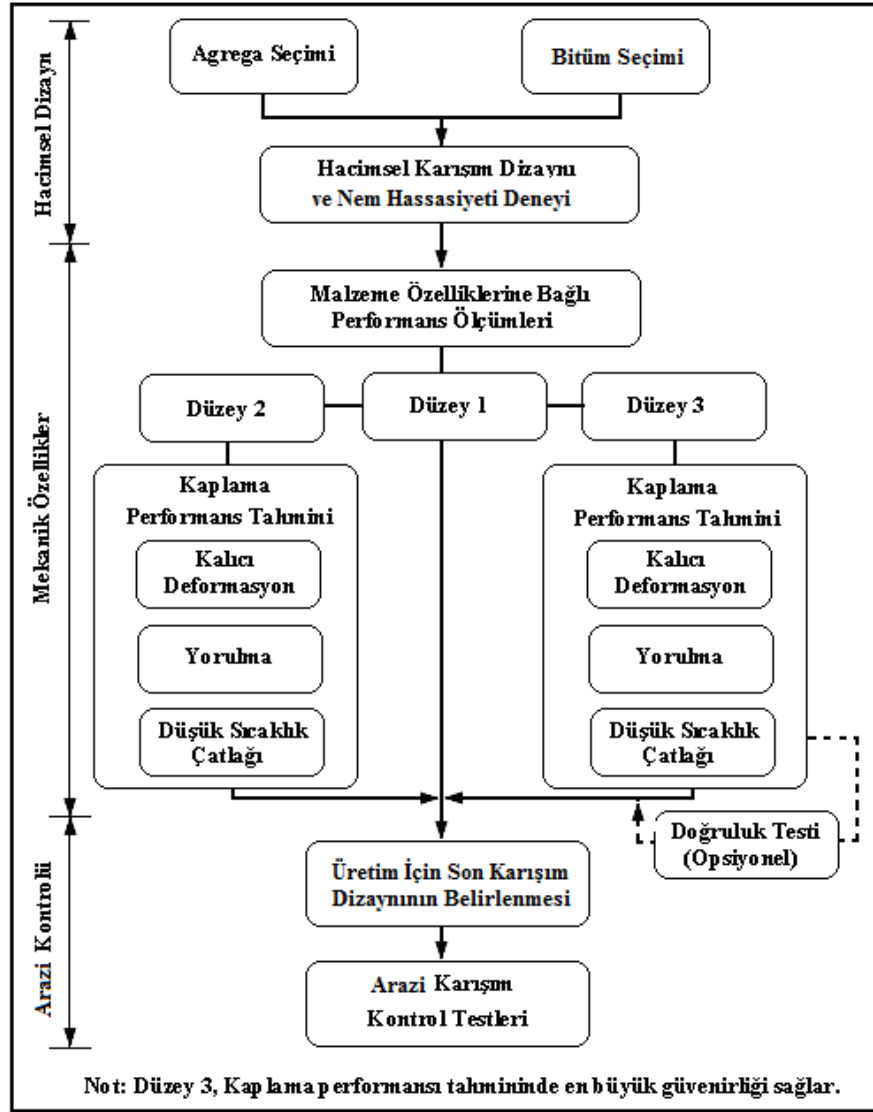
Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi, Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) dâhilinde yapılan 5 yıl süreli (1988 ile 1993 yılları arasında) çalışmaların sonucunda ortaya çıkmıştır. Superpave yönteminde bulunan bağlayıcı deneylerinde, uygulama bölgesindeki iklim koşulları dikkate alınmakta ve tekerlek izi, düşük sıcaklık ve yorulma çatlaklarını engellemek amacıyla bağlayıcılar performansa dayalı olarak incelenmektedir (Asphalt Institute, 1996). Superpave'in üç ana bileşenini; bağlayıcı şartnamesi, karışım tasarımı ile analiz ve bilgisayar yazılım sistemleri oluşturmaktadır (Altaş, 2002). Superpave karışım tasarım yönteminin genel akış karakteristiği aşağıda Şekil 4.1'de verilmiştir.

Superpave karışım tasarım yöntemi; düzey 1, 2 ve 3 olmak üzere üç farklı tasarım seviyesi içermektedir. Bu tasarım seviyeleri, kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı 80 kN'luk eşdeğer tek dingil yüklerinin toplamı esas alınarak belirlenmektedir. Bunun için önerilen trafik hacim değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Düzey 1 için karışım tasarımında sadece hacimsel tasarım ve nem hasarına karşı dayanım kullanılırken Düzey 2 ve Düzey 3'te basit kesme ve frekans değişimi, düşük sıcaklıklarda sünme deneyi gibi BSK performans deneyleri kullanılmaktadır.

Tablo 4.1. Karışım tasarım seviyeleri için önerilen tasarım trafik değerleri (Cominsky vd., 1994).

Tasarım Seviyesi	Tasarım Trafiği (80 kN)
1 (düşük)	$\leq 10^6$
2 (orta)	$\leq 10^7$
3 (yüksek)	$> 10^7$

1993 yılında SHRP araştırmasının tamamlanmasının ardından Amerika'daki birçok kuruluş Superpave yöntemini kullanmaya başlamıştır. Superpave şartnamesi, bölge iklim durumu baz alınarak hazırlandığından günün şartlarına göre uygun olmasına rağmen iklim şartlarına bağlı olarak zamanla değişiklik gösterebilmektedir (Asphalt Institute, 1996).



Şekil 4.1. Superpave karışım tasarım yönteminin yapısı (Cominsky vd., 1994).

4.1. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi

Superpave yönteminde uygulama bölgesinin hava sıcaklık verileri ve coğrafi konumundan faydalanılarak bağlayıcı tasarımı yapılmaktadır. Öncelikli olarak meteoroloji istasyonlarından uygulama bölgesine ait en az 20 yıllık süre içerisindeki her bir yılın ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıkları ortalaması ve en düşük bir günlük sıcaklık verileri alınmaktadır. Bu verilerden faydalanarak %50 ve %98 güvenilirlikte sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Güvenilirliğin belirlenmesinde sıcaklık değerlerinin standart

sapmalarından faydalanılmaktadır. Standart sapma (σ) değeri aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunur (Ünver, 1995; Geçkil, 2008).

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

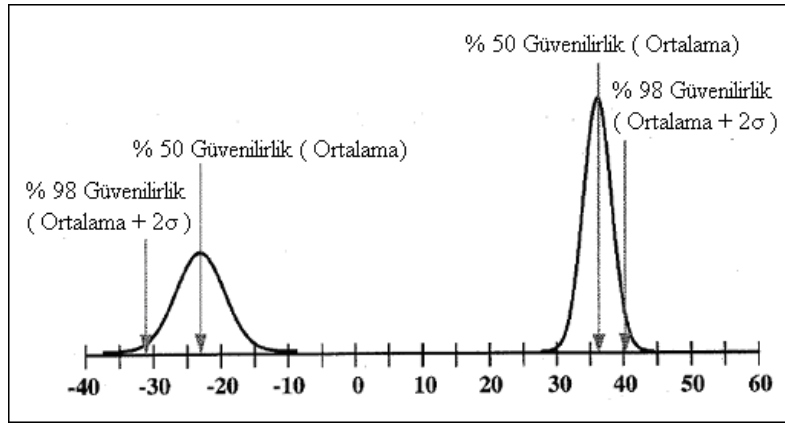
Burada;

σ : Standart sapma,

n: Örnekteki toplam gözlem sayısını,

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

En az 20 yıllık süre içerisindeki ardı ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıklarının ortalaması ve en düşük bir günlük sıcaklık değerlerinin ortalamasından %50 güvenilirlikte sıcaklık değerleri belirlenmektedir. Sıcaklık değerlerinin standart sapmaları (σ) kullanılarak %98 güvenilirlikte sıcaklık değerleri belirlenebilmektedir (Şekil 4.2) (McGennis vd., 1994).



Şekil 4.2. Uygulama bölgesi sıcaklıklarına göre güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi (McGennis vd., 1994).

Superpave yönteminde, ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı esas alınarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki tasarım yüksek sıcaklığı ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklık esas alınarak kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı SHRP yöntemine göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Asphalt Institute, 1996).

$$T_{20mm} = (T_{havamaks} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 \quad (4.2)$$

$$T_{min} = T_{havamin} \quad (4.3)$$

Burada;

T_{20mm} : Yüzeyden 20 mm derinlikteki kaplama tasarım yüksek sıcaklığı (°C),

$T_{havamaks}$: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı (°C),

E: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi (°)

T_{min} : Kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı (°C),

$T_{havamin}$: En düşük 1 günlük ortalama hava sıcaklığı (°C),

Superpave yönteminde bağlayıcı sınıfı iki değişkenli olarak PG X-Y şeklinde gösterilmektedir. Burada birinci değişken (X), bağlayıcının performans şartlarını sağladığı yüksek sıcaklık sınıfını, ikinci değişken (Y) ise bağlayıcının performans şartlarını sağladığı düşük sıcaklık sınıfını belirtmektedir. Uygulama bölgesi iklim şartları göz önünde bulundurularak tespit edilen en yüksek kaplama sıcaklığından daha yüksek olan sıcaklık sınıfı ve en düşük kaplama sıcaklığından daha düşük olan sıcaklık sınıfı alınarak bölge için geçerli olan bağlayıcı performans sınıfı tespit edilmektedir. Tablo 4.2’de Superpave bağlayıcı performans sınıfları verilmiştir.

Tablo 4.2. Superpave bağlayıcı performans sınıfları

Yüksek Sıcaklık Sınıfları (X), °C	Düşük Sıcaklık Sınıfları (Y), °C	Gösterim
46	-34, -40, -46	PG 46-Y
52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46	PG 52-Y
58	-16, -22, -28, -34, -40	PG 58-Y
64	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 64-Y
70	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 70-Y
76	-10, -16, -22, -28, -34	PG 76-Y
82	-10, -16, -22, -28, -34	PG 82-Y

Bağlayıcı performans sınıflarının belirlenmesinde kullanılan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları Tablo 4.3’te verilmiştir. Belirtilen deneyler Tablo 4.4’te belirtilen sınır ve sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcılara uygulanarak bağlayıcıların performans sınıfları belirlenmektedir.

Tablo 4.3. Bağlayıcıya uygulanan Superpave bağlayıcı deneyleri ve amaçları

Deney Adı	Kullanım Amacı	Bağlayıcı Türü
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFO)	Bitümlü bağlayıcının kısa dönem yaşlanma karakteristiklerini belirlemek	Orijinal
Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)	Bitümlü bağlayıcının uzun dönem yaşlanma karakteristiklerini belirlemek	RTFOT kalıntısı
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Bitümlü bağlayıcıların yüksek ve orta sıcaklık karakteristiklerini belirlemek	Orijinal RTFOT kalıntısı PAV kalıntısı
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcıların yüksek sıcaklıkta akışkanlık karakteristiklerini, BSK'ların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek	Orijinal
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık karakteristiklerini belirlemek	PAV kalıntısı

Bağlayıcı tipinin seçiminde taşıt hızları ve trafik hacmi de dikkate alınmaktadır. Tasarım eşdeğer tek dingil yükü ve taşıt hızları kullanılarak bağlayıcı performans sınıfının belirlenmesinde kullanılan değerler Tablo 4.5'te verilmiştir (McGennis vd., 1994). Tabloya uygun olarak uygulama bölgesi için belirlenen performans sınıfı 1 veya 2 seviye artırılabilir.

Tablo 4.5. Taşıt hızlarına ve trafik hacmine göre bağlayıcı performans sınıfının düzeltilmesi (McGennis vd., 1994).

Tasarım Eşdeğer tek dingil yükü (milyon)	Genel taşıt hareketi		
	Park	Ağır	Normal
< 0,3	-	-	-
0,3 – 3	2	1	-
3 – 10	2	1	-
10 – 30	2	1	-
> 30	2	1	1

Tablo 4.4. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi (McGennis vd., 1994).

PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-							PG 58-					PG 64-					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 46			< 52							< 58					< 64					
Minimum KaplamaTasarım Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORİJİNAL 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	46			52							58					64					
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	46			52							58					64					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																					
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90			90							100					100					
Dinamik Kayma, TP5, G*sind, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme,	Rapor																				
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

Tablo 4.4. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi (Devamı) (McGennis vd., 1994).

PERFORMANS SINIFI	PG 70-						PG 76-					PG 82-				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 70						< 76					< 82				
Minimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34
ORİJİNAL 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	70						76					82				
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	70						76					82				
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Fiziksel Sertleşme,	Rapor															
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24

4.1.1. Superpave Bağlayıcı Deneyleri

Superpave yönteminde bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmasını temsil etmesi amacıyla Dönel İnce Film Halinde Isıtma 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 Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Direkt Çekme Deneyi (DTT) ve yüksek sıcaklık dayanımlarını belirlemek amacıyla Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi uygulanmaktadır.

4.1.1.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuarda RTFOT (Dönel İnce Film Halinde Isıtma 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 4.3).



Şekil 4.3. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi

Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır.

Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir (TS EN 12607-1, 2003).

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (4.4)$$

4.1.1.2. 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 4.6'da verilmiştir. Deney aleti ise Şekil 4.4'te görülmektedir.

Tablo 4.6. 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 4.4. PAV deney aleti

RTFOT ve PAV deneyinden elde edilen numuneler Superpave deneylerinde kullanılmakta ve yaşlandırılmış bağlayıcıların performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir.

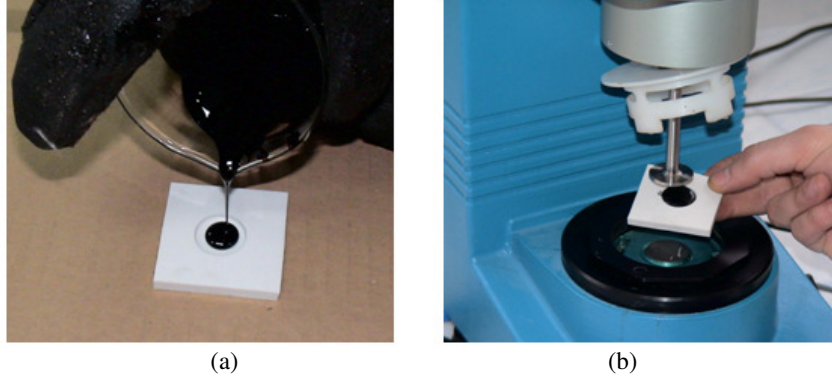
4.1.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel vizkozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 4.5). 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). Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr. malzeme alınarak sıcaklığı 150°C’den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilir. Malzemeden yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulur. Numune bölmesi, sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilir ve 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletilerek deney yapılır. Deneyde bir motor yardımıyla iğnenin düzenli olarak 20 rpm. hızla dönmesi sağlanmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılır ve bu üç değerın ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilir. BSK’ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri

4.1.1.4. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi

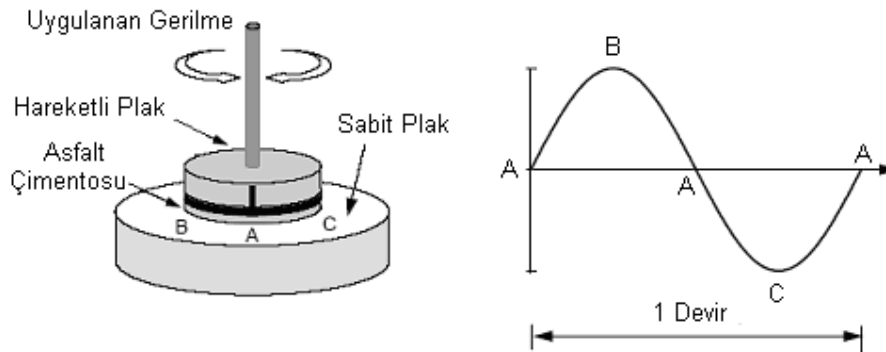
33

Deneyde bitümlü bağlayıcı doğrudan plaklar üzerine dökülebildiği gibi silikon kalıplar yardımıyla da numune hazırlanabilmektedir. Silikon kalıplarla numune hazırlanışı ve numunenin deney aletine yerleştirilişi Şekil 4.7’de görülmektedir.



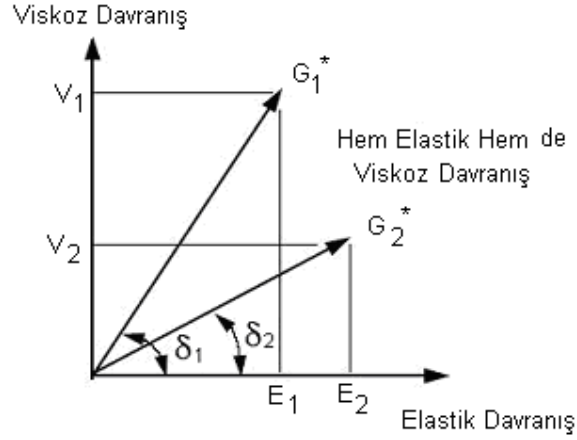
Şekil 4.7. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a) ve üst plağa yerleştirilmesi (b)

Deneyde, Şekil 4.8’de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir / saniye’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtmayı amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılır. Daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).



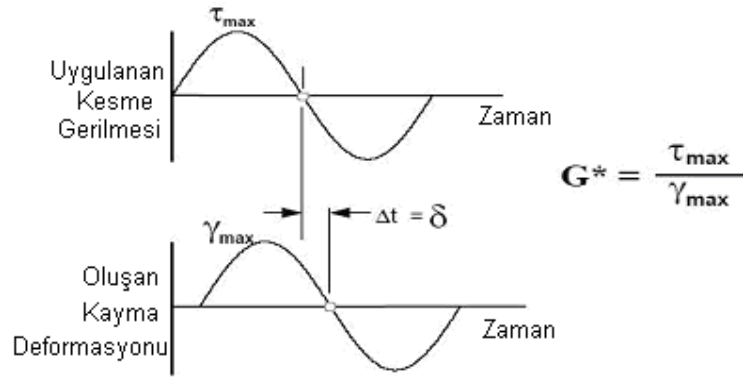
Şekil 4.8. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Dinamik kesme reometresi deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Şekil 4.9) (McGennis vd., 1994).



Şekil 4.9. Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği (McGennis vd., 1994).

Viskoelastik davranışı ifade eden Şekil 4.9'da görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (yükleme hızı yüksek ve sıcaklık düşük) ifade ederken dikey eksen ise viskoz davranışı (yükleme hızı düşük ve sıcaklık yüksek) ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısısı ve normal yükleme durumlarında asfalt çimentosu hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliğe sahip olması ve her bir asfalt çimentosunun birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi viskoelastik özellik hem G^* 'a hem de δ 'a bağlıdır. Bu nedenle asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir. Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Faz açısı Şekil 4.10'da gösterilmiştir (McGennis vd., 1995).



Şekil 4.10. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi (McGennis vd., 1995).

AASHTO TP-5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım şartname limitleri Tablo 4.7’de verilmiştir (McGennis vd., 1994).

Tablo 4.7. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri (McGennis vd., 1994).

Bağlayıcı Türü	Deney Amacı	Şartname Limitleri
Orijinal	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 1,00 kPa
RTFOT	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 2,2 kPa.
PAV	Yorulmaya karşı dayanım	Maksimum 5000 kPa

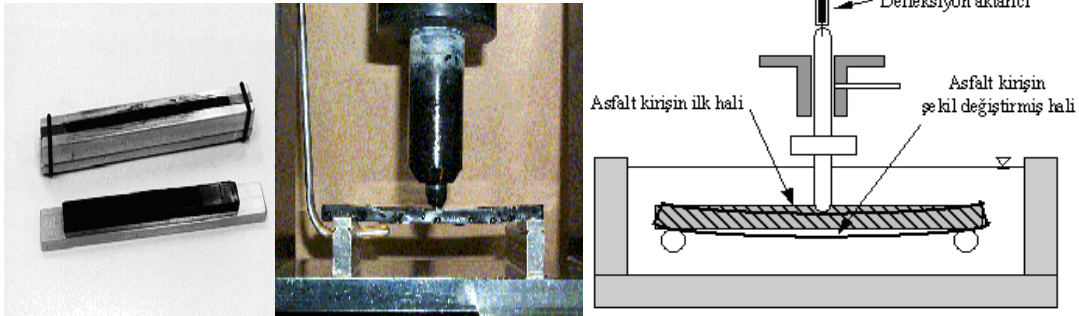
4.1.1.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

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 yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. BBR deney aleti Şekil 4.11’de görülmektedir.



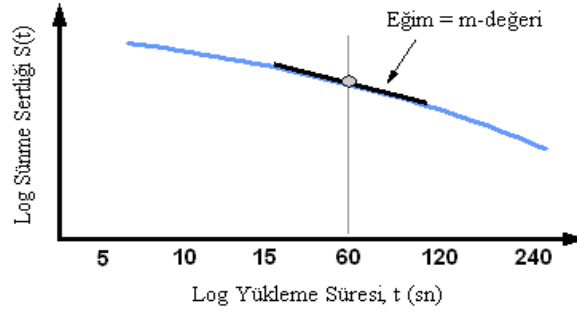
Şekil 4.11. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti

Deney boyunca asfalt kiriş numunesi bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kalıplar kullanılmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması

Deney sonunda yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini ve sünme oranını (m-değeri) tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımın bir göstergesi iken sünme oranı (m-değeri) ise sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı ifade etmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 4.13). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. AASHTO TP1 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir.



Şekil 4.13. Sünme oranının belirlenmesi

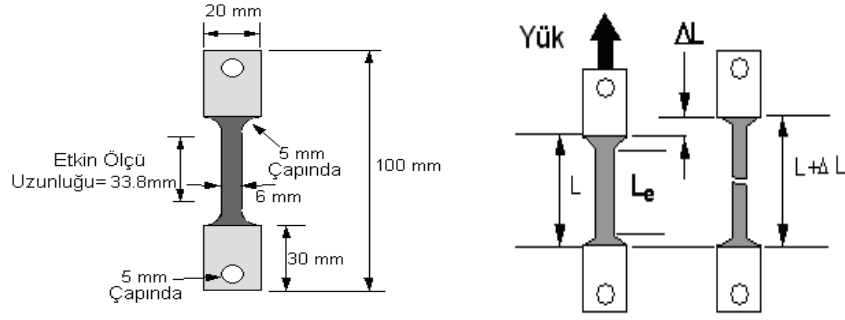
4.1.1.6. Direkt Çekme Deneyi (DTT)

Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda sahip oldukları rijitlik ile kopma anındaki sünme miktarları arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Bitümlü bağlayıcı çekme gerilmesine tabi tutulduğunda yeterince sünme gösterirse düktil (sünek), sünme göstermeden koparsa gevrek (kırılgan) olarak adlandırılmaktadır. Yani bitümlü bağlayıcı ne kadar rijit (sert) ise o kadar gevrek ne kadar yumuşak ise de o kadar düktil davranış gösterir. İdeal bir bağlayıcı düşük sıcaklıklarda da bir miktar sünek davranış sergilemelidir. Aksi takdirde trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada düşük ısı çatlakları meydana gelmektedir (Tunç, 2004).

BBR deneyi ile belirlenen sünme rijitliği, bağlayıcının kopmadan önceki sünme kapasitesini tam olarak karakterize etmemektedir. Bu deneyle rijit ama düktil özellik gösteren bağlayıcıların kiriş eğme reometresi deney sonuçları 300 ile 600 MPa. arasında ise bu deneye ihtiyaç duyulmaktadır. Bağlayıcı BBR sonuçları, 300 MPa.'dan daha az ise bu deneye ihtiyaç duyulmamaktadır. Deney; orijinal, PAV'da yaşlandırılmış ve RTFOT aletinde yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanabilmektedir.

Direkt çekme deneyinde numune 1,0 mm/dak. hızla çekilmektedir (Şekil 4.14). Deney sonucunda uzama miktarının ilk uzunluğa oranı % 1'den fazla olmalıdır. Bu oran (ϵ_t) aşağıdaki bağıntı ile bulunmaktadır.

$$\epsilon_t = \frac{\text{BoyDeğişimMiktarı}}{\text{İlkBoy}} \times 100 \quad (4.5)$$

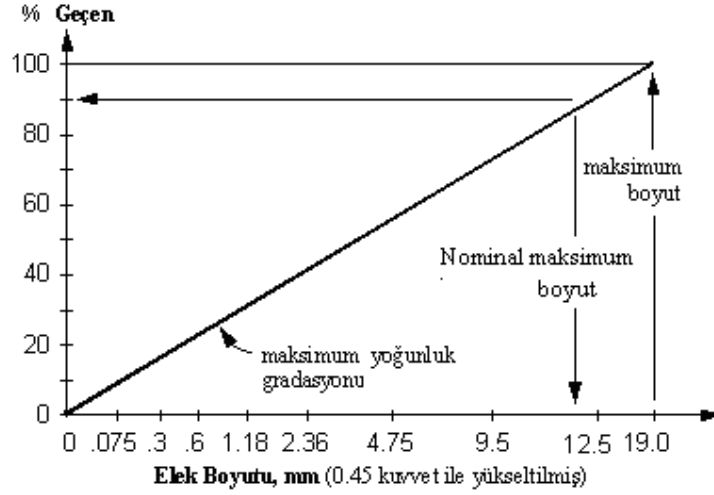


Şekil 4.14. DDT deneyinin uygulanışı

4.2. Superpave Karışım Tasarımı

4.2.1. Tasarım Agregada Gradasyonu Seçimi

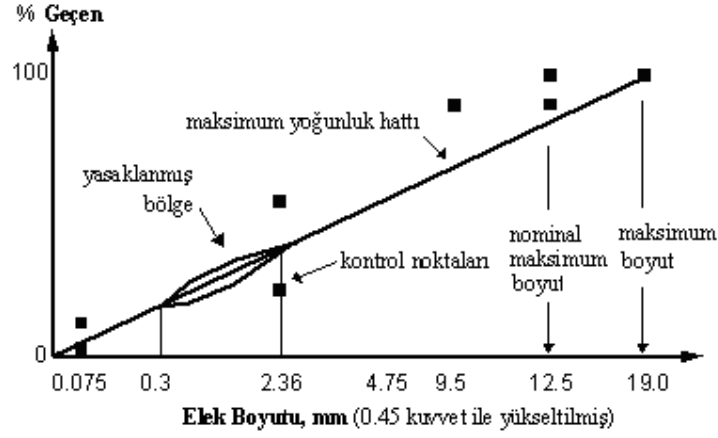
Geleneksel yöntemlerde agregada gradasyon limitleri verilirken yatay ekseninde logaritmik ölçekte elek boyutu, düşey ekseninde ise aritmetik ölçekte % geçen değeri verilerek kümülatif dane dağılımı belirlenmektedir. Superpave yönteminde farklı olarak 0,45 kuvvet grafiği kullanılmaktadır. Bu yöntemde düşey ekseninde aritmetik olarak % geçen değeri verilirken yatay ekseninde elek açıklığının 0,45. kuvveti alınarak değerler işaretlenmektedir. Burada, 0,45 üstel kuvvet eğrisinin en önemli özelliği, maksimum yoğunluktaki gradasyonu elde etmek içindir (Şekil 4.15). Bu yoğunluk ise, grafiğin orijininin yani 0,0 noktasından maksimum agregada boyutunun %100 geçtiğini gösteren noktaya çizilen doğru ile elde edilmektedir (Tunç, 2004). Maksimum yoğunluk hattına yakın veya paralel geçen malzemelerin içerisinde yeteri kalınlıkta asfalt film tabakasının oluşmasına izin vermeyecek kadar az boşluğa sahip olması sebebiyle, bu tür gradasyona sahip agregada karışımlarının kullanılmasından kaçınılmalıdır.



Şekil 4.15. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu (Tunç, 2004).

Superpave yönteminde ayrıca maksimum boyut, nominal maksimum boyut, yasaklanmış bölge ve kontrol noktaları ifadeleri yer almaktadır. Nominal maksimum boyut, agrega malzemesinin %10'dan fazlasının üstte kaldığı (veya %90'ının geçtiği) ilk eleğin bir üst elek boyutudur. Maksimum boyut, nominal maksimum boyuttan bir büyük elek boyutudur. Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları belirlemektedir. Bu sınır noktaları nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm) ve en küçük boyutlu (0,075 mm) eleklerin bulunduğu yerlerde belirlenmiştir. Yasaklanmış bölge ise, band şeklindeki bir bölgeyi temsil eder ve gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken bir bölge olarak tanımlanır. Yasaklanmış bölge, maksimum yoğunluk hattı üzerinde ve maksimum boyuta bağlı olarak 4,75 mm veya 2,36 mm ile 0,3 mm elekler arasında bir band şeklindeki bölgedir (Şekil 4.16). Bu tip gradasyon, bünyesinde çok fazla kum veya ince malzeme ihtiva ettiğinden yapım sırasında sıkıştırma zorluğuna ve sonrasında kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Yasaklanmış bölge, ince agrega boyutunda gradasyon eğrisinin maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçmesini engeller ve bu hattan uzaklaşmayı gerektirir. Çünkü maksimum yoğunluk gradasyonu, genellikle yetersiz agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) sağladığından ve bu boşluklar içerisine yetersiz miktarda asfalt bağlayıcı gireceğinden karışımın durabilitesi azalacaktır. Ayrıca bu tip gradasyonlar asfalt içeriğine çok duyarlı olup asfalt içeriğindeki çok küçük değişimlerde bile kolayca plastik özellik gösterebilmektedir. Superpave yöntemi, agrega gradasyonunun yasaklanmış bölgenin altından geçmesini önermekle birlikte herhangi bir mecburiyet getirmemektedir. Ancak, karışımın iyi bir performans göstermesi için

gradasyonun özellikle yasaklanmış bölgenin altından geçmesi tavsiye edilmektedir (Tunç, 2004).



Şekil 4.16. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri (Tunç, 2004).

Superpave yönteminde, Tablo 4.8’de görüldüğü gibi nominal maksimum agrega boyutuna göre tanımlanan beş çeşit agrega karışımı kullanılmaktadır. Ayrıca, bu beş Superpave karışımı için kullanılan sayısal gradasyon limitleri Tablo 4.9’da görülmektedir.

Tablo 4.8. Superpave karışım gradasyonları (Tunç, 2004).

Nominal Maksimum Boyut, mm	Maksimum Boyut, mm
37,5	50
25	37,5
19	25
12,5	19
9,5	12,5

Tablo 4.9. Superpave karışım gradasyon limitleri (Tunç, 2004).

Standart Elek (mm)	Yüzde Geçen Kriteri (Kontrol Noktaları)				
	Nominal Maksimum Elek Boyutu				
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm
50,0					100
37,5				100	90–100
25,0			100	90–100	
19,0		100	90–100		
12,5	100	90–100			
9,5	90–100				
2,36	32–67	28–58	23–49	19–45	15–41
0,075	2,0–10,0	2,0–10,0	2,0–8,0	1,0–7,0	0,0–6,0
Elek	Tavsiye Edilen Yasaklanmış Bölge				
4,75				39,5	34,7
2,36	47,2	39,1	34,6	26,8–30,8	23,3–27,3
1,18	31,6–37,6	25,6–31,6	22,3–28,3	18,1–24,1	15,5–21,5
0,6	23,5–27,5	19,1–23,1	16,7–20,7	13,6–17,6	11,7–15,7
0,3	18,7	15,5	13,7	11,4	10,0

4.2.2. Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı

Superpave sisteminde tasarım yöntemi, dikkate alınan trafik değerine göre Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 olmak üzere üç farklı prosedürde uygulanmaktadır. En düşük kriterlere sahip olan Seviye 1 tasarım yönteminde nem hasarına karşı dayanıklılık deneyi ve hacimsel karışım tasarımı yer almaktadır. Hacimsel karışım tasarımı aynı zamanda diğer iki seviyeye göre tasarımda temel prosedür olarak yer almaktadır. Karışım tasarım işlemleri, Superpave agrega gradasyon kriterlerini sağlayan farklı agrega deneme karışımlarını hazırlayarak, bu deneme karışımlarını bitümlü bağlayıcı ile karıştırarak bu karışımları kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutmak, yaşlanmış 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 asfalt içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli asfalt içeriklerinde karışım numunesi hazırlayarak sıkıştırmaktır (Geçkil, 2008). Hacimsel tasarımda agrega ve bitümün özgül ağırlıklarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Agrega özgül ağırlıkları; hacim (Gsb), efektif (Gse) ve zahiri özgül ağırlık (Gsa) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Hacim özgül ağırlık; standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (bütün boşluklar dâhil) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Efektif özgül ağırlık; standart bir

sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (bitümlü bağlayıcının giremediği fakat suyun nüfus edebildiği boşluklar dâhil) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Zahiri özgül ağırlık ise standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (boşluk içermeyen) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Özgül ağırlıkların değişiminde dikkate alınan boşluklar etkili olmaktadır. Dolayısıyla hacim değerleri arttıkça özgül ağırlık değerleri azalmaktadır. Özgül ağırlık değerleri arasında dikkate alınan hacim değerlerine bağlı olarak $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ şeklinde bir ilişki bulunmaktadır.

Superpave yöntemi hacimsel BSK tasarımında iki farklı bitümlü sıcak karışım özgül ağırlık değeri kullanılmaktadır. Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm}); Standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki asfalt ve agregadan oluşan karışımın (boşluksuz) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Maksimum teorik özgül ağırlık AASHTO T209 ile belirlenmekte olup asfalt betonu karışımındaki hava boşluğu miktarının ve yapım süresince kaplama sıkıştırması için hedef yoğunluk değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Hacim Özgül Ağırlık (G_{mb}); Standart bir sıcaklıkta, sıkışmış asfalt ve agregası karışımının (boşluklu) birim hacminin standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır.

Tasarım yönteminde öncelikle nominal maksimum elek boyutlarına göre gradasyon kontrol noktalarına uygun, yasaklanmış bölgenin dışında olacak şekilde üç farklı gradasyon seçilmektedir. Seçilen deneme karışımlarındaki, kaba ve ince agregası ile fillerin özgül ağırlıkları tespit edilerek, her bir deneme agregası karışımının hacim (G_{sb}) ve zahiri (G_{sa}) özgül ağırlığı aşağıdaki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanmaktadır.

$$G_{sb}, G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (4.6)$$

P_1, P_2, P_N : Her bir agreganın ağırlıkça yüzdesi,

G_1, G_2, G_N : Her bir agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlığı.

Agregası karışımının efektif özgül ağırlığı karışımın efektif özgül ağırlığından faydalanarak belirlenebilmektedir. Fakat tasarım aşamasında öncelikle aşağıdaki formülle yakın bir değer belirlenmekte ve kullanılmaktadır. Bu bağıntıda, su absorpsiyonuna bağlı

olarak değişen katsayı değeri 0,8 olarak alınmıştır. Absorpsiyonu yüksek olan agregalarda bu katsayı 0,6 veya 0,5'e kadar azaltılabilir.

$$Gse = Gsb + 0,8 \times (Gsa - Gsb) \quad (4.7)$$

Agrega tarafından absorbe edilecek bitümlü bağlayıcı hacmi (Vba) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Vba = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \times \left(\frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse}\right) \quad (4.8)$$

Vba: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm³/cm³),

Pb: Bağlayıcı yüzdesi,

Ps: Agreg a yüzdesi,

Gb: Bağlayıcının özgül ağırlığı,

Va: Hava boşluğu hacmi.

Her üç deneme karışımının efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(Sn) \quad (4.9)$$

Vbe: Efektif bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm³/cm³),

Sn: Agreg a karışımındaki nominal maksimum elek boyutu (mm).

Başlangıç deneme asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmektedir.

$$Ws = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \quad (4.10)$$

$$Pbi = \frac{Gb \times (Vbe + Vba)}{(Gb \times (Vbe + Vba)) + Ws} \times 100 \quad (4.11)$$

Pbi: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi,

Ws: Agreganın ağırlığı (gr).

Karışım ağırlığına göre bulunan bağlayıcı yüzdesi (Pbi) yardımıyla, toplam agreg ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı (Wb) aşağıdaki Formül 4.12 ile hesaplanmaktadır. Bitümlü sıcak karışım numunelerinin hazırlanmasında dönel viskozimetre deneyinden elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları kullanılmalıdır.

$$Wb = \frac{Ws \times Pbi}{100 - Pbi} \quad (4.12)$$

Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespit edilmesi amacıyla her bir deneme karışımı için başlangıç deneme bitüm içeriklerinde en az iki adet olmak üzere toplam 6 adet karışım numunesi hazırlanmaktadır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekareye 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden ısıtılmış 135°C'deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Hazırlanan ve yaşlandırma işleminden sonra soğumaya bırakılan karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları (Gmm) AASHTO T209 standardına göre tespit edilmektedir.

$$Gmm = (C - A) / ((B - A) - (D - C)) \quad (4.13)$$

A: Piknometre ağırlığı (gr)

B: Piknometre +Su ağırlığı (gr)

C: Piknometre +Numune ağırlığı (gr)

D: Piknometre +Numune+Su ağırlığı (gr)

Belirlenen Gmm değerlerinden faydalanılarak hesapla agreg karışımın efektif özgül ağırlığı (Gse) değerleri belirlenir. Çalışmanın geri kalan kısmında hesapla belirlenen bu Gse değerleri kullanılır.

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - Pbi}{\left(\frac{100}{Gmm} - \frac{Pbi}{Gb} \right)} \quad (4.14)$$

Daha sonra deneme karışımlarının sıkıştırılması amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışım numunesi hazırlanmaktadır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekareye 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden

ısıtılmış 135°C’deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Karışım numuneleri, yaşlandırma işleminden sonra, sıkıştırma sıcaklığına ulaşması için 30 dakika etüvde bekletilmektedir. Bu sırada, ilk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45–60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve konulmakta ve yoğurmalı pres hazırlanmaktadır. Sıkıştırma enerjisinin bir fonksiyonu olan yoğurma sayısı; uygulanan yoldan geçmesi planlanan eşdeğer standart tek dingil yükü (ETDY) sayısı ve yolun sınıfına bağlı olarak AASHTO TP4 standardına göre Tablo 4.10’da görülmektedir.

Tablo 4.10. Taşıt sayısına göre sıkıştırma parametreleri (URL-5, 2011; Anderson ve McGennis, 1994).

Tasarım Trafik (ETDY), milyon	Sıkıştırma Parametreleri			Tipik Karayolu Uygulamaları
	Nini	Ndes	Nmaks	
< 0,3	6	50	75	Çok az trafik kapasiteli yollar
0,3–3	7	75	115	Orta trafikli şehir yolları
3–30	8	100	160	Yüksek trafikli şehir yolları ile çift yönlü, çok şeritli yollar
> 30	9	125	205	Ağır kamyon trafiğine maruz kalan çok şeritli, ağır trafik yoğunluklu yollar

Superpave yönteminde sıkıştırma enerjisi, yoğurma sayısının (Ndes) bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. Nini sayısı karışımın sıkışabilirliğini, Nmaks sayısı ise karışımın ulaşabileceği maksimum yoğunluğu tespit etmek için kullanılmaktadır. Deney için sıkıştırma sıcaklığına getirilerek hazırlanan karışımlar kalıba yerleştirilmekte ve sıkıştırma işlemine başlanmaktadır. Sıkıştırma işlemi esnasında, karışımların yoğurma sayılarındaki yükseklikleri ölçülmekte ve istenen yoğurma sayısı (Ndes) tamamlandıncaya kadar numuneler sıkıştırılmaktadır. Sıkışan numuneler zarar görmeden kalıptan çıkartılarak soğumaya bırakılmakta ve bu numunelerin hacim özgül ağırlığı (Gmb(ölçülen)), AASHTO T166 standardına göre aşağıdaki formül ile tespit edilmektedir.

$$Gmb(ölçülen) = A/(B-C) \quad (4.15)$$

A: Numunenin kuru ağırlığı (gr)

B: Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)

C: Sudaki ağırlık (gr)

Tasarım esnasında bütün trafik düzeyleri için karışımların hava boşluklarının %4 olması istenmektedir. Sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluklarının hacimce yüzdesi aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (4.16)$$

Va: Sıkıştırılmış bir karışımın toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları,

Gmm: Asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı (hesaplanmış veya deneyle bulunmuş),

Gmb: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı.

Mineral agregalar arasındaki boşluklar (VMA); efektif asfalt içeriği ve hava boşlukları içeren sıkıştırılmış bir asfalt karışımında, agregataneleri arasındaki granüler boşluklar olarak tanımlanmakta ve karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA, agreganın hacim özgül ağırlığına göre hesaplanır ve sıkıştırılmış asfalt karışımının hacim özgül ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Bu sebeple VMA, sıkıştırılmış asfalt karışımının toplam hacminden, hacim özgül ağırlığınca belirlenmiş agregat hacminin çıkartılması ile hesaplanır. VMA yüzdesi, karışım ağırlığı ve agregat ağırlığının yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Asphalt Institute, 1996). Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agregat içeriğinden yola çıkılarak Formül 4.17 ile, toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği yola çıkarak ise Formül 4.18 ile VMA hesaplanmaktadır. Superpave yönteminde, agregat boyutuna bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğunda tavsiye edilen minimum VMA değerleri Tablo 4.11’de verilmiştir.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (4.17)$$

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

Gsb: Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı,

Gmb: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (AASHTO T166)

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agregat içeriği.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100 \quad (4.18)$$

Pb: Toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği.

Tablo 4.11. Superpave VMA gereksinimleri (Asphalt Institute, 1996).

Nominal Maksimum Agrega Boyutu, mm	Minimum VMA, %
9,5	15,0
12,5	14,0
19	13,0
25	12,0
37,5	11,0

Agrega tarafından absorbe edilmiş bitümün dışındaki karışımda bulunan bitüm içeriğini ifade eden asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VFA), aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir (Asphalt Institute, 1996). Superpave yönteminde, trafik düzeyine bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğu yüzdesinde kabul edilebilir VFA değer aralığı Tablo 4.12’de verilmiştir.

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - Va}{VMA} \quad (4.19)$$

VFA: VMA’nın yüzdesi olarak asfalt ile dolu boşluklar,

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

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

Tablo 4.12. Superpave VFA gereksinimleri (Asphalt Institute, 1996).

Tasarım Trafiği (ETDY), milyon	Tasarım VFA, %
<0,3	70–80
0,3–3	65–78
3–10	65–75
10–30	65–75
≥30	65–75

4.2.3. Deneme Karışımlarının Değerlendirilmesi

Yoğurmalı pres ile yapılan sıkıştırma sırasında her dönüş sonrası numune yüksekliği cihazda bulunan sensörler yardımıyla ölçülerek yazılım tarafından kaydedilmektedir. Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (Gmb) numune yüksekliğinden yola çıkılarak belirlenebilmektedir. Herhangi bir yoğurma değeri için hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlık değeri olan Gmb(tahmini), karışım ağırlığının numunenin hacmine bölünmesi ile elde edilir.

$$Gmb(tahmini) = \frac{(Wm / Vmx)}{\gamma_{su}} \quad (4.20)$$

Gmb(tahmini) : Numunenin sıkıştırma sırasındaki hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı,

Wm: Numunenin ağırlığı (gr),

γ_{su} : Suyun yoğunluğu (1 gr/cm³),

Vmx: Numunenin hesapla bulunan hacmi (cm³).

$$Vmx = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0.001 cm^3 / mm^3 \quad (4.21)$$

d: Kalıbın çapı (100 mm veya 150 mm),

h_x: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği (mm),

Hesaplamalarda silindir geometriye sahip sıkıştırılmış numunelerin kenarlarının tam olarak düzgün ve boşluksuz olduğu kabul edilmekte ancak gerçekte boşluklar nedeniyle daha düşük hacimli bir numune elde edilmektedir. Bu nedenle hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı (Gmb(tahmini)) bir düzeltme faktörüyle (C) çarpılarak düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı (Gmb(düzeltilmiş)) elde edilmektedir.

$$C = \frac{Gmb(\text{ölçülen})}{Gmb(tahmini)} \quad (4.22)$$

$$Gmb(düzeltilmiş) = C \times Gmb(tahmini) \quad (4.23)$$

C: Düzeltme faktörü,

Gmb(ölçülen) : Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı,

Gmb(tahmini) : Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı.

Gmb(düzeltilmiş): Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı.

Düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (% Gmm) değeri, düzeltilmiş hacim özgül ağırlığın (Gmb(düzeltilmiş)), ölçülen teorik maksimum özgül ağırlığına (Gmm(ölçülen)) oranlanması ile bulunur.

Superpave hacimsel tasarım kriterleri olan VMA, VFA ve filler oranı, tasarım yoğurma sayısı olan Ndes'de karışımın % 4'lük hava boşluğu içeriğine sahip olması esasına dayanmaktadır. Superpave karışım tasarım yöntemi ayrıca Nmaks, Ndes ve Nini yoğurma

sayılarında da karışım yoğunluğu için kriterler içermektedir. Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (% VMA) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmektedir.

$$Va = 100 - \%Gmm@Ndes \quad (4.24)$$

Va: Toplam hacmin yüzdesi olarak Ndes'deki hava boşluğu,

%Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi.

$$\%VMA = 100 - \left(\frac{\%Gmm @ Ndes \times Gmm \times Ps}{Gsb} \right) \quad (4.25)$$

%VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

%Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi,

Gmm: Maksimum teorik özgül ağırlık,

Gsb: Toplam agreganın hacim özgül ağırlığı,

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agregada içeriği (cm³/cm³).

Bu kısma kadar deneme bitüm içeriğinde hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri değerlendirilmektedir. Hacimsel tasarımda hava boşluğunun %4 olması istenmektedir. Deneme (başlangıç) bitüm içeriğinde genellikle %4 boşluk oranı yakalanamamaktadır. Bu nedenle hesaplamayla tasarım yoğurma sayısında (Ndes) %4 boşluk oranını verecek tahmini bitüm içeriği aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir.

$$Pb(\text{tahmini}) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va)) \quad (4.26)$$

Pb(tahmini) : Karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini asfalt içeriği,

Pbi: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak deneme (başlangıç) asfalt içeriği,

Va: Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (deneme).

Deneme bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin hacimsel özelliklerinden yola çıkarak karışımların tasarım yoğurma sayısında (Ndes) ve %4 hava boşluğuna sahip olması durumundaki hacimsel özellikleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir.

$$\%VMA(tahmini) = \%VMA(başlangıç) + C \times (4 - V_a) \quad (4.27)$$

$\%VMA(başlangıç)$: Deneme asfalt içeriğindeki karışımın agregada boşlukları yüzdesi,

C: Sabit katsayı, hava boşluğu yüzdesi $\% 4$ 'den az ise 0,1; yüksek ise 0,2 alınır.

$$\%VFA(tahmini) = 100 \times \frac{(\%VMA(tahmini) - 4.0)}{\%VMA(tahmini)} \quad (4.28)$$

$$\%Gmm(tahmini)@Nini = \%Gmm(deneme)@Nini - (4,0 - V_a) \quad (4.29)$$

$$\%Gmm(tahmini)@Nmaks = \%Gmm(deneme)@Nmaks - (4,0 - V_a) \quad (4.30)$$

Karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agregada karışımındaki ağırlıkça yüzdesinin ($P_{0,075}$), toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanan efektif asfalt içeriğine ($Pbe(tahmini)$) oranlanması ile filler oranı (DP) hesaplanmaktadır. Bir karışımındaki efektif asfalt bağlayıcı içeriği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır. Filler oranı ise Formül 4.32 ile belirlenmektedir.

$$Pbe(tahmini) = Pb(tahmini) - (Ps \times Gb) \times \left(\frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right) \quad (4.31)$$

Pbe: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak efektif asfalt içeriği,

Pb(tahmini) : Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini asfalt içeriği,

Ps: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak agregada içeriği,

Gb: Asfaltın özgül ağırlığı,

Gse: Agreganın efektif özgül ağırlığı,

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı.

$$DP = \frac{P_{0.075}}{Pbe(tahmini)} \quad (4.32)$$

Başlangıçta belirlenen üç farklı deneme agregada gradasyonu ile başlangıç asfalt içeriklerinde hazırlanan karışımların yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra bu değerler aşağıda tablo halinde verilen şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmaktadır. Tasarım kriterlerine en uygun olan karışım tasarım agregada gradasyonu olarak seçilmektedir. Seçilen üç gradasyonda kriterleri sağlamaması durumunda yeniden farklı deneme agregada gradasyonları belirlenerek bütün işlemler tekrarlanmaktadır.

Tablo 4.13. Superpave hacimsel karışım tasarım kriterleri (Asphalt Institute, 1996).

Tasarım Trafik (ETDY), milyon	Gerekli Yoğunluk (%Gmm)			Mineral Agregadaki Boşluk (VMA), min %					Asfalt ile Dolu Boşluk (VFA), min %	Filler- Asfalt Oranı (DP)
	Nini	Ndes	Nmaks	Nominal Maksimum Agregada Boyutu (mm)						
				37,5	25,0	19,0	12,5	9,50		
<0,3	≤91,5	96,0	≤98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	70–80	0,6–1,2*
0,3–3	≤90,5								65–78	
3–10	≤89,0								65–75	
10–30										
≥30										

* : Agregada gradasyonu yasak bölgenin altından geçiyorsa 0,8–1,6 alınmalıdır.

4.2.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriklerinin Tespit Edilmesi

Hazırlanan deneme agregası karışımlarından tasarım agregası gradasyonu seçildikten sonra, kabul edilen deneme karışımının tahmini asfalt içeriğinde, tahmini asfalt içeriğinin %0,5 ve %1,0 üstündeki yüzdelerde ayrıca tahmini asfalt içeriğinin %0,5 altında olmak üzere en az dört ayrı asfalt içeriğinde, her asfalt içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmaktadır. Bu dört asfalt 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), asfaltla 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 Tablo 4.13'deki değerlerle karşılaştırılmakta ve uygunluğu tespit edilmektedir. Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (N_{maks}) sıkıştırılmakta ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmaktadır.

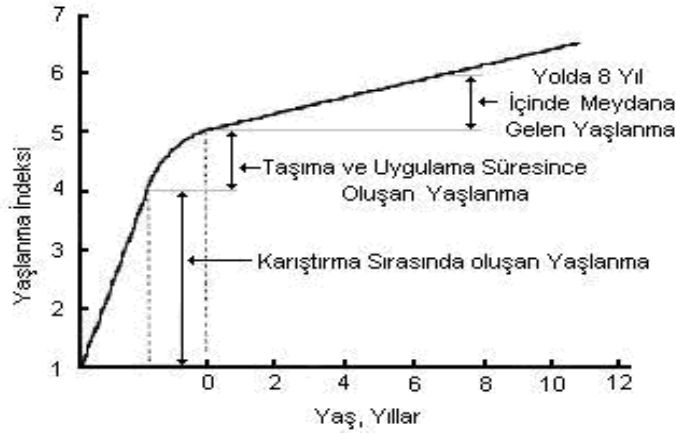
5. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA MEYDANA GELEN YAŞLANMA

Asfalt çimentolarının durabilitesi; yaşlanmanın, sıcaklığın ve yükleme miktarının bir fonksiyonudur. Bitümlü bağlayıcıların çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesine yaşlanma denilmektedir (Şengöz, 2003). BSK yapımı ve hizmet ömrü süresince bitümlü bağlayıcıda meydana gelen yaşlanmaya neden olan iki temel faktör oksidasyon ve bağlayıcıda bulunan hafif bileşenlerin buharlaşmasıdır. Oksidasyon, organik moleküllerden oluşan bitümlü bağlayıcının hidrokarbon bileşenlerinin havanın oksijeni ile birleşmesi sonucu bünyesinde bulunan hidrojen ve karbonun bir kısmını kaybetmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Whiteoak ve Read, 2003). Bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen yaşlanmaya neden olan faktörler ile ilgili geniş bilgi Tablo 5.1’de görülmektedir. Yaşlanma nedeniyle bağlayıcının viskozitesi artmakta dolayısıyla karışımın sertliği artmaktadır. Yaşlanma nedeniyle karışımların kırılabilirliği ve çatlak ilerleyişine karşı dayanımları azalmaktadır (Vallerga, 1981).

Tablo 5.1. Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmasına neden olan faktörler (Traxler, 1963).

Yaşlanmaya Neden Olan Etkiler	Meydana Geliş Sebebi				Meydana Geldiği Yer	
	Süre	Sıcaklık	Oksijen	Güneş Işığı	Yüzeyde	Kütlede
1. Oksidasyon	X	X	X	–	X	–
2. Fotooksidasyon (Direkt ışık)	X	X	X	X	X	–
3. Buharlaşma	X	X	–	–	X	X
4. Fotooksidasyon (Yansıyan Işık)	X	X	X	X	X	–
5. Foto Kimyasal (Direkt Işık)	X	X	–	X	X	–
6. Foto Kimyasal (Yansıyan Işık)	X	X	–	X	X	X
7. Polimerleşme	X	X	–	–	X	X
8. Yapı İçerisinde Gerçekleşen Yaşlanma (Tiksotropi)	X	–	–	–	X	X
9. Yağ Yayılması (Sineresis)	X	X	–	–	X	–
10. Nükleer Enerjideki Değişim	X	X	–	–	X	X
11. Suyun Etkisi	X	X	X	X	X	–
12. Agrega Tarafından Absorbe Edilme	X	X	–	–	X	X
13. Agrega Yüzeyinde Bileşenlerin Absorbe Edilmesi	X	X	–	–	X	–
14. Ara Yüzeyde Meydana Gelen Kimyasal Reaksiyonlar veya Katalizör Etkisi	X	X	–	–	X	X
15. Mikrobiyolojik Bozulma	X	X	X	–	X	X

Bitümlü bağlayıcıda oluşan yaşlanma meydana geliş süresine göre kısa ve uzun dönem olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Kısa dönem yaşlanma, bitümün depolanma, plente taşınma, agregayla karıştırılma, uygulama bölgesine taşınma, serilme ve sıkıştırılma sırasında meydana gelirken uzun dönem yaşlanma yolun servis ömrü boyunca meydana gelmektedir. Yaşlanma derecesini tespit etmek amacıyla yaşlanma indeksi kullanılmaktadır. Yaşlanma indeksi ve zaman arasındaki ilişki Şekil 5.1’de verilmiştir (Whiteoak ve Read, 2003).



Şekil 5.1. Bitümün yaşlanma indisindeki değişimin zamanla ilişkisi (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi yaşlanmanın büyük bir oranı yolun hizmete açılıncaya kadar geçen sürede meydana gelmektedir. Hizmet süresi boyunca meydana gelen yaşlanma ise toplam yaşlanma miktarının yaklaşık % 30’unu oluşturmaktadır. Yaşlanmanın büyük bir çoğunluğu ise karıştırma esnasında meydana gelmektedir (Whiteoak ve Read, 2003). BSK’larda meydana gelen yaşlanma üzerine çalışmalar bağlayıcı ve karışım üzerinde yapılan çalışmalar olarak iki alt grupta incelenmektedir. Yaşlanmanın sadece bağlayıcıda meydana geldiği düşünülmesine rağmen bazı agregat türleriyle bitüm arasında kimyasal bağ oluşması ayrıca bazı agregat türlerinin de zamanla özelliklerinin değişmesi karışım numunelerinin uzun dönem yaşlanma açısından değerlendirilmesi gerektiği gerçeğini ortaya koymaktadır (Bell ve Sosnovske, 1994).

Kısa dönem yaşlanmanın etkisi bağlayıcılar üzerinde RTFO deneyiyle, uzun dönem yaşlanmanın etkisi ise basınçlı yaşlandırma aleti (PAV) deneyi ile laboratuvar ortamına yansıtılabilmektedir. Karışımların kısa dönem yaşlandırılmasında Superpave yöntemine göre karışımların sıkıştırılmadan gevşek halde 4 saat süresince 135°C sıcaklıkta

bekletilmesi tavsiye edilmektedir. BSK'larda meydana gelen uzun dönem yaşlanma, Superpave yönteminde yer almamaktadır. SHRP bünyesinde uzun dönem yaşlanmayı laboratuvar ortamına en uygun şekilde yansıtabilmek amacıyla Bell ve ekibi tarafından yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda kısa süre (135°C'de 4 saat) yaşlandırılmış karışımların sıkıştırıldıktan sonra 85°C'deki hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat (5 gün) bekletilmesinin yoğun gradasyonlu BSK'ların uzun dönem yaşlandırılması için en uygun yöntem olduğu belirlenmiştir (Bell ve Sosnovske, 1994; Bell vd., 1994(a); Bell vd., 1994(b)). BSK'ların standartta belirtilen şekilde 85°C'deki hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat (5 gün) bekletilmesi şeklinde uzun dönem yaşlandırılması ile arazide 7-10 yıllık yaşlanmanın laboratuvar ortamına yansıtılması sağlanmaktadır (Harrigan vd., 1994). Bitümlü sıcak karışımların kısa ve uzun dönem yaşlandırılması ile ilgili yöntem önce AASHTO PP2 geçici standardı ile tanımlanmış, en son hali AASHTO R30-02 "Bitümlü Sıcak Karışımların Koşullandırılması" standardında belirtilmiştir.

Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen yaşlanma, BSK'ların arazideki davranışı doğrudan etkilediğinden üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Bitümlü bağlayıcıda meydana gelen kısa ve uzun dönem yaşlanma ile ilgili çalışmalar 1903 yılından beri devam etmekte olup (Dow, 1903) bu yönde yapılan çalışmalar halen devam etmektedir. Bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlandırılması ile ilgili günümüz şartnamelerinde dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) tavsiye edilmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalarda orijinal bağlayıcılar için uygun olan bu yöntemin bitümün viskozitesinin artmasından dolayı bitüm filminin hareket etmemesi nedeniyle modifiye bitümler için uygun olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle modifiye-RTFOT yöntemi geliştirilmiş olup hala çalışmalar devam etmektedir (Juan ve Xiaoning, 2005). Ayrıca yapılan çeşitli çalışmalarda BSK'ların uzun dönem yaşlandırılmasında kullanılan yöntemin uygun olmadığı belirtilmektedir (Raghavendra vd., 2006). BSK'ların yaşlanmasıyla alakalı bugüne kadar yapılmış olan en detaylı çalışma AASHTO R30-02 standardında belirtildiğinden çalışmada BSK'ların yaşlandırılmasında bu standarttan faydalanılmıştır. Bitümlü sıcak karışımların kısa dönem yaşlandırılması amacıyla sıkıştırılmamış numuneler 135°C sıcaklıktaki etüvde 4 saat bekletildikten sonra sıkıştırılmış, uzun dönem yaşlandırma amacıyla sıkıştırılmış numuneler 85°C'deki hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat (5 gün) bekletilmiştir (Şekil 5.2). Sürenin sonunda etüv kapatılarak kapağı açılmış ve numuneler yerinden oynatılmadan 24 saat bekletilmiş daha sonra deneylere tabi tutulmuştur.



Şekil 5.2. BSK numunelerinin uzun dönem yaşlandırılması

6. TEZ ÇALIŞMASINDA BSK NUMUNELERİNE UYGULANAN DENEY YÖNTEMLERİ

6.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Tez çalışmasında BSK numunelere uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34 standardına göre yapılmıştır. Standartta stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen deformasyon olarak tanımlanmaktadır (TS EN 12697-34, 2007). Standartta 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 ortalanacak biçimde yerleştirilmektedir. Numunenin çenenin alt ve üst parçalarına tam olarak temas ettiği kontrol edilmelidir. İçinde numune bulunan kırma çenesi Marshall stabilite aletine yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yük sırasındaki 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.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (6.1)$$

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 değerlendirilmeden 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 stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir (Zoorob ve Suparma, 2000; Hınıslıoğlu ve Ağar, 2004; Çolak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2009).

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-6, 2011). 24 saat 60°C suda bekletilen numunelerin Marshall değerinin normal Marshall değerine oranlanması ile Kalıcı Marshall Stabilitesi belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değerinin yüksek olması bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olacağını göstermektedir.

6.2. Nem hasarına karşı dayanım deneyi (AASHTO T 283)

Bitüm ile agregası arasındaki adezyon, uzun vadede kaplamanın performansının yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biridir. Bitüm ile agregası arasına giren su adezyonun azalmasına dolayısıyla BSK kaplamalarda erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına agregası özellikleri,

bitüm özellikleri, çevresel etkenler, trafik, drenaj ve yapım aşamasındaki özen gibi birçok parametre etki etmektedir.

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 $7 \pm 0,5$ 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. Yaklaşık 5 dakikalık 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 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenmektedir.

$$J = B' - B \quad (6.2)$$

J: Absorbe su hacmi (cm^3)

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

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

$$S' = J / I * 100 \quad (6.3)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (6.4)$$

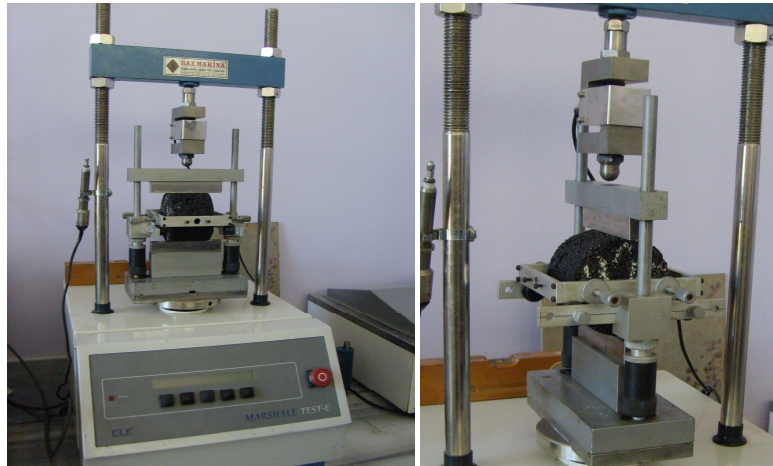
S' : Doygunluk derecesi (%)

I : Hava boşluğu hacmi (cm^3)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm^3)

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 6.3). Standarda göre numunelerin öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat ardından 60°C suda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürenin ardından numuneler poşet ve plastik filmden 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 6.3).



Şekil 6.3. 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.

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (6.5)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (6.6)$$

6.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirekt çekme ve burulma deneyleri uygulanabilmektedir. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Diametral (çap doğrultusunda yük uygulanan) deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Kök, 2007). Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir (Zoorob VE Suparma,2000). BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. ITSM deney düzeneği

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 20°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilir. 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 sonucu aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R + 0,27)}{LH} \quad (6.7)$$

Burada S_m , indirekt çekme rijitlik modülü (MPa), F maksimum dikey yük (N), H 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm), L ortalama numune yüksekliği (mm), R ise poisson oranıdır (0,35).

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.

6.4. 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 belirli bir oranda kaplamanın yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Laboratuvar ortamında bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla geliştirilmiş birçok deney bulunmaktadır. Bu deneyler, gerilme ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Deney türüne göre yükleme şekli, numune geometrisi ve numunede oluşan gerilme artışı farklılık gösterdiğinden yapılan bu deneylerde yorulma ömürleri farklılık gösterebilmektedir. Yorulma ömrü üzerine yapılan çalışmalar sonucunda deformasyon kontrollü deneylerden elde edilen yorulma ömürlerinin gerilme kontrollü deneylere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvar ortamında belirlenen yorulma ömrünün arazide tespit edilen yorulma ömründen çok daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yorulma ömrünün gerilme dağılımının ve kaplamanın sınır şartlarının bir fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır (Ghile, 2006). Buna rağmen yorulma deneyleri, farklı karışımların yorulma performanslarını karşılaştırmak için imkan sağlamaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyinde (İÇYD), numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekrür sayısı olarak tanımlanan yorulma ömrü belirlenmektedir. Her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmaya neden olan yük tekrür sayıları belirlenmektedir (N_f). Böylece N_f ile gerilme (σ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya aşağıdaki Wöhler formülünden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (6.8)$$

Burada; N_f , yorulma ömrünü ifade eden yük tekerrür sayısını, k_1 ve k_2 malzeme karakteristiklerini, σ uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir (Molenaar ve Medani, 2000). Yorulma denklemlerinden elde edilen k_1 ve k_2 katsayıları, karışımların yorulma karakteristikleri üzerinde katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Üssel katsayı olan k_2 'nin büyük olması yorulma çizgisi eğiminin daha yatık olduğunu göstermektedir. Karşılaştırılan iki karışımın k_1 değerlerinin aynı olması durumunda k_2 katsayısı yüksek olan karışımın yorulma ömrü daha uzun olmaktadır. Diğer taraftan k_2 değerlerinin eşit olması, karışımların yorulma ömrü eğrilerinin birbirine paralel olduğunu göstermekte olup daha düşük k_1 değerine sahip karışımın yorulma ömrü daha düşük olacaktır (Simms, 1998).

Asfalt karışımlarda diğer birçok malzemede olduğu gibi gerilme veya birim deformasyon azaldıkça yorulma ömrü düzenli olarak artmaktadır. Çekme deformasyonlarının azalması malzemenin tamamen elastik davranış göstermesine (çok düşük sıcaklıklarda veya çok hızlı yüklemelerde) dolayısıyla yorulma çatlaklarının oluşmamasına neden olmaktadır. Genellikle yorulma limitinin altındaki gerilmeler sadece elastik deformasyonlara neden olmaktadır. İndirekt çekme yorulma deneyinde, plastik şekil değiştirmeler yorulma deformasyonuna ve buna bağlı olarak yorulma çatlaklarına neden olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımını belirlemek amacıyla yapılan deneyler eğilme deneyleri, direkt veya indirekt çekme deneyleri şeklinde uygulanabilmektedir. Bu deneylerde değişik geometrilere sahip numunelere sinüsoidal ve haversine gibi farklı kontrollü yükleme çeşitleri uygulanabilmektedir. TS EN 12697-24 standardında yer alan ve numune geometrisi, yükleme şekli ve test aparatına göre değişen yorulma deneyleri; trapez geometrili numuneler üzerinde uygulanan iki nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan iki nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan üç nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan dört nokta eğilme deneyi ve silindirik numuneler üzerinde uygulanan indirek çekme deneyidir (TS EN 12697-24, 2004). Deneyler deformasyon kontrollü olarak uygulanabildiği gibi yük kontrollü olarak yapılabilmektedir. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneyleri arasındaki farklar Tablo 6.1'de verilmiştir (Francken, 1998).

Tablo 6.1. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması (Francken, 1998).

	Yük kontrollü deney	Deformasyon kontrollü deney
Deney süresince değişme	Deplasmanın artması	Yükün azalması
Genel kırılma kriteri	Numunenin kırılması	Başlangıç rijitliğinin yarısının azalması
Sonuçlarının dağılımı	Düşük	Yüksek
Sıcaklığın artması ($> 0^{\circ}\text{C}$)	Yorulma ömrünün azalması	Yorulma ömrünün artması
Rijitlik modülünün artması	Yorulma ömrünün artması	Yorulma ömrünün azalması
Bekleme süresinin (resting time) etkisi	Fazla	Az
Çatlak gelişiminin süresi	Kısa	Uzun
Deney frekansının artması	Artma	Azalma
Hasarın gelişimi	Hızlı	Orta

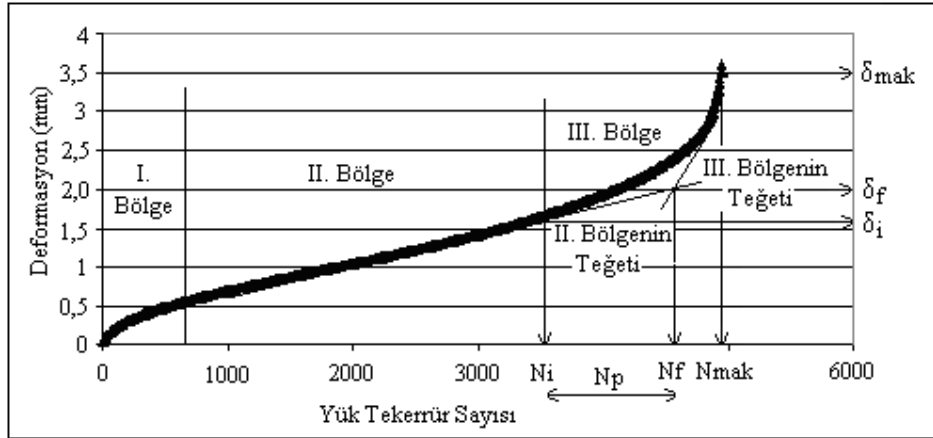
İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı yada araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme veya deformasyon kontrollü olarak tekrarlı yükleme altında bitümlü karışımların yorulma dayanımını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. 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 6.5'te 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 kırılincaya kadar devam etmektedir.



Şekil 6.5. Yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 6.6’da temsili olarak görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekerrür 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 6.6. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi

I. bölgede numunedeki boşluklardan dolayı önce aşırı deformasyon değişimi meydana gelmekte ardından eksenel deformasyon oranı azalmaktadır. II. bölgede sabit oranda deformasyon söz konusu olup yaklaşık olarak lineer değişim meydana gelmektedir. III. Bölgede çatlak oluşumu başlamıştır. Bu bölgede deformasyon değişimi artmaktadır (Ghile, 2006). Çatlak ilerleme oranı (r_p), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili formül aşağıda verilmiştir (Subagio vd., 2003).

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (6.9)$$

Burada;

r_p : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

δ_f : Bozulma anında toplam deformasyon (mm)

δ_i : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

6.5. Tekrarlı Sünme Deneyi

Tekerlek izi oluşumu, tekrarlı trafik yükleri altında üstyapıdaki tabakaların her birinde kalıcı deformasyonun kademeli olarak artması olarak tanımlanmaktadır (Tayfur vd., 2007). Kalıcı deformasyon açısından en önemli tabaka ise trafik yüklerine direk maruz kalan kaplama tabakasıdır (Khodaii ve Mehrara, 2009). Kalıcı deformasyonlar, kaplamanın servis ömrünün farklı dönemlerinde oluşabilmektedir. Temel olarak kalıcı deformasyon için iki farklı oluşum mekanizması söz konusudur. Birincisi kaplama servis ömrünün ilk yıllarında meydana gelen kalıcı deformasyondur. Bu tür bozulmalar genellikle kaplamanın yapımı esnasında yeterli sıkışmanın sağlanamaması sonucu oluşan konsolidasyondan kaynaklanmaktadır. Diğer tür kalıcı deformasyonlar ise ikincil veya kayma kalıcı deformasyonu olarak adlandırılmaktadır. Arazide görülen kalıcı deformasyonların genellikle ikincil olduğu belirlenmiştir. Birinci tür bozulmalarda deforme olan kısım

kaplamanın ilk kotundan daha düşük bir kota inerken ikinci tür bozulmalarda deforme olmuş yüzey tekerleğin geçmiş olduğu alanın yan tarafından yükselmektedir (Alavi vd., 2011).

Bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla en sık kullanılan deneylerden biri tekrarlı sünme deneyidir. Bu deney 1970'lerin ortalarından beri kaplama malzemelerinin kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu deneyin diğer deneylere göre başlıca tercih edilme nedenleri kolay olması ve kalıcı deformasyon oluşumu ile tutarlı bir ilişkiye sahip olmasıdır (Alavi vd., 2011). Bu deneyde sabit bir değerdeki yük, laboratuarda üretilen yada araziden alınan silindirik numunenin yüzeyine belirli periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır (Şekil 6.7). Numunenin yüzeyine konulan metal plak üzerine dik olarak yerleştirilen LVDT'ler yardımıyla her bir yük tekrarı sonucu oluşan plastik ve elastik deformasyonlar belirlenebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Aşağıdaki formüller yardımıyla sünme ve esneklik modülleri belirlenebilmektedir (ELE, 1994).

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (6.10)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / (G - (L3_n - L1)) \quad (6.11)$$

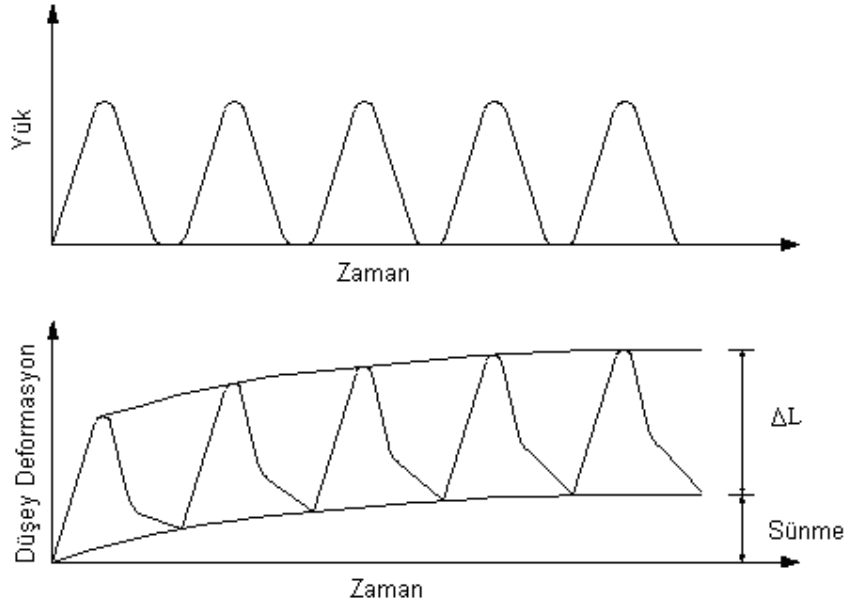
$$\sigma = F / A \quad (6.12)$$

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (6.13)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (6.14)$$

Burada; ε_c , toplam plastik (kalıcı) eksenel birim şekil değiştirme, ε_r , toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme, E_c , sünme modülü (sertliği), E_r , esneklik (rezilyans) modülü (sertliği), G , numunenin başlangıç yüksekliği (mm), $L1$, LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm), $L2_n$, n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik + plastik), $L3_n$, $(n+1)$. darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik), σ , maksimum düşey gerilme (kPa), F , maksimum düşey yük (N), A , numunenin kesit alanıdır (cm^2). Formül 6.13 ve 6.14'te görüldüğü üzere plastik ve elastik birim şekil değiştirme ile sünme ve esneklik modülü değerleri ters orantılıdır. Plastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda sünme modülü düşük, elastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda da esneklik modülü düşük olacaktır. Dolayısıyla yüksek sünme modülü

değerleri bitümlü sıcak karışım numunesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımının yüksek olacağını göstermektedir. Yüksek esneklik modülü değerleri ise bitümlü sıcak karışımın daha az elastik davranış sergileyeceğini göstermektedir.



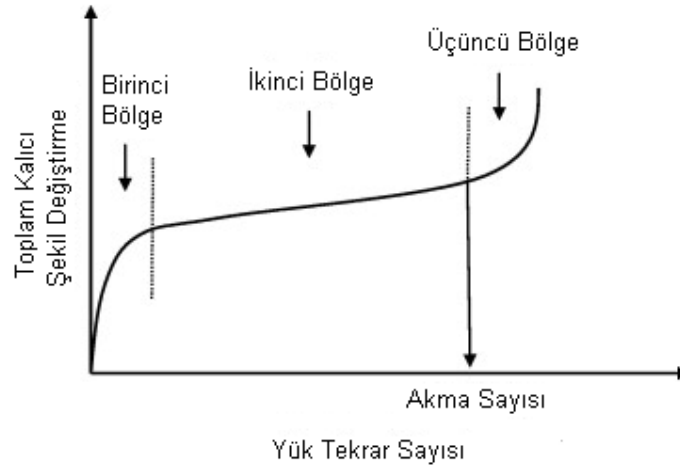
Şekil 6.7. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi

Tekrarlı sünme deneyi, UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır Şekil 6.8’de deney düzeneği görülmektedir. ITSM ve indirekt çekme yorulma deneylerinde olduğu gibi deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 40°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Deney öncesinde sıcaklığın numune bünyesine tam olarak nüfus etmesini sağlamak için numuneler en az 4 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme, ön yükleme süresi, ön yükleme gerilmesi, yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak LVDT’ler ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deneyde öncelikle girilen süre ve gerilme değerinde ön yükleme uygulanarak birincil oturmanın oluşması amaçlanmaktadır. Ön yükleme süresinin sonunda normal gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanarak numuneler kırılncaya kadar deney devam etmektedir.



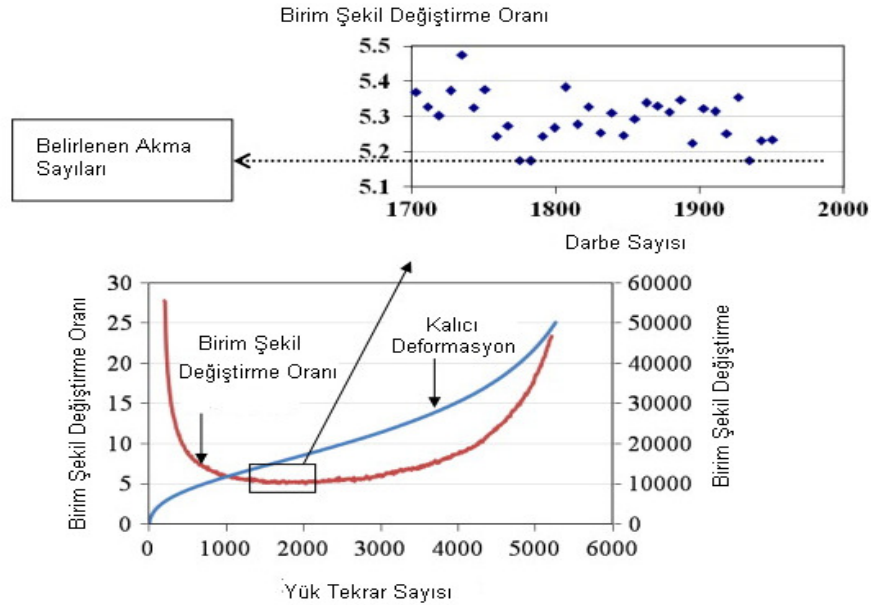
Şekil 6.8. Tekrarlı sünme deney düzeneği

Numunede bozulma meydana gelinceye kadar devam eden deney sonucunda Şekil 6.9’da görüldüğü gibi yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 6.9’da görüldüğü üzere eğri üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede, numunenin sahip olduğu boşluklardan dolayı konsolidasyon meydana gelerek bu bölgede karışımın hacmi azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta önemli oranda artmakta daha sonra azalmaktadır. İkinci bölgede uygulanan tekrarlı yük sonucu toplam şekil değiştirmede lineere yakın bir değişim gözlenmektedir. Üçüncü bölge ise ikinci tür kalıcı deformasyonun olduğu bölge olup bu bölgede kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir. Yorulma deneyinde de görüldüğü üzere üç aşamalı kalıcı deformasyon davranışı bitümlü karışımların temel özelliğidir. Witczak’ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı “akma sayısı” olarak isimlendirilmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar sonucunda kalıcı birim şekil değiştirme ve akma sayısı ile tekerlek izi oluşumu arasında bir bağlantı olduğu, akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımın bir göstergesi olduğu belirlenmiştir (Witczak vd., 2002).



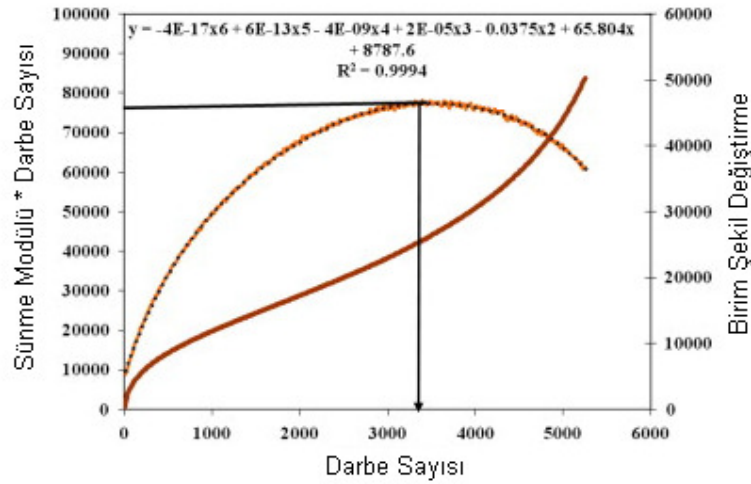
Şekil 6.9. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi

Akma sayısı değeri, Şekil 6.9’da görülen plastik deformasyon – yük tekrar sayısı eğrisinde eğimin minimum olduğu nokta olarak alınmaktadır. Fakat bu yöntemde birçok minimum eğim değerini veren noktanın olması durumunda Şekil 6.10’da görüldüğü üzere akma sayısı değerini bulmak zorlaşmaktadır (Goh ve You., 2009).



Şekil 6.10. Akma sayısının bulunmasında karşılaşılan zorluklar (Goh ve You., 2009).

Akma sayısını bulmak için diğer bir yöntem Bausano ve Williams tarafından geliştirilmiştir (Bausano ve Williams, 2007). Bu yöntemde yatay ekseninde darbe sayısı düşey ekseninde ise sünme modülü ile darbe sayısının çarpımı olacak şekilde grafik çizilmekte ve grafiğin pik noktası akma sayısı olarak bulunmaktadır (Şekil 6.11). Bausano ve Williams (2007), bu yöntemle bulunan akma sayısı değerlerinin daha tekrarlanabilir olduğunu, eğim yardımıyla bulma yöntemine göre değişme oranının daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.



Şekil 6.11. Akma sayısının bulunması (Bausano ve Williams, 2007).

6.6. Kırılma Mekaniği Yaklaşımlarıyla BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi

Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan bozulmalar; şekil değiştirme, kırılma (çatlama) ve ayrışma olarak üç ana grupta toplanabilir (Hınıslioğlu ve Hattatoğlu, 2003). Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan çatlaklar ise trafik etkisine bağlı olan ve olmayan çatlamlar olarak iki kısımda incelenmektedir. Çatlak oluşumuna üstyapı tabakalarının kalınlığı ve bitümlü sıcak karışımların malzeme özellikleri gibi birçok faktör etki etmektedir (Jajliardo, 2003; Garcia, 2002). Trafik etkisine bağlı çatlamlar ya ağır dingil yüklerinin tek veya birkaç kez geçmesi sonucunda yada taşıtların tekrarlı olarak kaplamanın üzerinden geçmeleri sonucunda oluşmaktadır. Taşıtların çok sayıda geçmesi sonucu oluşan çatlaklara yorulma çatlakları denilmektedir. Birinci durumda çatlak, ağır dingil yükünün oluşturduğu gerilmenin asfalt betonunun eğilme-çekme direncini aşmasından kaynaklanmaktadır.

Yorulmada ise dingil yüklerinin tekrarlı geçişi sonrasında oluşan kalıcı deformasyonların birikimiyle yorulma çatlakları oluşmaktadır (Hınıslioğlu ve Hattatoğlu, 2003). Çatlamalar, trafik yüklerine bağlı olmadan çevre etkisi, sıcaklık ve nem etkisiyle de oluşabilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan çatlamalar;

- Timsah sırtı çatlaklar (yorulma çatlakları)
- Büzülme çatlakları
- Kenar çatlakları
- Derz çatlakları
- Enine çatlaklar
- Yansıma çatlakları
- Öteleme çatlakları şeklinde sınıflandırılmaktadır (Ağar ve Umar, 1991; KGM, 2008).

Karayollarında oluşan çatlaklar nedeniyle kırılma mekaniği prensiplerinin bitümlü sıcak karışımlara uygulanması üzerine son dönemde birçok çalışma yapılmaktadır. Kırılma, malzemelerin gerilme altında birden fazla parçaya ayrılmasıdır. Kırılmanın türü malzemeden malzemeye değişir ve genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma başlıca iki safhadan oluşur. Birinci safha “çatlak teşekkülü”, ikinci safha ise “çatlağın ilerlemesi”dir (Özdemir, 2006). Makroskobik açıdan kırılma tipleri gevrek, sünek ve sürüntü kırılmasıdır. Gevrek kırılmalarda hiçbir plastik deformasyon meydana gelmeden kırılma oluşmaktadır. Sünek malzemelerde ise kırılmadan önce önemli oranda plastik deformasyon meydana geldikten sonra malzeme kırılmaktadır. Sürüntü kırılmasında ise yüksek sıcaklıklarda sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılma meydana gelmektedir. Makroskopik açıdan bakıldığında, sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur, bu sebeple sünek kırılmaya benzer. Mikroskobik açıdan ise; sürünme kırılması, sünek kırılmadan farklıdır (Özdemir, 2006). Taneleri kesip kesmemeye göre ise intergranüler (taneler arası) kırılma ve transgranüler (taneleri keserek) kırılma olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Kırılma mekaniği ise malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yığılmasını arttıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceleyen bir bilim dalıdır (Alyamaç, 2008). Kırılma mekaniğinin temelleri, 1920’li yıllarda malzemelerde oluşan çatlakların ilerleyişini açıklamak amacıyla Griffith tarafından atılmıştır. Griffith enerji dengesine dayalı olarak kırılma malzemeler için kırılma

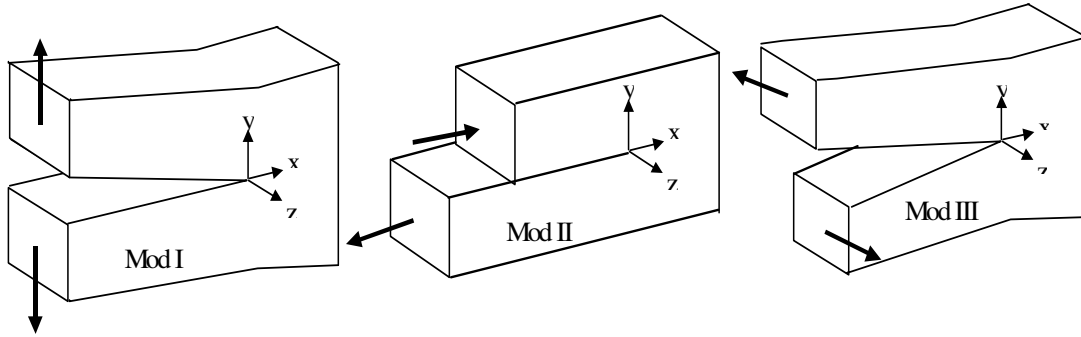
mekanikini formüle etmiştir. Griffith, potansiyel enerjinin cismin yüzey enerjisinden büyük olması durumunda çatlak boyutunun artacağını ifade etmiştir. 1957’de Irwin kırılma mekanikinde yeni bir dönem başlatmıştır. Griffith’in teorisi cam gibi tam gevrek malzemelerde çatlak yayılması için gerekli gerilmeyi belirlemesine rağmen çatlak yayılmadan önce veya sonrası için herhangi bir bilgi vermemektedir. Irwin, teoriyi plastik şekil değiştirme gösteren malzemeleri de içine alacak şekilde geliştirmiş, daha sonra sırasıyla çekme, kesme ve burulma durumlarına karşılık gelen üç yükleme durumu Mod I, Mod II ve Mod III genel kırılma modlarını (Şekil 6.12) ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanını ortaya koymuştur (İnce, 1998).

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (6.15)$$

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (6.16)$$

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (6.17)$$

Denklemlerde σ , malzemeye uygulanan çekme gerilmesini, τ , kayma gerilmesini ve a yarı çatlak uzunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 6.12. Kırılma modları

Gerilme şiddet çarpanı (K), geometriye ve yükleme durumuna bağlı bir sabittir. Yani her malzeme aynı geometriye ve yükleme durumuna maruz kalırsa bu değer sabit olacaktır. Dolayısıyla gerilme şiddet çarpanı bir malzeme sabiti değildir. K, belirli bir kritik değer olan K_c değerine ulaştığında kırılma tokluğu veya kritik gerilme şiddet çarpanı adını almakta ve bu değer her malzeme için farklı bir değer olmaktadır.

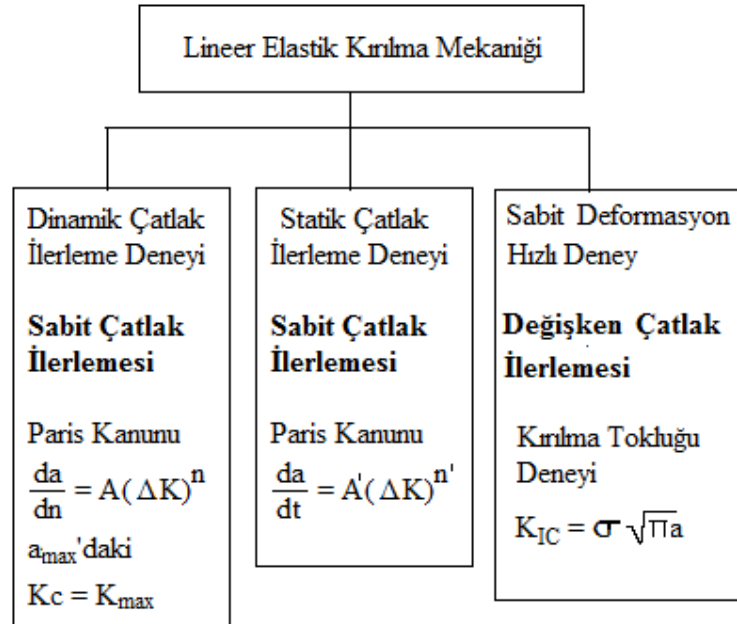
Şekil 6.12’de görülen Mod I kırılma, çatlak düzlemi boyunca uygulanan yükler sonucu oluşmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yükleri ve termal gerilmeler sonucunda bu

tür kırılmalar meydana gelmektedir. Mod II kırılma aynı zamanda düşey yönde kesmeye dayanım modu olarak isimlendirilmekte olup gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla x eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yüklerinden ötürü bu tip kırılmalar oluşabilmektedir. Mod III kırılmada burulma etkisi söz konusu olup gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla z eksenine doğrultusunda, çatlakla dip kenarına paralel olarak etki etmektedir. Bu tip kırılma bitümlü sıcak karışımlarda ihmal edilebilmektedir (Hajj vd., 2008). Mod I durumu için kritik gerilme şiddet çarpanı aşağıdaki formülle belirlenebilmektedir.

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (6.18)$$

Burada K_{IC} , kritik gerilme şiddet çarpanını σ , malzemeye uygulanan çekme gerilmesini a , yarı çatlak uzunluğunu ve $f\left(\frac{a}{w}\right)$ numune boyutları ile ilgili geometrik faktörü ifade etmektedir.

Irwin'in ortaya koyduğu çalışmalar lineer elastik kırılma mekaniğinin temelini oluşturmuştur. Bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği çeşitli deney yöntemleriyle uygulanabilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyi, statik çatlak ilerleme deneyi ve sabit deformasyon hızlı deney ile bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği uygulanabilmektedir (Şekil 6.13) (Molenaar, 2003).



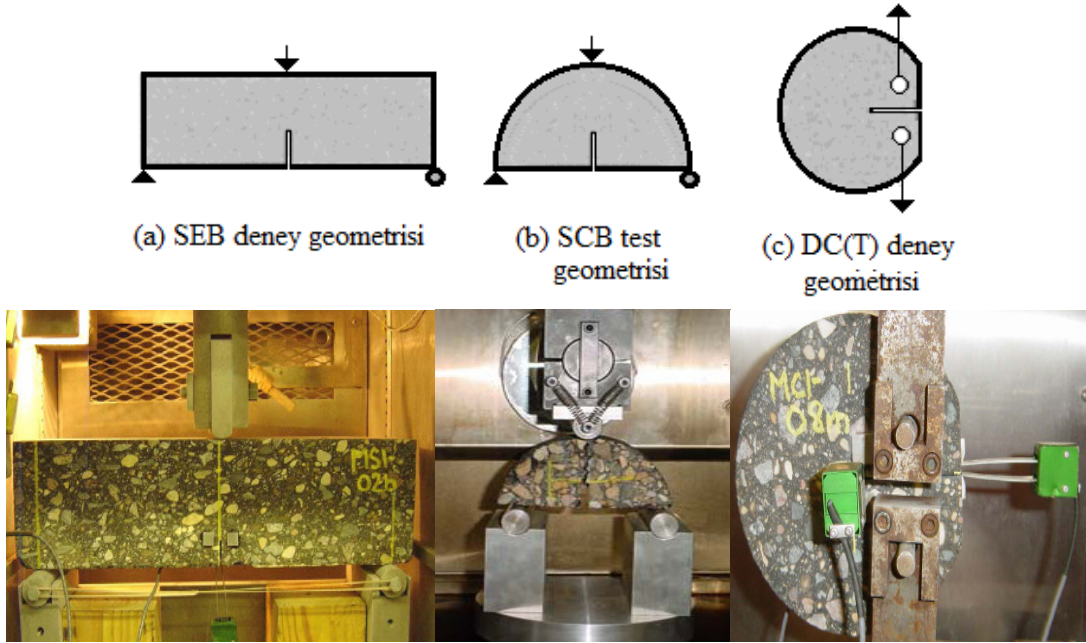
Şekil 6.13. BSK'lara uygulanan lineer elastik kırılma mekaniği deneyleri (Molenaar, 2003).

Dinamik çatlak ilerlemesi deneyinde önceden çentik açılmış numuneye periyodik olarak yük uygulanmaktadır. Sabit deformasyon hızlı deneyde adından da anlaşılacağı gibi sabit deformasyon hızında numuneye yük etki ettirilmektedir. Kırılma tokluğu deneyi ve çekme dayanımı deneyleri olmak üzere iki farklı sabit deformasyon hızlı deney bulunmaktadır. Kırılma tokluğunu belirlemek için uygulanan deneylerde numunelere çentik açılmakta, çekme deneylerinde ise numuneler çentik açılmadan doğrudan deneye tabi tutulmaktadır. Özel bir deney olan statik çatlak ilerleme deneyinde önceden oluşturulmuş çatlğa sahip olan numuneye sabit çatlak ilerlemesi sağlayacak şekilde yük uygulanmaktadır. Şekil 6.13'te görüldüğü üzere dinamik çatlak ilerleme deneyinde çatlak ilerlemesi karakterize edilirken sabit deformasyon hızlı deney ile kırılmaya karşı dayanım belirlenebilmektedir. Çatlak ilerlemesi deneyinde çatlaktaki ilerleme sabittir. Kırılma tokluğu deneyinde çatlaktaki açılma düzenli değildir. Dinamik çatlak ilerleme davranışı, Paris kanunu ile karakterize edilebilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyinde A ve n sabitler olup kritik gerilme şiddet çarpanı deney sırasındaki gerilme ve çatlak ilerleyişinden elde edilmektedir. Çatlak ilerleme deneyleri zor ve pahalı ekipmanlar gerektirdiğinden asfalt karışım dizaynı gibi rutin uygulamalar için uygun değildir. Paris kanununa uygun çatlak ilerleme deneyleri yerine kırılma tokluğu yönteminin kullanılması daha kolay ve etkin bir yöntemdir.

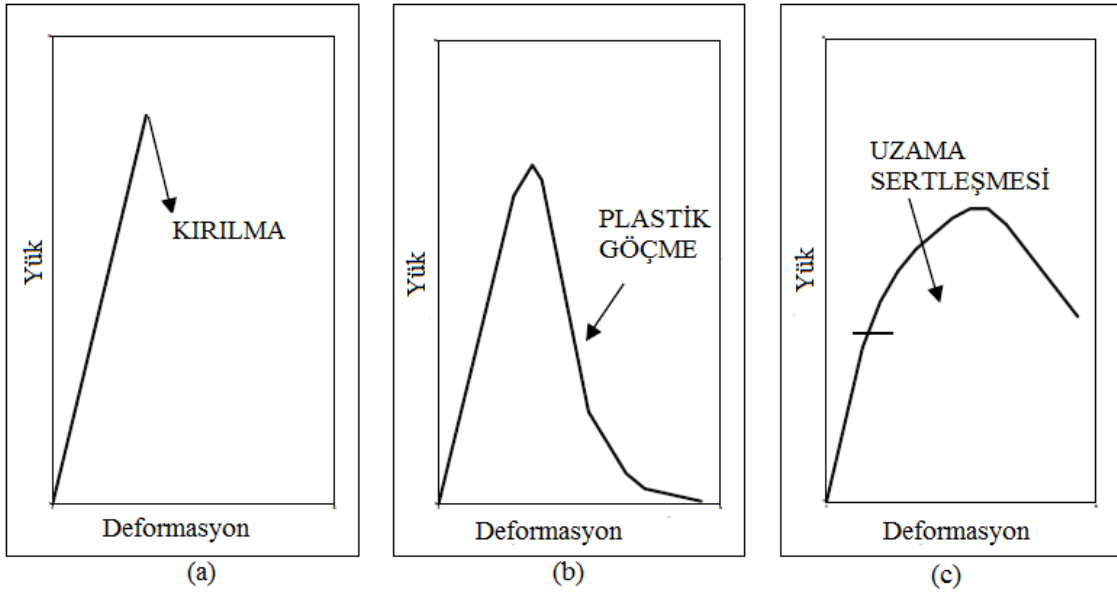
Sabit deformasyon hızlı deneyde farklı numune geometrileri kullanılabilmektedir. Şekil 6.14'te en sık kullanılan numune geometrileri gösterilmiştir. Kiriş numuneler hazırlanması zor olması ve kiriş boyutları için herhangi bir standart bulunmaması gibi dezavantajlara sahiptir (Wagoner vd., 2005). Disk şeklinde çekme deneyinde de numunenin kesilmesinde ve delik açılmasında zorluk yaşanmaktadır. Yarım daire eğilme deneyinde numuneler hem arazide hem de laboratuarda kolayca elde edilebilmektedir. Ayrıca hazırlanma sırasında numunede meydana gelen homojenliğin azalması ihtimali numunenin ortadan ikiye bölünmesi ile azalmaktadır (Huang vd., 2005). Numunedeki çentiğin açısına bağlı olarak Mod I ve Mod I ile Mod II türü kırılmanın birlikte olduğu durumlar için kritik gerilme şiddet çarpanı değerleri belirlenebilmektedir (Marasteanu vd., 2004).

Bitümlü sıcak karışımlar sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olarak elastik ve viskoz davranış gösterebilmektedirler. Normal şartlarda ise bitüm viskoelastik davranış göstermektedir. Yarım daire numunelerde sıcaklıkla yük-deformasyon eğrisinin değişimi Şekil 6.15'te verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu başlıca üç yük-deformasyon diyagram şekli olduğu belirlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda (1°C veya daha düşük) asfalt karışımlar tamamen elastığe yakın davranış sergilerler. Bu nedenle uygun yükleme hızlarında 1°C

veya daha düşük sıcaklıklarda lineer elastik kırılma mekaniği bitümlü sıcak karışımlara uygulanabilmektedir.



Şekil 6.14. Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri (a) Tek çentikli kiriş eğilme deneyi (b) Yarım daire eğilme deneyi (c) Disk şeklinde numune çekme deneyi (Wagoner vd., 2005).



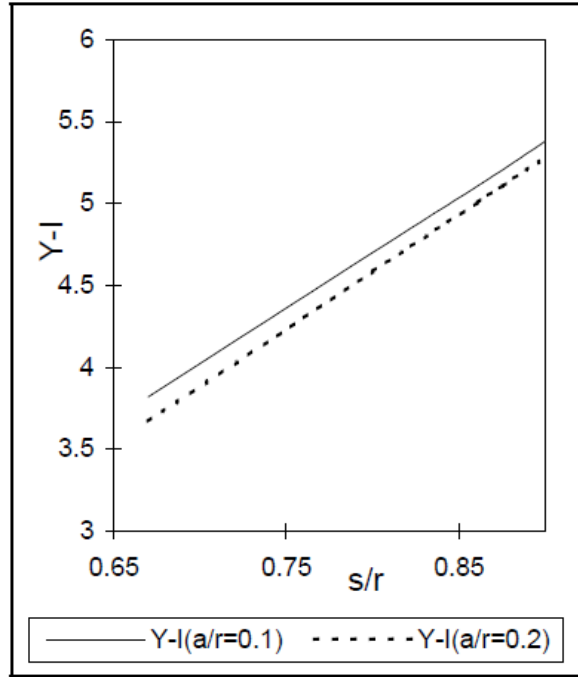
Şekil 6.15. SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon diyagram türleri (a) -10°C veya 1°C sıcaklıktaki elastik kırılma (b) 15°C sıcaklıktaki plastik göçme (uzama sertleşmesi yok) (c) 25°C veya daha yüksek sıcaklıkta oluşan uzama sertleşmesi (Molenaar, 2003).

Lim ve diğ. tarafından yarım daire numune şekline sahip bitümlü sıcak karışımlar üzerinde lineer elastik kırılma mekaniğini (LEKM) uygulanmıştır (Lim ve diğ., 1993). Yapılan çalışma sonucunda Mod I kırılma için kritik gerilme şiddet çarpanının ($N/mm^{3/2}$) aşağıdaki formül yardımıyla belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

$$K_{IC} = \sigma_0 \sqrt{\pi a Y_I} \quad (6.19)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{BD} \quad (6.20)$$

Burada P_0 , uygulanan maksimum yükü (N) B, numune yüksekliğini (mm) D, numune çapını (mm) ifade etmektedir. Y_I değeri Lim ve diğ. tarafından belirlenerek grafik halinde verilmiştir (Şekil 6.16). Şekilde 2S mesnetler arası yatay açıklığı, 2r numune çapını (mm), a çentik boyunu (mm) ifade etmektedir.



Şekil 6.16. Y_I değerinin belirlenmesi (Lim ve diğ., 1993).

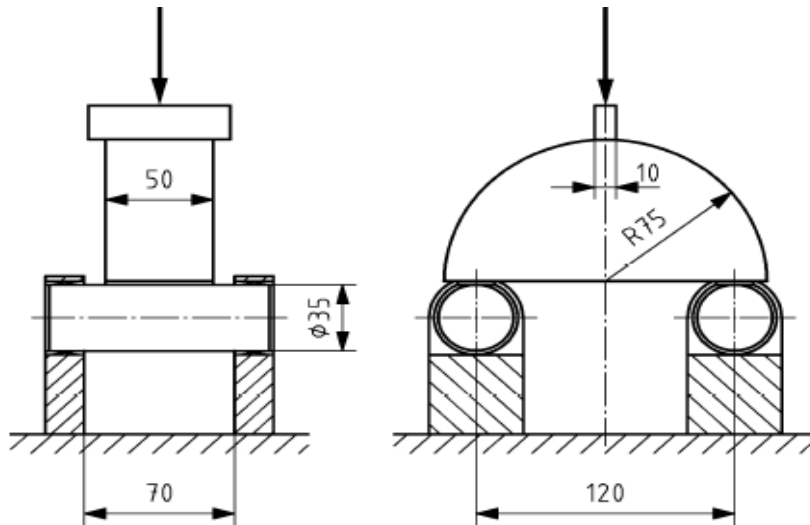
Hoffman ve ekibi, yapmış oldukları çalışmada deney sıcaklığı olarak $0 \pm 1^\circ C$ 'yi ve 5,1 mm/dak yükleme hızını kullanarak bitümlü sıcak karışımlar üzerinde yarım daire eğilme deneyini uygulamışlardır (Hoffman vd., 2003). Aşağıdaki formül yardımıyla kritik gerilme şiddet çarpanı (K_{IC}) değerlerini belirlemişlerdir.

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (6.21)$$

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (6.22)$$

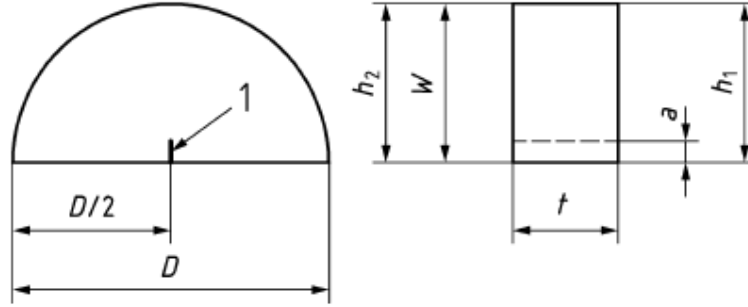
$$f\left(\frac{a}{w}\right) = -0,623 + 29,29 * \left(\frac{a}{w}\right) - 171,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 457,1 * \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 561,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^4 + 265,54 * \left(\frac{a}{w}\right)^5 \quad (6.23)$$

Bitümlü sıcak karışımların Lineer Elastik Kırılma Mekanikği'ne göre değerlendirilmesiyle ilgili Bakker tarafından Hollanda'da yapılan çalışmalarda farklı bitümler içeren araziden alınan ve laboratuarda hazırlanan numuneler üzerinde yarım daire eğilme deneyleri uygulanmış ve bu deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak EN 12697-44 standardı hazırlanmıştır (Bakker, 2001). Ağustos 2010'da standartlaşan deneyde yarım silindir şeklindeki deney numunesinin alt yüzeyinin ortasına çentik açılmakta ve üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmaktadır. Deney süresince deformasyon 5 mm/dak sabit hızla artmaktadır. Standarda göre maksimum yük, malzemenin çatlak ilerleyişine karşı dayanımıyla doğrudan ilişkilidir. Deney aparatları ve numune şekli ile ilgili örnek bir resim aşağıda verilmiştir (EN 12697-44, 2010).



Şekil 6.17. Yarım daire eğilme deney düzeneği

Deney araziden alınan veya laboratuarda hazırlanan numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Numuneler 150 ± 1 mm çapında ve 50 ± 3 mm kalınlığında kesilmektedir. Kesme işlemi sırasında yüzeylerin düzgün ve birbirine paralel olmasına dikkat edilmelidir. Ardından numuneler ortadan ikiye bölünerek yarım daire şeklinde iki numune elde edilmektedir. Yarım daire numunelerin düz kısmının ortasına genellikle $0,35 \pm 0,1$ mm genişliğinde ve 10 ± 1 mm yüksekliğinde çentik açılmaktadır (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Numuneye çentik açılması

Deney sırasında numune kuru olmalıdır. Kesme işlemi su ile yapıldığı için numune kesme işleminden hemen sonra kullanılmamalı 15°C 'den daha düşük bir sıcaklıkta düz bir yüzeyde bekletilmelidir. Numuneler havada kurutulmalı, 30 dakika içinde ağırlık değişimi 0,1 gr.'dan az olduğunda numuneler deney işlemlerine tabi tutulmalıdır. Şekil 6.18'de görülen h_1 ve h_2 numune yükseklikleri arasındaki fark 0,5 mm.'den az olmalı, fazla olan numuneler kullanılmamalıdır. Aynı şekilde düzgün yüzeyin iki uç noktasından ölçülen taban kalınlıkları arasındaki fark 0,5 mm.'den fazla ise numune kullanılmamalıdır.

Numune, genellikle kullanılan deney sıcaklığı olan $0 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta en az 4 saat bekletilmelidir. Sürenin sonunda numune iklimlendirme kabininden çıkarılarak deney düzeneğine yerleştirilmeli, kısa bir süre içinde numunenin mesnetler üzerinde ortalanması sağlanmalıdır. $5 \pm 0,2$ mm/dak hızla yükleme yapılarak düşey deformasyonun 0,01 mm hassasiyetle yükün ise 1 N hassasiyetle kayıt altına alınması sağlanmalıdır. Numunenin iklimlendirme kabininden çıkarılışı ile numunenin kırılması 60 saniye içerisinde tamamlanmalıdır. Çatlak ilerleyişi numunenin merkezinden ± 15 mm den fazla saparsa numune geçersiz sayılmalıdır.

Deney sonucunda maksimum yük (F_{mak}) ve maksimum düşey deformasyon (ΔW) değerleri elde edilmektedir. Maksimum yük anındaki şekil değiştirme aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

$$\epsilon_{mak} = \frac{\Delta W}{W} * 100 \quad (6.24)$$

Burada W, numunenin yüksekliğini (mm) ΔW , maksimum yük sırasındaki deformasyonu (mm) ϵ_{mak} , maksimum birim şekil değiştirmeyi (%) ifade etmektedir. Kırılmaya neden olan maksimum gerilme (σ_{mak}) aşağıdaki formül ile belirlenmektedir.

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (6.25)$$

Burada D, numunenin çapını (mm), t, numunenin kalınlığını (mm), F_{mak} , maksimum yükü (N), σ_{mak} , maksimum gerilmeyi (N/mm²) ifade etmektedir. Kırılma tokluğu (K_{IC}) ise aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

$$K_{IC} = \sigma_{mak} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6.26)$$

Burada W, numune yüksekliğini (mm) a, çentik yüksekliğini (mm) σ_{mak} , maksimum gerilmeyi (N/mm²), K_{IC} kırılma tokluğunu (N/mm^{3/2}), $f\left(\frac{a}{W}\right)$, numunenin geometrik faktörünü ifade etmektedir. Geometrik faktör birimsiz olup virgülden sonra üç hane olacak şekilde yuvarlanmaktadır. Çatlak yüksekliği 9 mm < a < 11 mm ve numune yüksekliği 70 mm < W < 75 mm ise $f\left(\frac{a}{W}\right) = 5,956$ olarak alınmaktadır. Eğer deneyde daha farklı çentik yükseklikleri kullanılmışsa veya numune yüksekliği farklı ise geometrik faktör aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmektedir.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = -4,9965 + 155,58 * \left(\frac{a}{W}\right) - 799,94 * \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 2141,9 * \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 2709,1 * \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 1398,6 * \left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (6.27)$$

Çentiksiz numunelerde çekme dayanımı Formül 6.25'den elde edilen maksimum gerilmeye eşit olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlar düşük sıcaklıklarda elastik davranış göstermesine rağmen yüksek sıcaklıklarda viskoz davranış, normal şartlarda ise viskoelastik davranış

sergilediklerinden bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen çatlak ve kırılmaları normal ve yüksek sıcaklıklarda lineer elastik kırılma mekaniği ile değerlendirmek uygun değildir.

Kırılma mekaniği yaklaşımlarına göre numunedeki çatlağın ucunda, yükleme durumunda plastik deformasyona uğramış bir bölge bulunur. Plastik deformasyona uğramış bu bölge kırılma tokluğu deneyi sonuçlarını önemli ölçüde etkiler, çünkü kırılma tokluğu deneyi malzemenin çatlama direncinin bir ölçümüdür, plastik deformasyona uğramış malzemenin çatlama direncinin ölçümü değildir. Bu sebeple numunedeki plastik deformasyon bölgesi büyüdükçe deneyin anlamı, dolayısıyla deney sonuçlarının geçerliliği azalır. LEKM ile incelenemeyecek kadar büyük ölçüde çatlak ucu plastik deformasyona sahip malzemelerde ise elastik-plastik kırılma mekaniği kullanılmaktadır (Özdemir, 2006). Elastik-plastik kırılma mekaniğine uygun olarak çeşitli yöntemlerle malzemelerin davranışları incelenebilmektedir. Elastik-plastik kırılma mekaniği yöntemlerinden biri olan kritik çatlak ucu açılımı (COD) kullanılarak sünek malzemeler için kırılma parametresi belirlenmektedir. Çatlak ucunda büyük plastik bölge oluşması durumunda (COD)'un yerinin tayini büyük zorluklar gösterdiğinden COD'a alternatif olarak Rice tarafından 1968 yılında J integral yöntemi geliştirilmiştir (URL-7, 2011). Fiziksel açıdan J, yüklenmiş bir yapıda çatlak uzunluğu “a” dan “a+da” olurken meydana gelen potansiyel enerji farkı olarak tanımlanabilmektedir (İnce, 1994). Diğer bir deyişle çatlak uzunluğunun “da” kadar artması için gerekli olan enerjidir (Uğuz, 1996). Bu yöntem kritik enerji salıverme hızı (kritik J-integral değeri veya J_c) olarak adlandırılan kırılma mekaniği kavramına dayanmaktadır. J_c değerinin büyük olması malzemenin kırılmaya karşı dayanımının büyük olacağını göstermektedir (Haryanto ve Takahashi, 2007). Deney süresince çentik içeren numunelere sabit bir hızla yük uygulanmakta ve yük-deformasyon değerleri sürekli kaydedilerek J_c değeri aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

$$J_c = -\left(\frac{1}{b}\right) \frac{dU}{da} \quad (6.28)$$

Burada b, numune kalınlığını (mm) a, çentik yüksekliğini (mm) U, maksimum yük-deformasyon eğrisi altında kalan alandan elde edilen kırılmaya neden olan toplam şekil değiştirme enerjisini ifade etmektedir. Bir bitümlü sıcak karışımın yarım daire eğilme deneyiyle kritik enerji salıverme hızını (J_c) belirlemek amacıyla en az iki farklı yükseklikte çentik içeren numuneler üzerinde deney prosedürünün uygulanması gerekmektedir. İki

farklı çentik yüksekliği kullanılması durumunda aşağıdaki formülden faydalanarak J_c değeri hesaplanmaktadır. Daha fazla çentik yüksekliği kullanılması durumunda ise çentik yüksekliği – J grafiği çizilerek noktalardan faydalanarak doğru geçirilmekte ve bu doğruların türevi J_c değeri olarak belirlenmektedir.

$$J_c = \left(\frac{U_1}{b_1} - \frac{U_2}{b_2} \right) * \frac{1}{a_2 - a_1} \quad (6.29)$$

Bitümlü sıcak karışımların viskoelastik sınırlar içerisinde J integral yöntemi ile kırılma parametrelerinin bulunmasında en çok yarım daire numune geometrisi kullanılmaktadır. Önceden yapılmış olan çalışmalarda kiriş numunelerle yapılan üç nokta eğilme deneylerinde kiriş numunelerin kendi ağırlığından dolayı çökmelerin meydana geldiği belirtilmiştir (Kabir, 2008). Yarım daire eğilme deneylerinde ise arazi verileriyle yüksek bir uyum sağlandığı, deney numunesi hazırlama veya elde etmenin kolay olduğu, deney süresince veri toplamanın kolay olduğu belirtilmiştir (Walubita, 2010). Bu deney geometrisinin en büyük dezavantajları ise elastik-plastik kırılma mekaniğiyle J-integral yöntemi kullanılarak bitümlü sıcak karışımların dayanım özelliklerinin belirlenmesinde standart bir numune boyutu ve deney prosedürünün bulunmamasıdır. Bitümlü sıcak karışımlarda J-integral yöntemi ile kırılmaya karşı dayanımların yarım daire numuneler ile belirlenmesiyle ilgili birçok çalışma yapılmış ve çeşitli deney hızları, numune kalınlıkları ve çentik boyları kullanılmıştır. Genellikle 150 mm çapında numuneler kullanılmasına rağmen bazı çalışmalarda 100 mm çapında numuneler kullanılmıştır.

Mull, yapmış olduğu çalışmada kimyasal modifiyeli atık lastik içeren karışımların kırılma dayanımlarını incelemiştir. Yaklaşık 24°C’de yapılan yarım daire eğilme (SCB) deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, 57 mm numune kalınlığı, 0,5 mm/dak yükleme hızı, 25,4–31,8 ve 38 mm çentik yükseklikleri kullanılmıştır (Mull vd., 2002). Othman, bitümlü sıcak karışımların kırılma tokluğu üzerinde düşük yoğunluklu polietilenin etkisini incelemiştir. 20°C’de yapılan SCB deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, 57 mm numune kalınlığı, 2,5 mm/dak yükleme hızı, 25,4 ve 31,8 mm çentik yükseklikleri kullanılmıştır (Othman, 2010). Chen ve ekibi, epoksi asfalt karışımların kırılma özelliklerini yarım daire eğilme deneyi ile belirlemişlerdir. -10 ve 20°C’de yapılan SCB deneylerinde 50 mm numune yüksekliği 30 mm numune kalınlığı, 12–18–24 mm çentik yüksekliği ve 1 mm/dak yükleme hızı kullanılmıştır (Chen vd., 2009). Haryanto ve

Takahashi, agrega gradasyonundan yola çıkarak aşınma tabakalarındaki çatlak başlangıcını ve sünek kırılma özelliklerini incelemişlerdir. Marshall tokmağıyla hazırlanan numuneler ile 30°C’de yapılan deneylerde 50 mm numune yüksekliği, yaklaşık 45 mm numune kalınlığı, 15 ve 22,5 mm çentik yükseklikleri, 2,4 mm/dak yükleme hızı kullanılmıştır (Haryanto ve Takahashi, 2007, 2008). Vukosavljevic, araziye uygulanan geri dönüşümü sağlanmış asfalt malzemesi içeren bitümlü sıcak karışım kaplamalardan elde ettiği karışımların kırılma özelliklerini incelemiştir. Çalışmada 25°C’de yapılan deneylerde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 25,4 mm numune kalınlığı, 12,5–25,4 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dak yükleme hızı kullanmıştır (Vukosavljevic, 2006). Alshamsi, analitik olarak incelenmiş agrega yapısından yola çıkarak yeni bir karışım tasarım metodolojisi geliştirmeye çalışmıştır. 25°C’de yapılan deneylerde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 57 mm numune kalınlığı, 25,4–31,8 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dak yükleme hızı kullanılmıştır (Alshamsi, 2006). Kingery, laboratuarda hazırlanan geri dönüşümü sağlanmış malzeme içeren bitümlü sıcak karışımların yorulma özelliklerini incelemiştir. 25°C’de yapılan SCB deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 25,4 mm numune kalınlığı, 12,5–25,4 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dak yükleme hızı kullanmıştır (Kingery, 2004). Kabir, hidrate kirecin Superpave yöntemine göre hazırlanan BSK numuneleri üzerine etkilerini incelediği tez çalışmasında SCB deneyi yapmıştır. 25°C’de yapılan deneylerde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 57 mm numune kalınlığı, 25,4–31,8 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dak yükleme hızı kullanmıştır (Kabir, 2008). Mohammad ve diğ., yapmış oldukları çalışmada ılık karışım asfalt katkı maddesi olan Sasobit içeren karışımları değerlendirmişlerdir. Çalışmada yapılan SCB deneyi 25°C’de yapılmış, deneyde 57 mm kalınlığında 75 mm yüksekliğinde numuneler kullanılmıştır. 0,5 mm/dak hızla yükleme yapılan deneyde çentik yüksekliği olarak 25,4–31,8 ve 38,0 mm kullanılmıştır (Mohammad vd., 2008). Shu ve diğ., yapmış oldukları çalışmada geri dönüşümü sağlanmış karışımların kırılmaya karşı dayanımlarını SCB deneyi ile değerlendirmişlerdir. 25°C’de yapılan SCB deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 25,0 mm numune kalınlığı, 12,5–25,4 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dak yükleme hızı kullanmıştır (Shu vd., 2010).

Yapılan literatür çalışması sonucunda J-integral yöntemi için kesin bir deney standardının bulunmadığı belirlenmiştir. Fakat çalışmaların çoğunda deney sıcaklığının 25 °C ve yükleme hızının 0,5 mm/dak olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada 25 °C deney sıcaklığı, 0,5 mm/dak yükleme hızı, 50 mm numune kalınlığı, 75 mm numune yüksekliği

ve 1-2 ve 3 cm çentik yüksekliği değerleri kullanılmıştır. Çentik yüksekliğinin 1-2 ve 3 cm seçilmesinin nedeni çentik ilerlemesi için daha fazla mesafenin kalması düşüncesidir.

6.7. Sayısal Görüntü İşleme Yöntemi

Çalışmada J-integral yaklaşımına göre uygulanan yarım daire eğilme deneylerinde numunelerde meydana gelen çatlak ilerleyişi deney süresince Canon 95IS (640 x 480 piksel çözünürlüklü, saniyede 30 kare kaydeden) marka kamera ile kaydedilmiştir (Şekil 6.19). Deney boyunca kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde 5 dakika, uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde 4 dakika süresince görüntü alımı yapılmıştır. Daha sonra bu görüntüler sayısal görüntü işleme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Sayısal görüntü işleme, bir resimdeki parlaklık kontrast gibi ölçüm değerlerinin değişimini sağlayan bir teknikler bütünüdür.



Şekil 6.19. Görüntü işleme için verilerin elde edilmesi

Deneyisel çalışmalar sırasında kaydedilen videolar daha sonra MATLAB video ve görüntü işleme Toolbox'ları kullanılarak, bitümlü sıcak karışımda meydana gelen çatlak alan olarak zamana karşı değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir. Bu amaç için şöyle bir yol izlenmiştir;

1-) İlk olarak videolar, MATLAB Video Toolbox kullanılarak resimlerine ayrıştırılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımdaki çatlak belirli bir zamandan sonra meydana geldiği için, bu zamana kadar olan resimler ihmal edilmektedir.

2-) Çatlağın ilerlemeye başladığı resim numarası şu şekilde hesaplanmaktadır. Videolar kaydedilirken çatlamanın ilk olduğu ana kadar geçen süre kaydedildi. Kamera saniyede 30 resim kaydettiği için, çatlamaya kadar geçen süre ile saniyedeki resim sayısı çarpılarak, ilk çatlamanın meydana geldiği resim bulunmuştur.

3-) Çatlağın ilerlemeye başladığı ilk resimden itibaren, rasgele 81 resim seçilmiştir. Bu resimlere, bitümlü sıcak karışımda oluşan çatlağın alanını buldurmak için sırası ile kesme, gri tona dönüştürme ve eşikleme işlemleri uygulanmıştır. Kaydedilen videolarda ilgilenilen bölgenin dışında, gereksiz alanlar kesme işlemi ile elimine edilmiştir. Böylece ilk olarak 640x320 piksel olan resimler, 240x180 piksellik resimlere dönüştürülmüştür. Renkli olarak kaydedilen videolardan elde edilen resimler daha sonra gri tona dönüştürülmüştür. Bunun için lineer bir dönüşüm kullanılmıştır. Gri tona çevrilen resimler daha sonra eşiklenerek ikilik görüntü elde edilmiştir. Bu görüntüde çatlaklar 1 ile çatlak olmayan pikseller ise 0 ile etiketlenmektedir. İkilik görüntüdeki 1'lerin toplam sayısı çatlağın alanını oluşturmaktadır.

7. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez çalışmasında Silopi asfaltinin bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanımının etkisi incelenmiştir. Doktora çalışmasının yapıldığı yer olması nedeniyle uygulama bölgesi olarak Elazığ ili seçilmiştir. Çalışmada öncelikle Superpave yöntemine göre Elazığ için uygun bağlayıcı seçimi yapılmıştır. TÜPRAŞ rafinerisinden alınan B 70/100 sınıfı asfalt çimentosu Superpave bağlayıcı deneylerine tabi tutulmuştur. Böylece bağlayıcının performans sınıfı (PG) ve Elazığ için uygunluğu belirlenmiştir. Agregada olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker türü kırmataş malzeme kullanılmıştır. Silopi TKİ kontrol Müdürlüğü'nden temin edilen asfaltit, konkasörde kırılarak 0,075 mm. açıklıklı (No. 200) elekten elenmiştir. Şekil 7.1'de Silopi asfaltinin konkasörde kırılmadan önce ve sonraki hali görülmektedir. Her bir karışım türü için Superpave yöntemine göre tasarım asfalt bağlayıcı içeriği belirlenmiştir. %1–5 arasında 5 farklı yüzdede asfaltit, kalker türü filler malzemesi yerine bitümlü sıcak karışım numunelerinde kullanılmıştır. Tasarım asfalt bağlayıcı içeriklerinde hazırlanan, saf karışım ve filler yerine %1–5 arasında 5 farklı oranda asfaltit içeren karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall oranı, nem hasarına karşı dayanım (AASHTO T 283), indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM), indirekt çekme yorulma, tekrarlı sünme, lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımına göre çatlak ilerleyişine göre dayanım (EN 12697-44) ve elastik-plastik kırılma mekaniği yaklaşımına göre çatlak ilerleyişine karşı dayanım (J-integral) deneyleri uygulanarak filler malzemesi olarak asfaltit kullanımının etkisi geniş bir aralıkta incelenmiştir. Yukarıda belirtilen deneyler kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin yanı sıra AASHTO R 30 standardına göre uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde de uygulanmış böylece asfaltit içeren karışımların yola uygulandıktan 7-10 yıl sonraki performansları da değerlendirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 7.1. Silopi asfaltinin konkasörde kırılmadan önce ve sonraki hali

7.1. Elazığ İçin Uygun Bağlayıcının Seçilmesi

Bağlayıcı seçiminde uygulama bölgesi olarak Elazığ ili seçilmiştir. Coğrafi konum olarak 38°17' ile 39°11' enlemleri arasında bulunan Elazığ'ın Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen son 24 sene içerisindeki her yılın ardı ardına en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklığı değerleri Tablo 7.1'de verilmiştir.

Buna göre, son 24 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (168 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (24 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması, Formül 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan yüksek ve düşük hava sıcaklıklarının ortalama değeri ve standart sapması Tablo 7.2'de verilmiştir.

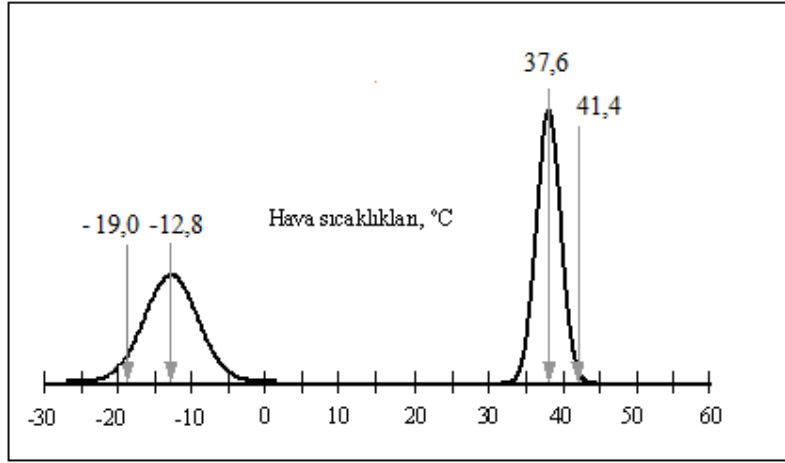
Tablo 7.2. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları

Hesaplamalar	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	37,6	-12,8
Standart Sapma (°C)	1,9	3,1

Tablo 7.1. Elazığ'ın 24 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	36,2	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
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

24 yıllık süre içerisindeki ardı ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıklarının ortalaması ve en düşük bir günlük sıcaklık değerlerinin ortalamasından %50 güvenilirlikte sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Sıcaklık değerlerinin standart sapmaları (σ) kullanılarak %98 güvenilirlikte sıcaklık değerleri (ortalama+2 σ) belirlenmiştir. Şekil 7.2’de, uygulama bölgesine ait Tablo 7.2’de verilen düşük ve yüksek hava sıcaklık değerleri kullanılarak bir frekans dağılım eğrisi temsili olarak ifade edilmiştir.



Şekil 7.2. Elazığ için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı

Buna göre, ardı ardına gelen 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı ortalaması 37,6°C ve standart sapması 1,9°C olan Elazığ için ortalama sıcaklığa standart sapmanın iki katının ilavesiyle elde edilen 41,4°C’lik sıcaklığa, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2’dir ve bu durumda güvenilirlik %98 olarak kabul edilir. Benzer şekilde, ortalama en düşük sıcaklığı -12,8°C ve standart sapması 3,1°C olan Elazığ’da, çok soğuk bir kış mevsiminde sıcaklığın -19,0°C olması ihtimali %2, dolayısıyla güvenilirlik derecesi %98 olacaktır.

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.

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

$$T_{20mm} = (37,6 - 0,00618 \times 38,44^2 + 0,2289 \times 38,44 + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 = 58,1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{min} = T_{havamin} = -12,8 \text{ } ^\circ\text{C' dir.}$$

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

$$T_{20mm\%98} = T_{20mm\%50} + 2S_{maks} = 58,1 + 2 \times 1,9 = 61,9 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{min\%98} = T_{min\%50} + 2S_{min} = -12,8 + 2 \times (-3,1) = -19,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

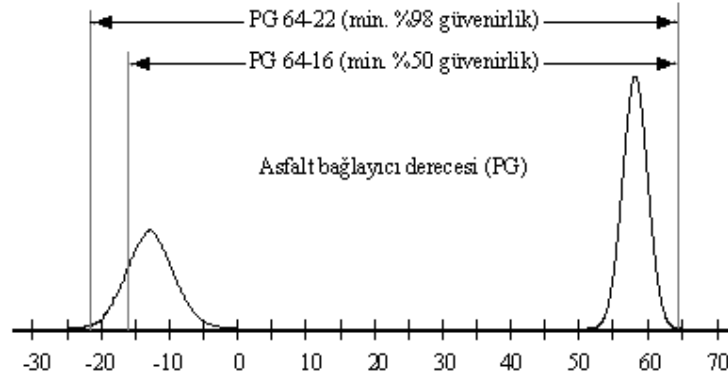
Yukarıda hava sıcaklıkları verilen uygulama bölgesinin hesaplanan tasarım sıcaklıklarının %50 ve %98 güvenirlilik değerleri Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.3. Farklı yöntemlere göre hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları

Yöntem	% 50 Güvenirlilik (°C)				% 98 Güvenirlilik (°C)			
	T _{havamaks}	T _{20mm}	T _{havamin}	T _{min}	T _{havamaks}	T _{20mm}	T _{havamin}	T _{min}
SHRP	37,6	58,1	-12,8	-12,8	41,4	61,9	-19,0	-19,0

Tablo 7.3'te, SHRP yöntemine göre uygulama bölgesi için %50 güvenirlilikte hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 58,1°C, düşük sıcaklık değeri -12,8°C'dir. Bu güvenirlilik değeri için seçilecek olan bağlayıcı sınıfı PG 64–16 olacaktır. Aynı yöntemle %98 güvenirlilik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 61,9°C, düşük sıcaklık değeri -19,0°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 7.3'te verilmiştir.

Elazığ bölgesi için 20 yıllık tasarım trafiği tahmini olarak 15 milyon eşdeğer standart tek dingil yükü alınmış ve trafiğin standart hızda (>70 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre, tasarım trafik sayısı 30 milyona kadar olan yollarda bağlayıcının yüksek sıcaklık derecesinin arttırılmasına gerek görülmediğinden bağlayıcı sınıfı PG 64–22 olarak seçilmiştir.



Şekil 7.3. Elazığ için bağlayıcı sınıfı seçimi

7.2. Bitümlü Bağlayıcı Deney Sonuçları

TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 70/100 sınıfı asfalt çimentosu üzerinde TS 1081 EN 12591 şartnamesinde yer alan standart deneyler uygulanarak bitümlü bağlayıcının kullanılabilirliği belirlenmiştir (TS 1081 EN 12591, 2003). Standartta yer almamasına rağmen düktilite deneyi yapılmış, bu değer 100 cm.'den büyük olduğu tespit edilmiştir (TS 119, 1964). Bitümlü bağlayıcılarda oluşan kısa dönem yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla TS EN 12607-1 standardına uygun olarak dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) uygulanmıştır (TS EN 12607-1, 2003). Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir (Formül 7.1–7.2). Formüldeki P_{25} , bitümün 25°C'deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktasını göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi'nin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir (ULLİDTZ, 1987). Bağlayıcı deney sonuçları ve şartname limitleri Tablo 7.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bitümlü bağlayıcının şartname limitlerini sağladığı belirlenmiştir.

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (7.1)$$

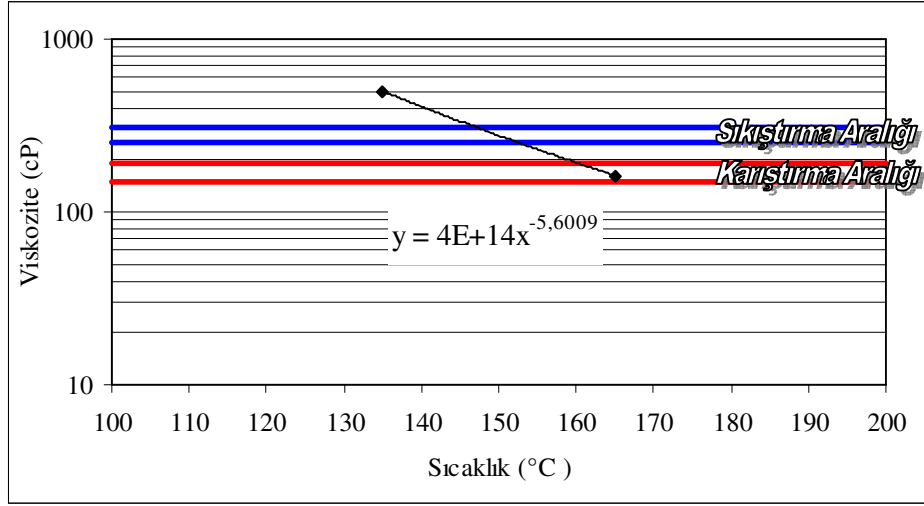
$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (7.2)$$

Tablo 7.4. Bitümlü bağlayıcı deney sonuçları

Özellikler	Standart	Sonuç	Şartname limiti
Penetrasyon (0,1 mm, 100 g, 5 s)	EN 1426	97	70-100
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427	49,6	43 – 51
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,481	-
Fraas Kırılma Noktası, (°C)	EN 12593	-16,2	< - 10
Düktilite, (cm)	TS 119	> 100	> 100
Özgül Ağırlık, (gr/cm ³)	TS 1087	1,039	1,0–1,1
RTFOT Sonrası			
Özellikler	Standart	Sonuç	Şartname limiti
Kütle Değişimi, en fazla, (%)	EN 12607-1	0,769	0,8
Penetrasyon, (25°C, 0,1mm)	EN 12607-1	52	-
Kalıcı Penetrasyon, en az, (%)	EN 12607-1	54	46
Yumuşama Noktası, en az, (°C)	EN 1427	58,3	45
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,782	-
Yumuşama Noktasındaki Artış, en fazla, (°C)	EN 1427	8,7	9

Superpave yönteminde bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen kısa dönem yaşlanmayı laboratuvar ortamına yansıtmak amacıyla yer alan dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), uzun dönem yaşlanma için ise basınçlı yaşlandırma aleti (PAV) deneyi kullanılmıştır. 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.

Bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla orijinal bağlayıcılara 135°C ve 165°C sıcaklıklarda uygulanan dönel viskozimetre deneyleri sonucunda viskozite değerlerinin sırasıyla 500 ve 162,5 cP olarak belirlenmiştir. Çizilen sıcaklık–viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmiştir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını gösteren viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 7.4'te verilmiştir. Viskozite deneylerinden elde edilen bütün sonuçlar Tablo 7.5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bağlayıcının işlenebilirlik şartını sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 7.4. Bitümlü bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Tablo 7.5. Dönel viskozite deney sonuçları

	Standart	Sonuç	Şartname limiti
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	500	Maks. 3000
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	162,5	-
Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	-	158,6–165,4	-
Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	-	145,3–151,0	-

Superpave yönteminde bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla performans sınıfı yüksek sıcaklık değerinde 25 mm. çapında ve 1000 mikron yükseklikteki orijinal ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılara 1,59 devir / saniye’lik frekansta deneyler uygulanmakta, G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ değerleri hesaplanmaktadır. Belirlenen sıcaklıkta orijinal bağlayıcılardan elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerlerinin minimum 1,0 kPa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılardan elde edilen değerin ise 2,2 kPa olması gerekmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Çalışmada TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 70/100 bitümüne yaşlanma işlemi uygulamadan 5 farklı sıcaklıkta DSR deneyi uygulanarak bağlayıcının performans sınıfı yüksek sıcaklık değeri elde edilmiştir. Belirlenen sıcaklıkta RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcı deneye tabi tutularak şartname kriterini sağladığı kontrol edilmiştir. Orijinal ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılara uygulanan

deneylerden elde edilen sonuçlar ve şartname kriterleri Tablo 7.6’da verilmiştir. Orijinal bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyleri sonucunda bağlayıcının performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin 64 olduğu, RTFOT deneyinden elde edilen sonuçlardan da performans sınıfı yüksek sıcaklık değerinin uygun olduğu (PG 64-Y) belirlenmiştir.

Tablo 7.6. Orijinal ve RTFOT yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

B 70/100				
Sıcaklık, (°C)	G* , (Pa)	Faz Açısı, (δ , °)	G*/sin δ , (Pa)	G*/sin δ Şartname Limiti, (Pa) (AASHTO TP-5)
DSR (İşlem Görmemiş Bağlayıcı)				
46	14782,0	73,18	15442,66	min.1000
52	6656,0	75,94	6861,56	
58	3113,9	78,96	3172,61	
64	1478,5	81,46	1495,08	
70	734,7	83,57	739,33	
DSR (RTFOT ile Yaşlandırılmış Bağlayıcı)				
64	5514,1	72,60	5778,52	min.2200

Basıncılı yaşlandırma deney aleti bölümümüzde bulunmadığından PAV deneyi İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde yapılmıştır. Bağlayıcının yorulma çatlaklarına karşı dayanımını belirlemek amacıyla 8 mm çapında plaklar kullanılarak 19°C sıcaklıkta DSR deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ve şartname limitleri Tablo 7.7’de verilmiştir.

Tablo 7.7. PAV yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

B 70/100				
Sıcaklık, (°C)	G*, (Pa)	Faz Açısı, (δ , °)	G*.sin δ , (Pa)	G*.sin δ Şartname Limiti, (kPa) (AASHTO TP-5)
DSR (PAV ile Yaşlandırılmış Bağlayıcı)				
19	6721,8	42,97	4581,86	mak. 5000

Bağlayıcıların düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla -18 ve -24°C sıcaklıklarda kırıç eğme reometresi (BBR) deneyi uygulanmıştır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kırıç eğme reometresi deneyinde 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki asfalt kırıcin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN’luk yük etki ettirilmiştir. Deney sonucunda sünme sertliği ve sünme oranı (m-değeri) belirlenmiştir. BBR deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.8’de verilmiştir.

Tablo 7.8. PAV yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcıların BBR deney sonuçları

B 70/100			
Sıcaklık, (°C)	Sünme Sertliği, S, (mak 300 MPa)	m-değeri, (min 0,300)	Deformasyon (mm)
-18	110,2102	0,329052	0,7355
-24	225,6843	0,304712	0,3540
-30	226,3015	0,268049	0,3532

PG 64-Y Superpave bağlayıcı şartname kriterleri Tablo 7.9’da verilmiştir. Superpave bağlayıcı deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar şartname kriterleri ile karşılaştırıldığında bağlayıcının performans sınıfının PG 64-34 olduğu belirlenmiştir. TÜPRAŞ Batman rafinerisinden 2008 ve 2009 senelerinde alınan B 70/100 sınıfına ait numunelere KGM teknik araştırma dairesi başkanlığı tarafından uygulanan deneyler sonucunda da bağlayıcının performans sınıfının PG 64-28 olduğu belirlenmiştir (Güngör ve Sağlık, 2008; Güngör ve Sağlık, 2009). Bu durum petrolün özelliğine göre bitümlü bağlayıcının performans sınıfının değişebildiğini göstermektedir.

Elazığ bölgesi için 20 yıllık tasarım trafiği tahmini olarak 15 milyon eşdeğer standart tek dingil yükü alınmış ve trafiğin standart hızda (>70 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre, tasarım trafiği 30 milyona kadar olan yollarda bağlayıcının yüksek sıcaklık derecesinin arttırılmasına gerek görülmediğinden bağlayıcı sınıfı PG 64-22 olarak seçilmiştir. Sonuç olarak TÜPRAŞ Batman Rafinerisi’nden temin edilen bağlayıcının seçilen güvenilirlik ve trafik şartlarında Elazığ ili için uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7.9. PG 64-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi (McGennis vd., 1994).

Performans Sınıfı	PG 64				
	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 64				
Minimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	> -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 Kesme, TP5, G*/sinδ, minimum, 1,00 kPa, test sıcaklığı, 10 rad/s , °C	64				
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI					
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00				
Dinamik Kesme, TP5, G*/sinδ, minimum, 2,20 kPa, test sıcaklığı, 10 rad/s , °C	64				
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI					
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100				
Dinamik Kesme, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, test sıcaklığı, 10 rad/s , °C	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme,	Rapor				
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m- değeri, minimum 0,300 , test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	-30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1,0 test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	-30

7.3. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Çalışmada agregalar olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker (kireçtaşı) türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Agregalar karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış bir şekilde deneylerde kullanılmıştır. Silopi TKİ kontrol Müdürlüğü'nden temin edilen asfaltit konkasörde kırılarak 0,075 mm. açıklıklı (No. 200) elekten elenmiştir. %1-5 arasında 5 farklı yüzdede asfaltit, doğal filler malzemesi yerine bitümlü sıcak karışım numunelerinde kullanılmıştır.

Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave agregalar gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agregalar yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (15 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100 mm) bağlı olarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı görülmüştür. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 7.10'da verilmiştir.

Tablo 7.10. Kalker agregasının fiziksel özellikleri

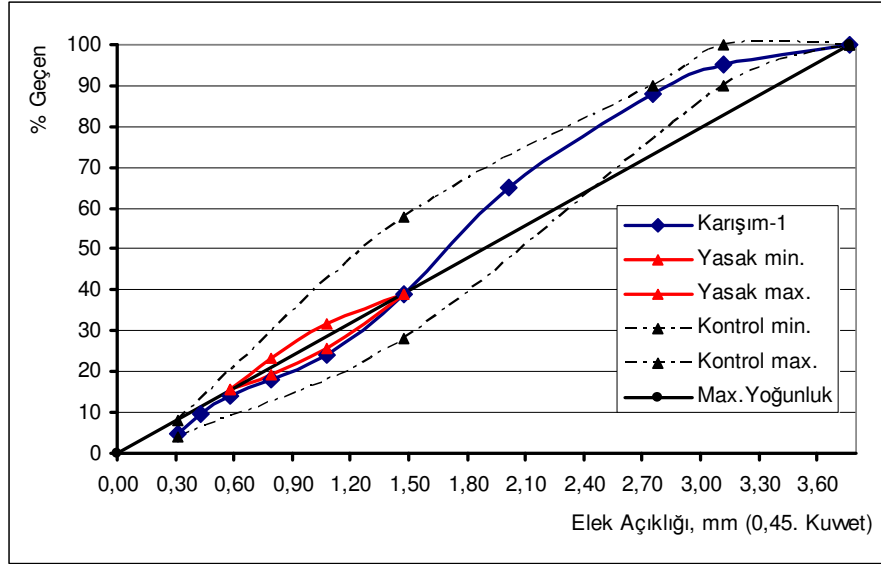
Özellikler	Deney Standardı	Mineral Agregası			Şartname Sınırı
		Kaba	İnce	Filler	
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma kaybı), (%)	ASTM C-131	29	-	-	Maks. 35
Sağlamlık (Na ₂ SO ₄ ile Donma kaybı), (%)	ASTM C-88	4,5	-	-	Maks. 10
Kaba Agregası Köşelliliği, (%)	ASTM D-5821	98/96	-	-	Min. 95/90
İnce Agregası Köşelliliği, (%)	AASHTO T304	-	49	-	Min. 45
Yassı ve Uzun Daneler, (%)	ASTM D-4791	2	-	-	Maks. 10
Kil İçeriği, (Kum Eşdeğerlik), (%)	AASHTO T176	-	55		Min. 45
Zararlı Maddeler, (%)	ASTM C-142	Bulunmamıştır			Maks. 2

7.4. Superpave Yöntemine Göre Hacimsel Karışım Tasarımının Yapılması

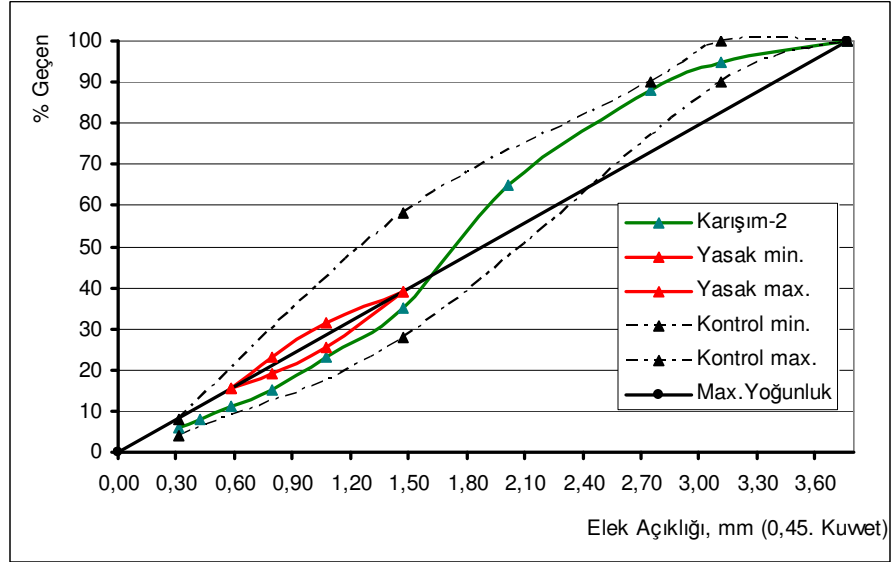
Tasarım yöntemine uygun olarak öncelikle maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm için belirtilen gradasyon kontrol noktaları ve yasaklanmış bölge sınırları dikkate alınarak üç adet deneme agregası karışımı (Karışım-1, Karışım-2 ve Karışım-3) seçilmiştir. Karışım gradasyonları Tablo 7.11’de verilmiştir. Ayrıca, bu üç deneme agregası karışımında kullanılan kaba, ince ve filler agregalarının ağırlıkça yüzdeleri de tabloda verilmiştir. Seçilen bu deneme agregası karışımlarının gradasyon eğrileri aşağıda sırasıyla Şekil 7.5, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de gösterilmiştir.

Tablo 7.11. Başlangıç deneme karışımları

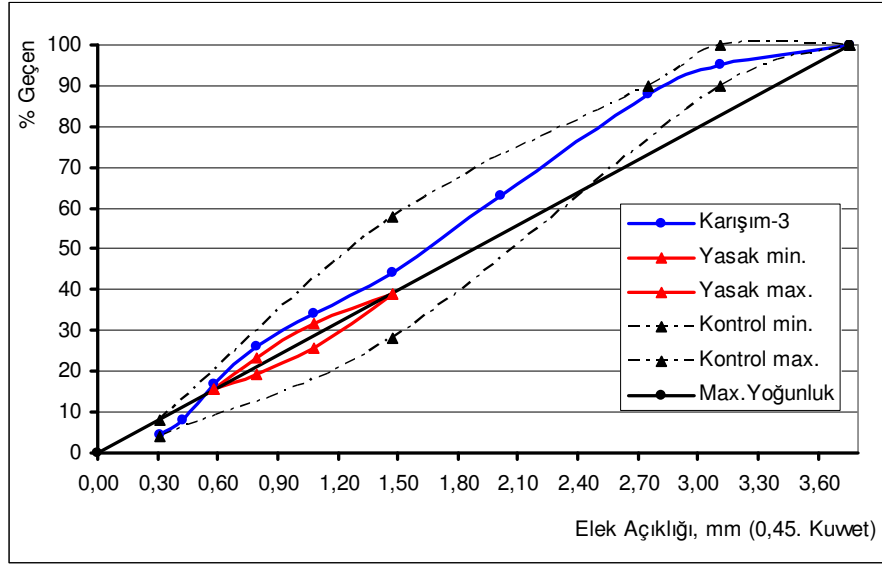
Elek Boyutu, mm (Elek No)	Karışım Gradasyonu, % Geçen		
	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3
19 (3/4")	100	100	100
12,5 (1/2")	95	95	95
9,5 (3/8")	88	88	88
4,75 (No.4)	65	65	63
2,36 (No.8)	39	35	44
1,18 (No.16)	24	23	34
0,600 (No.30)	18	15	26
0,300 (No.50)	14	11	17
0,150 (No.100)	9,5	8	8
0,075 (No.200)	5	6	4,5
Karışımlardaki Agregası Yüzdeleri			
Kaba Agregası	35	35	37
İnce Agregası	60	59	58,5
Filler	5	6	4,5



Şekil 7.5. Karışım-1 agrega gradasyon eğrisi



Şekil 7.6. Karışım-2 agrega gradasyon eğrisi



Şekil 7.7. Karışım-3 agrega gradasyon eğrisi

Seçilen deneme karışımlarındaki, kaba ve ince agrega ile fillerin özgül ağırlıkları tespit edilerek, her bir deneme agrega karışımının hacim (Gsb) ve zahiri (Gsa) özgül ağırlığı Formül 4.6 ile hesaplanmış ve bu değerler Tablo 7.12’de gösterilmiştir. Hesaplamalarda, fillerin hacim özgül ağırlığını tespit etmek güç olduğundan zahiri özgül ağırlık değeri kullanılmıştır.

$$\text{Karışım-1: } Gsb = \frac{100}{\frac{35}{2,613} + \frac{60}{2,611} + \frac{5}{2,711}} = 2,617 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gsa = \frac{100}{\frac{35}{2,675} + \frac{60}{2,687} + \frac{5}{2,711}} = 2,684 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-2: } Gsb = \frac{100}{\frac{35}{2,613} + \frac{59}{2,622} + \frac{6}{2,711}} = 2,624 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gsa = \frac{100}{\frac{35}{2,675} + \frac{59}{2,684} + \frac{6}{2,711}} = 2,682 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-3: } Gsb = \frac{100}{\frac{37}{2,624} + \frac{58,5}{2,609} + \frac{4,5}{2,711}} = 2,619 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{37}{2,690} + \frac{58,5}{2,701} + \frac{4,5}{2,711}} = 2,697 \text{ gr/cm}^3$$

Tablo 7.12. Deneme karışımlarının özgül ağırlıkları

Özellik	Deney Standardı	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
		Kaba	İnce	Kaba	İnce	Kaba	İnce
Hacim Özgül Ağırlık	ASTM C-127 ve ASTM C-128	2,613	2,611	2,613	2,622	2,624	2,609
Zahiri Özgül Ağırlık		2,675	2,687	2,675	2,684	2,690	2,701
Zahiri Özgül Ağırlık		Filler = 2,711					
Su absorpsiyonu, (%)		0,89	1,08	0,89	0,90	0,93	1,30
Toplam Agrega Karışımı							
Karışım Hacim Özgül Ağırlığı, Gsb		2,617		2,624		2,619	
Karışım Zahiri Özgül Ağırlığı, Gsa		2,684		2,682		2,697	

Agreganın hacimsel özellikleri tespit edildikten sonraki adımda, her deneme karışımı için hazırlanan asfalt karışım numuneleri belirlenen asfalt içeriklerinde (Pbi) sıkıştırılmış ve hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla, her bir deneme karışımı için başlangıçta gereken asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi), agregası karışımının efektif özgül ağırlığının (Gse) tespit edilmesi ile birlikte aşağıdaki işlem sırasına göre belirlenmiştir.

Deneme karışımlarının efektif özgül ağırlığı (Gse) Formül 4.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Karışım-1: } G_{se} = 2,617 + 0,8 \times (2,684 - 2,617) = 2,670 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-2: } G_{se} = 2,624 + 0,8 \times (2,682 - 2,624) = 2,671 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-3: } G_{se} = 2,619 + 0,8 \times (2,697 - 2,619) = 2,682 \text{ gr/cm}^3$$

Agrega tarafından absorbe edilecek olan asfalt bağlayıcı hacmi (Vba) Formül 4.8 ile hesaplanmıştır. Hesaplarda hava boşluğunun %4 olduğu kabul edilmektedir.

$$\text{Karışım-1: } V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,039} + \frac{0,95}{2,670}\right)} \times \left(\frac{1}{2,617} - \frac{1}{2,670}\right) = 0,0174 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Karışım-2: } V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,039} + \frac{0,95}{2,671}\right)} \times \left(\frac{1}{2,624} - \frac{1}{2,671}\right) = 0,0151 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Karışım-3: } V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,039} + \frac{0,95}{2,682}\right)} \times \left(\frac{1}{2,619} - \frac{1}{2,682}\right) = 0,0202 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Her üç deneme karışımının efektif bağlayıcı hacmi (V_{be}) ise Formül 4.9 ile belirlenmiştir.

$$\text{Karışım-1,2,3: } V_{be} = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(12,5) = 0,102 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Son olarak, başlangıç deneme asfalt bağlayıcı içeriği (P_{bi}) Formül 4.10 ve Formül 4.11 ile belirlenmiştir.

$$\text{Karışım-1: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,039} + \frac{0,95}{2,670}\right)} = 2,258 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,039 \times (0,102 + 0,0174)}{(1,039 \times (0,102 + 0,0174)) + 2,258} \times 100 = \% 5,207$$

$$\text{Karışım-2: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,039} + \frac{0,95}{2,671}\right)} = 2,258 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,039 \times (0,102 + 0,0151)}{(1,039 \times (0,102 + 0,0151)) + 2,258} \times 100 = \% 5,109$$

$$\text{Karışım-3: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,039} + \frac{0,95}{2,682}\right)} = 2,267 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,039 \times (0,102 + 0,0202)}{(1,039 \times (0,102 + 0,0202)) + 2,267} \times 100 = \% 5,305$$

Hazırlanmış olan üç farklı agrega deneme karışımının her biri için en az iki numune Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı (SGC) ile sıkıştırılmış ve her bir deneme karışımının maksimum teorik özgül ağırlığının (Gmm) tespit edilebilmesi için ikişer numune fazladan hazırlanmıştır. Bu amaçla çalışmada, tasarım agrega gradasyonunu tespit etmek için, her bir deneme agrega karışımının sıkıştırılması ve teorik özgül ağırlığının (Gmm) bulunması için dörder adet olmak üzere toplam 12 adet karışım numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım numunelerinin sıkıştırılması için 100 mm'lik silindirik kalıp kullanılmış ve bu kalıp için gereken toplam agrega ağırlığı 1200 gr olarak alınmıştır.

Karışım ağırlığına göre bulunan bağlayıcı yüzdesi (Pbi) yardımıyla, toplam agrega ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı (Wb) Formül 4.12 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Karışım-1: } W_b = \frac{1200 \times 5,207}{100 - 5,207} = 65,92 \text{ gr}$$

$$\text{Karışım-2: } W_b = \frac{1200 \times 5,109}{100 - 5,109} = 64,61 \text{ gr}$$

$$\text{Karışım-3: } W_b = \frac{1200 \times 5,305}{100 - 5,305} = 67,22 \text{ gr}$$

Asfalt karışımların hazırlanması ve sıkıştırılması için gerekli olan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, asfalt bağlayıcının (PG 64–34) viskozite-sıcaklık diyagramı kullanılarak tespit edilmiştir. Buna göre, uygulama bölgesi için ana bağlayıcı olarak seçilmiş olan PG 64–34 asfalt bağlayıcısının karıştırma sıcaklığı 159–165°C, sıkıştırma sıcaklığı ise 145–151°C sıcaklık aralığında tespit edilmiştir. Çalışmada karıştırma sıcaklığı olarak 163°C, sıkıştırma sıcaklığı olarak ise 150°C kullanılmıştır.

Çalışmada ilk olarak, deneme agrega karışımlarının sıkıştırılması amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu amaçla; belirlenen karışım sıcaklığına erişmesi için hazırlanan asfalt bağlayıcı 2 saat, agrega ise 3 saat kadar karıştırma sıcaklığındaki (163°C) etüvde ısıtılmıştır. Isıtılmış bitümlü bağlayıcı ısıtılmış agrega üzerine önceden belirlenen miktarda dökülerek bir karıştırıcı vasıtasıyla agrega taneleri asfalt bağlayıcı ile iyice kaplanana kadar 1,5–2 dakika karıştırılmıştır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekaşe 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden ısıtılmış 135 °C'deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Karışım numuneleri, yaşlandırma

işleminde sonra, sıkıştırma sıcaklığına (150°C) ulaşması için 30 dakika etüvde bekletilmiştir. Bu sırada, ilk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45–60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve konulmuş ve yoğurmalı sıkıştırıcı ve yazılımı hazırlanmıştır. Çalışmada, kabul edilen 15 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri; $N_{ini} = 8$, $N_{des} = 100$ ve $N_{maks} = 160$ olarak alınmıştır.

Çalışmada, TÜBİTAK desteği ile alınan İngiltere’de üretilen Cooper marka yoğurmalı pres kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Cihaz, 1,25° yoğurma açısına sahip, yoğurma hızı 30 devir/dakika, yoğurma basıncı 0–700 kPa olarak ayarlanabilen ve 100 mm ile 150 mm’lik numune dökmeye elverişli olarak imal edilmiştir. Cihazda yoğurma sayısı otomatik olarak yazılım kullanılarak girilmektedir. Yoğurma süresince sıkışma miktarı sensörler yardımıyla ölçülüp otomatik olarak bilgisayara aktarılmaktadır. Yoğurma işlemi sonunda cihaz üzerinde monte edilmiş olan kriko yardımıyla numune kalıptan çıkarılmaktadır. Deney çalışmalarında kullanılan TÜBİTAK desteği ile alınmış “Cooper” yoğurmalı sıkıştırıcısı Şekil 7.8’de gösterilmiştir.



Şekil 7.8. Cooper yoğurmalı sıkıştırıcı

Deney için sıkıştırma sıcaklığına getirilerek hazırlanan karışımlar kalıba yerleştirilerek sıkıştırma işlemine başlanmıştır. Sıkıştırma işlemi esnasında, istenen yoğurma sayısı ($N_{des}=100$) tamamlanıncaya kadar numuneler sıkıştırılmıştır. Karışımların yoğurma sayılarındaki yükseklikleri cihazda bulunan sensörler sayesinde ölçülmüş ve yazılım

sayesinde kaydedilmiştir. Sıkışan numuneler yaklaşık 5 dakikalık bir bekleme süresi sonunda zarar görmeden kalıptan çıkartılarak soğumaya bırakılmış ve bu numunelerin hacim özgül ağırlığı (Gmb(ölçülen)), AASHTO T166 standardına göre tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 7.13'te verilmiştir.

Tablo 7.13. Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları

Hacim Özgül Ağırlık, Gmb(ölçülen)	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
	1	2	1	2	1	2
Kuru ağırlık, A (gr)	1260,08	1259,78	1259,69	1259,41	1262,72	1261,86
Doygun yüzey kuru ağırlık, B (gr)	1264,69	1264,11	1268,25	1266,74	1268,16	1266,19
Sudaki ağırlık, C (gr)	724,14	724,88	717,27	719,51	727,86	727,08
Gmb(ölçülen) = A/(B-C)	2,331	2,336	2,286	2,301	2,337	2,341

Daha sonra, deneme agrega karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespit edilmesi amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışımı daha hazırlanmıştır. Yukarıda ifade edildiği gibi hazırlanan ve yaşlandırma işleminden sonra soğumaya bırakılan karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları AASHTO T209 standardına göre tespit edilerek sonuçları Tablo 7.14'te verilmiştir.

Tablo 7.14. Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları

Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, (Gmm)	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
	1	2	1	2	1	2
Piknometre, A (gr)	472,6	472,6	472,6	472,6	472,6	472,6
Piknometre +Su, B (gr)	1513,7	1513,7	1513,7	1513,7	1513,7	1513,7
Piknometre +Numune, C (gr)	1731,48	1733,13	1729,93	1731,93	1735,8	1734,44
Piknometre +Numune+Su, D (gr)	2255,3	2256,8	2246,8	2246,9	2258,09	2259,28
Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C))	2,434	2,436	2,398	2,394	2,435	2,444
Ortalama, Gmm	2,435		2,396		2,439	

Belirlenen Gmm değerlerinden faydalanılarak hesapla Gse değerleri belirlenmiştir. Çalışmanın geri kalan kısmında hesapla belirlenen bu Gse değerleri kullanılmıştır.

Karışım-1 için;

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - 5,207}{\left(\frac{100}{2,435} - \frac{5,207}{1,039}\right)} = 2,629 \text{ gr/cm}^3$$

Karışım-2 için;

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - 5,109}{\left(\frac{100}{2,396} - \frac{5,109}{1,039}\right)} = 2,577 \text{ gr/cm}^3$$

Karışım-3 için;

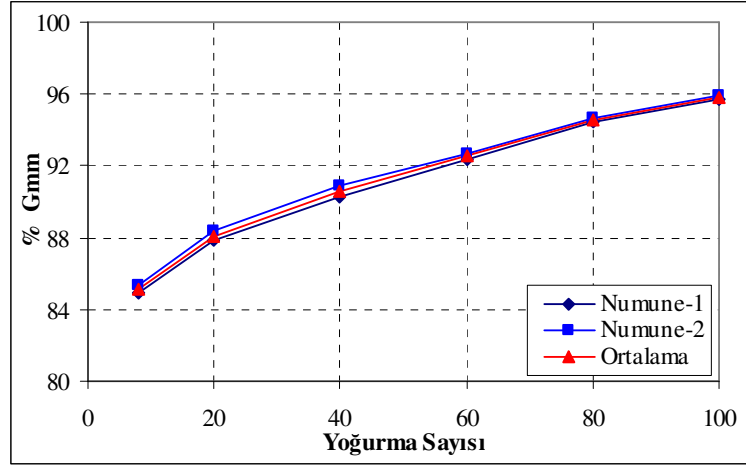
$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - 5,305}{\left(\frac{100}{2,439} - \frac{5,305}{1,039}\right)} = 2,638 \text{ gr/cm}^3$$

7.4.1. Deneme Agrega Gradasyonlarında Hazırlanan Karışımların Değerlendirilmesi

Her bir karışım numunesinin elde edilen sıkıştırma verileri (hx, Gmb(ölçülen), Wm, Gmm) kullanılarak, tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) tahmini hacim özgül ağırlık (Gmb(tahmini)), düzeltme faktörü (C), düzeltilmiş hacim özgül ağırlık (Gmb(düzeltilmiş)) ve son olarak maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (%Gmm) hesaplanarak sonuçları analiz edilmiştir. Tablo 7.15'te deneme karışımlarından Karışım-1'in, PG 64-34 ana bağlayıcısı ile %5,207 bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri verilmiştir. Sıkıştırılan Karışım-1 numunelerinin farklı yoğurma sayılarındaki yoğunluk değerleri ve bu değerlerin ortalaması Şekil 7.9'da gösterilmiştir.

Tablo 7.15. Karışım-1 numunelerinin %5,207 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Karışım-1 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1260,08 gr		Numune-2		Wm = 1259,78 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	79,9	2,009	2,069	84,96	79,4	2,021	2,077	85,33	85,14
Ndes= 100	70,9	2,264	2,331	95,75	70,6	2,273	2,336	95,96	95,86
Gmb(ölçülen)		2,331			2,336				
Düz. Faktörü. (C)		1,030			1,028				
Gmm(ölçülen)		2,435							



Şekil 7.9. Karışım-1 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

Tablo 7.15'te tasarım yoğurma sayısında (Ndes) 1. numune için gösterilen hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$W_m = 1260,08 \text{ gr}$$

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0.001$$

$$V_{mx} = \frac{3,14 \times 100^2 \times 70,9}{4} \times 0,001 = 556,85 \text{ cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = \frac{(W_m / V_{mx})}{\gamma_{su}}$$

$$\gamma_{su} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = (1260,08 / 556,85) / 1 = 2,264 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{ölçülen}) = 2,331 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mm}(\text{ölçülen}) = 2,435 \text{ gr/cm}^3$$

$$C = \frac{G_{mb}(\text{ölçülen})}{G_{mb}(\text{tahmini})} = 2,331 / 2,264 = 1,030$$

$$G_{mb}(\text{düzeltilmiş}) = C \times G_{mb}(\text{tahmini})$$

$$G_{mb}(\text{düzeltilmiş}) = 1,030 \times 2,264 = 2,331$$

$$\% \text{ Gmm} = 100 \times \text{Gmb}(\text{düzeltilmiş}) / \text{Gmm}(\text{ölçülen})$$

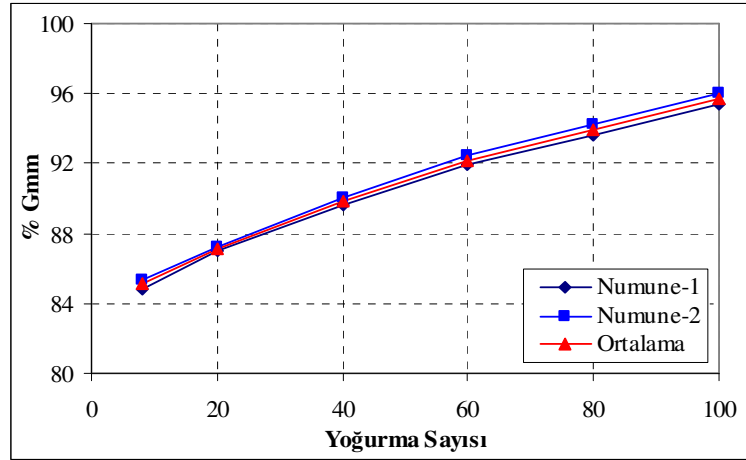
$$\% \text{ Gmm} = 100 \times 2,331 / 2,435 = \%95,75$$

$$\text{Ortalama } \% \text{ Gmm} = (95,75 + 95,96) / 2 = \%95,86$$

Karışım-2'nin %5,109 ve Karışım-3'ün %5,305 bitüm içeriğinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 7.16 ve Tablo 7.17'de, yoğunluk eğrileri ise Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de verilmiştir.

Tablo 7.16. Karışım-2 numunelerinin %5,109 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

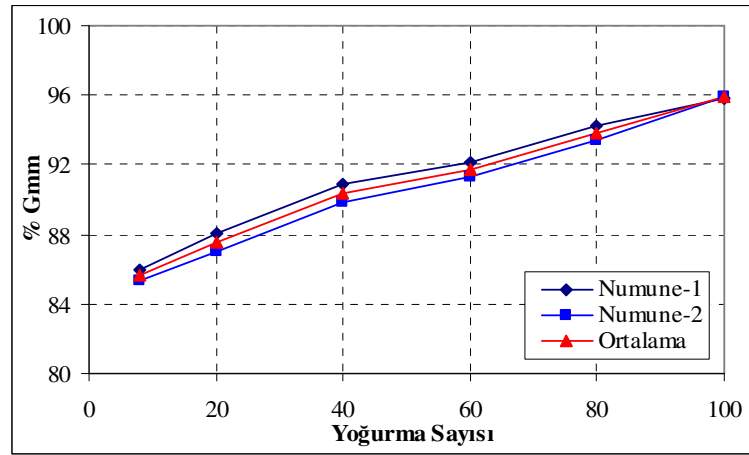
Devir Sayısı	Karışım-2 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1259,69 gr		Numune-2		Wm = 1259,41 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	80,4	1,996	2,033	84,86	80,8	1,986	2,045	85,35	85,10
Ndes= 100	71,5	2,244	2,286	95,42	71,8	2,234	2,301	96,05	95,73
Gmb(ölçülen)		2,286			2,301				
Düz. Faktörü. (C)		1,019			1,030				
Gmm(ölçülen)		2,396							



Şekil 7.10. Karışım-2 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

Tablo 7.17. Karışım-3 numunelerinin %5,305 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım-3 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1262,72 gr		Numune-2		Wm = 1261,86 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	78,3	2,054	2,098	86,01	78,9	2,037	2,083	85,37	85,69
Ndes= 100	70,3	2,288	2,337	95,80	70,2	2,290	2,341	95,95	95,87
Gmb(ölçülen)		2,337			2,341				
Düz. Faktörü. (C)		1,021			1,022				
Gmm(ölçülen)		2,439							

**Şekil 7.11.** Karışım-3 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

Deneme karışımlarının özelliklerinin tayin edilebilmesi ve şartname limitleri ile karşılaştırılabilmesi için, hesaplamalar için gerekli olan ortalama %Gmm@Ndes ve %Gmm@Nini değerleri Tablo 7.15, Tablo 7.16 ve Tablo 7.17’den alınarak aşağıda Tablo 7.18’de verilmiştir. Bu yoğunluklar esas alınarak, her karışımın tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VMA) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmiş ve Tablo 7.19’da verilmiştir.

Tablo 7.18. Deneme karışımlarının Nini ve Ndes’deki %Gmm değerleri

Deneme Karışımı	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
Karışım-1	85,14	95,86
Karışım-2	85,10	95,73
Karışım-3	85,69	95,87

$$V_a = 100 - \%G_{mm}@N_{des}$$

$$\text{Karışım-1: } V_a = 100 - 95,86 = \%4,14$$

$$\text{Karışım-2: } V_a = 100 - 95,73 = \%4,27$$

$$\text{Karışım-3: } V_a = 100 - 95,87 = \%4,13$$

$$\%VMA = 100 - \left(\frac{\%G_{mm} @ N_{des} \times G_{mm} \times P_s}{G_{sb}} \right)$$

$$\text{Karışım-1: } VMA = 100 - \left(\frac{95,86 \times 2,435 \times 0,948}{2,617} \right) = \%15,45$$

$$\text{Karışım-2: } VMA = 100 - \left(\frac{95,83 \times 2,396 \times 0,949}{2,624} \right) = \%17,05$$

$$\text{Karışım-3: } VMA = 100 - \left(\frac{95,87 \times 2,439 \times 0,947}{2,619} \right) = \%15,43$$

Tablo 7.19. Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti

Deneme Karışımı	%AC	%G _{mm} @N _{ini}	%G _{mm} @N _{des}	%V _a	%VMA
Karışım-1	5,207	85,14	95,86	4,14	15,45
Karışım-2	5,109	85,10	95,73	4,27	17,05
Karışım-3	5,305	85,69	95,87	4,13	15,43

Deneme karışımları için tasarım yoğurma sayısında (N_{des}) bulunan hava boşluğu yüzdeleri % 4'den farklı çıktığından, tasarım yoğurma sayısındaki hava boşluğu %4 olan tahmini bir asfalt içeriği hesaplanmış ve hesaplanan tahmini tasarım asfalt içeriğindeki tahmini tasarım özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Tasarım yoğurma sayısında (N_{des}) hava boşluğu % 4 olan tahmini asfalt içeriği;

$$P_b(\text{tahmini}) = P_{bi} - (0,4 \times (4 - V_a))$$

$$\text{Karışım-1: } P_b(\text{tahmini}) = 5,2 - (0,4 \times (4 - 4,14)) = \%5,27$$

$$\text{Karışım-2: } P_b(\text{tahmini}) = 5,1 - (0,4 \times (4 - 4,27)) = \%5,21$$

$$\text{Karışım-3: } P_b(\text{tahmini}) = 5,3 - (0,4 \times (4 - 4,13)) = \%5,35$$

Tasarım yoğurma sayısındaki (N_{des}), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yoğurma sayısındaki (N_{ini}) karışım yoğunlukları, bu tahmini asfalt içerikleri için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\%VMA(tahmini) = \%VMA(başlangıç) + C \times (4 - Va)$$

C = Boşluk yüzdeleri %4'den büyük olduğundan 0,2 olarak alınmıştır.

$$\text{Karışım-1: } \%VMA(tahmini) = 15,45 + 0,2 \times (4 - 4,14) = \%15,43$$

$$\text{Karışım-2: } \%VMA(tahmini) = 17,05 + 0,2 \times (4 - 4,27) = \%17,02$$

$$\text{Karışım-3: } \%VMA(tahmini) = 15,43 + 0,2 \times (4 - 4,13) = \%15,42$$

$$\%VFA(tahmini) = 100 \times \frac{(\%VMA(tahmini) - 4,0)}{\%VMA(tahmini)}$$

$$\text{Karışım-1: } \%VFA(tahmini) = \frac{15,43 - 4,0}{15,43} \times 100 = \%74,07$$

$$\text{Karışım-2: } \%VFA(tahmini) = \frac{17,02 - 4,0}{17,02} \times 100 = \%76,50$$

$$\text{Karışım-3 : } \%VFA(tahmini) = \frac{15,42 - 4,0}{15,42} \times 100 = \%74,06$$

$$\%Gmm(tahmini)@Nini = \%Gmm(deneme)@Nini - (4,0 - Va)$$

$$\text{Karışım-1: } \%Gmm(tahmini)@Nini = 85,14 - (4,0 - 4,14) = \%85,28$$

$$\text{Karışım-2: } \%Gmm(tahmini)@Nini = 85,10 - (4,0 - 4,27) = \%85,37$$

$$\text{Karışım-3: } \%Gmm(tahmini)@Nini = 85,69 - (4,0 - 4,13) = \%85,82$$

Son olarak, karışımda kullanılan 0,075 mm'lik elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesinin, efektif asfalt bağlayıcı içeriğine oranlanması ile hesaplanan filler veya toz oranı (DP) aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Pbe(tahmini) = Pb(tahmini) - (Ps \times Gb) \times \left(\frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right)$$

$$\text{Karışım-1: } Pbe(tahmini) = 5,27 - (94,73 \times 1,039) \times \left(\frac{2,629 - 2,617}{2,629 \times 2,617} \right) = \%5,09$$

$$\text{Karışım-2: } Pbe(tahmini) = 5,21 - (94,79 \times 1,039) \times \left(\frac{2,671 - 2,624}{2,671 \times 2,624} \right) = \%4,56$$

$$\text{Karışım-3: } Pbe(tahmini) = 5,35 - (94,65 \times 1,039) \times \left(\frac{2,682 - 2,619}{2,682 \times 2,619} \right) = \%4,48$$

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be(tahmini)}}$$

Karışım-1: $DP = 5,0/5,09 = 0,98$

Karışım-2: $DP = 6,0/4,56 = 1,32$

Karışım-3: $DP = 4,5/4,48 = 1,01$

Sonuç olarak, başlangıçta değerlendirilmeye alınan üç farklı agrega karışımı için, başlangıç asfalt içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler Tablo 7.20’de gösterilerek şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.20. Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri

Deneme Karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
Karışım-1	5,21	5,27	4,0	15,43	74,07	0,98	85,28	96
Karışım-2	5,11	5,21	4,0	17,02	76,50	1,32	85,37	96
Karışım-3	5,30	5,35	4,0	15,42	74,06	1,01	85,82	96
Şartname Kriterleri			4,0	14,0 (min.)	65-75 (min.)	0,6-1,2	≤89,0	96

Sıkıştırılan deneme karışımlarının özellikleri şartname kriterleri ile kıyaslandığında, Karışım-2’nin bitümle dolu boşluk oranı (VFA) ve filler oranı (DP) bakımından şartname kriterlerini sağlamadığı belirlenmiştir. Karışım-1 ve Karışım-3 bütün şartname kriterlerini karşılamıştır. Her iki gradasyon hacimsel olarak kriterleri sağlamasına rağmen bitüm ihtiyacı az olduğundan ayrıca yasaklanmış bölgenin üstünden geçen bir gradasyonun kullanılması durumunda ince malzeme miktarı fazla olacağından tekerlek izi probleminin oluşabileceği göz önünde bulundurulduğunda çalışmanın geri kalanında Karışım-1’e ait deneme agrega gradasyonun, tasarım agrega gradasyonu olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

7.4.2. Saf Karışımın Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi

Hazırlanan deneme agregası karışımlarından tasarım agregası gradasyonu seçildikten sonra, kabul edilen deneme karışımının (Karışım-1) tahmini asfalt içeriğinde, $\pm 0,5$ ve $+1,0$ olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde ve her asfalt içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 asfalt karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu dört asfalt içeriği, Superpave karışım tasarım yöntemi için minimum gereksinimdir. Karışım-1 için; PG 64-34 bağlayıcısı kullanılarak %4,77; %5,27; %5,77 ve %6,27 asfalt içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri “Tasarım Agregası Gradasyonu Seçimi” bölümünde ifade edildiği gibi hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Ayrıca, seçilen agregası karışımının her bir asfalt içeriğindeki karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri belirlenerek Tablo 7.21’de gösterilmiştir.

Tablo 7.21. Farklı asfalt içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri

%AC (Pb)	Wb (gr)	Numune-1				Numune-2				Gmm
		A (kuru)	B (doğru)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	A (kuru)	B (doğru)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	
4,77	60,1	1254,81	1261,76	718,82	2,311	1255,51	1263,52	719,07	2,306	2,450
5,27	66,7	1261,68	1264,74	725,17	2,338	1261,56	1265,2	724,55	2,333	2,433
5,77	73,4	1266,4	1268,57	729,54	2,349	1266,1	1267,14	729,47	2,355	2,416
6,27	80,2	1272,33	1274,61	736,35	2,364	1273,61	1275,83	736,11	2,360	2,399

Karışım-1 agregasının %4,77; %5,27; %5,77 ve %6,27 asfalt içeriklerinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 7.22-7.25’te verilmiştir.

Tablo 7.22. Karışım numunelerinin %4,77 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1254,81 gr		Numune-2		Wm = 1255,51 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	80,1	1,996	2,054	83,84	79,6	2,009	2,060	84,06	83,95
Ndes= 100	71,2	2,245	2,311	94,32	71,1	2,249	2,306	94,11	94,21
Gmb(ölçülen)		2,311			2,306				
Düz. Faktörü. (C)		1,031			1,040				
Gmm(ölçülen)		2,450							

Tablo 7.23. Karışım numunelerinin %5,27 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1261,68 gr		Numune-2		Wm = 1261,56 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	79,8	2,014	2,080	85,51	79,9	2,011	2,076	85,34	85,43
Ndes= 100	71,0	2,264	2,338	96,11	71,1	2,260	2,333	95,91	96,01
Gmb(ölçülen)		2,338			2,333				
Düz. Fakt. (C)		1,033			1,032				
Gmm(ölçülen)		2,433							

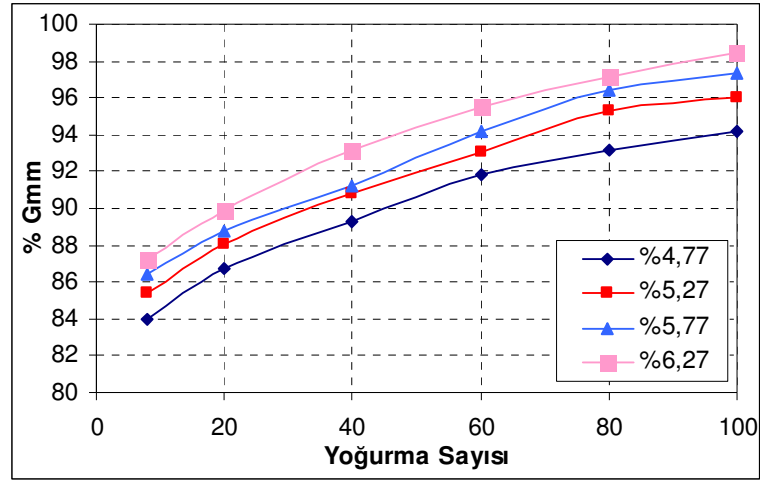
Tablo 7.24. Karışım numunelerinin %5,77 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1266,40 gr		Numune-2		Wm = 1266,10 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	79,6	2,027	2,084	86,25	79,7	2,024	2,092	86,59	86,42
Ndes= 100	70,6	2,285	2,349	97,25	70,8	2,278	2,355	97,47	97,36
Gmb(ölçülen)		2,349			2,355				
Düz. Fakt. (C)		1,028			1,034				
Gmm(ölçülen)		2,416							

Tablo 7.25. Karışım numunelerinin %6,27 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1272,33 gr		Numune-2		Wm = 1273,61 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	80,3	2,018	2,093	87,24	80,0	2,028	2,091	87,17	87,21
Ndes= 100	71,1	2,280	2,364	98,53	70,9	2,288	2,360	98,36	98,45
Gmb(ölçülen)		2,364			2,360				
Düz. Faktörü. (C)		1,037			1,031				
Gmm(ölçülen)		2,399							

Karışım-1 agrega graasyonu ile %4,77; %5,27; %5,77 ve %6,27 asfalt içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri, Şekil 7.12’de gösterilmiştir.



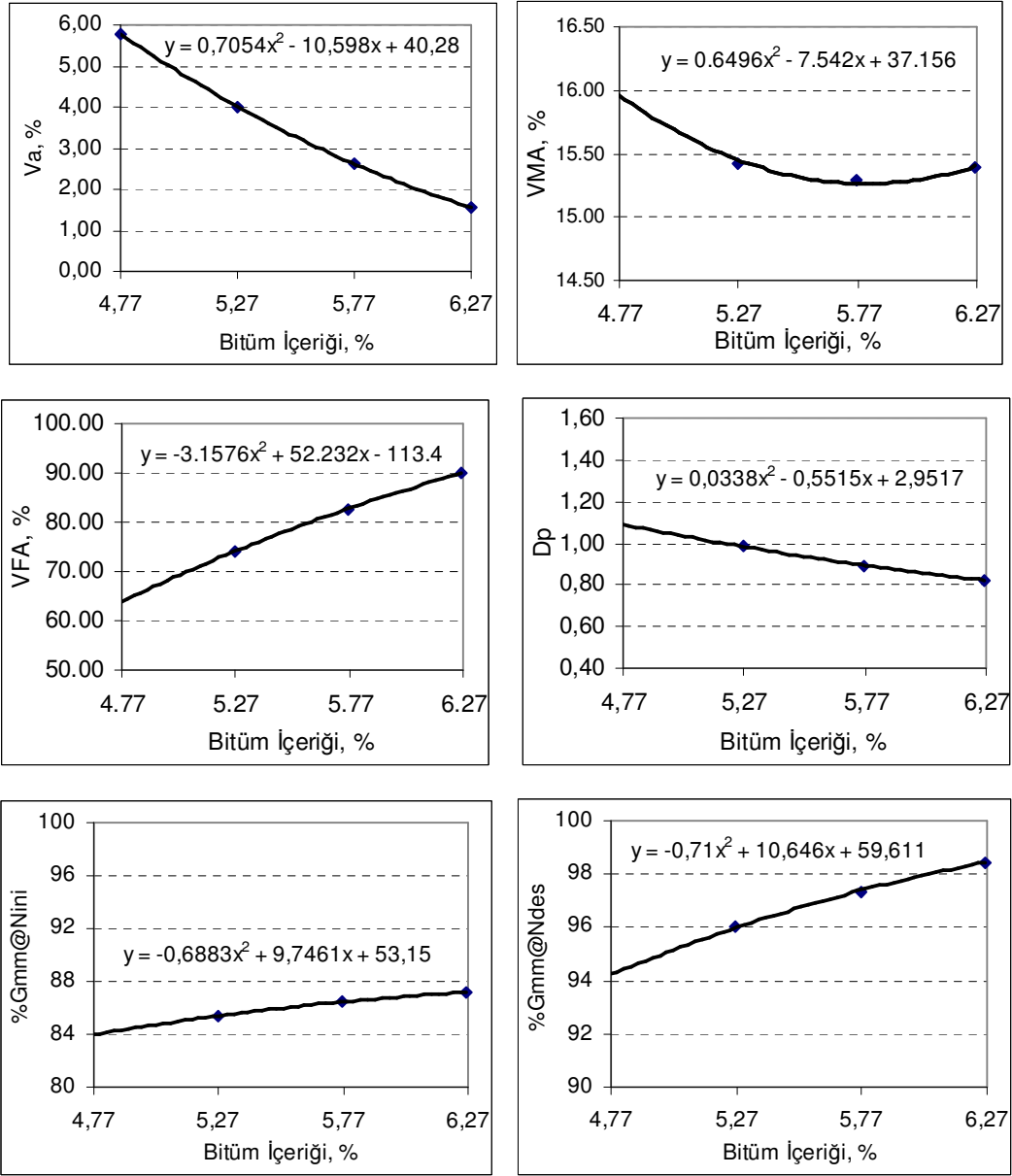
Şekil 7.12. Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri

Tasarım yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı asfalt içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 7.26’da verilmiştir.

Tablo 7.26. Karışım numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	<u>%Gmm@Nini.</u>	<u>%Gmm@Ndes.</u>
4,77	5,79	15,97	63,78	1,09	83,95	94,21
5,27	3,99	15,43	74,12	0,98	85,43	96,01
5,77	2,64	15,29	82,73	0,89	86,42	97,36
6,27	1,55	15,39	89,91	0,82	87,21	98,45

Tasarım yoğurma sayısında (Ndes=100) hesaplanan Va, VMA, VFA ve DP değerleri ile yoğunluk değerlerinin, asfalt yüzdelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafikler çizilerek Şekil 7.13’te gösterilmiştir.



Şekil 7.13. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin asfalt içeriği ile değişimi

Karışımlarda bağlayıcı olarak kullanılan PG 64–34 sınıfı bağlayıcı için tasarım asfalt bağlayıcı içeriği; karışımın hava boşluğu yüzdesi-asfalt yüzdesi grafiği yardımıyla, boşluk % 4 olacak şekilde %5,27 olarak tespit edilmiştir. Bulunan bu tasarım asfalt bağlayıcı yüzdesine göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 7.27’de verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.27. Karışımların %5,27 tasarım asfalt bağlayıcı içeriğindeki özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va)	% 4,0	% 4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA)	% 15,47	Min. %14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)	% 74,1	% 65–75
Filler Oranı (DP)	0,99	0,6–1,2 (0,8–1,6)
%Gmm@Nini. = 8	% 85,4	Maks. % 89
%Gmm@Ndes. = 100	% 96,0	% 96

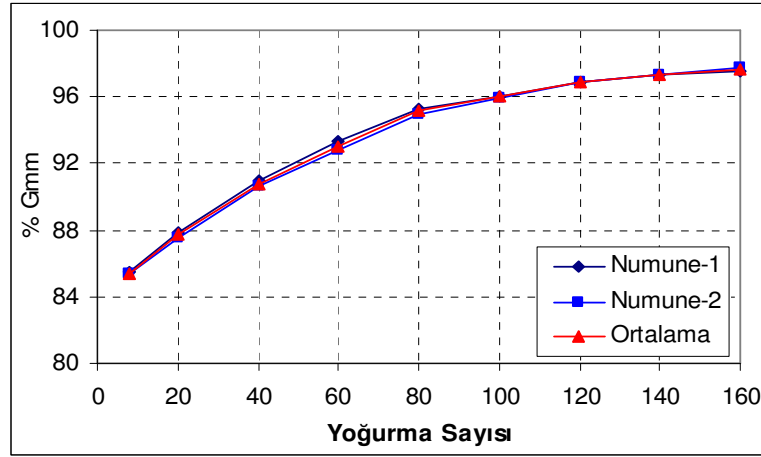
Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan ve maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri Tablo 7.28’de, sıkıştırma karakteristikleri Tablo 7.29’da, yoğunluk eğrileri Şekil 7.14’te ve bu numunelerin farklı yoğurma sayılarındaki (Nini, Ndes ve Nmaks) ortalama maksimum yoğunluk yüzdesi (%Gmm) değerleri de Tablo 7.30’da verilmiştir.

Tablo 7.28. Kontrol karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri

%AC (Pb)	Wb (gr)	Numune-1				Numune-2				Gmm
		A (kuru)	B (doygun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	A (kuru)	B (doygun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	
5,27	66,7	1260,08	1263,92	726,68	2,345	1261,61	1263,31	727,01	2,352	2,433

Tablo 7.29. Numunelerin Nmaks.’da %5,27 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1260,08 gr		Numune-2		Wm = 1261,61 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	79,2	2,027	2,082	85,58	78,9	2,037	2,081	85,54	85,56
20	77,5	2,071	2,128	87,45	77,5	2,074	2,119	87,09	87,27
40	74,3	2,160	2,219	91,22	74,2	2,166	2,213	90,96	91,09
60	72,3	2,220	2,281	93,74	72,1	2,229	2,277	93,61	93,68
80	71,4	2,248	2,309	94,92	71,3	2,254	2,303	94,66	94,79
Ndes= 100	70,7	2,270	2,332	95,86	70,2	2,289	2,339	96,14	96,00
120	70,6	2,274	2,336	96,00	70,1	2,293	2,342	96,28	96,14
140	70,4	2,280	2,342	96,27	70,0	2,296	2,346	96,42	96,35
Nmax= 160	70,3	2,283	2,345	96,41	69,8	2,303	2,352	96,70	96,55
Gmb(ölçülen)		2,345			2,352				
Düz. Faktörü. (C)		1,027			1,022				
Gmm(ölçülen)		2,433							



Şekil 7.14. Karışım numunelerinin Nmaks.'da %5,27 bitüm içeriğindeki yoğunluk eğrileri

Tablo 7.30. Karışım numunelerinin Nmaks.'da %5,27 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri

Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	85,56	96,0	96,55
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

Tablo 7.30 incelendiğinde, seçilmiş olan tasarım agrega gradasyonu (Karışım-1) ile ana bağlayıcı (PG 64-34) kullanılarak tespit edilen tasarım bitüm içeriğinde (%5,27) hazırlanan ve Nmaks'da sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk yüzdesi değerlerini Nini, Ndes ve Nmaks yoğurma sayılarında sağladığı görülmektedir.

7.4.3. Asfaltit İçeren Karışımların Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi

Saf karışımın yanı sıra asfaltit içeren karışımların tasarım asfalt bağlayıcı içerikleri de Superpave yöntemine göre belirlenmiştir. Asfaltit içeren ve saf karışımların tasarım asfalt bağlayıcı içerikleri ve belirlenen hacimsel özellikleri ile şartname kriterleri Tablo 7.31'de verilmiştir.

Tablo 7.31'de görüldüğü üzere karışımlarının hepsi agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) dışındaki bütün şartları sağlamıştır. Superpave karışım tasarımında VMA şartının en az %14,0 olması istenmektedir. Saf karışım ve filler yerine ağırlıkça %1, %2 ve %3 asfaltit içeren karışımlar bu şartı sağlamasına rağmen filler yerine ağırlıkça %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlar bu şartı sağlamamıştır. Bilindiği üzere VMA, boşluk oranı ve

efektif bağlayıcı hacminin toplamını ifade etmektedir. Superpave şartnamesinde boşluk oranı %4 sabit olduğundan %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların VMA şartını sağlamaması efektif bağlayıcı hacminin azalmasından kaynaklanmıştır. Asfaltit içeriği arttıkça tasarım asfalt bağlayıcı içeriği azalmıştır. Efektif bağlayıcı hacminin azalması asfaltit içeriği arttıkça tasarım asfalt bağlayıcı içeriğinin azalmasından kaynaklanmıştır. Filler yerine ağırlıkça %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlar Superpave şartname kriterlerini sağlamamasına rağmen asfaltitin etkisini daha geniş bir aralıkta araştırabilmek için bitümlü sıcak karışımlar üzerinde uygulanan deneylerde kullanılmıştır.

Tablo 7.31. Asfaltit içeren ve saf karışımların hacimsel tasarım sonuçları ve şartname limitleri

Karışım Özelliği	Şartname Kriteri	Asfaltit İçeriği, (%)					
		0	1	2	3	4	5
Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriği, (%)	-	5,27	5,19	5,15	5,10	5,08	5,04
Hava Boşluğu Yüzdesi, (Va, %)	4,0	4,00	4,01	4,05	3,98	3,98	4,03
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi, (VMA, %)	Min. 14,0	15,44	15,00	14,52	14,01	13,38	13,10
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi, (VFA, %)	65–75	74,12	73,27	72,15	71,58	70,27	69,21
Filler Oranı, (DP)	0,8–1,6	0,98	1,02	1,07	1,11	1,18	1,22
$\%G_{mm}@N_{ini.} = 8$ (%)	Maks. 89	85,56	85,59	84,97	85,28	85,64	85,56
$\%G_{mm}@N_{des.} = 100$ (%)	96	96,00	95,99	95,95	96,02	96,02	95,97
$\%G_{mm}@N_{des.} = 160$ (%)	Maks. 98	96,55	97,29	97,11	97,30	97,77	97,52

7.5. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

Asfaltit içeren ve saf bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi ile nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall Stabilitesi deneyi uygulanmıştır. Deneyler kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin yanı sıra AASHTO R30 standardına göre etüvde uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde de uygulanmıştır. Kullanılan bağlayıcı sert (PG 64–34) olduğundan ayrıca yoğun gradasyonlu bir karışım kullanıldığından stabilite değerleri yüksek çıkmıştır. Bölümümüz laboratuvarında bulunan Marshall stabilite deney aleti 25 kN kapasiteli olduğundan numuneler gradasyona uygun olarak 1100 gr. agrega kullanılarak hazırlanmıştır. Bütün karışımlar optimum bitüm içeriklerinde ve %4 boşluk oranına sahip olacak şekilde 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. Karışıklığa neden olmaması için Marshall deneyi uygulanan numunelerin isimlendirilmesi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 7.32. Marshall deneylerinde kullanılan karışım numunelerinin isimlendirilmesi

Karışım Türü	İsimlendirme	Kısaltma
Kısa dönem yaşlandırılmış, 60°C suda 40 dakikada bekletilmiş	Kontrol	K
Kısa dönem yaşlandırılmış, 60°C suda 24 saat bekletilmiş	Koşullandırılmış	KŞ
Uzun dönem yaşlandırılmış, 60°C suda 40 dakikada bekletilmiş	Yaşlandırılmış Kontrol	YK
Uzun dönem yaşlandırılmış, 60°C suda 24 saat bekletilmiş	Yaşlandırılmış Koşullandırılmış	YKŞ

7.5.1. Kısa Dönem Yaşlandırılmış Karışım Numunelerinin Marshall Deney Sonuçları

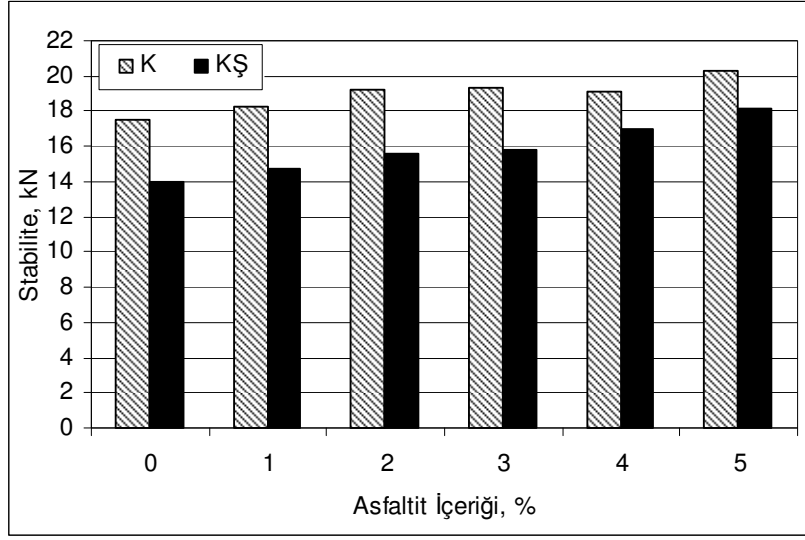
Saf ve filler yerine %1-5 oranında asfaltit içeren kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerine (K-KŞ) uygulanan Marshall stabilite ve akma deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.33 ve Tablo 7.34’te verilmiştir. Ayrıca koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall stabilite değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.15’te verilmiştir.

Tablo 7.33. Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış numunelerin (K) Marshall deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h ₁ , (mm)	h ₂ , (mm)	h ₃ , (mm)	h _{ort} , (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
0	1	62,1	63,1	62,9	62,7	17,4	3,89	1,039	18,09	4,79
	2	62,7	62,5	63,5	62,9	16,4	3,51	1,034	16,96	
	3	62,4	62,8	63,5	62,9	17,0	3,59	1,034	17,58	
	Ortalama						3,66		17,54	
1	4	62,2	62,6	63,4	62,7	18,1	3,35	1,039	18,80	5,11
	5	62,2	63,2	63,1	62,8	17,1	3,86	1,036	17,71	
	6	62,4	63,3	63,2	63,0	17,7	3,51	1,032	18,27	
	Ortalama						3,57		18,26	
2	7	63,0	63,6	62,8	63,1	18,2	3,68	1,028	18,71	5,16
	8	62,5	63,6	63,8	63,3	18,8	3,98	1,023	19,24	
	9	62,3	63,1	63,5	63,0	19,1	3,5	1,032	19,72	
	Ortalama						3,72		19,22	
3	10	63,3	64,2	63,2	63,6	18,4	3,37	1,016	18,70	5,88
	11	63,2	64,2	64,2	63,9	19,5	3,26	1,009	19,67	
	12	63,2	63,5	63,9	63,5	19,2	3,21	1,017	19,53	
	Ortalama						3,28		19,30	
4	13	63,6	64,6	64,3	64,2	18,7	3,98	1,001	18,72	5,34
	14	63,7	64,3	64,6	64,2	19,3	3,57	1,000	19,30	
	15	63,7	64,3	63,9	64,0	19,2	3,19	1,006	19,32	
	Ortalama						3,58		19,11	
5	16	64,6	63,8	64,8	64,4	20,9	3,63	0,995	20,79	5,50
	17	64,2	64,1	65,0	64,4	20,3	3,60	0,994	20,18	
	18	64,0	65,1	64,6	64,6	20,2	3,85	0,991	20,01	
	Ortalama						3,69		20,33	

Tablo 7.34. Kısa dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin (KŞ) Marshall deney sonuçları

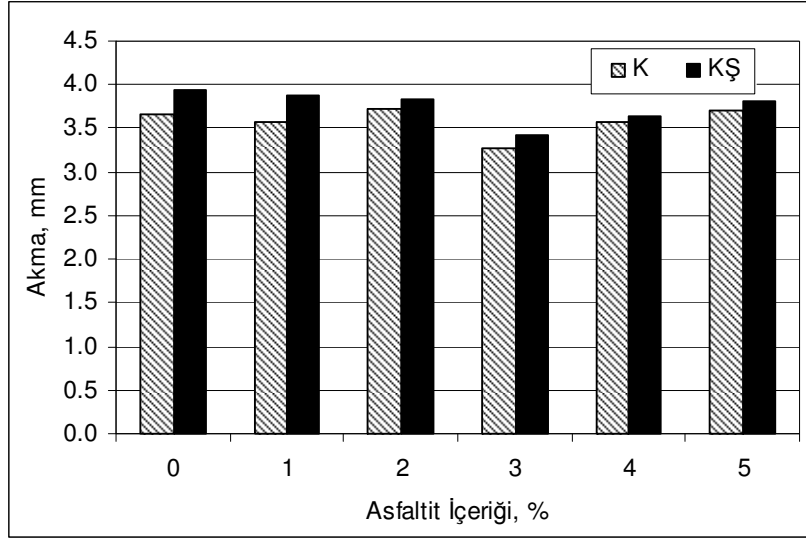
Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h ₁ , (mm)	h ₂ , (mm)	h ₃ , (mm)	h _{ort} , (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
0	1	61,8	61,6	62,0	61,8	13,3	3,45	1,064	14,15	3,57
	2	62,2	62,5	63,0	62,6	12,9	4,38	1,043	13,45	
	3	61,9	63,0	62,7	62,5	13,9	3,96	1,044	14,51	
	Ortalama						3,93		14,04	
1	4	62,2	62,3	63,0	62,5	14,6	3,73	1,045	15,25	3,80
	5	62,2	62,3	63,1	62,5	14,2	3,89	1,044	14,82	
	6	62,8	63,0	63,8	63,2	13,8	4,02	1,026	14,16	
	Ortalama						3,88		14,75	
2	7	63,3	63,7	62,8	63,3	15,8	3,99	1,024	16,18	4,08
	8	62,5	62,7	63,7	63,0	14,8	3,83	1,032	15,28	
	9	62,7	63,7	62,9	63,1	15,0	3,66	1,029	15,43	
	Ortalama						3,83		15,63	
3	10	63,5	63,7	64,2	63,8	15,5	3,73	1,010	15,66	4,64
	11	63,3	63,5	64,2	63,7	16,1	3,40	1,014	16,32	
	12	63,2	63,6	64,3	63,7	15,3	3,11	1,013	15,50	
	Ortalama						3,41		15,83	
4	13	63,5	63,8	64,8	64,0	16,5	3,61	1,004	16,57	4,66
	14	63,0	63,4	64,2	63,5	17,1	3,94	1,017	17,40	
	15	63,3	63,9	64,4	63,9	16,7	3,36	1,009	16,84	
	Ortalama						3,64		16,94	
5	16	63,8	64,1	64,8	64,2	17,9	3,74	0,999	17,88	4,76
	17	63,6	64,2	64,6	64,1	18,7	3,94	1,002	18,73	
	18	63,9	64,6	65,1	64,5	18,0	3,75	0,991	17,85	
	Ortalama						3,81		18,15	



Şekil 7.15. K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle stabilite değerlerinin değişimi

Şekil 7.15'te görüldüğü üzere koşullandırma işleminden önce asfaltit içeriği arttıkça stabilite değerlerinde genel olarak bir artış meydana gelmiştir. Ağırlıkça %2, %3 ve %4 oranında asfaltit içeren karışımların stabilite değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. En yüksek stabilite değeri ise %5 asfaltit içeren karışımlarda görülmüştür. %5 oranında asfaltit kullanılması durumunda stabilite değerinin saf karışıma göre %15,9 arttığı tespit edilmiştir. Kuloğlu ve ekibi ile Oruç ve Eren tarafından yapılan çalışmalarda saf ve asfaltit içeren karışımların tasarımı Marshall yöntemine göre yapılmıştır. Bu çalışmalarda asfaltit kullanımı ile stabilite değerinin azaldığı belirtilmiştir (Kuloğlu vd., 2009; Oruç ve Eren, 2008). Bu tez çalışmasında ise asfaltit içeriğinin artması ile stabilite değerinin arttığı belirlenmiştir. Bu zıtlığın tasarım yönteminden ve kullanılan agrega ile bitümün farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Koşullandırılmış numunelerin stabilite değerlerinde koşullandırılmamış numunelere göre bir azalma meydana gelmiştir. Ayrıca koşullandırma işleminden sonra asfaltit içeriğinin artışıyla stabilite değerlerinin düzenli şekilde arttığı tespit edilmiştir. Koşullandırma işleminden sonra en yüksek stabiliteye %5 asfaltit içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %3, %4 ve %5 asfaltit kullanılması durumunda stabilite değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %12,8; %20,7 ve %29,3 oranında arttığı tespit edilmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış karışımların akma değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.16'da verilmiştir.

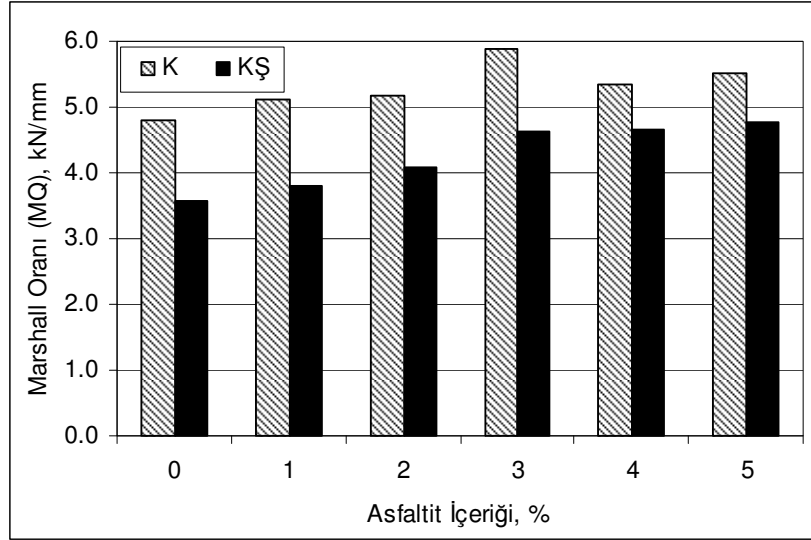


Şekil 7.16. K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle akma değerlerinin değişimi

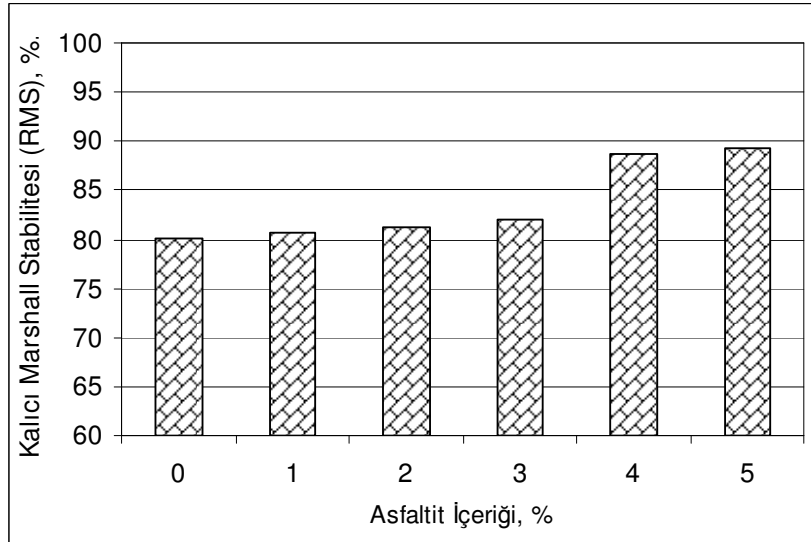
Şekil 7.16 incelendiğinde akma değerlerinin %3 asfaltit içeriğine kadar azaldığı daha sonra arttığı görülmektedir. Koşullandırılmış karışımların akma değerlerinin değişimi koşullandırılmamış karışımlarla benzer özellik göstermiştir. Koşullandırma nedeniyle akma değerlerinde artış meydana gelmiştir. Koşullandırılmamış karışımlar içerisinde en yüksek akma değerlerine %2 asfaltit içeren karışımlarda rastlanırken koşullandırılmış karışımlar içerisinde en yüksek akma değerlerine saf karışımda rastlanmıştır. En düşük akma değeri ise her iki durumda ağırlıkça %3 asfaltit içeren karışımda gözlenmiştir. Marshall stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall oranı (MQ) değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.17’de verilmiştir.

Şekil 7.17 incelendiğinde Marshall oranı (MQ) değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile genel olarak arttığı görülmektedir. Koşullandırma işleminden önce en yüksek MQ değerine ağırlıkça %3 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum öncelikle %3 asfaltit içeren karışımın akma değerinin düşük çıkmasından kaynaklanmıştır. Koşullandırılmış numunelerde, koşullandırılmamış numunelere göre MQ değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Koşullandırma işleminden sonra %3, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların MQ değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum koşullandırma işleminden sonra %3 ve %4 oranında asfaltit içeren karışımların %5 asfaltit içeren karışımlar kadar kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının yüksek olacağını göstermektedir. Koşullandırma öncesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda MQ değerinde saf karışımın MQ değerine göre %22,8 artış meydana gelirken koşullandırma

sonrasında %3 asfaltit içeren karışımlarda %30,0 , %4 asfaltit içeren karışımlarda %30,5 ve %5 asfaltit içeren karışımlarda %33,3 oranında artış meydana gelmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan Kalıcı Marshall Stabilitesi değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi ise Şekil 7.18’de verilmiştir.



Şekil 7.17. K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle marshall oranı değerlerinin değişimi



Şekil 7.18. Kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarının asfaltit içeriğiyle RMS değerlerinin değişimi

Şekil 7.18’de görülen RMS değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi incelendiğinde asfaltit içeriği arttıkça RMS değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Saf karışım, %1, %2 ve %3 oranında asfaltit içeren karışımların RMS değerleri birbirlerine yakın çıkarken %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların RMS değerlerinin diğer karışımlara göre önemli oranda yüksek olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %4 asfaltit içeren karışımın RMS değerinin saf karışıma göre %10,8 oranında arttığı, %5 asfaltit içeren karışımın RMS değerinin ise %11,6 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu durum asfaltit kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını arttırdığını özellikle %4 ve %5 oranında asfaltit kullanımının nem hasarına karşı dayanımda daha etkin olduğunu göstermektedir.

7.5.2. Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışım Numunelerinin Marshall Deney

Sonuçları

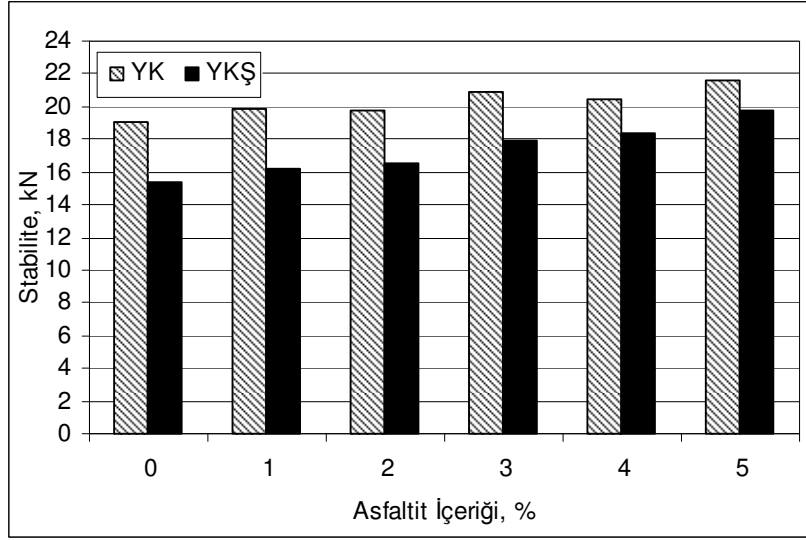
Uzun dönem yaşlandırılmış, filler yerine %1-5 oranında asfaltit içeren ve saf karışım numunelerine (YK-YKŞ) uygulanan Marshall deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.35 ve Tablo 7.36’da verilmiştir. Uzun dönem yaşlandırılmış karışımların koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall stabilite değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.19’da verilmiştir.

Tablo 7.35. Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış numunelerin (YK) Marshall deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h ₁ , (mm)	h ₂ , (mm)	h ₃ , (mm)	h _{ort} , (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
0	1	62,3	62,7	63,2	62,7	19,1	3,62	1,039	19,84	5,56
	2	62,9	62,8	63,5	63,1	18,0	3,56	1,030	18,53	
	3	62,6	62,6	63,5	62,9	18,3	3,12	1,034	18,92	
	Ortalama						3,43		19,10	
1	4	62,1	62,7	63,2	62,7	19,1	3,86	1,040	19,87	5,66
	5	63,3	63,0	62,5	62,9	18,9	3,11	1,033	19,53	
	6	63,2	63,4	62,5	63,0	19,5	3,55	1,031	20,10	
	Ortalama						3,51		19,83	
2	7	63,2	63,3	62,5	63,0	19,6	3,21	1,031	20,22	5,85
	8	62,8	64,0	63,2	63,3	18,8	3,55	1,023	19,22	
	9	62,6	62,3	63,4	62,8	19,2	3,39	1,038	19,92	
	Ortalama						3,38		19,79	
3	10	63,6	63,3	62,4	63,1	20,3	3,37	1,029	20,88	6,46
	11	62,9	64,1	63,6	63,5	21,0	3,06	1,017	21,36	
	12	63,3	63,9	63,0	63,4	20,0	3,27	1,021	20,42	
	Ortalama						3,23		20,89	
4	13	63,4	64,3	63,9	63,9	20,7	3,22	1,009	20,88	6,13
	14	63,7	64,2	64,3	64,1	19,8	3,59	1,003	19,87	
	15	63,1	63,7	64,2	63,7	20,3	3,19	1,014	20,58	
	Ortalama						3,33		20,44	
5	16	63,9	64,7	64,2	64,3	21,6	3,18	0,998	21,56	6,64
	17	64,5	64,1	65,3	64,6	21,3	3,03	0,989	21,06	
	18	63,9	64,9	64,4	64,4	22,1	3,52	0,995	21,99	
	Ortalama						3,24		21,54	

Tablo 7.36. Uzun dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin (YKŞ) Marshall deney sonuçları

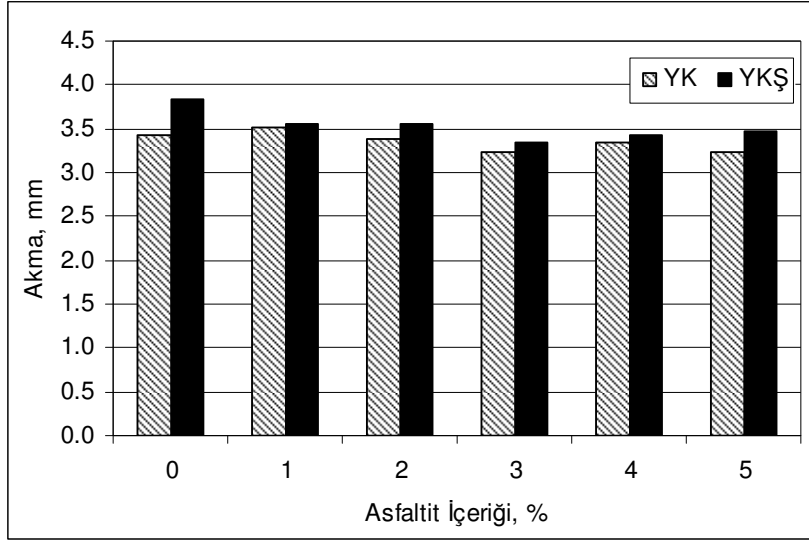
Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h ₁ , (mm)	h ₂ , (mm)	h ₃ , (mm)	h _{ort} , (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
0	1	62,8	61,9	62,2	62,3	14,7	4,18	1,050	15,44	4,02
	2	62,3	62,7	63,2	62,7	14,4	3,38	1,039	14,95	
	3	61,7	62,9	62,5	62,4	15,1	3,95	1,048	15,83	
	Ortalama						3,84		15,41	
1	4	62,4	62,8	63,3	62,8	15,4	3,79	1,036	15,95	4,55
	5	63,1	62,7	63,1	63,0	16,0	3,37	1,032	16,52	
	6	63,2	62,7	63,6	63,2	15,6	3,49	1,027	16,02	
	Ortalama						3,55		16,16	
2	7	63,1	63,7	62,6	63,1	15,7	3,43	1,028	16,14	4,65
	8	63,3	62,9	62,4	62,9	16,3	3,39	1,035	16,87	
	9	63,3	62,6	63,8	63,2	16,3	3,87	1,025	16,71	
	Ortalama						3,56		16,57	
3	10	63,4	63,7	64,2	63,8	17,6	2,89	1,011	17,80	5,35
	11	63,1	63,2	64,3	63,5	17,7	3,13	1,017	18,01	
	12	63,4	62,7	63,8	63,3	17,4	4,01	1,023	17,81	
	Ortalama						3,34		17,87	
4	13	63,7	64,2	63,8	63,9	18,1	3,32	1,008	18,24	5,35
	14	63,2	63,4	64,1	63,6	17,8	3,78	1,016	18,09	
	15	63,3	63,6	64,5	63,8	18,7	3,21	1,010	18,89	
	Ortalama						3,44		18,41	
5	16	63,9	64,1	64,7	64,2	19,5	3,53	0,999	19,48	5,69
	17	63,7	64,4	64,8	64,3	20,1	3,74	0,997	20,05	
	18	64,1	63,5	64,4	64,0	19,7	3,16	1,005	19,80	
	Ortalama						3,48		19,78	



Şekil 7.19. YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle stabilite değerlerinin değişimi

Şekil 7.19’da görüldüğü üzere kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi koşullandırma işleminden önce asfaltit içeriği arttıkça stabilite değerlerinde genel bir artış meydana gelmiştir. Saf karışım ile ağırlıkça %1 ve %2 oranında asfaltit içeren karışımların stabilite değerlerinin birbirine yakın ve 20 kN değerinin altında olduğu tespit edilmiştir. En yüksek stabilite değerleri ise %5 asfaltit içeren karışımda daha sonra ise %3 asfaltit içeren karışımda görülmüştür. Koşullandırılmamış numunelerde ağırlıkça %3 oranında asfaltit kullanılması durumunda stabilite değeri %9,4 oranında artarken bu oran %5 oranında asfaltit kullanılan karışımlarda %12,8 olarak tespit edilmiştir.

Koşullandırma işlemi nedeniyle stabilite değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda da koşullandırma işleminden sonra asfaltit içeriğinin artışıyla stabilite değerlerinin düzenli şekilde arttığı tespit edilmiştir. Koşullandırma işleminden sonra en yüksek stabiliteye %5 asfaltit içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %3 asfaltit kullanılması durumunda %16,0; %4 asfaltit kullanılması durumunda %19,5; %5 oranında asfaltit kullanılması durumunda ise stabilite değerinin saf karışıma göre %28,4 oranında arttığı tespit edilmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış karışımların akma değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.20’de verilmiştir.

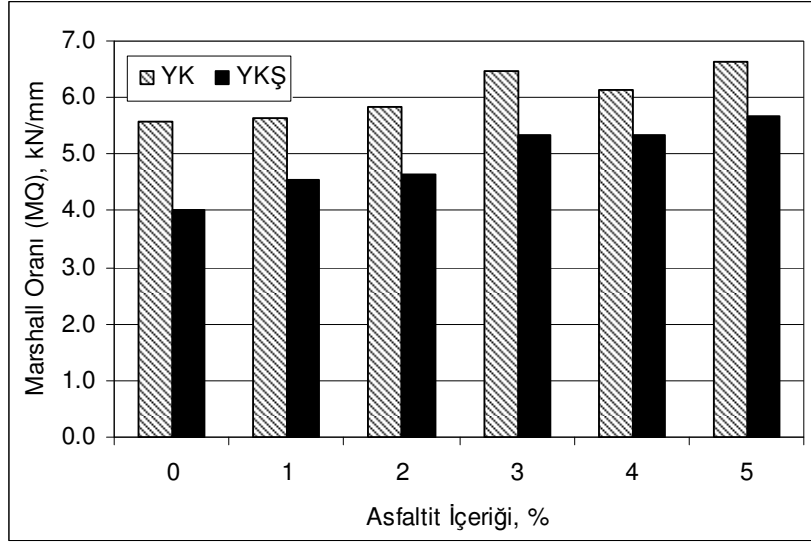


Şekil 7.20. YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle akma değerlerinin değişimi

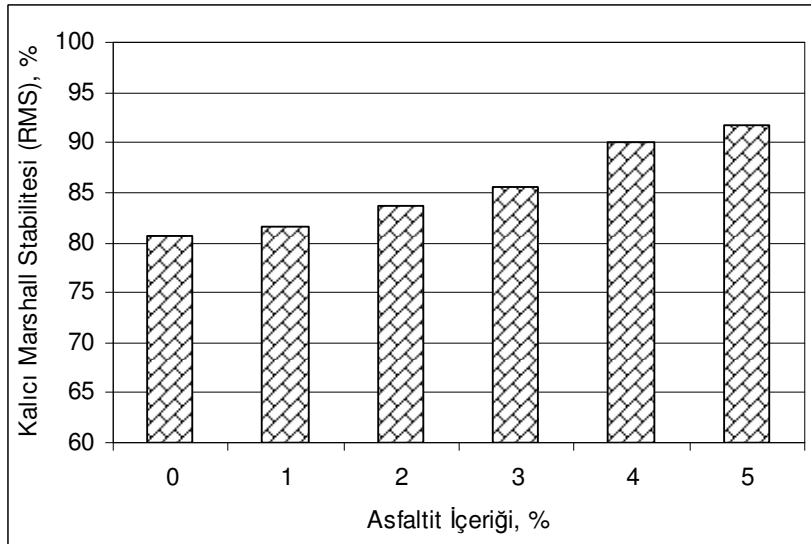
Şekil 7.20’de görüldüğü üzere kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda da %3 asfaltit içeriğine kadar akma değerlerinin genel olarak azaldığı daha sonra ise arttığı belirlenmiştir. Koşullandırma öncesinde ağırlıkça %1 oranında asfaltit içeren karışım dışında bütün karışımların akma değeri saf karışımın akma değerinden düşük çıkmıştır. Koşullandırma nedeniyle akma değerlerinde artış meydana gelmiştir. Koşullandırılmış karışımlar içerisinde en yüksek akma değeri saf karışımında gözlenirken en düşük akma değerleri kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi %3 oranında asfaltit içeren karışımında gözlenmiştir. Marshall stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall oranı (MQ) değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.21’de verilmiştir.

Marshall oranı (MQ) değerleri incelendiğinde kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda da asfaltit içeriğinin artması ile MQ değerlerinin genel olarak arttığı belirlenmiştir. Koşullandırma işleminden önce en yüksek MQ değerine ağırlıkça %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu daha sonra ise %3 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma öncesinde ağırlıkça %3 oranında asfaltit içeren karışımların MQ değerleri saf karışıma göre %16,2 oranında artarken %5 asfaltit içeren karışımlarda bu oran %19,4 olarak belirlenmiştir. Koşullandırma işlemi nedeniyle bütün karışımların MQ değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Koşullandırma işleminden sonra %3 ve %4 asfaltit içeren karışımların MQ değerlerinin aynı olduğu belirlenmiştir. Bu durum koşullandırma işleminden sonra %3

oranında asfaltit içeren karışımların %4 asfaltit içeren karışımlar kadar kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının yüksek olacağını göstermektedir. Koşullandırma sonrasında %3 ve %4 asfaltit içeren karışımlarda %33,1 ve %5 asfaltit içeren karışımlarda %41,5 oranında saf karışımın MQ değerine göre artış meydana gelmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan Kalıcı Marshall Stabilitesi değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi ise Şekil 7.22’de verilmiştir.



Şekil 7.21. YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle marshall oranı değerlerinin değişimi

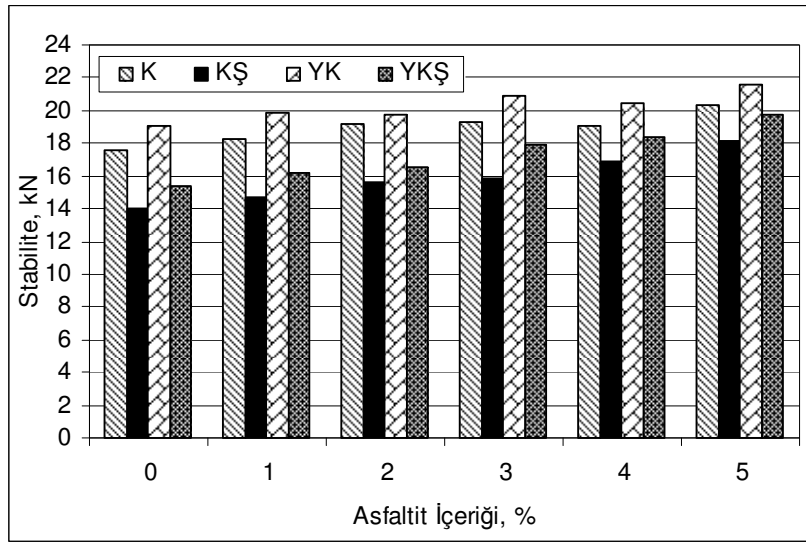


Şekil 7.22. YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle RMS değerlerinin değişimi

Şekil 7.22’de görülen kalıcı Marshall stabilitesi değerleri incelendiğinde asfaltit içeriği arttıkça RMS değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %4 ve %5 oranında asfaltit içeren karışımların RMS değerleri %90 ve üzerinde çıkmıştır. Ağırlıkça %4 asfaltit içeren karışımın kalıcı Marshall stabilitesi değerinin saf karışıma göre %11,6 oranında arttığı, %5 asfaltit içeren karışımın kalıcı Marshall stabilitesi değerinin ise %13,8 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu durum asfaltit kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını arttırdığını, kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi özellikle %4 ve %5 oranında asfaltit kullanımının nem hasarına karşı dayanımda daha etkin olduğunu göstermektedir.

7.5.3. Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Marshall Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

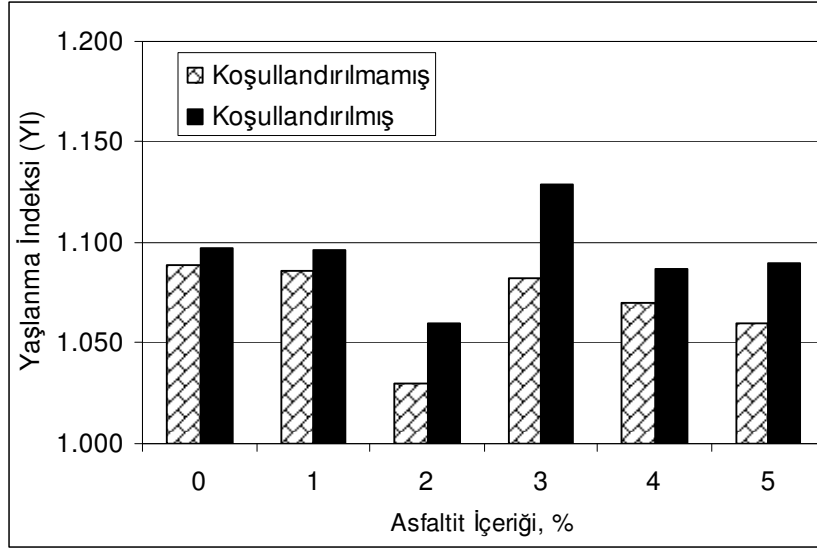
Saf karışım ve 5 farklı oranda asfaltit içeren karışımlar üzerinde uzun dönem yaşlandırmanın etkisini açık bir şekilde görebilmek amacıyla asfaltit içeriğinin artışıyla Marshall stabilite değerlerinin değişimi Şekil 7.23’te verilmiştir.



Şekil 7.23. Marshall stabilitesi-asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.23 incelendiğinde uzun dönem yaşlanmanın etkisiyle Marshall stabilite değerlerinin arttığı görülmektedir. Koşullandırma işlemi uygulanan karışımlarda da uzun dönem yaşlandırma nedeniyle bir artış meydana gelmiştir. Uzun dönem yaşlanmanın

etkisini daha net bir şekilde gösterebilmek amacıyla yaşlanmadan sonraki Marshall stabilite değerinin yaşlanmadan önceki Marshall stabilitesi değerine bölümüyle belirlenen yaşlanma indeksi (YI) değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.24'te verilmiştir.

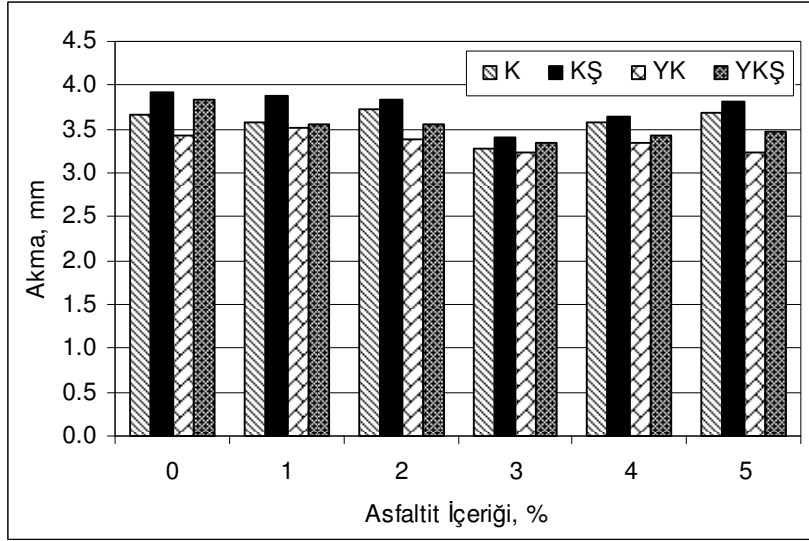


Şekil 7.24. Marshall stabilitesi yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi

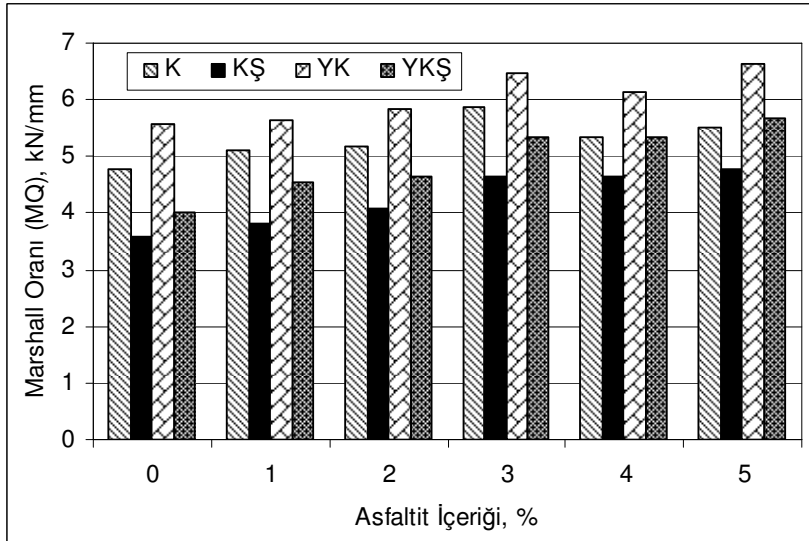
Şekilde görüldüğü üzere koşullandırılmamış karışımlarda en yüksek YI değeri saf karışımda görülürken en düşük YI değeri ağırlıkça %2 asfaltit içeren karışımlarda görülmüştür. Koşullandırma işlemi sonrasında ise en yüksek YI değerleri %3 asfaltit içeren karışımda ve saf karışımda görülmüştür. En düşük indeks değeri ise yine %2 asfaltit içeren karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış %3 asfaltit içeren karışım dışında asfaltit içeren bütün karışım numunelerinin YI değerlerinin saf karışımdan düşük olduğu belirlenmiştir. Marshall stabilite değerlerinden genel olarak asfaltit kullanımının uzun dönem yaşlanmanın etkilerini azalttığı söylenebilmektedir. Bütün karışımların akma değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.25'te verilmiştir.

Asfaltit içeriğinin artmasıyla akma değerleri saf karışıma göre genel bir azalma göstermiştir (Şekil 7.25). Ayrıca uzun dönem yaşlanma nedeniyle hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış karışımların akma değerleri azalma göstermiştir. Uzun dönem yaşlandırma nedeniyle koşullandırma öncesinde akma değerlerinde en büyük değişim %5 asfaltit içeren karışımlarda görülürken en az değişim %1 asfaltit içeren karışımda gözlenmiştir. Koşullandırılmış karışımlar içerisinde ise en fazla değişim %5 asfaltit içeren karışımlarda görülürken en az değişim %3 asfaltit içeren karışımda gözlenmiştir. Sonuç

olarak uzun dönem yaşlanmanın akma değerleri üzerinde düzenli bir değişime neden olmadığı söylenebilmektedir. Bütün karışımların Marshall oranı değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.26’da verilmiştir.



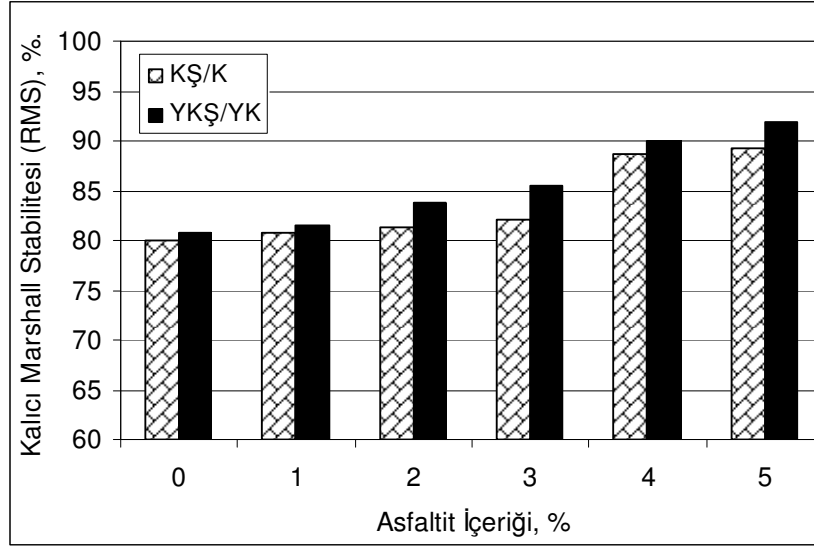
Şekil 7.25. Akma değeri-asfaltit içeriği ilişkisi



Şekil 7.26. Marshall oranı-asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.26 incelendiğinde, uzun dönem yaşlanmadan ötürü asfaltit içeriğinin artmasıyla stabilite değerlerinin artması ve akma değerlerinin azalması nedeniyle MQ değerlerinin de arttığı görülmektedir. Koşullandırılmamış karışımlarda uzun dönem yaşlanma nedeniyle

MQ değerlerinde en fazla değişim %5 asfaltit içeren karışımlarda görülürken en az değişim %3 asfaltit içeren karışımda gözlenmiştir. Koşullandırılmış karışımlarda ise en yüksek değişim %1 asfaltit içeren karışımda en düşük değişim ise saf karışımda gözlenmiştir. Bütün karışımların Kalıcı Marshall Stabilitesi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.27’de verilmiştir.



Şekil 7.27. Kalıcı marshall stabilitesi-asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.27 incelendiğinde hem kısa dönem yaşlandırma hem de uzun dönem yaşlanma nedeniyle RMS değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Uzun dönem yaşlandırma nedeniyle kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinde meydana gelen en fazla değişim %5 asfaltit içeren karışımlarda meydana gelirken en az değişim saf karışımda meydana gelmiştir.

Uzun dönem yaşlanmanın Marshall stabilite ve akma ile kalıcı Marshall Stabilitesi deneylerinden elde edilen değerler üzerindeki etkileri incelendiğinde uzun dönem yaşlanmanın elde edilen değerler üzerinde düzenli bir değişime neden olmadığı söylenebilmektedir.

7.6. Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları

Saf ve asfaltit içeren bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde AASHTO T 283 standardına uygun olarak çekme dayanımı oranı deneyi uygulanarak karışımların nem hasarına karşı dayanımları belirlenmiştir. Deneyler kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin

yanı sıra AASHTO R30 standardına göre etüvde uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde de uygulanmıştır. Her bir asfaltit içeriği için $7 \pm 0,5$ boşluk oranına sahip olacak şekilde 12 adet numune hazırlanmıştır. AASHTO T 283 standardına uygun olarak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak numuneler hazırlanırken 60 devirlik sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Ayrıca karışımların kısa dönem yaşlandırılmasında numuneler 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında (150°C) iki saat bekletilmiştir. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ardından numunelerin hacimsel özellikleri belirlenerek boşluk oranları birbirine yakın olacak şekilde gruplandırılmıştır. Hazırlanan numunelerden 6 tanesi 85°C'deki etüvde 120 saat bekletilerek uzun dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Uzun dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının %70-80 oranında suyla dolması sağlanmıştır. Bu doygunluk oranını sağlamak amacıyla koşullandırmaya maruz bırakılacak numunelerin hepsine 5 dakika süresince vakum uygulanmıştır. 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 filmden çıkarılmış ve 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek kırılmıştır. Koşullandırılmamış numunelerde 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakika'lık (50,8 mm/sn) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Maksimum yük değerleri yardımıyla çekme dayanımı değerleri Formül 6.5 kullanılarak, çekme dayanımı oranları ise Formül 6.6 kullanılarak belirlenmiştir. Çekme dayanımı oranı deneyi uygulanan numunelerin isimlendirilmesi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 7.37. Çekme dayanımı oranı deneyinde kullanılan karışım numunelerinin isimlendirilmesi

Karışım Türü	İsimlendirme	Kısaltma
Kısa dönem yaşlandırılmış, 25°C'deki suda 2 saat bekletilmiş	Kontrol	K
Kısa dönem yaşlandırılmış, -18°C sıcaklıkta 16 saat 60°C suda 24 saat bekletilmiş	Koşullandırılmış	KŞ
Uzun dönem yaşlandırılmış, 25°C'deki suda 2 saat bekletilmiş	Yaşlandırılmış Kontrol	YK
Uzun dönem yaşlandırılmış, -18°C sıcaklıkta 16 saat 60°C suda 24 saat bekletilmiş	Yaşlandırılmış Koşullandırılmış	YKŞ

7.6.1. Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları

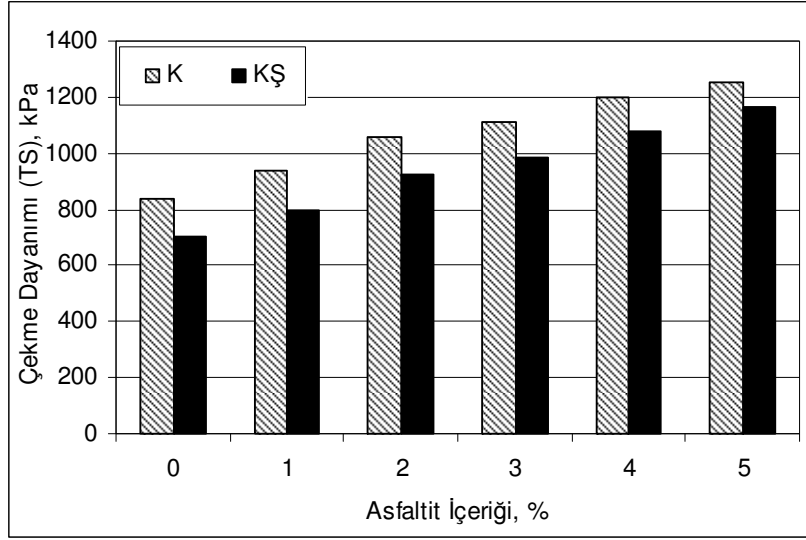
Kısa dönem yaşlandırılmış saf karışım ve filler yerine %1-5 oranında asfaltit içeren bitümlü sıcak karışım numunelerine (K-KŞ) uygulanan çekme dayanımı oranı deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.38 ve Tablo 7.39’da verilmiştir. Koşullandırma işleminden önce ve sonra çekme dayanımı (TS) değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.28’de, çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi ise Şekil 7.29’da verilmiştir. TSR değerleri koşullandırılmış numunelerin TS değerlerinin koşullandırılmamış numunelerin TS değerlerine oranlanması ile elde edilmiştir.

Tablo 7.38. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h_{ort} , (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
0	1	65,8	1156,23	655,13	1164,65	2,269	2,435	6,81	8,72	844,1
	2	65,8	1156,54	653,81	1163,91	2,267		6,89	8,48	821,3
	3	65,9	1157,14	655,95	1163,88	2,278		6,44	8,85	855,8
	Ortalama									840,4
1	4	66,3	1157,80	654,73	1166,21	2,264	2,423	6,58	9,72	934,3
	5	65,9	1156,85	652,89	1165,37	2,257		6,84	9,98	965,1
	6	65,8	1156,57	653,04	1165,80	2,256		6,91	9,39	908,5
	Ortalama									935,9
2	7	66,5	1155,93	653,01	1165,20	2,257	2,415	6,55	10,70	1024,9
	8	67,0	1156,71	652,84	1166,63	2,251		6,78	11,50	1092,7
	9	66,9	1156,34	653,72	1165,93	2,258		6,52	11,20	1066,3
	Ortalama									1061,3
3	10	67,5	1156,03	651,37	1166,32	2,245	2,405	6,66	11,40	1075,2
	11	67,2	1155,81	651,06	1166,78	2,241		6,81	11,70	1109,0
	12	67,1	1156,06	650,73	1167,90	2,235		7,05	12,20	1158,7
	Ortalama									1114,3
4	13	67,3	1155,71	650,02	1166,40	2,238	2,401	6,78	12,10	1145,2
	14	67,5	1155,27	651,09	1168,50	2,233		7,01	13,20	1246,2
	15	67,9	1155,64	652,33	1169,05	2,236		6,85	12,80	1201,3
	Ortalama									1197,6
5	16	68,0	1154,9	649,14	1166,69	2,231	2,389	6,59	13,10	1227,7
	17	68,2	1155,65	648,88	1167,95	2,226		6,81	13,50	1261,4
	18	68,1	1155,43	649,75	1169,23	2,224		6,90	13,60	1272,0
	Ortalama									1253,7

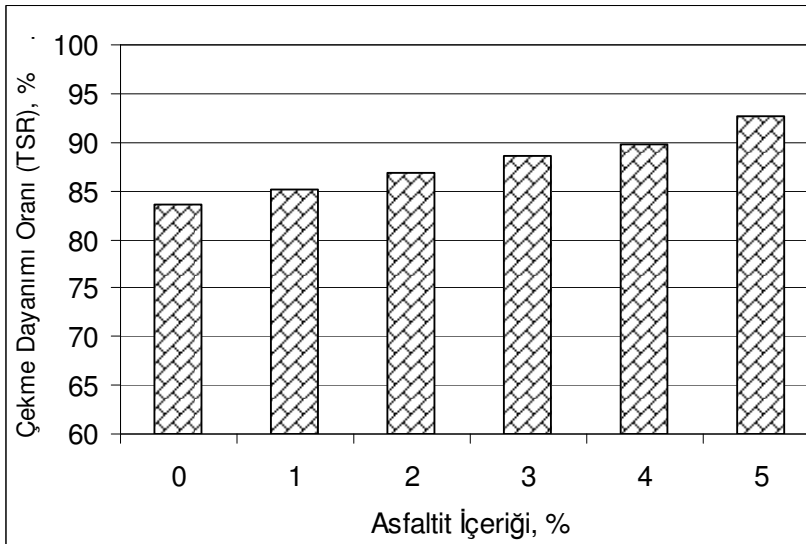
Tablo 7.39. Kısa dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h _{ort} , (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Vakum Sonrası, (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Doygunluk Derecesi, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
0	1	66,1	1156,79	654,44	1163,99	1181,15	2,270	2,435	6,77	70,6	6,89	663,9
	2	66,0	1157,04	654,05	1164,30	1181,55	2,268		6,87	69,9	7,73	746,4
	3	66,3	1157,20	653,51	1164,67	1182,34	2,264		7,03	70,0	7,24	695,2
	Ortalama											701,8
1	4	66,5	1157,35	655,12	1167,00	1181,48	2,261	2,423	6,69	70,5	8,33	798,3
	5	66,2	1156,69	652,89	1165,69	1182,13	2,256		6,91	71,8	8,24	793,2
	6	66,4	1155,99	653,04	1166,14	1182,73	2,253		7,02	74,3	8,33	798,7
	Ortalama											796,7
2	7	66,5	1156,23	653,79	1166,81	1180,76	2,254	2,415	6,68	71,6	9,17	878,3
	8	67,1	1155,95	653,45	1166,37	1180,37	2,254		6,68	71,3	10,20	968,7
	9	67,0	1156,85	654,37	1166,55	1181,48	2,259		6,47	74,3	9,68	920,2
	Ortalama											922,4
3	10	67,8	1155,56	651,49	1168,11	1182,11	2,237	2,405	7,00	73,5	10,90	1024,5
	11	67,1	1155,54	651,55	1167,78	1180,70	2,238		6,93	70,4	10,40	986,7
	12	67,5	1155,26	650,88	1166,05	1181,33	2,242		6,76	74,9	10,10	952,6
	Ortalama											987,9
4	13	67,5	1155,98	650,67	1166,93	1180,59	2,239	2,401	6,74	70,7	11,90	1122,4
	14	67,2	1156,23	651,63	1168,88	1181,92	2,235		6,90	72,0	11,30	1070,5
	15	67,8	1155,42	651,99	1169,71	1181,76	2,232		7,05	72,2	11,00	1033,4
	Ortalama											1075,4
5	16	68,4	1154,94	649,63	1168,08	1179,84	2,228	2,389	6,75	71,1	12,90	1201,8
	17	67,8	1150,80	649,03	1167,79	1176,93	2,218		7,14	70,5	12,60	1184,3
	18	68,2	1154,76	650,00	1169,55	1180,19	2,223		6,96	70,3	11,80	1101,5
	Ortalama											1162,5



Şekil 7.28. K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle çekme dayanımı değerlerinin değişimi

Şekil 7.28’de görüldüğü üzere hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış karışım numunelerinde asfaltit içeriği arttıkça çekme dayanımı değerleri artmıştır. Koşullandırılmamış karışım numunelerinde %5 asfaltit kullanılması durumunda çekme dayanımı değerlerinde saf karışıma göre %49,2 artış meydana gelirken koşullandırılmış numunelerde %5 asfaltit içeren karışımlarda %65,7 artış meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 7.29. K ve KŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle çekme dayanımı oranlarının değişimi

Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranları incelendiğinde (Şekil 7.29) asfaltit içeriği arttıkça çekme dayanımı oranlarının arttığı belirlenmiştir. Superpave yöntemine göre bitümlü sıcak karışımların tasarımında nem hasarına karşı dayanım bakımından TSR değerlerinin %80'in üzerinde olması gerektiği belirtilmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde bütün karışımların TSR değerinin %80'in üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Filler yerine %5 oranında asfaltit kullanılması durumunda TSR değerinin %90'ın üzerinde olması özellikle yüksek asfaltit içeriklerinin nem hasarına karşı dayanımda önemli etkisi olduğunu göstermektedir.

7.6.2. Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları

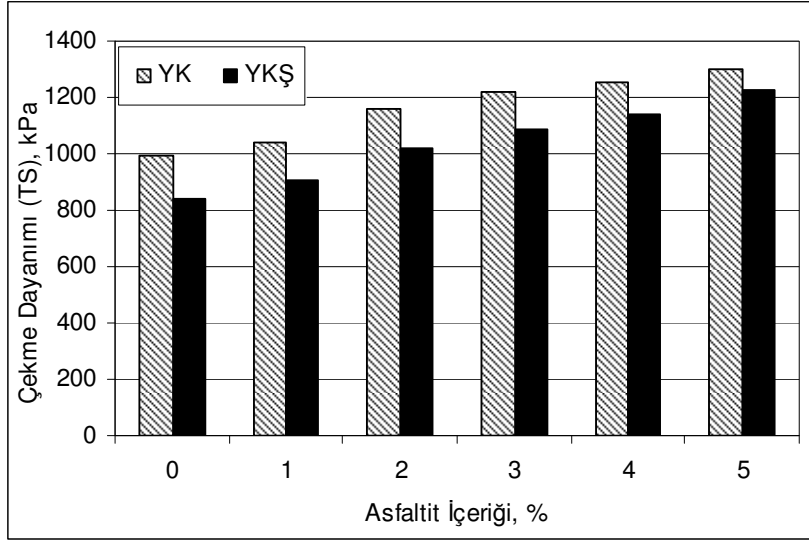
Uzun dönem yaşlandırılmış, mineral filler yerine 5 farklı oranda asfaltit içeren ve saf bitümlü sıcak karışım numunelerine (YK-YKŞ) uygulanan çekme dayanımı oranı deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.40 ve Tablo 7.41'de verilmiştir. Koşullandırma işleminden önce ve sonra çekme dayanımı (TS) değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 7.30'da, çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin asfaltit içeriğinin artışı ile değişimi ise Şekil 7.31'de verilmiştir.

Tablo 7.40. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h_{ort} , (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
0	1	66,0	1155,60	655,91	1166,28	2,264	2,435	7,01	10,30	994,5
	2	65,9	1157,24	654,48	1164,39	2,269		6,80	10,00	966,0
	3	65,8	1157,63	655,41	1163,76	2,277		6,48	10,60	1026,1
	Ortalama									995,5
1	4	66,3	1157,09	655,16	1167,25	2,260	2,423	6,75	11,20	1076,0
	5	66,6	1157,10	654,73	1166,17	2,262		6,63	10,90	1041,9
	6	66,4	1156,54	655,22	1165,41	2,267		6,44	10,50	1007,7
	Ortalama									1041,9
2	7	66,6	1156,82	653,13	1165,19	2,259	2,415	6,45	11,80	1129,1
	8	66,8	1156,26	653,94	1166,75	2,255		6,64	12,20	1163,9
	9	66,7	1157,31	652,69	1167,04	2,250		6,83	12,40	1184,1
	Ortalama									1159,0
3	10	67,1	1155,83	651,79	1164,44	2,255	2,405	6,25	13,90	1318,8
	11	66,7	1155,87	651,03	1166,08	2,244		6,69	12,50	1193,1
	12	66,9	1155,09	651,32	1165,88	2,245		6,66	12,00	1142,5
	Ortalama									1218,1
4	13	67,2	1156,58	651,14	1165,55	2,248	2,401	6,36	13,30	1260,0
	14	67,9	1156,28	652,51	1167,01	2,247		6,40	13,70	1285,8
	15	67,7	1157,23	652,69	1169,33	2,240		6,71	12,90	1213,7
	Ortalama									1253,1
5	16	68,6	1155,10	649,53	1166,70	2,234	2,389	6,51	13,70	1272,6
	17	68,2	1154,42	649,09	1168,10	2,224		6,90	14,10	1316,8
	18	68,4	1154,91	649,27	1169,81	2,219		7,13	14,10	1312,4
	Ortalama									1300,6

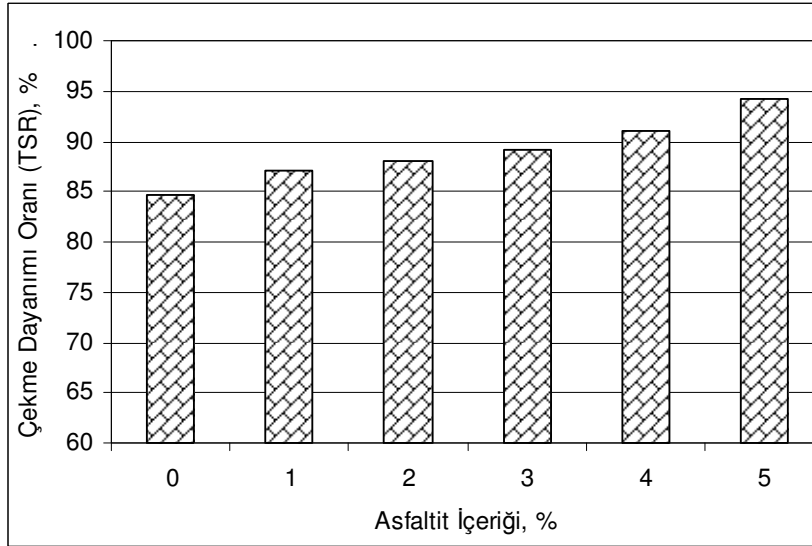
Tablo 7.41. Uzun dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h _{ort} , (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Vakum Sonrası, (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Doygunluk Derecesi, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
0	1	66,4	1155,84	654,30	1164,10	1180,46	2,267	2,435	6,89	70,1	8,74	838,4
	2	65,8	1157,38	656,82	1165,70	1181,11	2,274		6,60	70,7	9,35	905,1
	3	66,1	1156,32	655,27	1165,44	1182,00	2,267		6,92	72,8	8,15	784,9
	Ortalama											842,8
1	4	66,3	1157,56	655,35	1166,93	1181,36	2,263	2,423	6,62	70,3	9,25	888,6
	5	66,3	1156,25	654,48	1166,00	1180,98	2,260		6,71	72,1	10,00	961,2
	6	66,1	1157,14	655,97	1165,44	1181,33	2,271		6,26	75,8	9,07	873,5
	Ortalama											907,8
2	7	66,9	1156,91	653,01	1165,34	1180,88	2,258	2,415	6,50	72,0	11,2	1065,8
	8	66,3	1155,68	652,84	1167,67	1181,12	2,245		7,05	70,1	10,2	979,9
	9	66,4	1154,97	653,06	1165,49	1179,06	2,254		6,67	70,5	10,6	1016,8
	Ortalama											1020,8
3	10	66,7	1155,29	653,37	1168,85	1179,82	2,241	2,405	6,81	69,9	11,5	1098,7
	11	67,1	1155,87	652,66	1165,84	1179,67	2,252		6,35	73,1	11,2	1063,2
	12	66,9	1156,74	651,99	1164,92	1179,37	2,255		6,23	70,8	11,5	1095,4
	Ortalama											1085,8
4	13	67,3	1155,91	652,02	1165,40	1179,23	2,252	2,401	6,22	73,0	12,4	1173,6
	14	67,2	1156,09	651,09	1169,55	1183,04	2,230		7,13	72,9	12,0	1136,8
	15	67,0	1156,73	652,03	1168,72	1181,48	2,239		6,76	70,9	11,7	1112,3
	Ortalama											1140,9
5	16	68,0	1155,27	649,14	1166,66	1180,12	2,232	2,389	6,56	73,2	13,5	1264,5
	17	67,3	1155,38	648,88	1167,90	1180,92	2,226		6,82	72,2	13,1	1239,2
	18	67,8	1154,83	649,69	1170,32	1180,98	2,218		7,15	70,2	12,5	1174,3
	Ortalama											1226,0



Şekil 7.30. YK ve YKŞ karışımlarının asfaltit içeriğiyle çekme dayanımı değerlerinin değişimi

Şekil 7.30’da görüldüğü üzere kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış karışım numunelerinde asfaltit içeriği arttıkça çekme dayanımı değerleri artmıştır. Koşullandırılmamış karışım numunelerinde %5 asfaltit kullanılması durumunda çekme dayanımı değerlerinde saf karışıma göre %30,7 artış meydana gelirken koşullandırılmış numunelerde %5 asfaltit içeren karışımlarda %45,5 artış meydana geldiği belirlenmiştir.

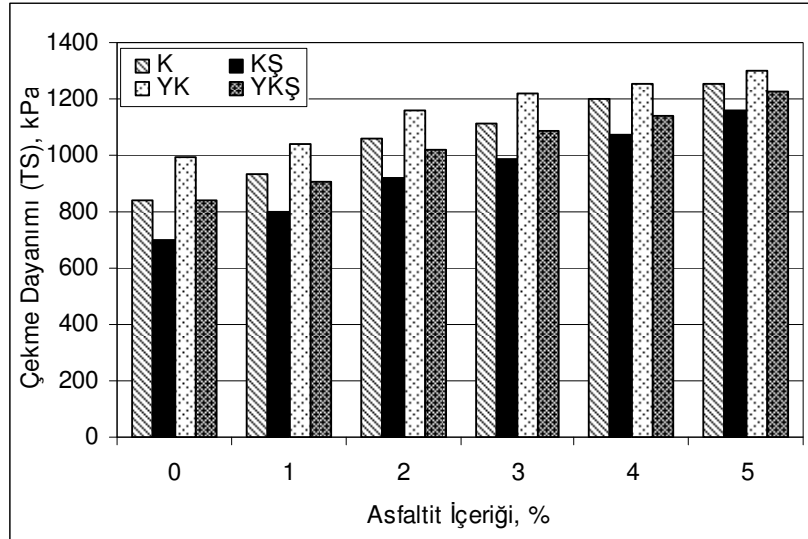


Şekil 7.31. Uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarının asfaltit içeriğiyle TSR değerlerinin değişimi

Çekme dayanımı oranları incelendiğinde (Şekil 7.31) kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça çekme dayanımı oranlarının arttığı belirlenmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde bütün karışımların TSR değerinin %80'in üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Mineral filler yerine %4 ve %5 oranında asfaltit kullanılması durumunda çekme dayanımı oranı değerlerinin %90'ın üzerinde olması özellikle yüksek asfaltit içeriklerinin nem hasarına karşı dayanımda önemli etkisi olduğunu göstermektedir.

7.6.3. Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

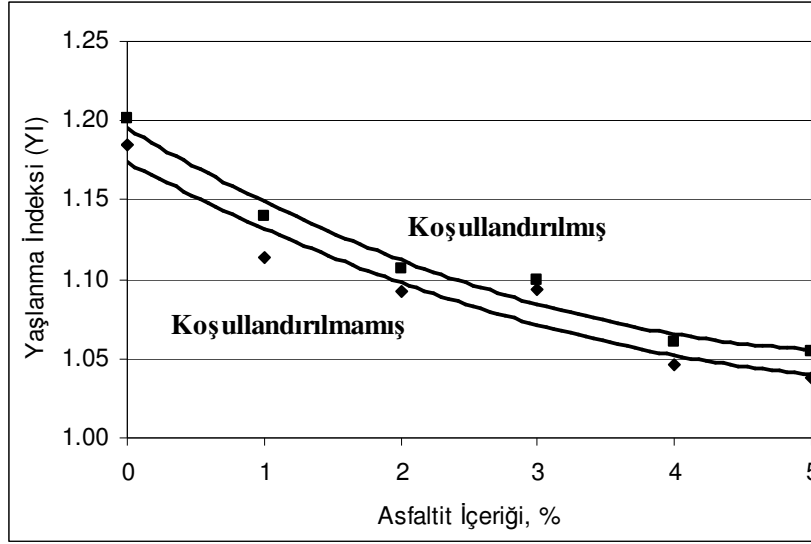
%1–5 aralığında 5 farklı oranda asfaltit içeren ve saf karışımların çekme dayanımı değerleri üzerinde uzun dönem yaşlanmanın etkisini açık bir şekilde görebilmek amacıyla asfaltit içeriğinin artışıyla çekme dayanımı değerlerinin değişimi Şekil 7.32'de verilmiştir.



Şekil 7.32. Çekme dayanımı-asfaltit içeriği ilişkisi

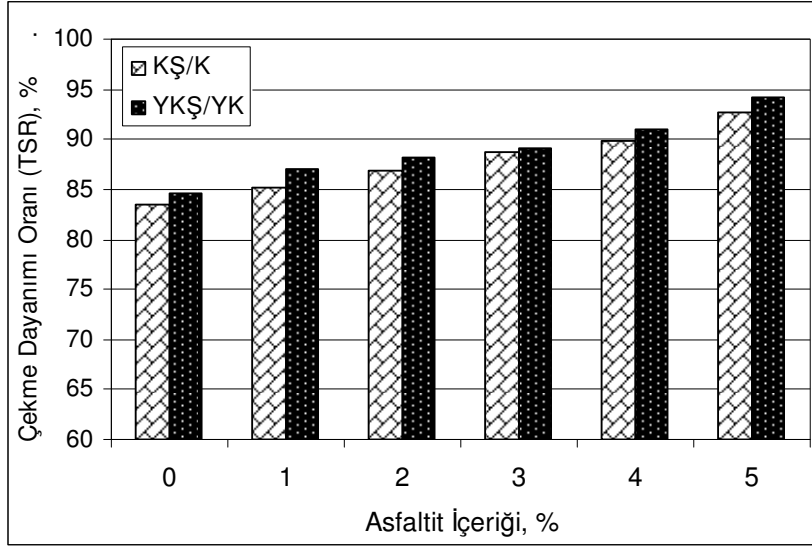
Şekil 7.32 incelendiğinde uzun dönem yaşlanmanın etkisiyle çekme dayanımı değerlerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Uzun dönem yaşlanmanın etkisiyle çekme dayanımı değerlerinde meydana gelen artış asfaltit içeriği arttıkça azalma göstermiştir. Yaşlanmanın etkisini daha net bir şekilde gösterebilmek amacıyla yaşlanmadan sonraki TS değerinin yaşlanmadan önceki TS değerine bölümüyle belirlenen

Yaşlanma İndeksi (YI) değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.33'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere saf karışımda çekme dayanımı üzerinde uzun dönem yaşlanma önemli oranda etkiliyken asfaltit içeriği arttıkça yaşlanmanın etkisi azalmıştır.



Şekil 7.33. Yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi

Asfaltit içeriğinin artışıyla çekme dayanımı oranlarında meydana gelen değişim ise Şekil 7.34'te verilmiştir. Uzun dönem yaşlanmadan dolayı karışımların TSR değerleri dolayısıyla nem hasarına karşı dayanımları artmıştır. Uzun dönem yaşlanma nedeniyle, çekme dayanımı değerlerinde olduğu gibi bariz bir artış TSR değerlerinde görülmemiştir. Uzun dönem yaşlanma nedeniyle çekme dayanımı oranı değerinde en büyük artış %2 ile %1 asfaltit içeren karışımlarda görülürken en düşük artış ise %0,5 ile %3 asfaltit içeren karışımlarda görülmüştür.



Şekil 7.34. Çekme dayanımı oranı-asfaltit içeriği ilişkisi

7.7. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Saf ve 5 farklı oranda asfaltit içeren bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan ITSM deneylerinde kullanılan numuneler yorulma deneylerinde de kullanılmıştır. Deneylerde her bir karışım türü için üç adet numune denenmiştir. Deneylerde kullanılan UMATTA deney aleti, en fazla 5 kN yük uygulayabildiğinden düşük sıcaklıklarda ve yüksek asfaltit içeriklerinde deney yapabilmek için bazı numuneler kesilerek yükseklikleri azaltılmıştır. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik yükler karşısında bitümlü sıcak karışımların rijitlikleri belirlenmektedir. Deneyde yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5 μ m. olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde 5 μ m. deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu Formül 6.7 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, 30°C ve 40°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Deneyler kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin yanı sıra

AASHTO R30 standardına göre etüvde uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde de uygulanmıştır.

7.7.1. Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin ITSM Deney Sonuçları

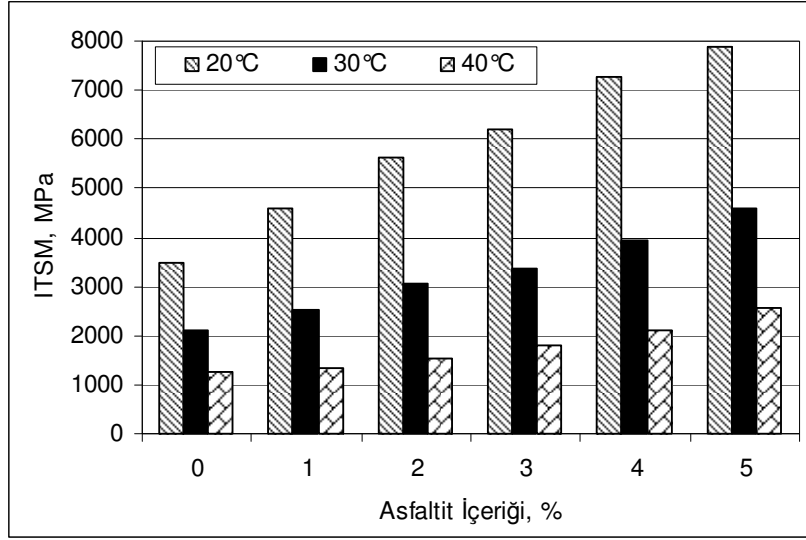
Kısa dönem yaşlandırılmış, saf ve mineral filler yerine %1-5 aralığında 5 farklı oranda asfaltit içeren bitümlü sıcak karışım numunelerine 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklıklarda uygulanan ITSM deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.42’de verilmiştir. Asfaltit içeriği ve sıcaklıkla ITSM değerlerinin değişimi Şekil 7.35’te verilmiştir.

Tablo 7.42. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)		
0	1	1	20	70,6	3522	3665	30	70,2	2097	2014	40	70,7	1266	1275		
		2			3807				1931				1283			
	2	1		70,6	3092	3133		70,4	2232	2118		70,4	1242	1230		
		2			3174				2004				1218			
	3	1		70,4	3739	3654		70,6	2272	2152		71,8	1222	1230		
		2			3568				2032				1237			
	Ortalama							3484				2095				1245
	1	1		1	20	71,2		4179	4072	30		71,2	2594	2681	40	71,6
2			3964	2768			1357									
2		1	71,2	5305		5155	72,0	2529	2504		71,2	1272	1255			
		2		5005				2479				1237				
3		1	71,4	4675		4582	71,2	2403	2369		70,9	1362	1389			
		2		4489				2335				1415				
Ortalama						4603			2518					1339		
2		1	1	20		70,8	5320	5388	30		71,1	2878	2865	40		71,1
	2		5455		2851		1682									
	2	1	71,1		5777	5720	71,1	3161		3228	71,0	1543	1471			
		2			5663			3295				1398				
	3	1	71,5		5771	5817	71,7	3141		3129	71,4	1427	1455			
		2			5863			3116				1483				
	Ortalama						5642				3074					1524
	3	1	1		20	72,0	5661	5814		30	72,1	3268	3253		40	72,3
2			5966	3238			1725									
2		1	71,5	6244		6332	71,9	3427	3536		72,3	1858	1819			
		2		6419				3644				1779				
3		1	71,7	6533		6425	72,1	3200	3316		72,6	1777	1821			
		2		6317				3432				1864				
Ortalama						6190			3368					1808		

Tablo 7.42. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı)

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)
4	1	1	20	71,9	6427	6605	30	72,0	3654	3797	40	71,9	1973	1982
		2			6783				3939				1990	
	2	1		72,5	7653	7499		72,2	4275	4206		72,2	2179	2197
		2			7345				4136				2214	
	3	1		72,3	7759	7737		72,4	3820	3786		72,5	2218	2160
		2			7714				3752				2102	
	Ortalama					7280			3929			2113		
	5	1	1	20	72,1	8074	8133	30	73,3	4831	5008	40	72,6	2402
2			8191			5185				2597				
2		1	72,4		8654	8774	72,8		4301	4283	72,2		2573	2604
		2			8893				4264				2634	
3		1	72,4		6648	6806	72,8		4325	4446	72,6		2519	2603
		2			6964				4567				2686	
Ortalama					7904			4579			2569			

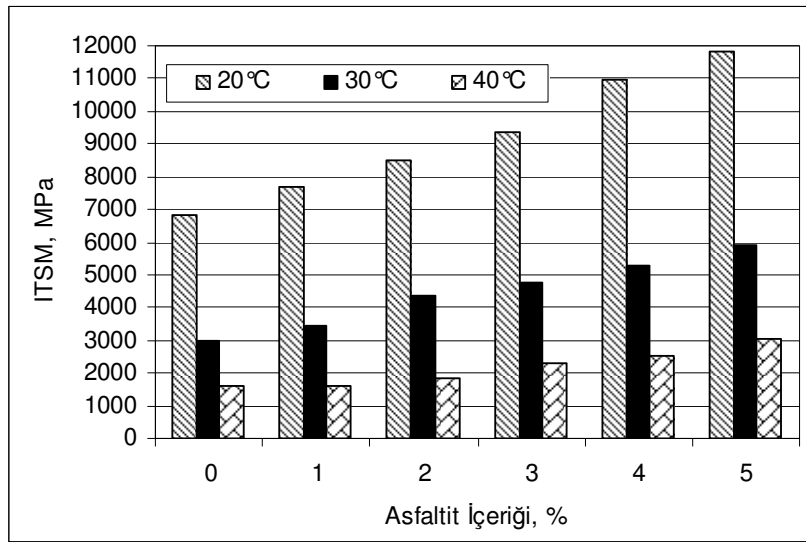


Şekil 7.35. Asfaltit içeriği ve sıcaklık ile ITSM değerlerinin değişimi

Şekil 7.35'te görüldüğü üzere asfaltit içeriği arttıkça bütün sıcaklıklarda ITSM değerleri artmıştır. Ayrıca bitümlü bağlayıcının termoplastik özelliğinden dolayı sıcaklığın artması ile ITSM değerleri azalmıştır. 20°C sıcaklıkta %5 asfaltit kullanılması ITSM değerini saf karışıma göre 2,3 kat arttırırken, 30°C sıcaklıkta 2,2 kat, 40°C sıcaklıkta ise 2,1 kat arttırmıştır. Bu durum asfaltit kullanımının rijitlik üzerindeki etkisinin sıcaklığın artması ile azaldığını göstermektedir. Karışımındaki asfaltit içeriğinin artması ile ITSM değerlerinde meydana gelen artış, bütün deney sıcaklıklarında asfaltit içeren karışımların saf karışıma göre daha rijit olacağını göstermektedir. Sıcaklığın artması ile ITSM değerleri azalmasına rağmen 40°C sıcaklıkta saf karışıma göre ITSM değerlerinde meydana gelen 2,1 kat artış, asfaltitin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı bitümlü sıcak karışımların dayanımı arttıracaklarını göstermektedir. Sıcaklığın 20°C'den 40°C'ye yükselmesi ile ITSM değeri saf karışımda 2,8 kat azalırken %5 asfaltit içeren karışımda 3,1 kat azalmıştır. Bu durum rijitlik açısından asfaltit içeren karışımların saf karışıma göre sıcaklıktan daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Malzemelerin yorulma ömrünü arttırmak malzemelerin elastik bileşen oranını ya da rijitliğini arttırmakla mümkündür (Whiteoak ve Read, 2003). Her üç sıcaklıkta da asfaltit içeriğinin artması ile rijitlik değerlerinin artması, asfaltit içeren karışımların yorulma ömrünün saf karışıma göre daha fazla olacağını göstermektedir.

7.7.2. Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin ITSM Deney Sonuçları

Uzun dönem yaşlandırılmış, saf ve filler yerine %1-5 aralığında 5 farklı oranda asfaltit içeren bitümlü sıcak karışım numunelerine 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklıklarda uygulanan ITSM deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.43'te verilmiştir. Asfaltit içeriği ve sıcaklıkla uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM değerlerinin değişimi Şekil 7.36'da verilmiştir.



Şekil 7.36. Asfaltit içeriği ve sıcaklığın değişimi ile ITSM değerlerinin değişimi

Kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda da asfaltit içeriği arttıkça bütün sıcaklıklarda ITSM değerleri artmıştır. Ayrıca sıcaklığın artması ile ITSM değerleri azalmıştır. 20°C sıcaklıkta %5 asfaltit kullanılması saf karışıma göre ITSM değerini 1,7 kat arttırırken, 30°C sıcaklıkta 2,0 kat, 40°C sıcaklıkta ise 1,9 kat arttırmıştır. Bu durum asfaltitin uzun dönem yaşlanmadan sonra 30°C sıcaklıkta daha etkin olduğunu göstermektedir. Sıcaklığın 20°C'den 40°C'ye yükselmesi ile saf karışımın ITSM değeri 4,3 kat azalırken %5 asfaltit içeren karışımda 3,9 kat azalmıştır. Bu durum ise asfaltit içeren uzun dönem yaşlandırılmış karışımların ITSM değerinin saf karışıma göre sıcaklığa karşı daha az duyarlı olduğunu göstermektedir. Asfaltit içeriğinin artışı ile ITSM değerlerinin artışı bütün deney sıcaklıklarında asfaltit içeren karışımların saf karışıma göre daha rijit olacağını dolayısıyla kısa süreli yaşlandırılmış karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaklarına karşı dayanım için yapılan yorumların uzun süreli yaşlandırılmış karışımlar için de geçerli olduğunu göstermektedir.

Tablo 7.43. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları

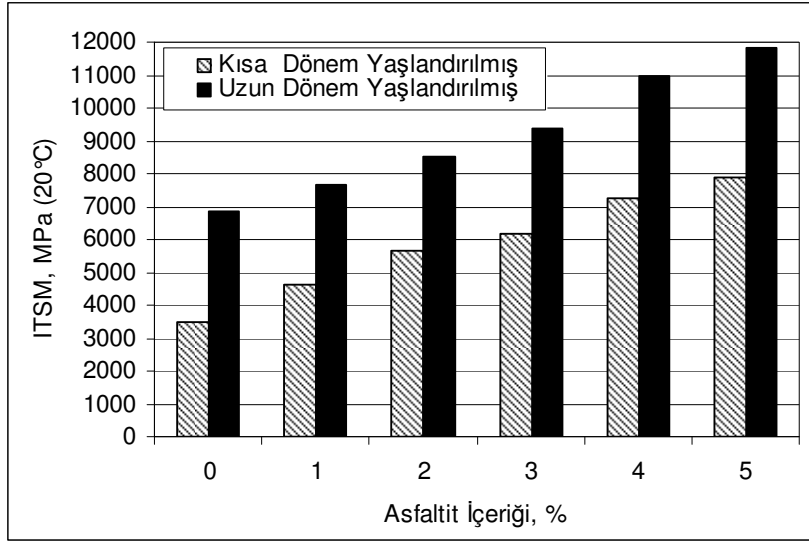
Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)			
0	1	1	20	51,8	6766	6932	30	64,3	2979	2963	40	64,9	1613	1565			
		2			7098				2946				1517				
	2	1		49,4	6914	6963		68,7	3220	3078		64,9	1624	1555			
		2			7011				2936				1485				
	3	1		50,9	6764	6684		60,9	2808	2932		65,3	1558	1664			
		2			6603				3056				1770				
	Ortalama							6859					2991				1595
	1	1		1	20	53,7		8057	7935	30		66,4	3391	3431	40	65,2	1752
2			7812	3470			1635										
2		1	51,6	7428		7406	64,4	3525	3553		65,2	1737	1697				
		2		7384				3581				1657					
3		1	52,2	7863		7697	68,2	3349	3432		65,3	1523	1490				
		2		7530				3515				1457					
Ortalama						7679					3472					1627	
2		1	1	20		53,0	8241	8257	30		67,8	4543	4486	40		65,6	1875
	2		8272		4128		1762										
	2	1	49,8		8276	8438	62,5	4635		4424	65,5	1767	1798				
		2			8600			4213				1828					
	3	1	50,0		8772	8809	68,2	4327		4369	65,4	1807	1824				
		2			8845			4410				1840					
	Ortalama						8501					4426					1813
	3	1	1		20	52,0	9168	9113		30	67,9	4591	4590		40	66,1	2305
2			9057	4588			2110										
2		1	52,5	9274		9416	70,0	4959	4860		66,3	2423	2348				
		2		9557				4760				2272					
3		1	50,4	9318		9531	69,1	4700	4776		66,0	2275	2268				
		2		9743				4851				2261					
Ortalama						9353					4742					2274	

Tablo 7.43. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı)

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	h _{ort} , (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	
4	1	1	20	50,9	10988	10591	30	67,8	5458	5241	40	65,9	2612	2603	
		2			10194				5024				2593		
	2	1		52,0	11815	11468		70,2	5525	5595		65,9	2507	2530	
		2			11120				5665				2552		
	3	1		52,0	10522	10804		65,9	5045	5021		66,3	2407	2387	
		2			11086				4996				2366		
	Ortalama							10954				5286			2506
	5	1		1	20	51,4		11628	11889	30		68,0	5651	5837	40
2			12149	6023			3151								
2		1	53,1	12687		12330	67,1	6253	6000		66,8	3046	2957		
		2		11973				5746				2867			
3		1	52,2	10978		11279	69,0	6024	5841		66,8	3220	3118		
		2		11580				5657				3016			
Ortalama						11833			5892				3058		

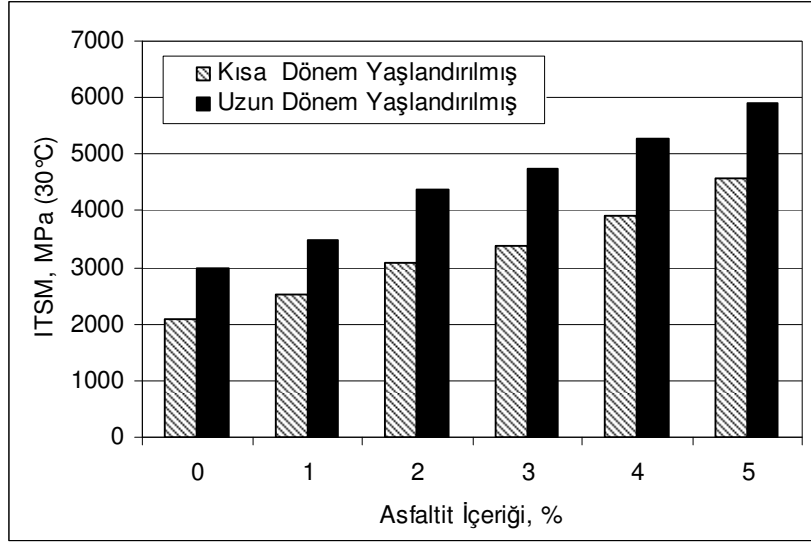
7.7.3. Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların ITSM Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Beş farklı oranda asfaltit içeren ve saf karışımların ITSM değerleri üzerinde uzun dönem yaşlandırmanın etkisini açık bir şekilde görebilmek amacıyla 20, 30 ve 40°C’de elde edilen asfaltit içeriğinin artışıyla ITSM değerlerinin değişimi Şekil 7.37-7.39’da verilmiştir.



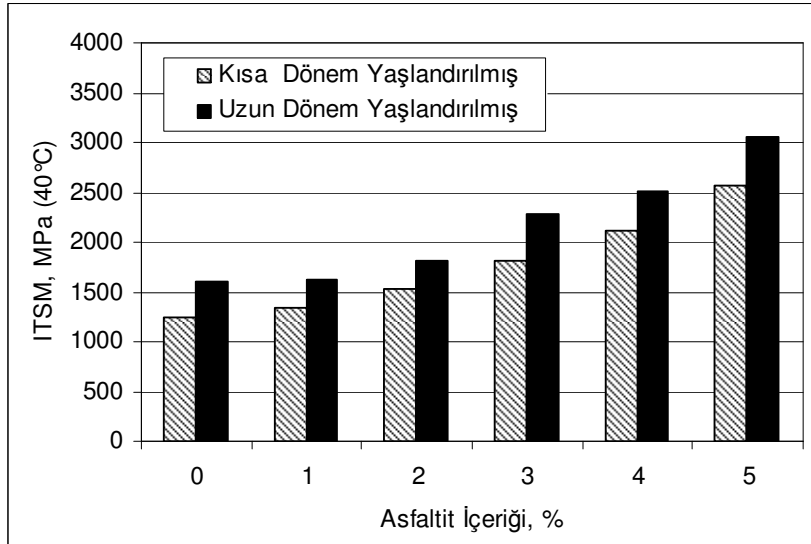
Şekil 7.37. 20°C’de ITSM-asfaltit içeriği ilişkisi

Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde 20°C sıcaklıkta yapılan ITSM deneyleri sonucunda yaşlanmanın etkisiyle ITSM değerlerinin arttığı dolayısıyla karışımların rijitliğinin arttığı tespit edilmiştir. Uzun dönem yaşlanma nedeniyle karışımların 20°C sıcaklıktaki ITSM değerlerinde en fazla artış saf karışımda (% 96,9) meydana gelirken en az artış ağırlıkça %5 asfaltit içeren karışımda (%49,7) meydana gelmiştir.



Şekil 7.38. 30°C’de ITSM-asfaltit içeriği ilişkisi

30°C’de karışımlara uygulanan ITSM deneyleri incelendiğinde uzun dönem yaşlanmanın etkisiyle ITSM değerlerinin arttığı, karışımlar içerisinde en fazla artışın saf karışımda (%42,8), en az artışın ise %5 asfaltit içeren karışımlarda (%28,7) meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 7.39. 40°C’de ITSM-asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.39 incelendiğinde diğer sıcaklıklarda olduğu gibi uzun dönem yaşlandırma nedeniyle ITSM değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Asfaltit içeren ve saf karışımların

40°C'deki ITSM değerleri karşılaştırıldığında uzun dönem yaşlandırma nedeniyle ITSM değerlerinde en büyük artış saf karışımda (%28,1), en az artış ise %4 asfaltit içeren karışımda (%19,0) meydana gelmiştir. Uzun dönem yaşlandırılmış (UDY) karışımların ITSM değerlerinin kısa dönem yaşlandırılmış (KDY) karışımların ITSM değerlerine bölümü sonucu elde edilen yaşlanma indeksi (YI_{ITSM}) değerlerinin asfaltit içerikleriyle değişimi Tablo 7.44'te verilmiştir.

Tablo 7.44. Yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

Asfaltit İçeriği	$YI_{ITSM} (ITSM_{UDY} / ITSM_{KDY})$		
	20°C	30°C	40°C
0	1,969	1,428	1,281
% 1	1,668	1,379	1,215
% 2	1,507	1,424	1,190
% 3	1,511	1,408	1,258
% 4	1,505	1,345	1,186
% 5	1,497	1,287	1,190

Tabloda görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça yaşlanma indeksi değerleri azalmıştır. Bu durum sıcaklık arttıkça değerlerin birbirine yaklaştığını, yüksek sıcaklıkta karışımların rijitliklerinin birbirine yaklaşarak yaşlanmanın etkisinin azaldığını göstermektedir. Bütün sıcaklıklarda en büyük YI_{ITSM} değerine saf karışımın sahip olması uzun dönem yaşlanmanın en fazla saf karışım üzerinde etkin olduğunu ifade etmektedir. En düşük YI_{ITSM} değerine ise 20 ve 30°C sıcaklıklarda %5 asfaltit içeren karışımların 40°C'de ise %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak 20, 30 ve 40°C sıcaklıklarda asfaltit içeren karışımların saf karışıma göre uzun dönem yaşlanmadan daha az etkilendiklerini göstermektedir.

7.8. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi, saf karışım ve %1 ile %5 arasında 5 farklı oranda filler olarak asfaltit kullanılan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde 300 kPa, 375 kPa ve 450 kPa olmak üzere üç farklı gerilme seviyesi uygulanmıştır.

Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan 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. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin yanı sıra uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde de indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 7.40'ta görülmektedir.



Şekil 7.40. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü

7.8.1. Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Bu deneyde, numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar yük tekrarı uygulanmıştır. Böylece maksimum yük tekerrür sayısı (N_{mak}) ve maksimum yük tekerrür 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. Eğride deformasyon oranının arttığı nokta (II. ve III. bölge sınırı) çatlak başlaması için gerekli yük tekerrür sayısı (N_i) olarak elde edilmiştir. Çatlak başlangıcı yük

tekrar sayısının belirlenmesi için eğim-yük tekrar sayısı grafiği çizilmiş eğimin artmaya başladığı nokta çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) olarak alınmıştır. Yorulma ömrü (N_f) ile çatlak başlangıcı yük tekerrür sayısı (N_i) arasındaki farktan çatlak ilerlemesi yük tekerrür sayısı (N_p) değerleri elde edilmiştir. Formül 6.9 kullanılarak III. Bölgede, N_i ile N_{mak} arasında ayrıca N_f ile N_{mak} arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları (r_p ve r_f) belirlenmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelere 300, 375 ve 450 kPa gerilme seviyelerinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen N_i , N_f , N_p , N_{mak} , δ_i , δ_f , δ_{mak} , r_p ve r_f değerleri Tablo 7.45–7.47’te verilmiştir. Ayrıca 300, 375 ve 450 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–yük tekerrür sayısı ilişkisine birer örnek Şekil 7.41–7.43’te çizilmiştir.

Tablo 7.45. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
0	1	300	$y = 0,0005x + 0,366$	$y = 0,0034x - 10,13$	2628	1,597	3621	2,426	993	3996	3,737	1198	286
	2		$y = 0,0005x + 0,249$	$y = 0,0036x - 10,31$	2310	1,330	3470	2,356	1160	3714	3,466	1131	220
	3		$y = 0,0006x + 0,541$	$y = 0,0031x - 7,751$	2322	1,877	3317	2,868	995	3558	3,366	1004	484
	Ort.				2420	1,601	3469	2,550	1049	3756	3,523	1111	330
1	1	300	$y = 0,0002x + 0,349$	$y = 0,0018x - 15,7$	6792	1,472	10031	2,558	3239	10284	2,989	2983	587
	2		$y = 0,0002x + 0,322$	$y = 0,0017x - 15,70$	6936	1,429	10678	2,664	3742	11496	3,75	3030	753
	3		$y = 0,0001x + 0,384$	$y = 0,0008x - 7,529$	6648	1,219	11305	2,008	4657	12792	3,146	5902	1307
	Ort.				6792	1,373	10671	2,410	3879	11524	3,295	3972	882
2	1	300	$y = 7E-05x + 0,563$	$y = 0,0009x - 15,58$	14520	1,510	19443	2,1	4923	20400	2,92	8344	1167
	2		$y = 7E-05x + 0,194$	$y = 0,0009x - 16,48$	12432	1,022	20089	2,093	7657	21600	3,487	7149	1084
	3		$y = 5E-05x + 0,757$	$y = 0,0009x - 18,34$	16392	1,518	22472	2,119	6080	23544	2,926	10116	1328
	Ort.				14448	1,350	20668	2,104	6220	21848	3,111	8537	1193
3	1	300	$y = 3E-05x + 0,342$	$y = 0,0005x - 12,26$	19248	0,948	26801	1,49	7553	27936	2,316	13935	1374
	2		$y = 2E-05x + 0,757$	$y = 0,0005x - 10,65$	18480	1,171	23771	1,446	5291	29424	2,978	19240	3690
	3		$y = 6E-05x + 0,402$	$y = 0,0004x - 9,107$	15792	1,263	27967	2,563	12175	29760	3,662	9365	1631
	Ort.				17840	1,127	26180	1,833	8340	29040	2,985	14180	2232

Tablo 7.45. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)

Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
4	1	300	$y = 3E-05x + 0,354$	$y = 0,0003x - 7,841$	21600	0,922	30351	1,278	8751	32880	2,304	24581	2465
	2		$y = 4E-05x + 0,620$	$y = 0,0008x - 25,07$	22944	1,479	33797	2,272	10853	34464	2,937	13686	1003
	3		$y = 3E-05x + 0,432$	$y = 0,0004x - 11,85$	23136	1,170	33204	1,982	10068	33936	2,615	12399	1156
	Ort.				22560	1,190	32451	1,844	9891	33760	1,190	16889	1541
5	1	300	$y = 9E-06x + 0,341$	$y = 0,0004x - 19,27$	36864	0,666	50154	0,917	13290	54432	1,783	52948	4940
	2		$y = 1E-05x + 0,446$	$y = 0,0003x - 14,38$	33600	0,801	51136	1,16	17536	55726	1,795	48847	7228
	3		$y = 2E-05x + 0,280$	$y = 0,0002x - 8,595$	37632	0,968	49303	1,341	11671	53472	2,053	31290	5855
	Ort.				36032	0,812	50198	1,139	14166	54543	0,812	44362	6008

Tablo 7.46. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
0	1	375	$y = 0,001x + 0,793$	$y = 0,0109x - 19,59$	1569	2,331	2055	3,349	486	2172	4,187	477	140
	2		$y = 0,0009x + 0,870$	$y = 0,0103x - 22,29$	1455	2,273	2464	3,51	1009	2586	4,276	816	159
	3		$y = 0,001x + 0,3585$	$y = 0,0091x - 14,26$	978	1,289	1805	2,576	827	1944	3,503	643	150
	Ort.				1334	1,964	2108	3,145	774	2234	3,989	645	150
1	1	375	$y = 0,0007x + 1,087$	$y = 0,0053x - 12,53$	2244	2,644	2959	3,433	715	3150	4,171	906	259
	2		$y = 0,0006x + 0,395$	$y = 0,0132x - 34,01$	1293	1,182	2730	2,811	1437	2883	3,775	882	159
	3		$y = 0,0005x + 0,653$	$y = 0,0049x - 11,37$	1908	1,638	2731	2,408	823	2847	3,866	1069	180
	Ort.				1815	1,821	2807	2,884	992	2960	3,937	952	199
2	1	375	$y = 0,0005x + 0,935$	$y = 0,0046x - 13,86$	2598	2,15	3608	2,89	1010	3774	3,542	1365	255
	2		$y = 0,0004x + 0,832$	$y = 0,0058x - 18,81$	2946	1,925	3638	2,435	692	3744	2,952	1357	205
	3		$y = 0,0003x + 0,995$	$y = 0,0045x - 16,21$	3690	2,22	4097	2,543	407	4266	3,013	1260	360
	Ort.				3078	2,098	3781	2,623	703	3928	3,169	1327	273
3	1	375	$y = 0,0003x + 0,618$	$y = 0,002x - 7,2982$	3804	1,647	4656	2,078	852	4950	2,844	1977	384
	2		$y = 0,0003x + 0,589$	$y = 0,0024x - 8,757$	2694	1,094	4450	1,905	1756	4788	3,013	2165	305
	3		$y = 0,0002x + 0,444$	$y = 0,0033x - 14,94$	4350	1,451	4963	1,838	613	5208	2,769	1584	263
	Ort.				3616	1,397	4690	1,940	1074	4982	2,875	1909	317

Tablo 7.46. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)

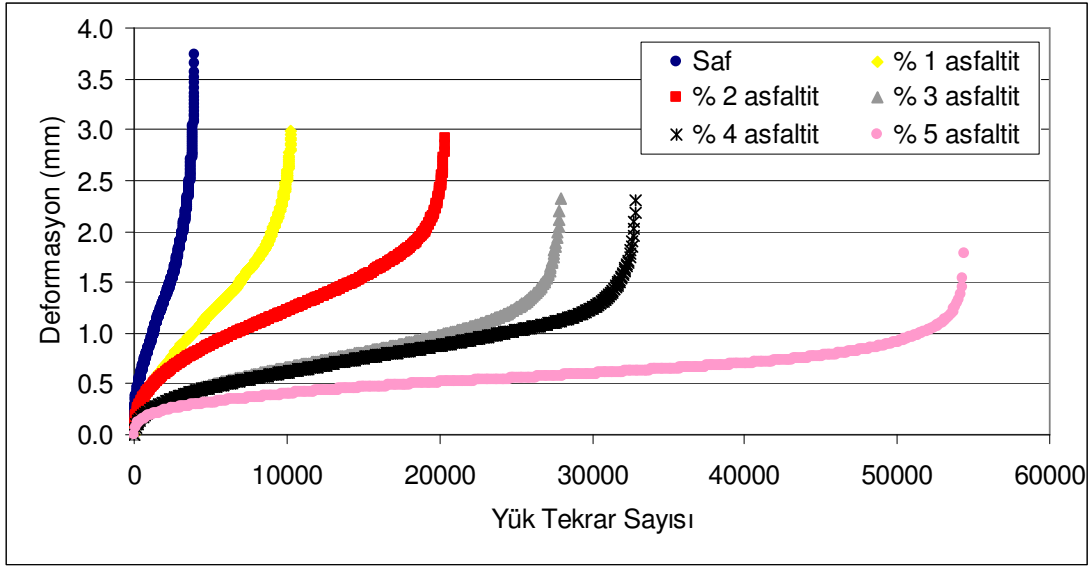
Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
4	1	375	$y = 0,0002x + 0,546$	$y = 0,0017x - 8,889$	4344	1,204	6290	1,755	1946	6792	2,678	3532	544
	2		$y = 0,0002x + 0,318$	$y = 0,0027x - 14,60$	4164	1,225	5965	1,851	1801	6396	2,523	2877	641
	3		$y = 0,0002x + 0,320$	$y = 0,0014x - 7,517$	3948	1,052	6530	1,821	2582	7020	2,561	3358	662
	Ort.				4152	1,160	6262	1,809	2110	6736	2,587	3255	616
5	1	375	$y = 0,0001x + 0,564$	$y = 0,0014x - 9,605$	6372	1,366	7822	1,734	1450	8412	2,543	3940	729
	2		$y = 0,0002x + 0,331$	$y = 0,0011x - 6,968$	4728	1,121	8110	1,866	3382	8724	2,46	4540	1034
	3		$y = 0,0002x + 0,247$	$y = 0,0009x - 6,152$	4236	0,89	9141	1,947	4905	9552	2,498	4640	746
	Ort.				5112	1,126	8358	1,849	3246	8896	2,500	4373	836

Tablo 7.47. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

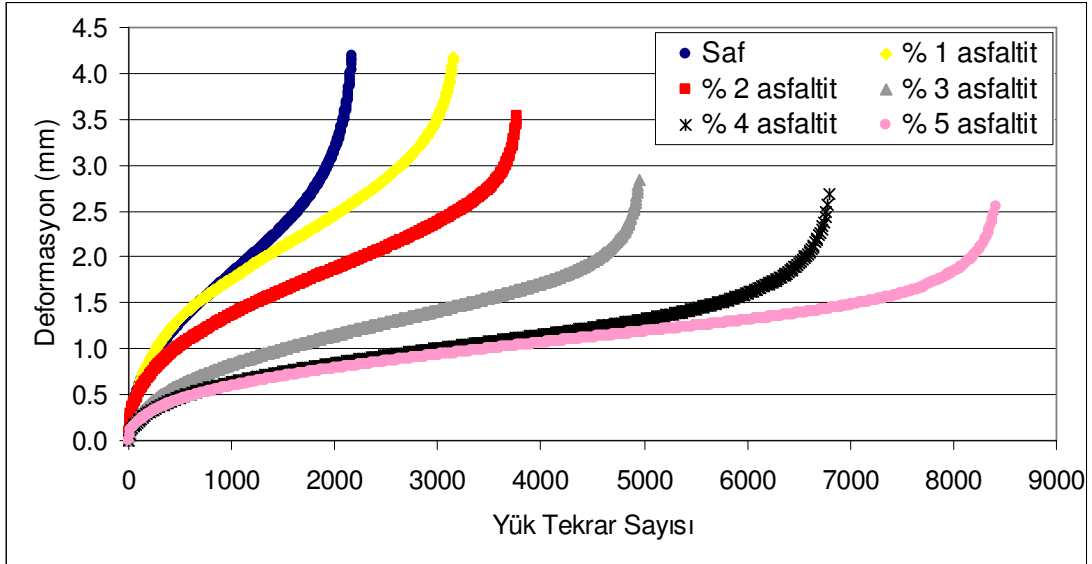
Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
0	1	450	$y = 0,0016x + 0,999$	$y = 0,0141x - 14,39$	960	2,55	1231	3,283	271	1284	3,831	370	97
	2		$y = 0,0018x + 0,333$	$y = 0,0174x - 15,28$	651	1,52	1001	2,458	350	1062	3,248	373	77
	3		$y = 0,0016x + 0,831$	$y = 0,0113x - 12,51$	1041	2,482	1375	3,297	334	1449	3,94	410	115
	Ort.				884	2,184	1202	3,013	318	1265	3,673	384	96
1	1	450	$y = 0,0008x + 0,561$	$y = 0,0066x - 10,90$	1368	1,701	1976	2,491	608	2148	3,414	770	186
	2		$y = 0,0008x + 0,289$	$y = 0,0068x - 10,45$	1362	1,832	1790	2,07	428	1944	2,872	1798	192
	3		$y = 0,0009x + 0,610$	$y = 0,0096x - 18,68$	741	0,872	2217	3,116	1476	2346	4,01	658	144
	Ort.				1157	1,468	1994	2,559	837	2146	3,432	1075	174
2	1	450	$y = 0,0004x + 0,819$	$y = 0,0074x - 18,90$	1863	1,630	2816	2,36	953	2955	3,301	1305	148
	2		$y = 0,0005x + 0,420$	$y = 0,0061x - 13,66$	1308	1,114	2513	2,147	1205	2685	3,067	1167	187
	3		$y = 0,0005x + 0,683$	$y = 0,0074x - 17,01$	1530	1,418	2564	2,409	1034	2727	3,422	1043	161
	Ort.				1567	1,387	2631	2,305	1064	2789	3,263	1172	165
3	1	450	$y = 0,0003x + 0,668$	$y = 0,005x - 15,986$	2616	1,440	3543	2,093	927	3816	2,782	1420	396
	2		$y = 0,0003x + 0,587$	$y = 0,0032x - 9,833$	2388	1,418	3593	1,974	1205	3690	2,684	2167	137
	3		$y = 0,0003x + 0,524$	$y = 0,0037x - 9,388$	2538	1,372	2915	1,62	377	3078	2,311	1520	236
	Ort.				2514	1,410	3350	1,896	836	3528	2,592	1702	256

Tablo 7.47. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)

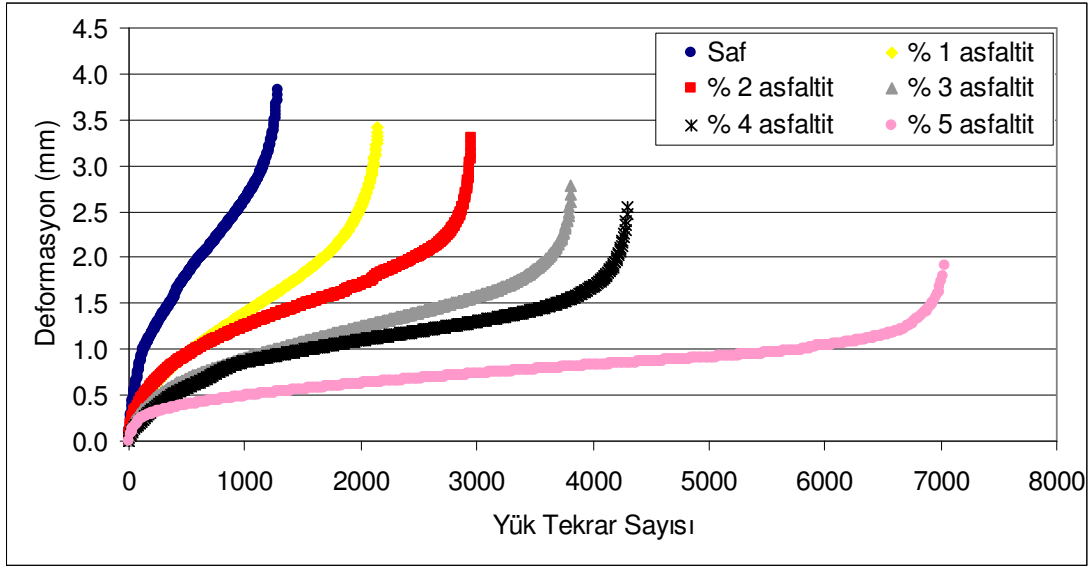
Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
4	1	450	$y = 0,0002x + 0,438$	$y = 0,0049x - 17,53$	2808	1,025	3822	1,431	1014	3960	2,050	2498	223
	2		$y = 0,0002x + 0,560$	$y = 0,0052x - 20,19$	3156	1,303	4151	1,721	995	4320	2,522	2380	211
	3		$y = 0,0002x + 0,234$	$y = 0,0036x - 13,78$	1674	0,629	4121	1,594	2447	4404	2,256	2536	427
	Ort.				2546	0,986	4031	1,582	1485	4228	2,276	2471	287
5	1	450	$y = 9E-05x + 0,448$	$y = 0,0029x - 18,91$	5868	1,005	6889	1,432	1021	7032	1,918	2391	294
	2		$y = 0,0001x + 0,510$	$y = 0,001x - 4,9068$	4452	1,063	6018	1,432	1566	6420	2,162	4244	551
	3		$y = 0,0001x + 0,421$	$y = 0,003x - 16,848$	4380	1,068	5955	1,602	1575	6252	2,302	2949	424
	Ort.				4900	1,045	6287	1,489	1387	6568	2,127	3195	423



Şekil 7.41. KDY numunelerin 300 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



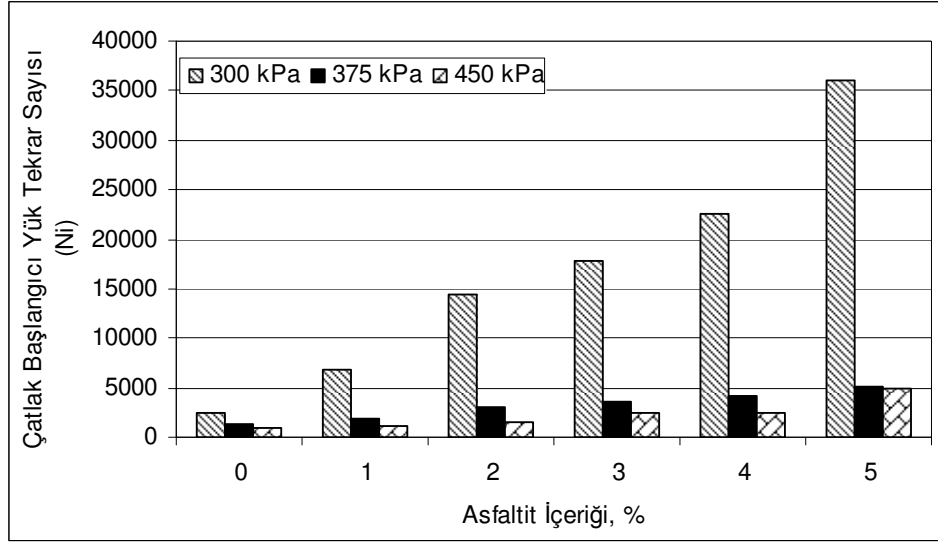
Şekil 7.42. KDY numunelerin 375 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



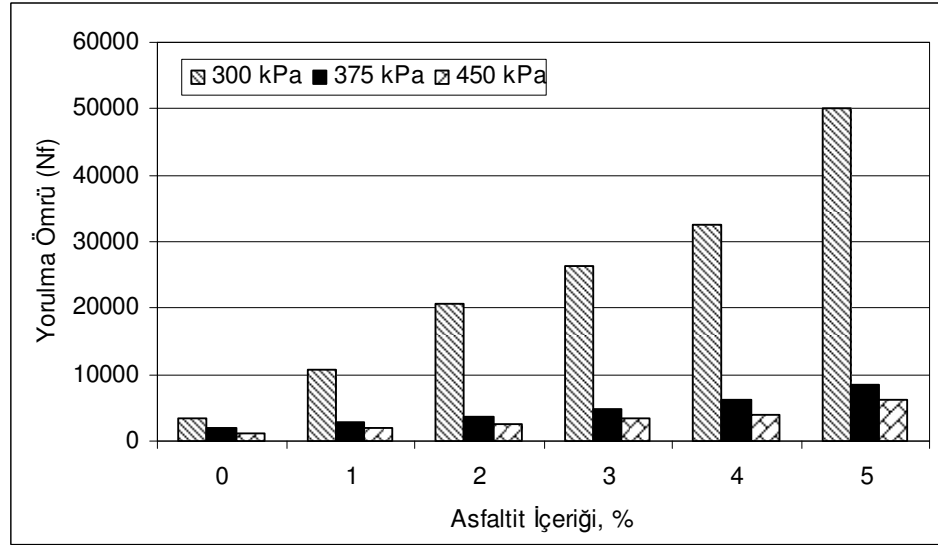
Şekil 7.43. KDY numunelerin 450 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 7.41-7.43'te görüldüğü üzere asfaltit içeriği arttıkça numunenin kırılması için gerekli yük tekrür sayısı artmıştır. Özellikle %5 asfaltit kullanılması, yorulma dayanımını önemli oranda arttırmaktadır. Deformasyonlar incelendiğinde ise asfaltit içeriği arttıkça maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarları azalmıştır. Bu durum, asfaltit içeriğinin artmasıyla numunelerin dayanabileceği yük tekrar sayısı artmasına rağmen bitümlü sıcak karışımların esnekliğinin azaldığını dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın olduğunu göstermektedir. 300, 375 ve 450 kPa gerilme seviyelerinde üç numuneden elde edilen çatlağın olduğu yük tekrar sayılarının (N_i) ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.44'te, yorulma ömrü (N_f) değerlerinin ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.45'te, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı (N_p) değerlerinin ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.46'da, maksimum yük tekrar sayılarının (N_{mak}) ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.47'de verilmiştir.

Şekil 7.44 incelendiğinde bütün gerilme seviyelerinde asfaltit içeriği arttıkça çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarının (N_i) arttığı belirlenmiştir. Ayrıca gerilme seviyeleri arttıkça bütün asfaltit içeriklerinde N_i değerleri azalmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda N_i değeri 7,37 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 14,89 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda N_i değeri 2,84 kat artarken %5 asfaltit kullanıldığında 5,54 kat artmıştır. Bu durum düşük gerilme seviyelerinde çatlak başlangıcı yük tekrar sayıları açısından düşük gerilmelerde (300 kPa) asfaltitin daha etkin olduğunu göstermektedir.



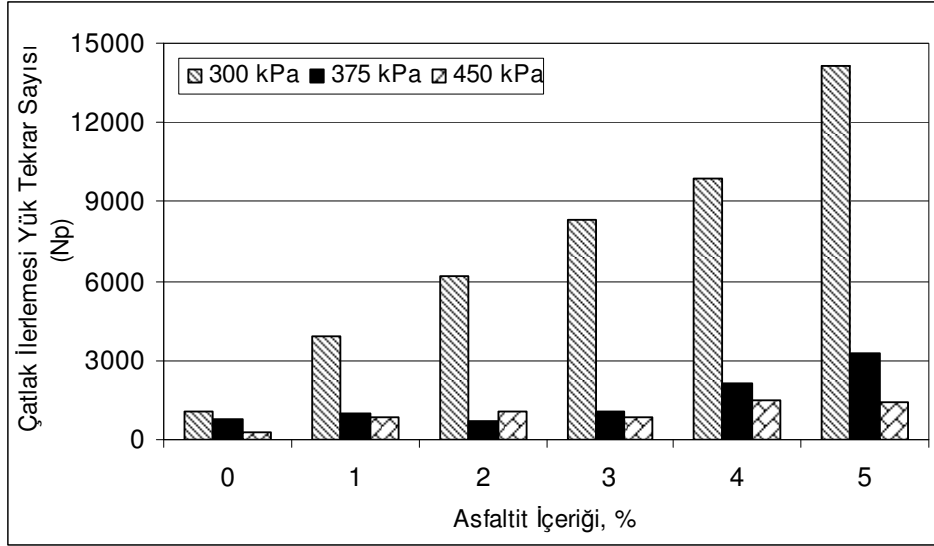
Şekil 7.44. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) - asfaltit içeriği ilişkisi



Şekil 7.45. Yorulma ömrü (N_f) - asfaltit içeriği ilişkisi

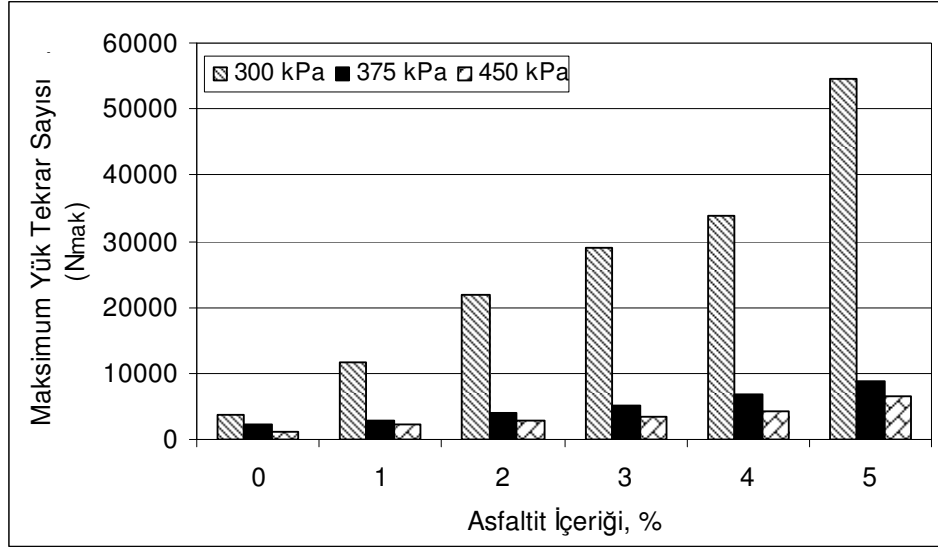
Yük tekrar sayısı - deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilen yorulma ömrü değerlerine göre çizilen grafiklerden, çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça yorulma ömrü (N_f) değerlerinin arttığı, gerilme seviyesi arttıkça ise N_f değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda N_f değeri 7,55 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 14,47 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda ise N_f değeri 2,79 kat artarken %5 asfaltit

kullanıldığında 5,23 kat artarak N_i değerleriyle benzer değişim göstermiştir. Saf karışımın yorulma ömrü değeri 300 kPa'dan 450 kPa gerilme seviyesine çıkıldığında 2,89 kat azalma gösterirken %3 asfaltit içeren karışımlarda 7,82 kat, %5 asfaltit içeren karışımlarda ise 7,98 kat azalma meydana gelmiştir.



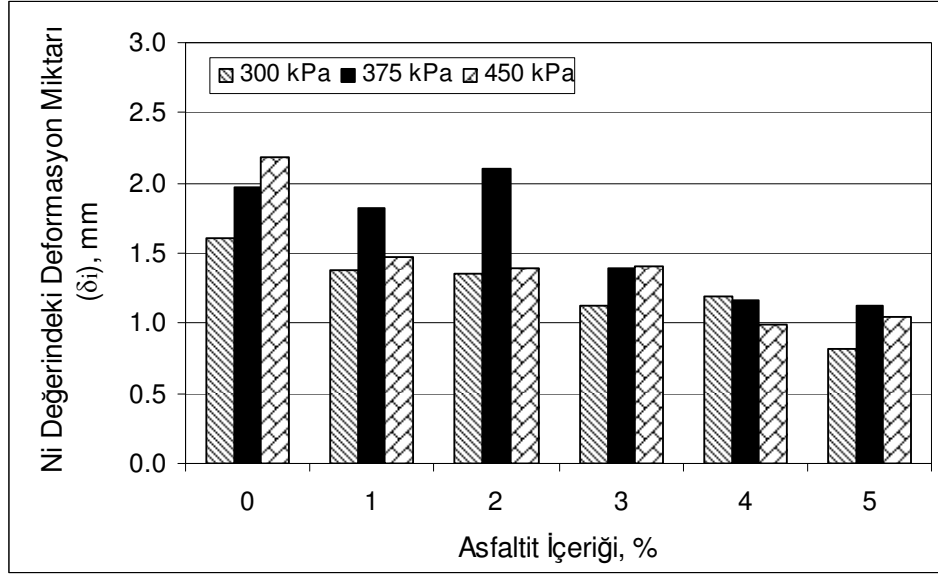
Şekil 7.46. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.46'da görülen çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı değerleri N_f ile N_i değerlerinin farkından elde edilmiştir. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayıları (N_p) değerleri incelendiğinde ise N_f ve N_i değerlerinin asfaltit içeriği ve gerilme ile değişimine benzer bir ilişki elde edilmiştir. Sadece %2 asfaltit içeriğinde 375 kPa gerilme seviyesinde ve %3 asfaltit içeriğinde 450 kPa gerilme seviyelerinde küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bu durum %2 asfaltit içeriğinde 375 kPa gerilme seviyesinde ve %3 asfaltit içeriğinde 450 kPa gerilme seviyelerinde çatlak başlangıcı yük tekrar sayıları değerlerinin yüksek olmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 7.47. Maksimum yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi

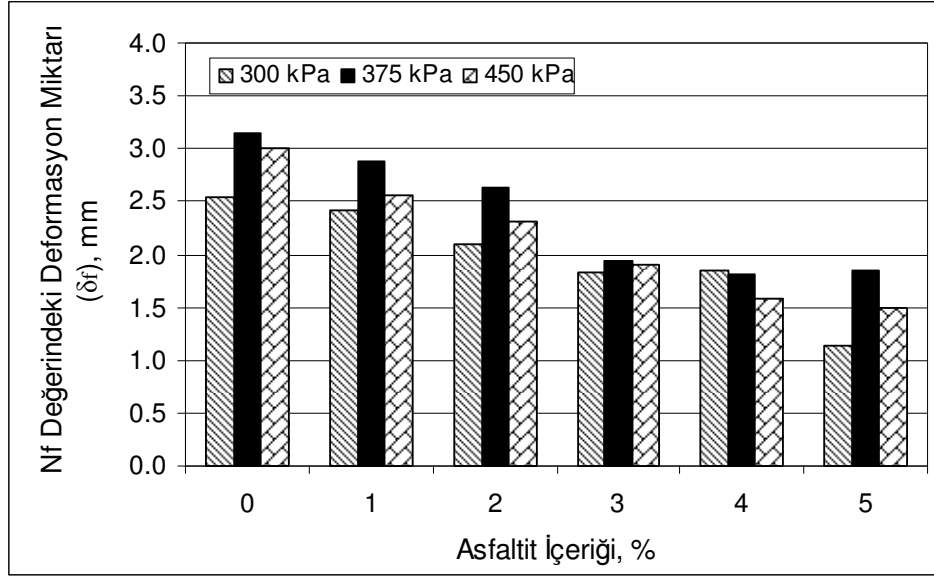
Şekil 7.47’de görüldüğü üzere, bütün gerilme seviyelerinde asfaltit içeriği arttıkça maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. Özellikle 300 kPa gerilme seviyesinde asfaltitin etkisi daha ön plana çıkmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit içeren karışımların ortalama maksimum yük tekrerrür sayısı saf karışıma göre 2,79 kat artarken 375 kPa gerilme seviyesinde 2,23 kat 300 kPa gerilme seviyesinde ise 7,73 kat artış meydana gelmiştir. %5 asfaltit içeren karışımların maksimum yük tekrar sayıları ise saf karışıma göre 450 kPa gerilme seviyesinde 5,19 kat artarken 375 kPa gerilme seviyesinde 3,98 kat, 300 kPa gerilme seviyesinde ise 14,52 kat artmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde %5 asfaltit kullanılması ile elde edilen saf karışıma göre 14 kat artış, özellikle yüksek oranda asfaltit kullanımının düşük gerilme seviyelerinde daha etkin olduğunu göstermektedir. N_i , N_f , N_p ve N_{mak} grafiklerinde ortak olarak görülen bu durum, ağır taşıt trafiğinin az olduğu bölgelerde kullanılması durumunda, asfaltit içeren karışımların yorulma dayanımlarının daha yüksek olacağını göstermektedir. Çatlak oluşumundaki deformasyon değerlerinin (δ_i) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.48’de, yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.49’da, maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının (δ_{mak}) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi ise Şekil 7.50’de verilmiştir.



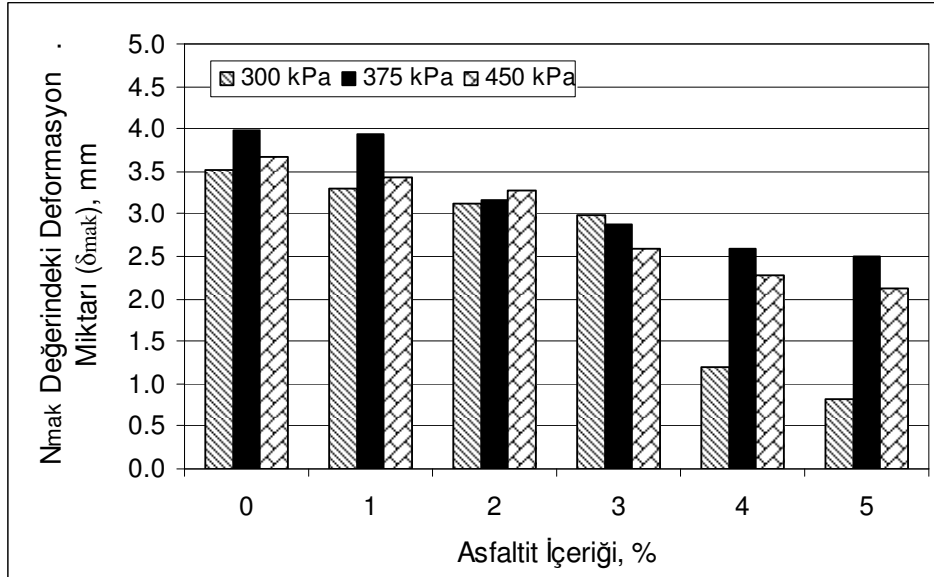
Şekil 7.48. N_i değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi

N_i değerindeki deformasyon miktarları (δ_i) incelendiğinde (Şekil 7.48) asfaltit içeriği arttıkça genel olarak deformasyon miktarlarının azaldığı, gerilme seviyesindeki artış ile düzensiz bir değişimin meydana geldiği gözlenmiştir. 300 ve 450 kPa gerilme seviyelerinde en yüksek δ_i değerlerine saf karışım sahip iken 375 kPa gerilme seviyesinde en yüksek δ_i değerine %2 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük δ_i değerine 300 ve 375 kPa gerilme seviyelerinde %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu, 450 kPa gerilme seviyesinde ise %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu, ikinci en düşük δ_i değerine ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 7.49'da görülen N_f değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) karşılaştırıldığında ise δ_i değerlerinde olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça genel olarak deformasyon miktarlarının azaldığı, gerilme seviyesindeki artış ile düzensiz bir değişimin meydana geldiği gözlenmiştir. Bütün gerilme seviyelerinde en yüksek δ_f değerine saf karışımın sahip olduğu en düşük δ_f değerine ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.



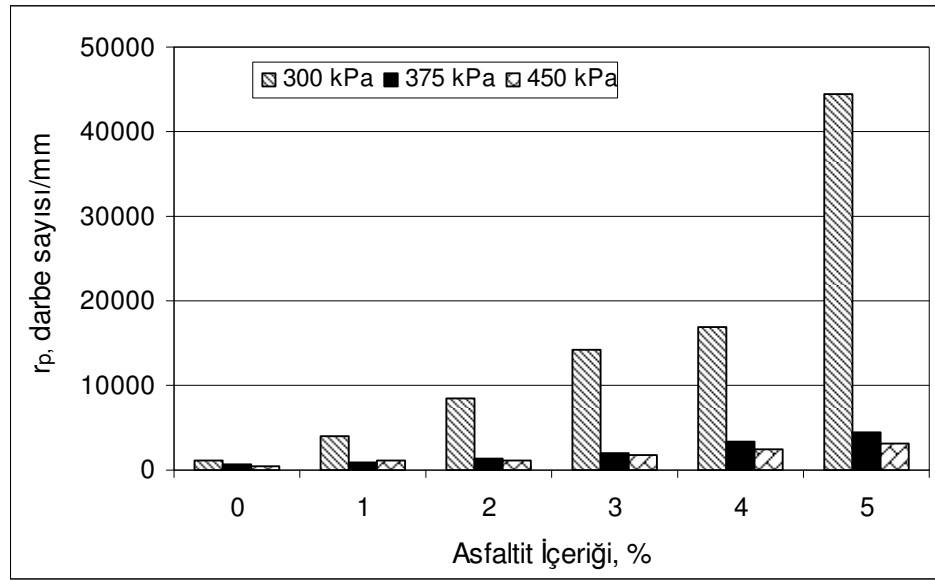
Şekil 7.49. N_f değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi



Şekil 7.50. N_{mak} değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi

Numunelerin maksimum yük tekrür sayısındaki maksimum deformasyon miktarlarının ortalamaları karşılaştırıldığında (Şekil 7.50) asfaltit içeriğinin artması ile maksimum yük tekrür sayısındaki maksimum deformasyon miktarlarının azaldığı belirlenmiştir. Bütün gerilme seviyelerinde en yüksek δ_{mak} değerine saf karışımın sahip olduğu, en düşük δ_{mak} değerine ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Gerilmenin değişmesi ile aynı asfaltit içeriklerinde değişken δ_{mak} değerleri belirlenmiştir.

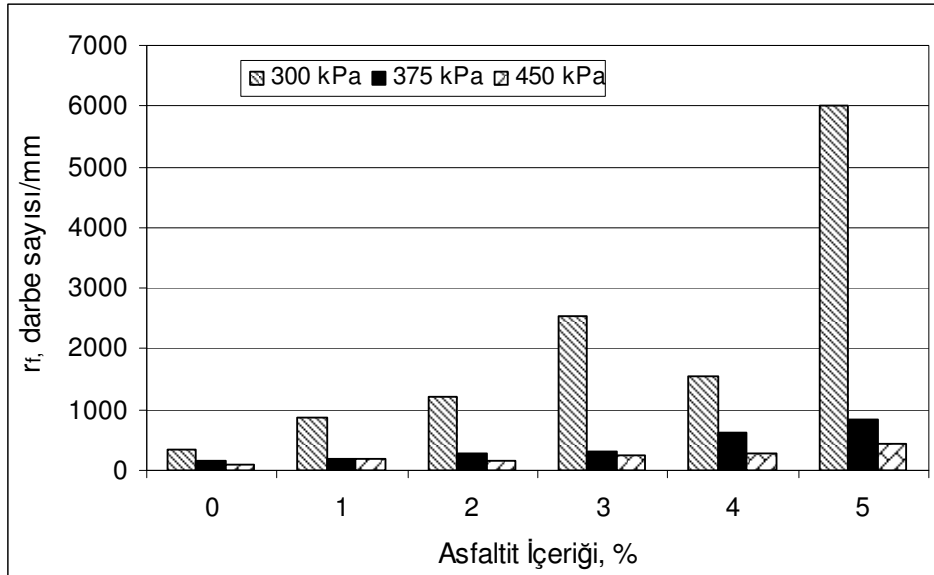
Saf karışım ile %1, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlarda en yüksek δ_{mak} değerleri 375 kPa gerilme seviyesinde elde edilirken, %2 asfaltit içeren karışımlarda 450 kPa gerilme seviyesinde ve %3 asfaltit içeren karışımlarda 300 kPa gerilme seviyesinde elde edilmiştir. Elde edilen δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimleri, asfaltit içeriği arttıkça yük tekrarı ile numunelerde meydana gelen deformasyon miktarlarının azalacağını dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın gözleneceğini göstermektedir. Subagio ve diğ., yapmış oldukları çalışmada bir doğal asfalt çeşidi olan Asbuton'u bitümlü sıcak karışımlarda kullanmış ve yaptıkları yorulma deneyleri sonucunda Asbuton kullanılan karışımlarda gevrek kırılma meydana gelirken saf karışımda duktıl bir kırılmanın meydana geldiğini belirlemişlerdir (Subagio vd., 2005). Elde edilen sonuçlar Asbuton kullanımında olduğu gibi asfaltit kullanılması durumunda da benzer şekilde gevrek bir kırılmanın gözleneceğine işaret etmektedir. Çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_p ve r_f) asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.51 ve 7.52'de verilmiştir.



Şekil 7.51. $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.51'de görülen $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı (r_p) değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile r_p değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile ise genel olarak bu değerin azaldığı belirlenmiştir. %1 asfaltit içeriğinde 450 kPa gerilme seviyesindeki r_p değerinin 375 kPa gerilme seviyesindeki r_p değerinden yüksek olması 375 kPa gerilme seviyesinde ' $\delta_f - \delta_i$ ' değerinin yüksek

olmasından kaynaklanmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_p değeri 12,76 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 39,93 kat artmıştır. 375 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_p değeri 2,96 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 6,78 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_p değeri 4,43 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 8,32 kat artmıştır. %3 ve %5 asfaltit içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen saf karışıma göre en yüksek r_p oranının 300 kPa gerilme seviyesinde en düşük r_p oranının 375 kPa gerilme seviyesinde görülmesi bütün asfaltit içeriklerinde tespit edilmiştir. Bu durum 300 kPa gerilme seviyesinde asfaltit içeren karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarının en yüksek olduğunu, 375 kPa gerilme seviyesinde ise en düşük olduğunu göstermektedir. 300 kPa gerilme seviyesinde %5 asfaltit içeriğinde tespit edilen yaklaşık 40 katlık değişmeye, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısının fazla olması kadar, deformasyon miktarındaki değişimin de az olması önemli oranda etkili olmuştur. Çatlak oluşuktan sonra her 1 mm deformasyon için gerekli yük tekrar sayını ifade eden r_f değerlerinden, özellikle düşük gerilme seviyelerinde ve yüksek asfaltit içeriklerinde çatlak ilerleyişine karşı dayanımın yüksek olduğu belirlenmiştir.

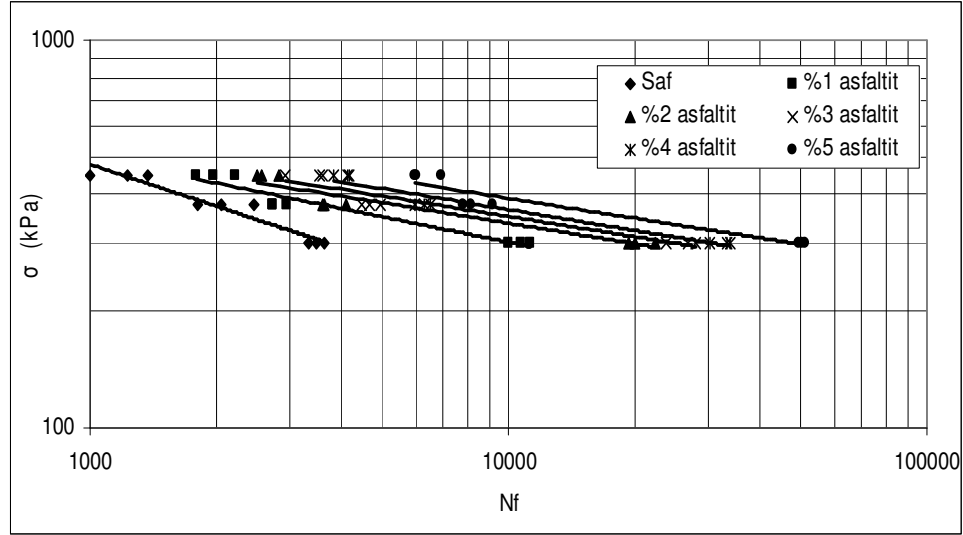


Şekil 7.52. $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.52’de görülen $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile r_f değerlerinin genel olarak arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile bu değer azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde %4 asfaltit içeriğine sahip karışımların r_f değerinin %3 asfaltit içeren karışımın r_f değerinden düşük olması %4 asfaltit içeren karışımların N_{mak} ile N_f değerleri arasındaki farkın düşük olmasından kaynaklanmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_f değeri 7,66 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 18,20 kat artmıştır. 375 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_f değeri 2,11 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 5,57 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_f değeri 2,67 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 4,41 kat artmıştır. Saf karışıma göre r_f değerindeki en düşük artışın, 375 kPa gerilme seviyesinde %1 asfaltit içeren karışımda (1,33 kat) olduğu belirlenmiştir. $N_i - N_f$ arasındaki yük tekrar sayısı ve deformasyon miktarlarından elde edilen r_p değerleri ile $N_f - N_{mak}$ arasındaki yük tekrar sayısı ve deformasyon miktarlarından elde edilen r_f değerleri karşılaştırıldığında r_p değerlerinin r_f değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çatlak başlangıcından yorulma ömrünün sonuna kadar karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının yorulma ömründen sonra numune kırılincaya kadar ki dönemde yük tekrarına karşı dayanımlarına göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Karayolları Genel Müdürlüğü’ne göre yorulma çatlakları görülen bir yolda çatlak oluşumu iyice belirginleştğinde ve çatlakların genişliği arttığında çatlak alanı toplam alanın %30’undan az olduğunda çatlak olan alanın kesilip atılması ve boşalan alanın yamanması tavsiye edilmektedir. Çatlak alanının %30’dan fazla olması durumunda ise geçici çözüm olarak kaplama tabakasının harç tipi örtü tabakası veya sathi kaplama ile kaplanması tavsiye edilmektedir. Kalıcı çözüm amaçlı olarak ise asfalt kaplamaların yeniden kullanım metodu ile iyileştirilmesi veya ilave tabaka yapılması tavsiye edilmektedir (KGM, 2008). Çatlak ilerleme oranı değerleri (r_p ve r_f) göz önünde bulundurulduğunda asfaltit içeriği arttıkça çatlak oluşumundan itibaren karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının artacağı, dolayısıyla BSK’ların yeniden yapım veya rehabilitasyon ihtiyaçlarının geciktirilebileceği söylenebilmektedir.

Yorulma ömrü değerleri kullanılarak ve Formül 6.8’de verilen Wöhler ilişkisinden faydalanılarak çizilen yorulma ömrü eğrileri Şekil 7.53’te verilmiştir. Şekil 7.53’teki grafiklerden elde edilen katsayılar Tablo 7.48’de verilmiştir.



Şekil 7.53. Karışımların yorulma ömrü diyagramları

Tablo 7.48. Yorulma deneyinden elde edilen değerler

Asfaltit İçeriği, (%)	Yorulma Ömrü, N_f	k_1	k_2	R^2
0	$N_f = 1,09E+10 \times \sigma^{-2,62}$	1,09E+10	2,62	0,9350
1	$N_f = 2,54E+14 \times \sigma^{-4,21}$	2,54E+14	4,21	0,9221
2	$N_f = 1,15E+17 \times \sigma^{-5,17}$	1,15E+17	5,17	0,9089
3	$N_f = 1,42E+17 \times \sigma^{-5,17}$	1,42E+17	5,17	0,9005
4	$N_f = 2,45E+17 \times \sigma^{-5,22}$	2,45E+17	5,22	0,9301
5	$N_f = 3,86E+17 \times \sigma^{-5,24}$	3,86E+17	5,24	0,8863

Şekil 7.53’te görüldüğü üzere en düşük yorulma ömrüne saf karışım, en yüksek yorulma ömrüne ise %5 asfaltit içeren karışım sahiptir. Asfaltit içeriği arttıkça karışımların yorulma ömürleri düzenli olarak artmıştır. Yorulma ömür bağıntılarından elde edilen Tablo 7.48’deki veriler incelendiğinde ise karışımlardan elde edilen yük tekerrür sayılarının yüksek uyumlulukta olduğu, %5 asfaltit içeren karışım dışında bütün karışımların belirtme katsayısının (R^2) 0,9’un üzerinde olduğu, k_1 ve k_2 katsayılarının asfaltit içeriğinin artışı ile arttığı belirlenmiştir. Molenaar ve Medani, yorulma çizgisinin eğimini ifade eden k_2

değerinin yüksek olmasının karışımın daha kırılgan davranış sergilemesine, düşük olmasının ise karışımın daha esnek davranış göstermesine işaret ettiğini belirtmektedir (Molenaar ve Medani, 2000). Maksimum yük tekrür sayısındaki, yorulma ömründeki ve çatlak başlangıcındaki deformasyon miktarları göz önüne alındığında genel olarak bu yorumun doğru olduğu söylenebilmektedir.

7.8.2. Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Uzun dönem yaşlandırılmış numunelere 300, 375 ve 450 kPa gerilme seviyelerinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen N_i , N_f , N_p , N_{mak} , δ_i , δ_f , δ_{mak} , r_p ve r_f değerleri Tablo 7.49–7.51’de verilmiştir. Ayrıca 300, 375 ve 450 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–maksimum yük tekrür sayısı ilişkisine birer örnek Şekil 7.54–7.56’da çizilmiştir.

Tablo 7.49. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
0	1	300	$y = 0,0001x + 0,639$	$y = 0,0008x - 11,66$	9624	1,598	17575	2,889	7951	18840	3,891	6159	1262
	2		$y = 0,0001x + 0,597$	$y = 0,0015x - 19,74$	7776	1,432	14523	2,631	6747	15216	3,598	5627	717
	3		$y = 0,0001x + 0,521$	$y = 0,0021x - 34,08$	9432	1,466	17298	2,769	7866	17688	3,4164	6037	602
	Ort.				8944	1,499	16465	2,763	7521	17248	3,635	5941	861
1	1	300	$y = 5E-05x + 0,555$	$y = 0,0009x - 17,84$	14496	1,326	21643	2,077	7147	22704	3,004	9517	1145
	2		$y = 7E-05x + 0,725$	$y = 0,0011x - 20,61$	12768	1,654	20716	2,774	7948	21720	3,661	7096	1132
	3		$y = 6E-05x + 0,653$	$y = 0,0006x - 11,15$	16992	1,738	21858	2,351	4866	23184	3,2292	7938	1510
	Ort.				14752	1,573	21406	2,401	6654	22536	3,298	8184	1262
2	1	300	$y = 3E-05x + 0,727$	$y = 0,0005x - 14,72$	20352	1,308	32873	2,045	12521	34224	2,895	16989	1589
	2		$y = 4E-05x + 0,627$	$y = 0,0007x - 22,52$	22800	1,473	35074	2,394	12274	36336	3,063	13327	1886
	3		$y = 4E-05x + 0,404$	$y = 0,0009x - 26,05$	19680	1,148	30758	1,864	11078	32448	2,958	15472	1545
	Ort.				20944	1,310	32902	2,101	11958	34336	2,972	15263	1674
3	1	300	$y = 1E-05x + 0,376$	$y = 0,0004x - 18,99$	29856	0,667	49651	1,017	19795	52464	2,011	56557	2830
	2		$y = 1E-05x + 0,347$	$y = 0,0002x - 12,63$	46272	0,829	68315	1,249	22043	71040	2,095	52483	3221
	3		$y = 2E-05x + 0,385$	$y = 0,0005x - 21,63$	32448	0,883	45863	1,294	13415	47568	1,973	32640	2511
	Ort.				36192	0,793	54610	1,187	18418	57024	2,026	47227	2854

Tablo 7.49. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)

Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
4	1	300	$y = 7E-06x + 0,297$	$y = 0,0002x - 15,05$	57216	0,689	79180	1,015	21964	83904	1,791	67374	6088
	2		$y = 8E-06x + 0,323$	$y = 0,0002x - 15,29$	49440	0,73	81317	1,187	31877	86880	1,647	69753	12093
	3		$y = 9E-06x + 0,186$	$y = 0,0002x - 14,16$	39360	0,515	75125	1,191	35765	79104	1,995	52907	4949
	Ort.				48672	0,645	78541	1,131	29869	83296	1,811	63345	7710
5	1	300	$y = 3E-06x + 0,444$	$y = 8E-05x - 7,8208$	79488	0,69	107338	0,933	27850	114240	1,655	114609	9560
	2		$y = 3E-06x + 0,400$	$y = 1E-04x - 10,832$	81024	0,612	115790	0,949	34766	123456	1,577	103163	12207
	3		$y = 6E-06x + 0,368$	$y = 9E-05x - 8,4998$	60864	0,712	105564	1,212	44700	108864	1,622	89400	8049
	Ort.				73792	0,671	109564	1,031	35772	115520	1,618	102391	9939

Tablo 7.50. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
0	1	375	$y = 0,0004x + 0,728$	$y = 0,0039x - 16,85$	3672	2,065	5022	3,012	1350	5262	3,878	1426	277
	2		$y = 0,0003x + 0,540$	$y = 0,0045x - 23,01$	4170	1,685	5608	2,497	1438	5820	3,412	1771	232
	3		$y = 0,0003x + 0,344$	$y = 0,0052x - 22,50$	2214	1,112	4661	2,523	2447	4944	3,607	1734	261
	Ort.				3352	1,621	5097	2,677	1745	5342	3,632	1644	257
1	1	375	$y = 0,0002x + 0,502$	$y = 0,0014x - 6,352$	4284	1,302	5711	1,784	1427	6144	2,711	2961	467
	2		$y = 0,0002x + 0,514$	$y = 0,0024x - 11,78$	4134	1,483	5590	2,073	1456	5946	3,066	2468	359
	3		$y = 0,0003x + 0,662$	$y = 0,0023x - 9,813$	3792	1,719	5237	2,406	1445	5550	3,181	2103	404
	Ort.				4070	1,501	5513	2,088	1443	5880	2,986	2511	410
2	1	375	$y = 0,0002x + 0,599$	$y = 0,003x - 20,538$	4716	1,651	7549	2,686	2833	7944	3,606	2737	429
	2		$y = 0,0002x + 0,394$	$y = 0,0039x - 29,84$	5364	1,556	8171	2,788	2807	8460	3,467	2278	426
	3		$y = 0,0002x + 0,344$	$y = 0,0028x - 18,36$	3900	1,146	7194	2,398	3294	7584	3,229	2631	469
	Ort.				4660	1,451	7638	2,624	2978	7996	3,434	2549	441
3	1	375	$y = 0,0001x + 0,600$	$y = 0,0021x - 20,46$	7536	1,491	10528	2,155	2992	11004	3,125	4506	491
	2		$y = 9E-05x + 0,515$	$y = 0,0014x - 14,54$	8556	1,250	11492	1,809	2936	11832	2,500	5252	492
	3		$y = 0,0001x + 0,290$	$y = 0,0028x - 25,63$	4512	0,929	9602	2,156	5090	10080	3,006	4148	562
	Ort.				6868	1,223	10541	2,040	3673	10972	2,877	4636	515

Tablo 7.50. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)

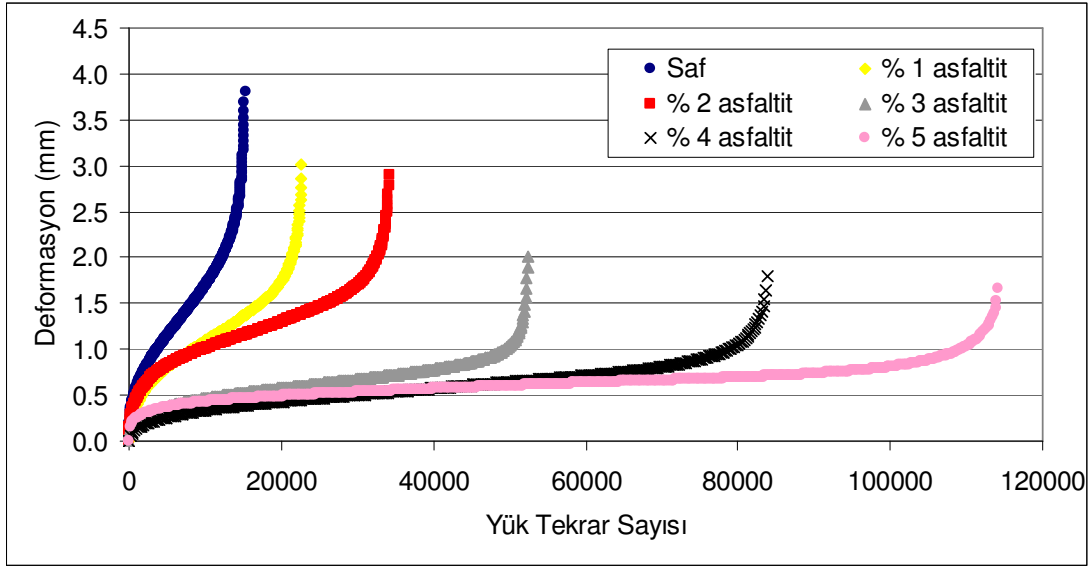
Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
4	1	375	$y = 4E-05x + 0,319$	$y = 0,0004x - 4,739$	10656	0,727	14049	1,041	3393	14952	1,88	10806	1076
	2		$y = 5E-05x + 0,169$	$y = 0,0009x - 10,22$	6600	0,509	12220	1,008	5620	12864	1,478	11263	1370
	3		$y = 6E-05x + 0,176$	$y = 0,0008x - 9,304$	7344	0,638	12811	1,283	5467	13632	1,841	8476	1471
	Ort.				8200	0,625	13027	1,111	4827	13816	1,733	10181	1306
5	1	375	$y = 3E-05x + 0,276$	$y = 0,0008x - 11,02$	10944	0,657	14665	0,975	3721	15528	1,609	11701	1361
	2		$y = 4E-05x + 0,329$	$y = 0,0007x - 11,70$	13296	0,832	18220	1,283	4924	18984	1,808	10918	1455
	3		$y = 5E-05x + 0,229$	$y = 0,0005x - 7,196$	6288	0,523	16498	1,142	10210	17256	1,537	16494	1919
	Ort.				10176	0,671	16461	1,133	6285	17256	1,651	13038	1578

Tablo 7.51. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

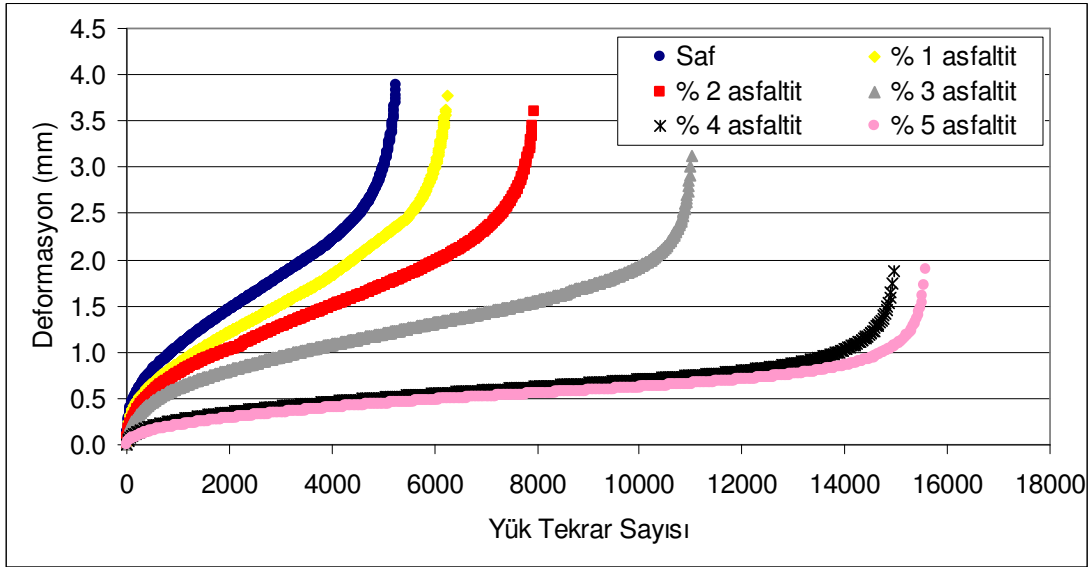
Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
0	1	450	$y = 0,0006x + 0,482$	$y = 0,0042x - 9,548$	1428	1,271	2786	2,383	1358	2940	3,089	1221	218
	2		$y = 0,0005x + 0,621$	$y = 0,0057x - 15,49$	1992	1,512	3099	2,329	1107	3252	3,171	1355	182
	3		$y = 0,0005x + 0,446$	$y = 0,0038x - 8,859$	1644	1,283	2820	2,092	1176	3024	2,833	1454	275
	Ort.				1688	1,355	2902	2,268	1214	3072	3,031	1343	225
1	1	450	$y = 0,0003x + 0,398$	$y = 0,0039x - 11,96$	2268	1,165	3431	1,808	1163	3654	2,611	1809	278
	2		$y = 0,0003x + 0,386$	$y = 0,0076x - 29,38$	1740	0,881	3972	1,999	2232	4242	3,013	1996	266
	3		$y = 0,0004x + 0,322$	$y = 0,0058x - 20,72$	2610	1,252	3837	2,177	1227	4044	2,99	1326	255
	Ort.				2206	1,099	3747	1,995	1541	3980	2,871	1711	266
2	1	450	$y = 0,0001x + 0,552$	$y = 0,0023x - 11,75$	4500	1,192	5593	1,583	1093	5940	2,327	2795	466
	2		$y = 0,0002x + 0,576$	$y = 0,0023x - 10,72$	3732	1,451	5378	2,121	1646	5736	2,89	2457	466
	3		$y = 0,0002x + 0,246$	$y = 0,0039x - 18,49$	2838	0,934	5063	1,957	2225	5424	3,024	2175	338
	Ort.				3690	1,192	5345	1,887	1655	5700	2,747	2476	423
3	1	450	$y = 9E-05x + 0,460$	$y = 0,0023x - 14,15$	5868	1,005	6612	1,191	744	7092	2,07	4000	546
	2		$y = 0,0001x + 0,320$	$y = 0,0018x - 9,743$	4392	0,829	5919	1,216	1527	6264	1,858	3946	537
	3		$y = 0,0001x + 0,359$	$y = 0,0023x - 14,6$	5244	0,897	6800	1,266	1556	7164	2,089	4217	442
	Ort.				5168	0,910	6444	1,224	1276	6840	2,006	4054	509

Tablo 7.51. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 450 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları (Devamı)

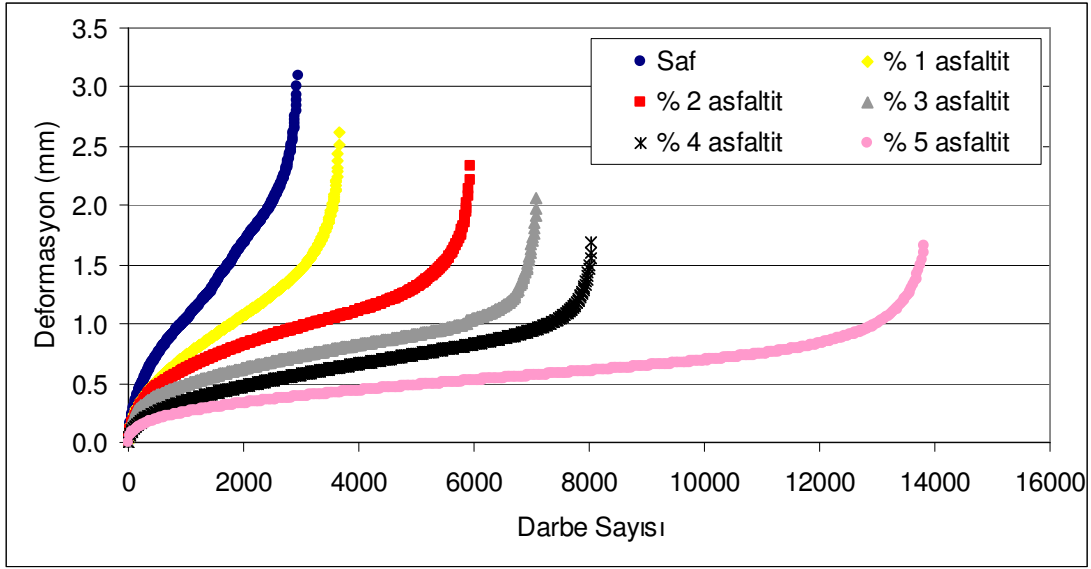
Asfaltit İçeriği, (%)	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p	r_f
4	1	450	$y = 9E-05x + 0,318$	$y = 0,0015x - 10,42$	5856	0,818	7617	1,094	1761	8040	1,688	6380	712
	2		$y = 1E-04x + 0,243$	$y = 0,0015x - 11,29$	3396	0,564	8234	1,345	4838	8688	1,958	6195	741
	3		$y = 1E-04x + 0,174$	$y = 0,0018x - 14,50$	4092	0,571	8629	1,331	4537	9120	1,864	5970	921
	Ort.				4448	0,651	8160	1,257	3712	8616	1,837	6182	791
5	1	450	$y = 4E-05x + 0,276$	$y = 0,0007x - 8,27$	9648	0,674	12948	0,989	3300	13824	1,659	10476	1307
	2		$y = 6E-05x + 0,335$	$y = 0,0009x - 8,643$	7548	0,821	10687	1,232	3139	11052	1,719	7637	749
	3		$y = 8E-05x + 0,162$	$y = 0,0012x - 10,91$	5820	0,613	9883	1,225	4063	10260	1,653	6639	881
	Ort.				7672	0,703	11173	1,149	3501	11712	1,677	8251	979



Şekil 7.54. UDY numunelerin 300 kPa gerilme altında deformasyon–yük tekrar sayısı ilişkisi

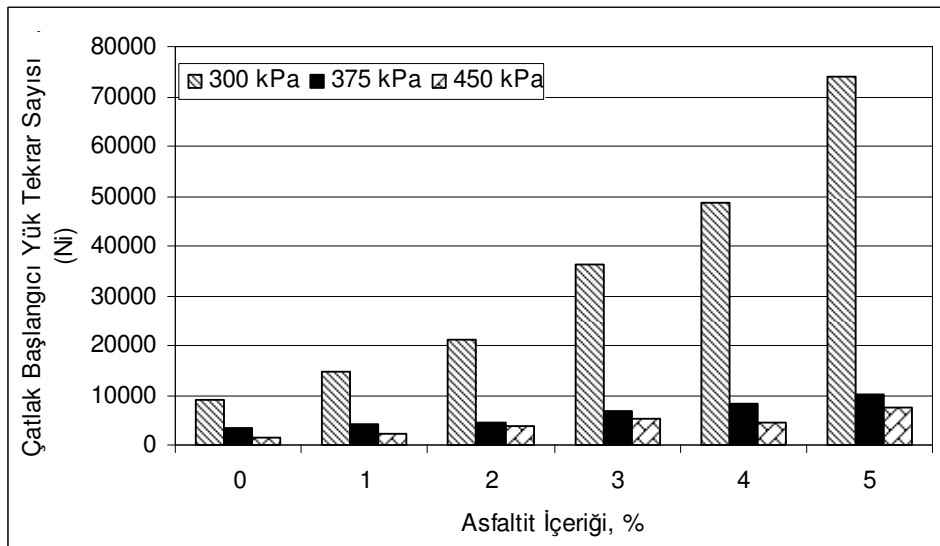


Şekil 7.55. UDY numunelerin 375 kPa gerilme altında deformasyon–yük tekrar sayısı ilişkisi



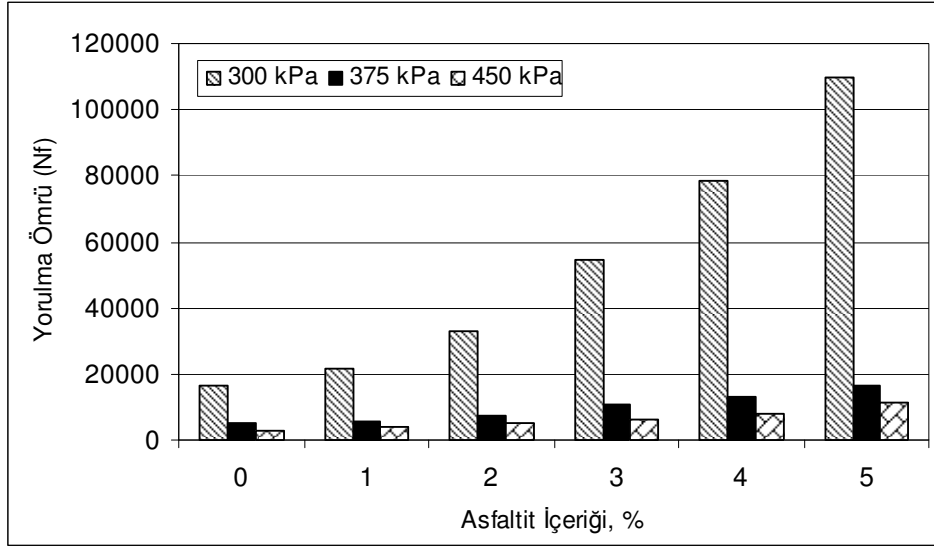
Şekil 7.56. UDY numunelerin 450 kPa gerilme altında deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

300, 375 ve 450 kPa gerilme seviyelerinde uzun dönem yaşlandırılmış üç numuneden elde edilen çatlağın oluştuğu yük tekrar sayılarının (N_i) ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.57’de, yorulma ömrü (N_f) değerlerinin ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.58’de, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı (N_p) değerlerinin ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.59’da, maksimum yük tekrar sayılarının (N_{mak}) ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.60’ta verilmiştir.



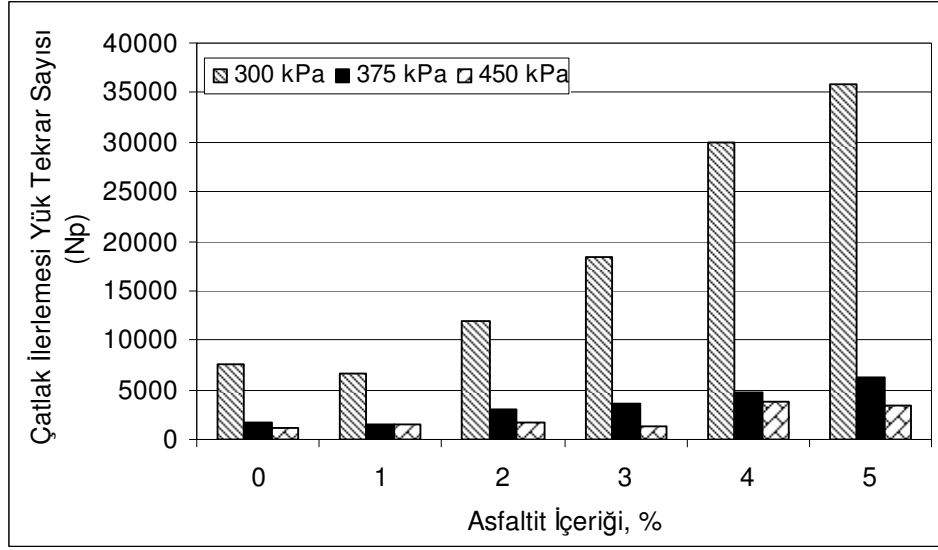
Şekil 7.57. UDY numunelerin çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı- asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.57 incelendiğinde %4 asfaltit içeren numunelerin 450 kPa gerilme seviyesindeki N_i değeri dışında bütün gerilme seviyelerinde asfaltit içeriği arttıkça çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarının (N_i) arttığı belirlenmiştir. Gerilme seviyelerinin artışı ile bütün asfaltit içeriklerinde N_i değerleri azalmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda N_i değeri saf karışıma göre 4,05 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 8,25 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda N_i değeri 3,06 kat artarken %5 asfaltit kullanıldığında 4,55 kat artmıştır. Bu durum kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde görüldüğü gibi çatlak başlangıcı yük tekrar sayıları açısından düşük gerilmelerde (300 kPa) asfaltitin daha etkin olduğunu göstermektedir.



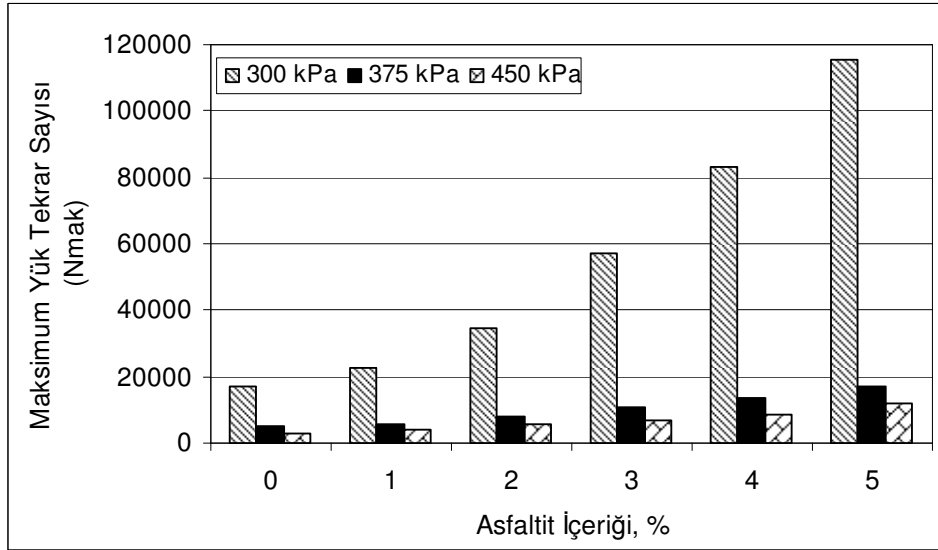
Şekil 7.58. UDY numunelerin yorulma ömrü - asfaltit içeriği ilişkisi

Yorulma ömrü – asfaltit içeriği grafiklerinden (Şekil 7.58) çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça yorulma ömrü (N_f) değerlerinin arttığı, gerilme seviyesi arttıkça ise N_f değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda N_f değeri 3,32 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 6,65 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda N_f değeri 2,22 kat artarken %5 asfaltit kullanıldığında 3,85 kat artmıştır. Gerilme seviyesi 450 kPa’dan 300 kPa’a düştüğünde saf karışımın yorulma ömrü değeri 5,67 kat artarken %3 asfaltit içeren karışımda 8,48 kat, %5 asfaltit içeren karışımda ise 9,81 kat artmıştır.



Şekil 7.59. UDY numunelerin çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi

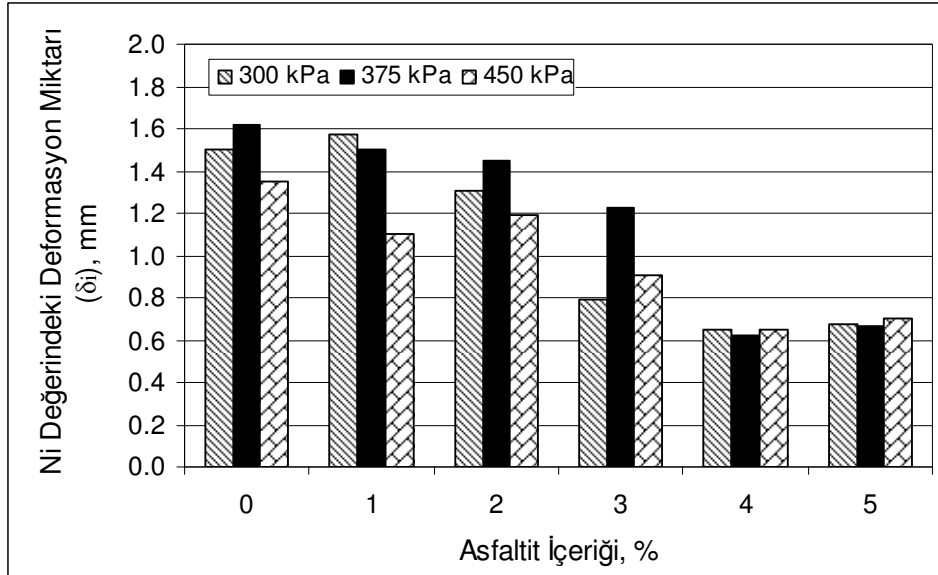
N_f ile N_i değerlerinin farkından elde edilen çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) değerleri incelendiğinde (Şekil 7.59) genel olarak N_f ve N_i değerlerinin asfaltit içeriği ve gerilme ile değişimine benzer bir ilişki elde edilmiştir.



Şekil 7.60. UDY numunelerin maksimum yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.60'ta görüldüğü üzere bütün gerilme seviyelerinde asfaltit içeriği arttıkça maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi özellikle 300 kPa gerilme seviyesinde asfaltitin etkisi daha ön plana çıkmıştır. 450 kPa

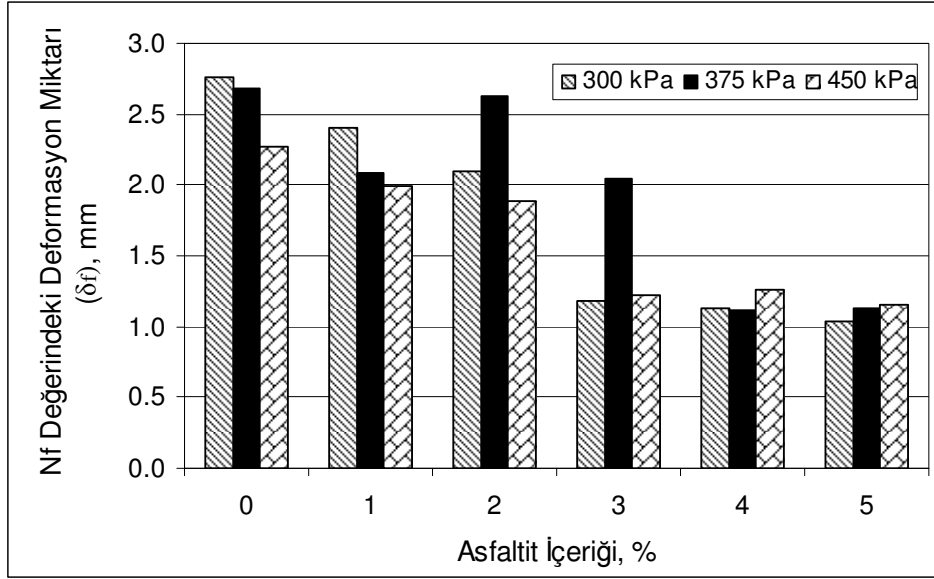
gerilme seviyesinde %3 asfaltit içeren karışımların ortalama yük tekrür sayısı saf karışıma göre 2,22 kat artarken 375 kPa gerilme seviyesinde 2,05 kat, 300 kPa gerilme seviyesinde ise 3,31 kat artış meydana gelmiştir. %5 asfaltit içeren karışımların maksimum yük tekrar sayıları ise saf karışıma göre 450 kPa gerilme seviyesinde 3,64 kat artarken 375 kPa gerilme seviyesinde 3,23 kat, 300 kPa gerilme seviyesinde ise 6,70 kat artmıştır. N_i , N_f , N_p ve N_{mak} grafiklerinde ortak olarak görülen %5 gibi yüksek asfaltit içeriklerinde ve düşük gerilme seviyelerinde asfaltitin yüksek oranda etkinliği, ağır taşıt trafiğinin az olduğu bölgelerde kullanılması durumunda, asfaltit içeren karışımların yorulma dayanımlarının daha yüksek olacağını göstermektedir. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin çatlak oluşumundaki deformasyon değerlerinin (δ_i) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.61’de, yorulma ömrü değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.62’de, maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının (δ_{mak}) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi ise Şekil 7.63’te verilmiştir.



Şekil 7.61. UDY numunelerin N_i değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi

UDY numunelerin N_i değerindeki deformasyon miktarları (δ_i) incelendiğinde (Şekil 7.61) kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça genel olarak deformasyon miktarlarının azaldığı gözlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde en yüksek δ_i değerine %1 asfaltit içeren karışım sahip iken 375 ve 450 kPa gerilme

seviyelerinde en yüksek δ_i değerlerine saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük δ_i değerine bütün gerilme seviyelerinde %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

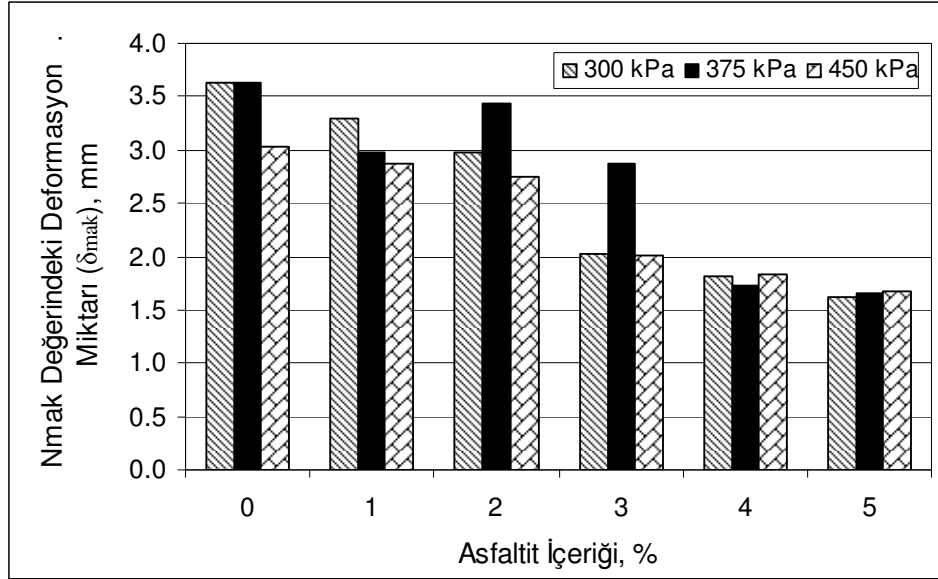


Şekil 7.62. UDY numunelerin N_f değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi

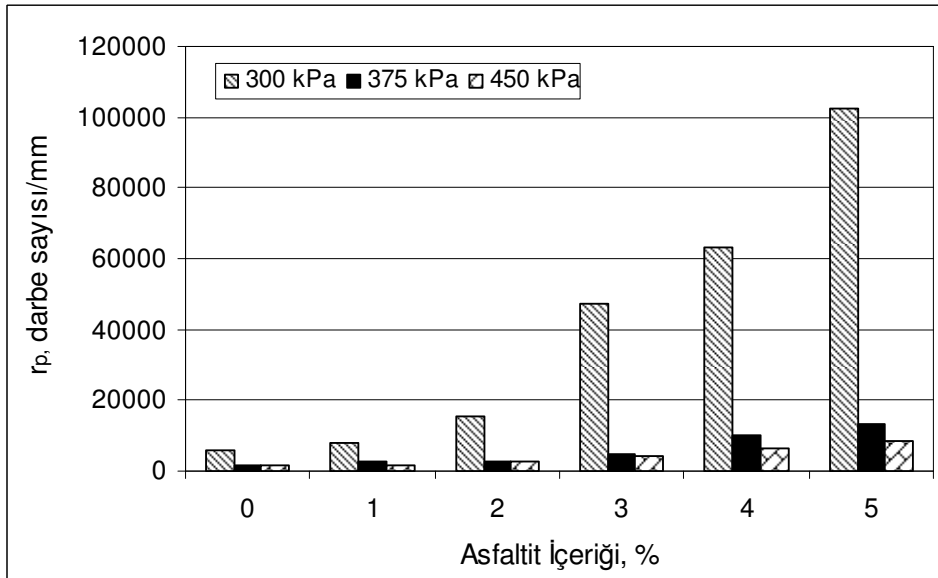
Şekil 7.62’de görülen N_f değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) karşılaştırıldığında ise δ_i değerlerinde olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça genel olarak deformasyon miktarlarının azaldığı gözlenmiştir. Bütün gerilme seviyelerinde en yüksek δ_f değerine saf karışımın sahip olduğu, en düşük δ_f değerine ise 300 ve 450 kPa gerilme seviyelerinde %5 asfaltit içeren karışımın, 375 kPa gerilme seviyesinde ise %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

UDY numunelerin maksimum yük tekrür sayısındaki maksimum deformasyon miktarlarının ortalamaları (δ_{mak}) karşılaştırıldığında (Şekil 7.63) asfaltit içeriğinin artması ile δ_{mak} değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bütün gerilme seviyelerinde en yüksek δ_{mak} değerine saf karışımın sahip olduğu, en düşük δ_{mak} değerine ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi gerilme seviyesinin değişmesi ile aynı asfaltit içeriklerinde değişken δ_{mak} değerleri belirlenmiştir. Saf ve %1 asfaltit içeren karışımlarda en yüksek δ_{mak} değerleri 300 kPa gerilme seviyesinde gözlenirken %2 ve %3 asfaltit içeriklerinde 375 kPa gerilme seviyesinde, %4 ve %5 asfaltit içeriklerinde ise 450 kPa gerilme seviyesinde gözlenmiştir. Elde edilen δ_i , δ_f

ve δ_{mak} değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimleri, asfaltit içeriği arttıkça yük tekrarı ile numunelerde meydana gelen deformasyon miktarlarının azalacağını dolayısıyla kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi daha gevrek bir kırılmanın gözleneceğini göstermektedir. UDY numunelerin çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_p ve r_f) asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.64 ve 7.65'te verilmiştir.

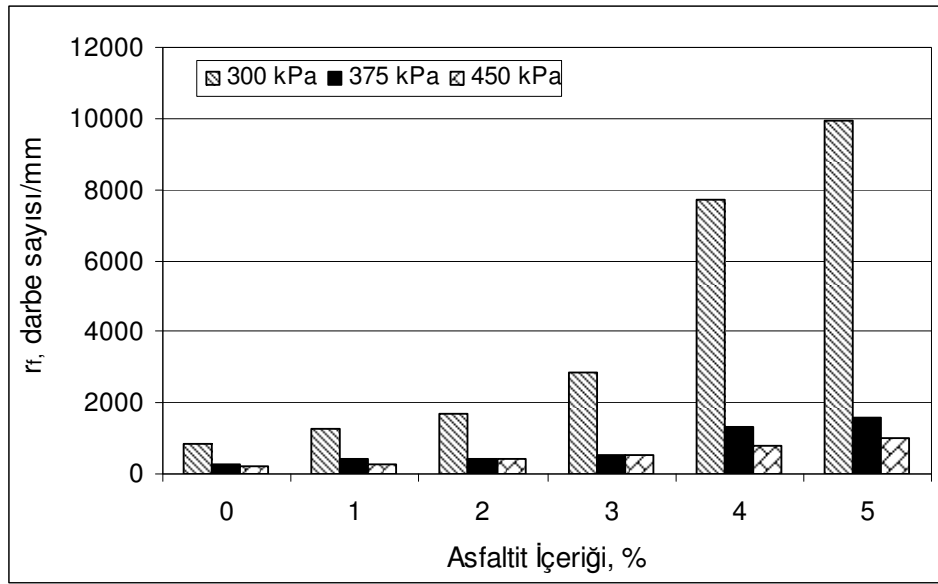


Şekil 7.63. UDY numunelerin N_{mak} değerindeki deformasyon miktarı - asfaltit içeriği ilişkisi



Şekil 7.64. UDY numunelerin $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi

UDY numunelerin $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı (r_p) değerlerinin asfaltit içeriği ile değişiminin görüldüğü Şekil 7.64 incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile r_p değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile ise bu değer azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_p değeri 7,95 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 17,24 kat artmıştır. 375 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_p değeri 2,82 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 7,93 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_p değeri 3,02 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 6,14 kat artmıştır. Çatlak oluşuktan sonra her 1 mm deformasyon için gerekli yük tekrar sayısını ifade eden r_p değerlerinden, kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde de özellikle düşük gerilme seviyelerinde ve yüksek asfaltit içeriklerinde çatlak ilerleyişine karşı dayanımın yüksek olduğu belirlenmiştir.

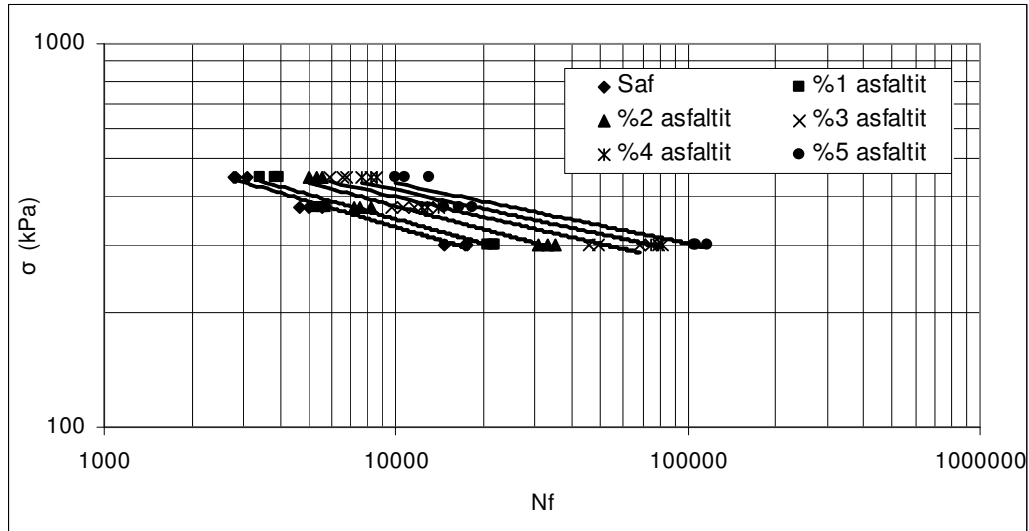


Şekil 7.65. UDY numunelerin $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı - asfaltit içeriği ilişkisi

UDY numunelerin $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi (Şekil 7.65) incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile r_f değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile genel olarak bu değer azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_f değeri 3,31 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 11,54 kat artmıştır. 375 kPa gerilme

seviyesinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_f değeri 2,00 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 6,14 kat artmıştır. 450 kPa gerilme seviyesinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre r_f değeri 2,26 kat artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda 4,35 kat artmıştır. Saf karışıma göre r_f değerindeki en düşük artışın, 450 kPa gerilme seviyesinde %1 asfaltit içeren karışımda (1,18 kat) olduğu belirlenmiştir. $N_i - N_f$ arasındaki yük tekrar sayısı ve deformasyon miktarlarından elde edilen r_p değerleri ile $N_f - N_{mak}$ arasındaki yük tekrar sayısı ve deformasyon miktarlarından elde edilen r_f değerleri karşılaştırıldığında kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi r_p değerlerinin r_f değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri (r_p ve r_f) göz önünde bulundurulduğunda uzun dönem yaşlanmadan sonra asfaltit içeriği arttıkça çatlak oluşumundan itibaren karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının artacağı söylenebilmektedir.

UDY numunelerin yorulma ömrü değerleri kullanılarak ve Formül 6.8'de verilen Wöhler ilişkisinden faydalanılarak çizilen yorulma ömrü eğrileri Şekil 7.66'da verilmiştir. Şekil 7.66'da görülen grafiklerden elde edilen katsayılar Tablo 7.52'de verilmiştir.



Şekil 7.66. UDY karışımların yorulma ömrü diyagramları

Tablo 7.52. UDY numunelerin yorulma deneylerinden elde edilen değerler

Asfaltit İçeriği, (%)	Yorulma Ömrü, N_f	k_1	k_2	R^2
0	$N_f = 7,35E+14 \times \sigma^{-4,31}$	7,35E+14	4,31	0,9702
1	$N_f = 1,25E+15 \times \sigma^{-4,37}$	1,25E+15	4,37	0,9344
2	$N_f = 5,55E+15 \times \sigma^{-4,56}$	5,55E+15	4,56	0,9204
3	$N_f = 6,82E+17 \times \sigma^{-5,31}$	6,82E+17	5,31	0,9277
4	$N_f = 7,71E+18 \times \sigma^{-5,68}$	7,71E+18	5,68	0,9271
5	$N_f = 1,59E+19 \times \sigma^{-5,75}$	1,59E+19	5,75	0,9028

Şekil 7.66 incelendiğinde kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde de en düşük yorulma ömrüne saf karışımın, en yüksek yorulma ömrüne ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu görülmektedir. Asfaltit içeriği arttıkça karışımların yorulma ömürleri düzenli olarak artmıştır. Yorulma ömür bağıntılarından elde edilen Tablo 7.52’deki veriler incelendiğinde ise karışımlardan elde edilen yük tekrür sayılarının yüksek uyumlulukta olduğu, bütün karışımların belirtme katsayısı (R^2) değerlerinin 0,9’un üzerinde olduğu, k_1 ve k_2 katsayılarının asfaltit içeriğinin artışı ile arttığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça karışımlarda daha gevrek kırılmanın meydana geleceği söylenebilmektedir.

7.8.3. Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Uzun dönem yaşlanmadan ötürü bütün karışımların yük tekrar sayıları artmış bunun yanı sıra deformasyon değerleri genel olarak azalmıştır. Saf karışım ve %1–5 oranında asfaltit içeren bitümlü sıcak karışımların yorulma parametreleri üzerinde uzun dönem yaşlanmanın etkisini görebilmek amacıyla uzun dönem yaşlandırma işleminden sonra elde edilen değerler, yaşlandırma işleminden önceki değerlere oranlanarak yaşlanma indeksleri belirlenmiştir. Bu değerler, Tablo 7.53’te verilmiştir. Aynı gerilme seviyesinde en düşük ve en yüksek değerlere sahip asfaltit içerikleri koyu olarak işaretlenmiştir.

Çatlak başlangıcı için gerekli yük tekrar sayılarının yaşlanma indekslerinin (N_{iu} / N_i), yorulma ömrü yaşlanma indekslerinin (N_{fu} / N_f), çatlak ilerlemesi yaşlanma indekslerinin (N_{pu} / N_p) ve maksimum yük tekrar sayısı yaşlanma indekslerinin (N_{maksu} / N_{maks}) büyük

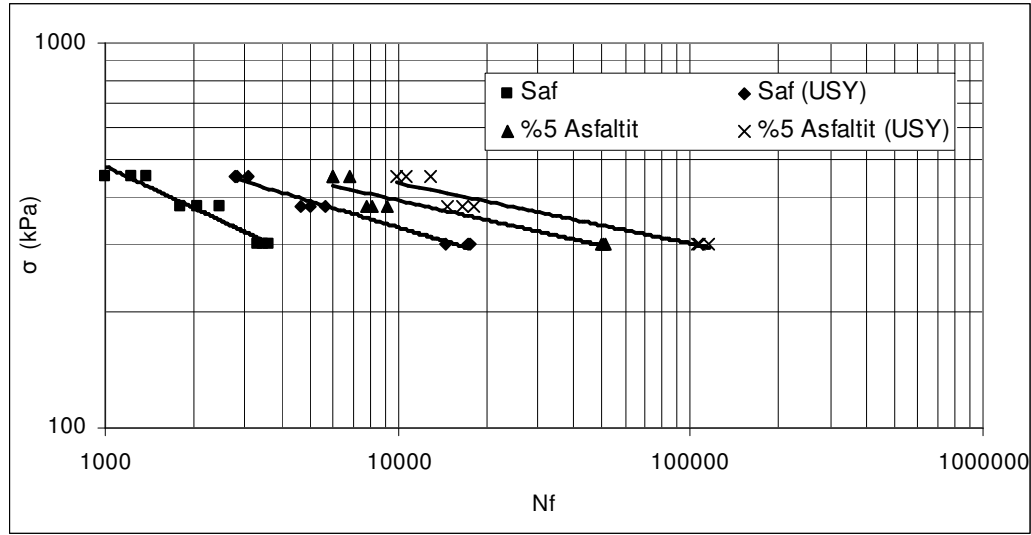
olması karışımların yaşlanmadan fazla etkilendiğini düşük olması ise yaşlanmadan daha az etkilendiğini göstermektedir. Tablo incelendiğinde en büyük ve en düşük yaşlanma indeksi değerlerine sahip asfaltit içeriklerinin farklılık gösterdiği, en yüksek yaşlanma indeksi değerlerine sahip karışımın en fazla saf karışım olduğu belirlenmiştir. Tabloda görüldüğü üzere hiçbir gerilme seviyesinde ve yaşlanma indeksi türünde en yüksek değere %3, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların sahip olmadığı belirlenmiştir. Deformasyon değerleri yaşlanma indekslerinde düzensiz bir değişme olmuş, fakat genel olarak yaşlanmadan ötürü deformasyon değerleri azalmıştır. Çatlak ilerleme değerlerinden elde edilen yaşlanma indekslerinde de deformasyon indekslerinde olduğu gibi düzenli bir değişme meydana gelmemiştir. Elde edilen yük tekrar sayısı yaşlanma indeksi değerlerinden asfaltit kullanımının bitümlü sıcak karışımların yaşlanmaya karşı dayanımını arttırdığı söylenebilmektedir.

Formül 6.8 kullanılarak belirlenen yorulma ömrü grafiklerinden uzun dönem yaşlandırmadan önce ve sonra en düşük yorulma ömrüne sahip olan saf karışım ve en yüksek değerlere sahip olan %5 asfaltit içeren karışımın gerilmeye bağlı yorulma ömrü değişim grafiği Şekil 7.67’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere uzun dönem yaşlanmadan ötürü saf ve %5 asfaltit içeren karışımın yorulma ömürleri artmıştır. Yaşlanmadan kaynaklanan bu değişim bütün karışım türlerinde gözlenmiştir.

Tablo 7.48 ve Tablo 7.52’deki k_1 ve k_2 değerleri incelendiğinde uzun dönem yaşlanmadan ötürü her iki katsayı değerinin arttığı belirlenmiştir. k_2 değerindeki artış yaşlanmadan ötürü karışımların daha gevrek kırılacağını ifade etmektedir. Uzun dönem yaşlanmadan ötürü deformasyon değerlerinde azalma meydana gelmesi, daha gevrek bir kırılmanın olacağını desteklemektedir.

Tablo 7.53. Yorulma deneylerinden elde edilen yaşlanma indeksleri

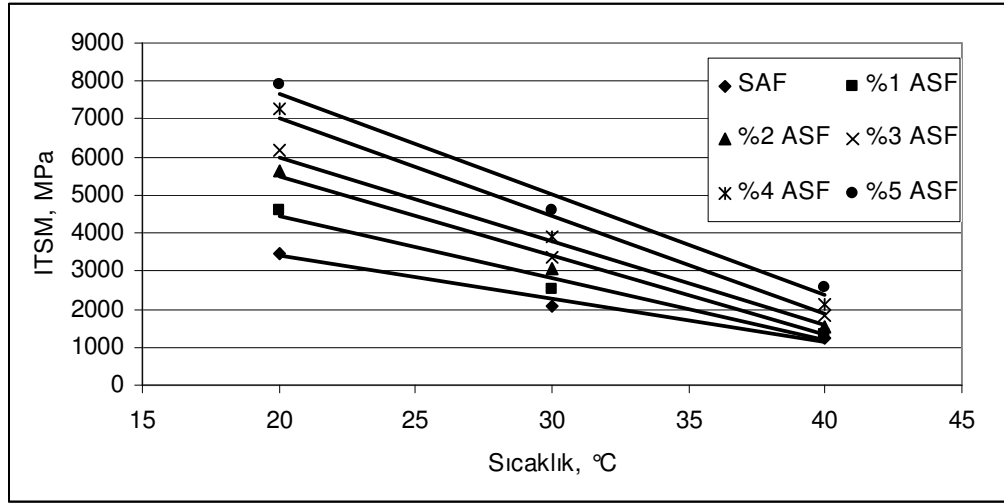
σ (kPa)	Asfaltit İçeriği, (%)	N_{iu} / N_i	δ_{iu} / δ_i	N_{fu} / N_f	δ_{fu} / δ_f	N_{pu} / N_p	N_{maku} / N_{mak}	$\delta_{maku} / \delta_{mak}$	r_{pu} / r_p	r_{fu} / r_f
300	0	3,696	0,936	4,746	1,084	7,168	4,592	1,032	5,348	2,608
	1	2,172	1,145	2,006	0,996	1,715	1,956	1,001	2,061	1,430
	2	1,450	0,970	1,592	0,999	1,922	1,572	0,955	1,788	1,403
	3	2,029	0,703	2,086	0,647	2,208	1,964	0,679	3,330	1,279
	4	2,157	0,542	2,420	0,613	3,020	2,467	1,521	3,751	5,003
	5	2,048	0,827	2,183	0,905	2,525	2,118	1,993	2,308	1,654
375	0	2,513	0,825	2,418	0,851	2,255	2,391	0,911	2,547	1,715
	1	2,242	0,824	1,964	0,724	1,455	1,986	0,758	2,636	2,056
	2	1,514	0,692	2,020	1,001	4,236	2,036	1,084	1,920	1,615
	3	1,899	0,875	2,248	1,051	3,421	2,202	1,001	2,429	1,623
	4	1,975	0,538	2,080	0,614	2,288	2,051	0,670	3,127	2,121
	5	1,991	0,596	1,970	0,613	1,936	1,940	0,660	2,981	1,887
450	0	1,910	0,621	2,413	0,753	3,813	2,428	0,825	3,496	2,336
	1	1,907	0,749	1,879	0,779	1,840	1,855	0,837	1,591	1,530
	2	2,355	0,859	2,031	0,819	1,555	2,044	0,842	2,113	2,561
	3	2,056	0,646	1,923	0,646	1,525	1,939	0,774	2,382	1,984
	4	1,747	0,660	2,024	0,794	2,499	2,038	0,807	2,501	2,757
	5	1,566	0,672	1,777	0,772	2,523	1,783	0,788	2,583	2,315



Şekil 7.67. UDY önce ve sonrasında saf ve %5 asfaltit içeren karışımın gerilme – yorulma ömrü ilişkisi

7.8.4. Rijitlikle Yorulma Ömrü Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında yapılan ITSM deneyleri sonucunda Şekil 7.35 ve Şekil 7.37’de görüldüğü üzere asfaltit içeriği arttıkça rijitlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Yapılan yorulma deneyleri sonucunda, Şekil 7.45 ve Şekil 7.58’de görüldüğü üzere asfaltit içeriği arttıkça karışımların yorulma ömürlerinin arttığı belirlenmiştir. Asfaltit içeren karışımlarda rijitlik ile yorulma ömrü arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla 25°C’deki ITSM değerleri ile yorulma ömürleri değerlendirilmiştir. ITSM deneyleri 20, 30 ve 40°C’de yapıldığından her bir karışımın ITSM değerinin sıcaklıkla değişim grafiği çizilerek 25 °C’deki ITSM değerleri elde edilmiştir (Şekil 7.68). Her bir karışımın ITSM değerinin sıcaklıkla değişim denklemi Tablo 7.54’te verilmiştir.

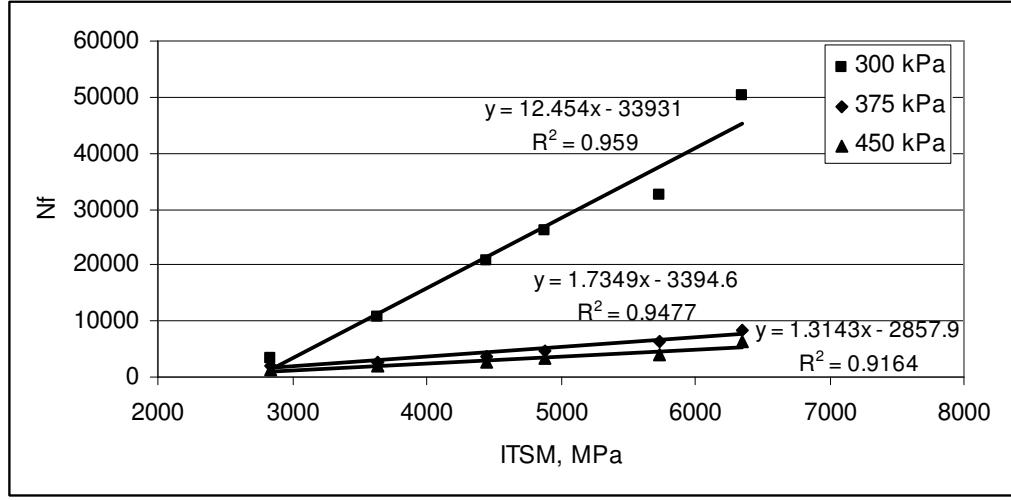


Şekil 7.68. Karışımların ITSM değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Tablo 7.54. Karışımların 25 °C'deki ITSM değerleri

Karışım Türü	Denklem	R ²	25 °C'deki ITSM, MPa
Saf	$y = -111,95x + 5633,2$	0,981	2834
%1 Asfaltit	$y = -163,2x + 7716$	0,975	3636
%2 Asfaltit	$y = -205,9x + 9590,3$	0,98	4443
%3 Asfaltit	$y = -219,1x + 10362$	0,9731	4885
%4 Asfaltit	$y = -258,35x + 12191$	0,9714	5732
%5 Asfaltit	$y = -266,75x + 13020$	0,9802	6351

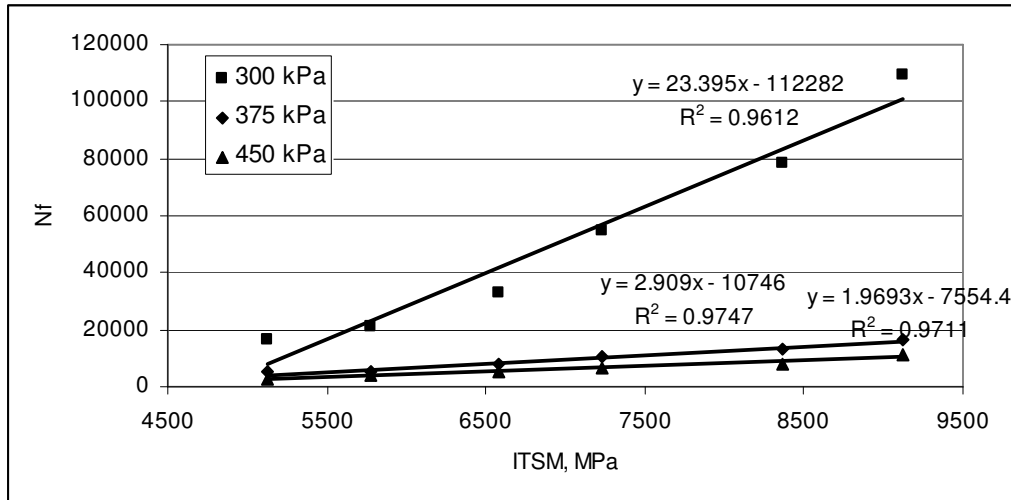
Aynı asfaltit içeriklerine sahip karışımların yorulma ömrü ITSM ilişkisi Şekil 7.69'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bütün gerilme seviyelerinde R² değerlerinin 0,9'dan büyük olduğu dolayısıyla ITSM değerleri ile kullanılan bütün gerilmelerdeki yorulma ömrü değerleri arasında büyük oranda uyum olduğu belirlenmiştir. Uzun dönem yaşlandırılmış karışımların 25°C'deki ITSM değerleri Tablo 7.55'te, yaşlanma sonrası yorulma ömrü değerleri ile ITSM değerlerinin değişimi ise Şekil 7.70'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere uzun dönem yaşlanmadan önce olduğu gibi sonra da ITSM ile yorulma ömrü arasında yüksek oranda uyum olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuca benzer olarak, yapılan birçok çalışma sonucunda gerilme kontrollü yorulma deneylerinde rijitlikteki artışın yorulma ömrünü arttırdığı belirlenmiştir (Francken, 1998).



Şekil 7.69. ITSM – yorulma ömrü ilişkisi

Tablo 7.55. UDY karışımların 25 °C’deki ITSM değerleri

Karışım Türü	Denklem	R^2	25 °C’deki ITSM, MPa
Saf	$y = -263,2x + 11711$	0,9315	5131
%1 Asfaltit	$y = -302,6x + 13337$	0,9517	5772
%2 Asfaltit	$y = -334,4x + 14945$	0,9843	6585
%3 Asfaltit	$y = -353,95x + 16075$	0,9704	7226
%4 Asfaltit	$y = -422,4x + 18921$	0,9625	8361
%5 Asfaltit	$y = -438,75x + 20090$	0,9599	9121



Şekil 7.70. Uzun dönem yaşlandırılmış karışımların ITSM – yorulma ömrü ilişkisi

7.9. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Dinamik sünme deneyi, saf karışım ve %1 ile %5 arasında 5 farklı oranda filler olarak asfaltit kullanılan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde UMATTA deney aleti kullanılarak uygulanmıştır. Her bir asfaltit içeriği için üç numune deneye tabi tutulmuştur. Deney 50°C sıcaklıkta yapılmıştır. 1., 2. ve 3. kısım deformasyon bölgelerinin rahatlıkla görülebilmesi amacıyla gerilme seviyesi 500 kPa olarak seçilmiştir (Tapkın vd., 2009). Deneye başlamadan önce numuneler 4 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, deney aparatına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Deneye başlanmadan önce numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılmıştır. Yükleme periyodu 1,0 sn olarak alınmıştır. Bu sürenin 500 ms.'si yük etki süresi, 500 ms.'si ise dinlenme süresi olarak seçilmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin yanı sıra uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde de dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 7.71'de görülmektedir.



Şekil 7.71. Dinamik sünme deneyi sonrasında numunelerin görünüşü

Çalışmada numunelerde bozulma meydana gelinceye kadar yük tekrarı uygulanmıştır. Toplam kalıcı birim şekil değiştirme, sünme ve esneklik modülü değerleri UMATTA cihazının yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Akma sayısı değerleri ise

Bausano ve Williams tarafından önerilen şekilde hesaplanmıştır (Bausano ve Williams, 2007). Özellikle yüksek oranda asfaltit içeren uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde cihazın izin verdiği maksimum yük tekrar sayısı (65000 darbe) kadar darbe numunelere uygulanmasına rağmen minimum eğim elde edilemediğinden Bausano ve Williams tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Bausano ve Williams, yapmış oldukları çalışmada 6. derece polinom fonksiyonu uygulandığında “sünme modülü * yük tekrar sayısı – yük tekrar sayısı” grafiğine en uygun denklemin elde edildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada ikinci derece polinom fonksiyonu uygulandığında da 6. derece polinom fonksiyonundan elde edilen değerlere yakın akma sayısı değerlerinin elde edildiği belirlenmiş ve 2. derece polinom fonksiyonunun da kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle çalışmada “sünme modülü * yük tekrar sayısı – yük tekrar sayısı” grafiklerine 2. derece polinom fonksiyonu uygulanarak akma sayısı değerleri belirlenmiştir.

7.9.1. Kısa Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Çalışmada 7500 yük tekrarı, %3 kalıcı birim şekil değiştirme ve akma sayısı olmak üzere üç farklı kriter alınarak değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.56 ve 7.57’de verilmiştir.

%3 kalıcı birim şekil değiştirmeye (ϵ_c) neden olan yük tekrarları incelendiğinde asfaltit içeriği arttıkça darbe sayısının arttığı, %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre bu değer 2,58 kat arttığı, %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 5,98 kat arttığı belirlenmiştir. Elastikiyetin bir göstergesi olan esneklik modülü değerleri incelendiğinde ise en yüksek esneklik modülü değerine %4 asfaltit içeriğine sahip karışımın en düşük esneklik modülü değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerindeki esneklik modülü değerleri %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre %1,46 , %4 asfaltit kullanılması durumunda %14,96 , %5 asfaltit kullanılması durumunda ise %14,22 artmıştır. Bu durum, en düşük elastik davranışları %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların göstereceğine işaret etmektedir. %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerindeki sünme modülü değerleri ise değişiklik göstermemiştir. Bu durum kalıcı birim şekil değiştirmenin sabit değer olarak alınmasından kaynaklanmıştır. Kalıcı birim şekil değiştirmeler eşit olduğundan sünme modülü değerleri de eşit çıkmıştır.

Tablo 7.56. KSY numunelerin dinamik sünme deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h	%3 ϵ_c 'deki Yük Tekrarı	%3 ϵ_c 'deki Esneklik Modülü	%3 ϵ_c 'deki Sünme Modülü	7500 Yük Tekrarındaki ϵ_c	7500 Yük Tekrarındaki Esneklik Modülü	7500 Yük Tekrarındaki Sünme Modülü
0	1	64,9	5288	585,8	16,61	5,225	473,7	9,569
	2	64,6	7520	554,1	16,66	2,997	564,8	16,69
	3	65,4	4888	522,3	16,66	-	-	-
	Ort.		5899	554,1	16,64	4,111	519,3	13,13
1	1	65,5	8240	532,4	16,65	2,703	571	18,48
	2	65,8	7504	549,3	16,65	3,000	549,3	16,65
	3	65,4	7600	522,3	16,63	2,949	526,9	16,91
	Ort.		7781	534,7	16,64	2,884	549,1	17,35
2	1	65,5	12912	531,3	16,62	1,712	613	29,17
	2	65,2	13920	554,1	16,63	1,663	655,6	30,07
	3	64,4	7776	615,7	16,63	2,915	622,7	17,11
	Ort.		11536	567,0	16,63	2,097	630,4	25,45
3	1	66,0	16160	572	16,65	1,386	646,8	36,04
	2	65,7	15776	553	16,67	1,601	631,8	31,2
	3	65,8	13632	561,5	16,65	1,71	597,7	29,22
	Ort.		15189	562,2	16,66	1,566	625,4	32,15
4	1	65,6	28544	632,3	16,62	1,199	707,4	41,59
	2	66,6	33088	640	16,64	1,074	712,4	46,54
	3	64,3	21440	638,6	16,67	1,699	756,4	29,38
	Ort.		27691	637,0	16,64	1,324	725,4	39,17
5	1	65,9	37952	625,6	16,66	1,173	690,8	42,63
	2	65,5	37056	626,1	16,64	1,164	669,2	42,93
	3	66,5	30784	646,9	16,66	1,227	701,1	40,69
	Ort.		35264	632,9	16,65	1,188	687,0	42,08

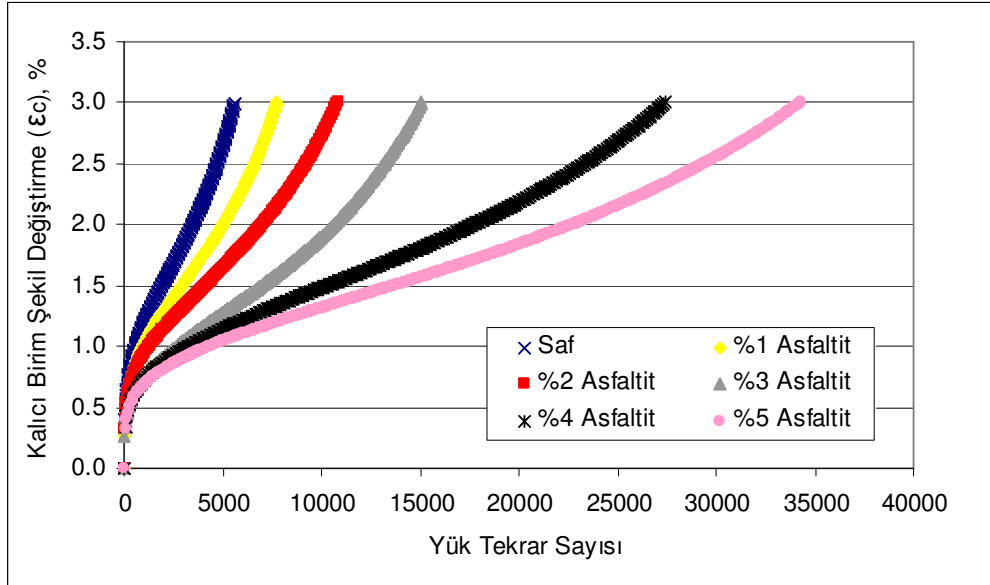
Tablo 7.57. KSY numunelerin akma sayısı sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	Akma Sayısı Denklemi	Akma Sayısı	Akma Sayısındaki ϵ_c	Akma Sayısındaki Esneklik Modülü	Akma Sayısındaki Sünme Modülü
0	1	$y = -0,0032x^2 + 31,847x + 9417,2$	4796	2,717	597,5	18,42
	2	$y = -0,0031x^2 + 38,607x + 9040$	6227	2,429	594,6	20,6
	3	$y = -0,0037x^2 + 32,83x + 9501,4$	4436	2,717	544,6	18,39
	Ort.		5153	2,621	578,9	19,14
1	1	$y = -0,0026x^2 + 36,147x + 12066$	6951	2,504	552,2	19,95
	2	$y = -0,0026x^2 + 34,566x + 13610$	6647	2,616	574,6	19,13
	3	$y = -0,0027x^2 + 35,082x + 19250$	6497	2,47	551,2	20,19
	Ort.		6698	2,530	559,3	19,76
2	1	$y = -0,002x^2 + 40,971x + 27837$	10243	2,227	588	22,42
	2	$y = -0,0019x^2 + 41,281x + 23967$	10863	2,212	615,9	22,61
	3	$y = -0,0018x^2 + 29,161x + 12241$	8100	3,112	594,5	16,06
	Ort.		9735	2,517	599,5	20,36
3	1	$y = -0,002x^2 + 47,001x + 32665$	11750	1,94	631,8	25,75
	2	$y = -0,0014x^2 + 37,538x + 32443$	13406	2,476	604,6	20,18
	3	$y = -0,0018x^2 + 38,672x + 28148$	10742	2,257	579,4	22,16
	Ort.		11966	2,224	605,3	22,70
4	1	$y = -0,0009x^2 + 40,522x + 51703$	22512	2,236	653,6	22,37
	2	$y = -0,0009x^2 + 44,521x + 57958$	24734	2,038	687,6	24,53
	3	$y = -0,0006x^2 + 28,62x + 36009$	23850	3,318	628,6	15,05
	Ort.		23699	2,531	656,6	20,65
5	1	$y = -0,0006x^2 + 35,956x + 68432$	29963	2,354	676	21,23
	2	$y = -0,0006x^2 + 37,455x + 62188$	31213	2,488	650	20,06
	3	$y = -0,0008x^2 + 38,318x + 52055$	23949	2,258	700,7	22,09
	Ort.		28375	2,367	675,6	21,13

Çalışmada saf karışımın denenen 3. numunesi 6500 yük tekrarında kırıldığından saf karışımın 7500 yük tekrarındaki verileri değerlendirilirken ilk iki numuneden elde edilen değerler göz önünde bulundurulmuştur. 7500 yük tekrarındaki kalıcı toplam birim şekil değişimleri incelendiğinde asfaltit içeriği arttıkça kalıcı birim şekil değiştirmelerin düzenli olarak azaldığı belirlenmiştir. %3 asfaltit kullanılması durumunda kalıcı birim şekil değiştirme miktarı saf karışıma göre 2,63 kat azalırken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 3,46 kat azalmıştır. Esneklik modülü değerleri incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile genel bir artış olduğu, en yüksek değere %4 asfaltit içeren karışımın, en düşük değere ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 7500 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri saf karışıma göre %3 asfaltit kullanılması durumunda %20,43 , %4 asfaltit kullanılması durumunda %39,69 , %5 asfaltit kullanılması durumunda ise %32,30 oranında artmıştır. Sünme modülü değerleri asfaltit içeriğinin artışı ile düzenli olarak artmış, sünme modülü değerlerinde saf karışıma göre %3 asfaltit kullanılması durumunda 2,45 kat, %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 3,21 kat artış meydana gelmiştir.

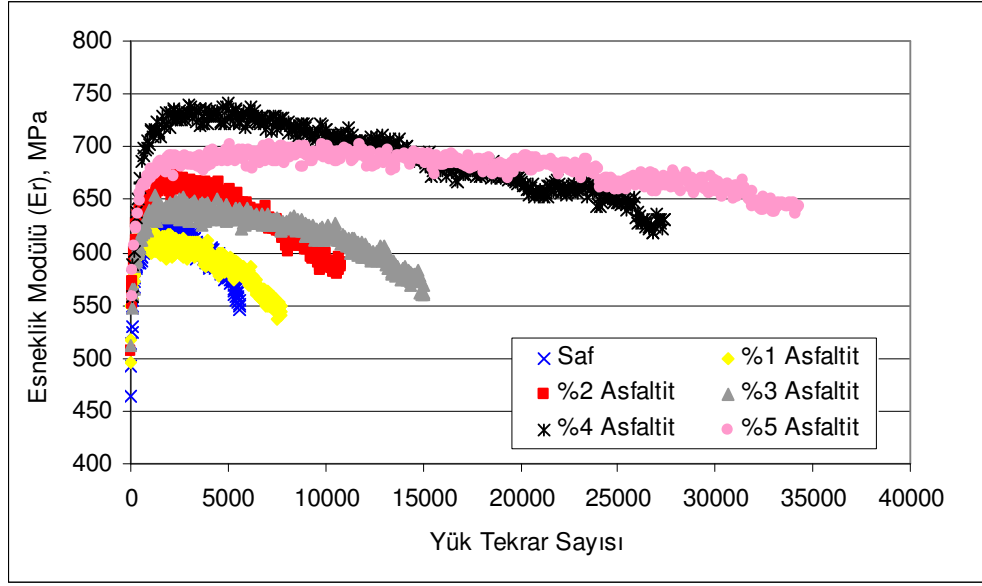
Tablo 7.57 incelendiğinde akma sayısı değerlerinin asfaltit içeriğinin artması ile düzenli olarak arttığı belirlenmiştir. Filler yerine %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre akma sayısı değerinin 2,32 kat, %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 5,51 kat arttığı belirlenmiştir. Kalıcı deformasyona karşı dayanımın bir göstergesi olan akma sayılarından asfaltit kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını arttırdığı söylenebilmektedir. Akma sayısındaki kalıcı birim şekil değiştirmeler incelendiğinde ise asfaltit içeriğinin artması ile genel olarak bu değer azaldığı en yüksek değere saf karışımın en düşük değere %3 asfaltit içeren karışımın daha sonra ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Akma sayısındaki esneklik modülleri incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile genel olarak esneklik modülü değerlerinin arttığı en düşük değere saf karışımın, en yüksek değere %3 asfaltit içeren karışımın daha sonra ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Esneklik modülü değerleri, akma sayısı yük tekrarında %3 asfaltit içeren karışımın en az elastik davranış gösteren karışım olduğunu, saf karışımın ise en fazla elastik davranış gösteren karışım olduğunu göstermektedir. Akma sayısındaki sünme modülü değerleri incelendiğinde ise asfaltit içeriğinin artışı ile genel bir artış olduğu belirlenmiştir. Filler yerine %3 asfaltit kullanılması durumunda akma sayısındaki sünme modülü değerleri saf karışıma göre %18,6 artarken %5 asfaltit kullanılması durumunda %10,4 oranında artmıştır.

Tablo 7.56 ve 7.57’de verilen değerler %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerinde, 7500 yük tekrarında ve akma sayısı değerlerinde tek bir noktadan elde edilen değerlerdir. Dinamik sünme deneyinde UMATTA test cihazının veri toplama sistemi ve yazılımı sayesinde her bir yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme, esneklik modülü ve sünme modülü değerleri elde edilebilmektedir. Karışımlarda %3 kalıcı birim şekil değişikliği meydana gelinceye kadar yük tekrar sayısı ile kalıcı birim şekil değişimi Şekil 7.72’de, esneklik modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.73’te, sünme modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.74’te verilmiştir. Kullanılan değerler, üç numuneden alınan değerlerin ortalamasından elde edilmiştir



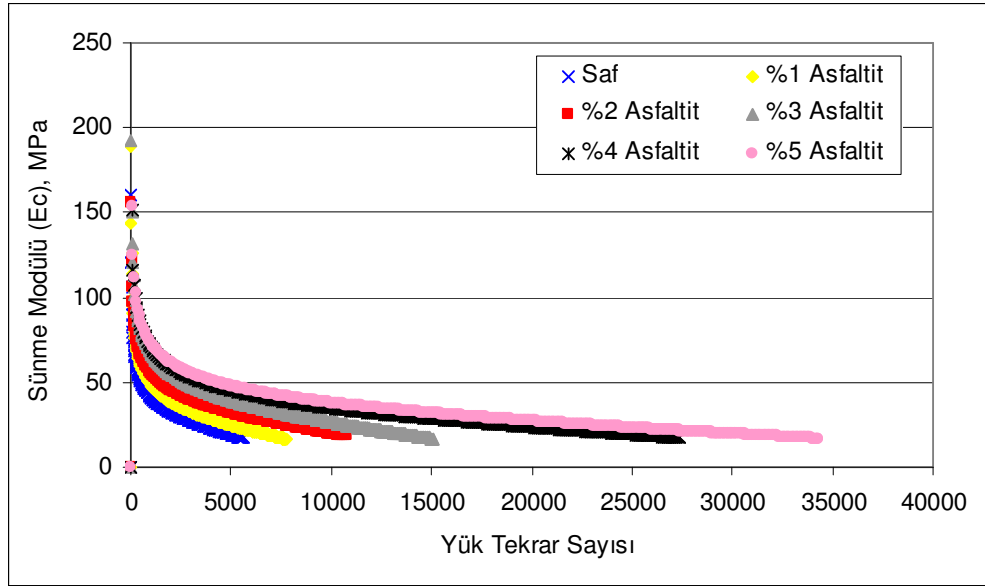
Şekil 7.72. %3 kalıcı birim şekil değiştirmedeki yük tekrar sayıları

Şekil 7.72’de görüldüğü üzere %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine ulaşınca kadar gerekli olan yük tekrar sayıları asfaltit içeriğinin artması ile artmıştır. Özellikle %4 ve %5 asfaltit içeriklerinde %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine ulaşılması için sırasıyla 27.700 ve 35.250 yük tekrarı uygulanması gerekmiştir.



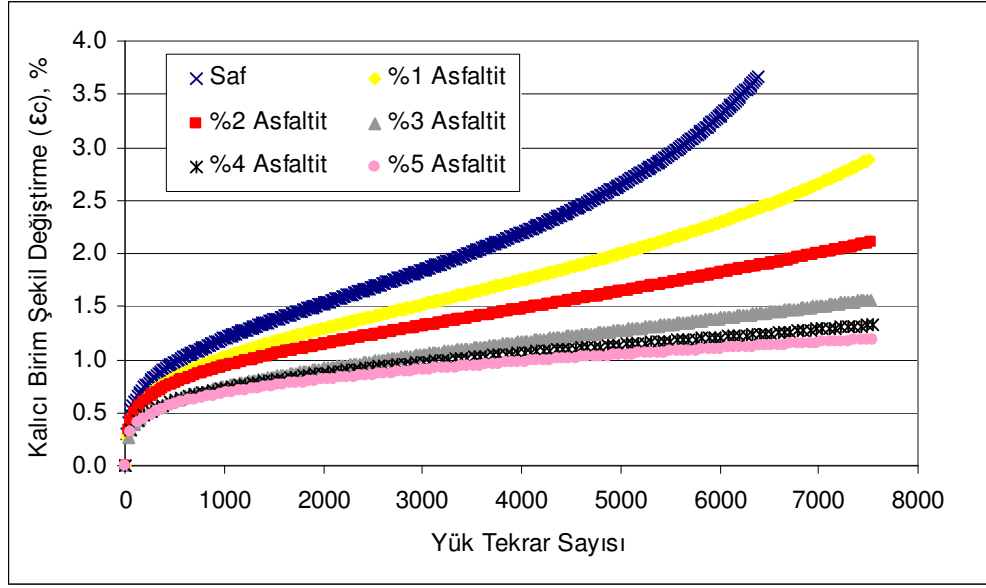
Şekil 7.73. %3 ϵ_c değerine kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi

%3 kalıcı birim şekil değişme meydana gelinceye kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişiminin görüldüğü Şekil 7.73 incelendiğinde ilk 1000 darbe sayısına kadar bütün karışım türlerinde esneklik modülü değerlerinin arttığı daha sonra darbe sayısının artışı ile sürekli bir azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Khodaii ve Mehrara, BSK'larda konsolidasyondan oluşan kalıcı deformasyonun karışımların esneklik modülüne etki ettiğini belirtmişlerdir (Khodaii ve Mehrara, 2009). Ayrıca dinamik yükleme sırasında esneklik modülündeki artışın karışımın meydana gelen sıkışmadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada ilk 1000 yük tekrarına kadar esneklik modülünün artması konsolidasyondan dolayı elastik birim şekil değişiminin azalmasından kaynaklanmıştır. İlk 1000 darbeden sonra bütün karışımların esneklik modülünün azalması karışımların rijitliğinin azalmasından dolayı elastik birim şekil değiştirmelerin artmasından kaynaklanmıştır. Şekil incelendiğinde saf karışım ile %1 asfaltit içeren karışımın, %2 ve %3 asfaltit içeren karışımın ve %4 ile %5 asfaltit içeren karışımın benzer değişim gösterdiği görülmektedir. Esneklik modülünde en yüksek artışın saf karışımında (%35,97), en düşük artışın ise %5 asfaltit içeren karışımında (%23,67) olduğu belirlenmiştir. Maksimum esneklik modülüne ulaştıktan sonra en fazla azalışın saf karışımında (%21,63), en düşük azalışın ise %5 asfaltit içeren karışımında (%7,32) olduğu belirlenmiştir. Yük tekrar sayısı ile esneklik modülünün azalması yani elastik birim şekil değiştirmelerin artması karışımın rijitliğinin azalmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 7.74. %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi

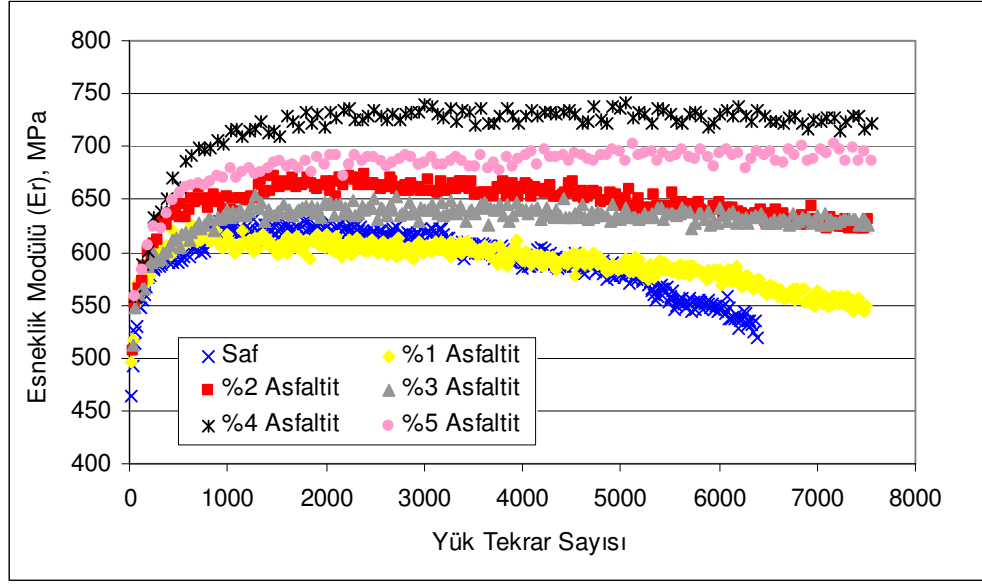
Şekil 7.74'te görüldüğü üzere karışımların sünme modülleri ilk 1000 yük tekrarına kadar hızlı olarak azalmış daha sonra sünme modülündeki azalma miktarı düşmüştür. Başlangıçtaki hızlı düşüş karışımlarda konsolidasyondan kaynaklanan sıkışmanın meydana gelmesinden kaynaklanmıştır. Kalıcı birim şekil değiştirme değeri sabit tutulduğundan (%3) son sünme modülü değerleri birbirine eşit çıkmıştır. Şekilde görüldüğü üzere başlangıçtan itibaren en düşük sünme modülü değerine saf karışımın en yüksek sünme modülü değerine ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Üç numunenin ortalamasından elde edilen karışımlara 7500 yük tekrarı uygulanıncaya kadar yük tekrar sayısı ile kalıcı birim şekil değişimi Şekil 7.75'te, esneklik modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.76'da, sünme modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.77'de verilmiştir.



Şekil 7.75. 7500 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değişmelerin yük tekrarı ile değişimi

7500 yük tekrarına ulaşınca kadar kalıcı birim şekil değiştirmeler, asfaltit içeriğinin artması ile azalmıştır. Saf karışımın 3. numunesi 6500 yük tekrarında kırıldığından saf karışımda üç numunenin 6500 yük tekrarına kadar elde edilen değerlerin ortalaması değerlendirilmiştir. %3, %4 ve %5 asfaltit içeriklerinde 2000 yük tekrarına kadar benzer kalıcı birim şekil değiştirmeler gözlenirken bu yük tekrarından sonra en düşük kalıcı birim şekil değiştirmeye %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 7500 yük tekrar sayısına kadar kalıcı deformasyona karşı en etkin karışımların %3, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlar olduğu tespit edilmiştir.

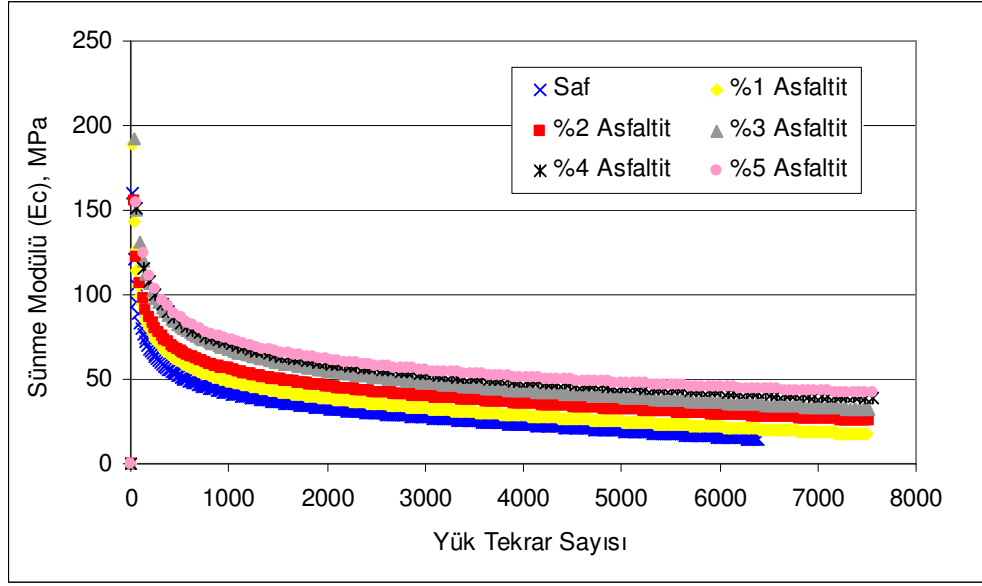
İlk 7500 yük tekrarına kadar esneklik modülü değerlerinin değişimini gösteren Şekil 7.76 incelendiğinde birincil oturmadan kaynaklanan ilk 1000 yük tekrarına kadarki artışın ardından saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımların esneklik modülü değerlerinde bariz bir azalmanın meydana geldiği, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların esneklik modülü değerlerinin ise sabit ilerlediği belirlenmiştir. Bu durum ilk 1000 yük tekrarından sonra saf ve %1 asfaltit içeren karışımlarda erken bozulma meydana gelmesine rağmen daha elastik davranış gösterdiğini ifade etmektedir. İlk 7500 darbe sonucunda en yüksek esneklik modülüs değerine %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.76. 7500 yük tekrarına kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi

Şekil 7.77'de görülen ilk 7500 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri incelendiğinde %3 kalıcı birim şekil değiştirmede olduğu gibi yük tekrarının artışı ile kalıcı deformasyonun artmasından dolayı sürekli bir azalma gözlenmiştir. Esneklik modülü değerlerinde en yüksek değere %4 asfaltit içeren karışım sahip olmasına rağmen sünme modülü değerlerinde düzenli bir değişim gözlenmiş, en düşük değere saf karışımın en yüksek değere ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Asfaltit içeriğinin artması ile akma sayılarındaki artış, %3 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayılarının artması ve sünme modülünün artması asfaltitin bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımını arttırdığını, esneklik modülündeki artış ise elastik davranışını azalttığını göstermektedir.



Şekil 7.77. 7500 darbe tekrarına kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi

7.9.2. Uzun Dönem Yaşlandırılmış Numunelerin Dinamik Sünme Deney Sonuçları

UDY numuneler üzerinde uygulanan dinamik sünme deneyleri sonucunda elde edilen değerlerden kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi 7500 darbe sayısı, %3 kalıcı birim şekil değiştirme ve akma sayısı olmak üzere üç farklı kriter seçilerek değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.58 ve 7.59’da verilmiştir.

UMATTA yazılımının izin verdiği maksimum yük tekrar sayısına (65000) ulaşılmasına rağmen %5 asfaltit içeren karışımlarda %3 kalıcı birim şekil değiştirmeye ulaşılmadığından bu şekil değiştirmedeki değerler elde edilememiştir. Tablo 7.58’de verilen %3 kalıcı birim şekil değişmedeki darbe sayıları incelendiğinde asfaltit içeriği arttıkça darbe sayısının arttığı belirlenmiştir. Filler yerine %3 asfaltit kullanılması durumunda %3 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısının saf karışıma göre 4,71 kat arttığı, %4 asfaltit kullanılması durumunda ise 5,71 kat arttığı belirlenmiştir. Elastikiyetin bir göstergesi olan esneklik modülü değerleri incelendiğinde ise en düşük değere saf karışımın sahip olması, saf karışımın en fazla elastik deformasyona sahip karışım olduğunu ifade etmektedir. %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerindeki esneklik modülü değerleri saf karışıma göre %3 asfaltit kullanılması durumunda %20,69 , %4 asfaltit kullanılması durumunda ise %31,39 artmıştır. %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerindeki sünme modülü değerleri ise kalıcı birim şekil değiştirmenin sabit tutulması nedeniyle değişiklik göstermemiştir.

7500 yük tekrarındaki veriler değerlendirildiğinde asfaltit içeriğinin artışı ile kalıcı birim şekil değişmelerin azaldığı, esneklik modülü ve sünme modülü değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir. Filler yerine %3 asfaltit kullanılması durumunda kalıcı birim şekil değiştirme miktarı saf karışıma göre 2,22 kat azalırken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 2,69 kat azalmıştır. Esneklik modülü değerleri incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile genel bir artış olduğu en yüksek değere kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 7500 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri, %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre %29,99 , %4 asfaltit kullanılması durumunda %44,55 , %5 asfaltit kullanılması durumunda ise %38,20 artmıştır. Sünme modülü değerleri saf karışıma göre %3 asfaltit kullanılması durumunda 2,31 kat, %5 asfaltit kullanılması durumunda ise 2,71 kat artmıştır.

Akma sayıları tespit edilirken %5 asfaltit içeren karışımın iki numunesinin akma sayısı değerlerinin yazılımın izin verdiği değerden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle %5 asfaltit içeren karışımların akma sayısı değerleri elde edilebilmiş fakat akma sayısındaki kalıcı birim şekil değiştirme, esneklik modülü ve sünme modülü değerleri elde edilememiştir. Akma sayısı değerleri, asfaltit içeriğinin artması ile düzenli olarak artmıştır. Filler yerine %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre akma sayısı değerinin 3,84 kat, %5 asfaltit kullanılması durumunda 8,40 kat arttığı belirlenmiştir. Elde edilebilen akma sayısındaki kalıcı birim şekil değiştirmeler incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile genel olarak bu değerin azaldığı en yüksek değere saf karışımın en düşük değere %3 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Akma sayısındaki esneklik modülleri incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile düzenli olarak esneklik modülü değerlerinin arttığı en düşük değere saf karışımın, en yüksek değere %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Akma sayısındaki sünme modülü değerleri incelendiğinde ise asfaltit içeriğinin artışı ile genel bir artış olduğu belirlenmiştir. En yüksek değere sahip olan %3 asfaltit değerinde saf karışıma göre akma sayısındaki sünme modülü değerleri %29,18 artarken %4 asfaltit kullanılması durumunda %17,85 artmıştır.

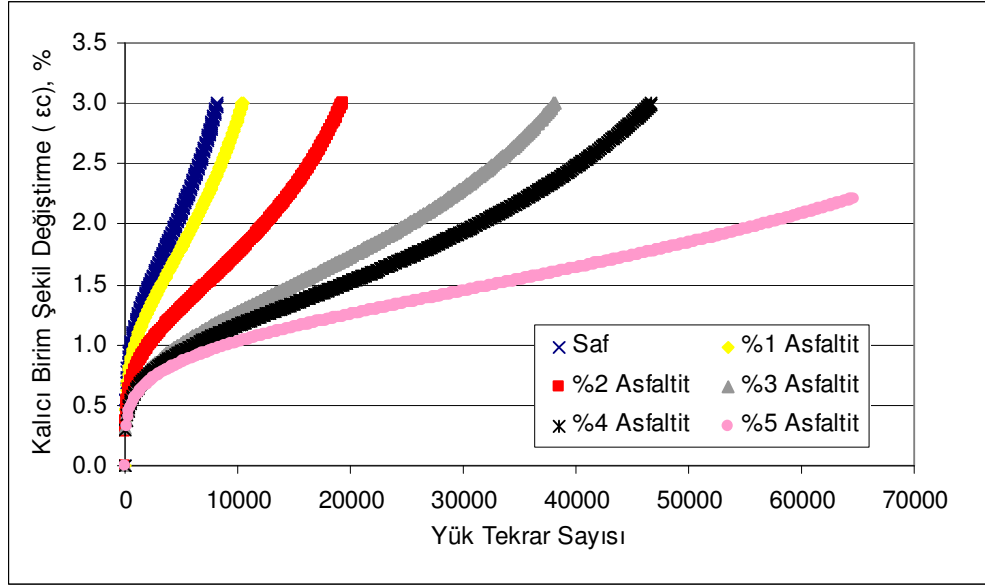
Uzun dönem yaşlandırılmış üç numunenin ortalamasından elde edilen saf karışım ve asfaltit içeren karışımlarda %3 kalıcı birim şekil değişikliği meydana gelinceye kadar yük tekrar sayısı ile kalıcı birim şekil değişimi Şekil 7.78’de, esneklik modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.79’da, sünme modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.80’de verilmiştir.

Tablo 7.58. UDY numunelerin dinamik sünme deney sonuçları

Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	h	%3 ϵ_c 'deki Yük Tekrarı	%3 ϵ_c 'deki Esneklik Modülü	%3 ϵ_c 'deki Sünme Modülü	7500 Yük Tekrarındaki ϵ_c	7500 Yük Tekrarındaki Esneklik Modülü	7500 Yük Tekrarındaki Sünme Modülü
0	1	66,1	8848	438,8	16,63	2,437	447,8	20,50
	2	65,0	8736	645,6	16,64	2,664	641,9	18,75
	3	64,3	6896	529,8	16,63	3,207	515,3	14,14
	Ort.		8160	538,1	16,63	2,551	544,9	19,63
1	1	65,5	10368	591,1	16,65	2,293	628,1	21,83
	2	65,6	10352	640,7	16,65	2,280	689,0	21,91
	3	65,3	10544	622,3	16,64	2,260	639,5	22,09
	Ort.		10421	618,0	16,65	2,278	652,2	21,94
2	1	65,7	18304	643,7	16,64	1,570	763,3	31,81
	2	65,4	21440	627,6	16,67	1,468	715,4	34,05
	3	65,3	18912	605,5	16,66	1,541	674,0	32,39
	Ort.		19552	625,6	16,66	1,526	717,6	32,75
3	1	66,0	38400	657,1	16,62	1,228	721,9	40,63
	2	65,8	40960	644,4	16,67	1,056	690,8	52,66
	3	65,7	35840	646,6	16,60	1,166	712,0	42,89
	Ort.		38400	649,4	16,63	1,150	708,2	45,39
4	1	66,1	47808	699,2	16,65	1,057	766,4	47,30
	2	66,1	41216	650,1	16,61	1,179	741,7	42,50
	3	65,9	50688	771,6	16,66	0,951	854,7	52,56
	Ort.		46571	707,0	16,64	1,062	787,6	47,45
5	1	66,1	-	-	-	1,033	758,2	48,37
	2	65,6	-	-	-	1,000	778,0	50,06
	3	66,6	-	-	-	0,815	722,7	61,15
	Ort.		-	-	-	0,949	753,0	53,19

Tablo 7.59. UDY numunelerin akma sayısı sonuçları

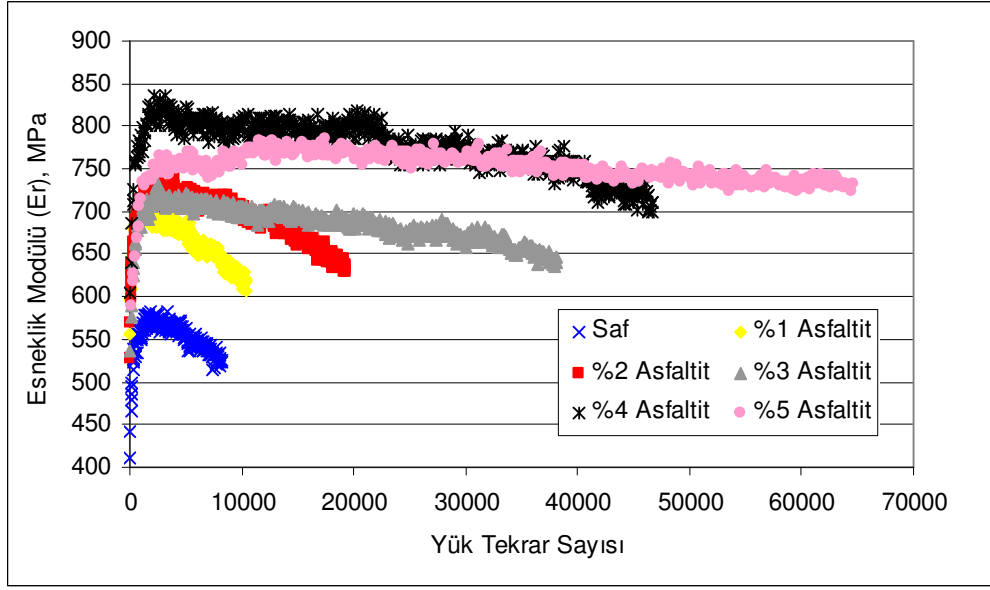
Asfaltit İçeriği, (%)	Numune No	Akma Sayısı Denklemi	Akma Sayısı	Akma Sayısındaki ϵ_c	Akma Sayısındaki Esneklik Modülü	Akma Sayısındaki Sünme Modülü
0	1	$y = -0,0028x^2 + 40,118x + 9410,6$	7164	2,321	445,8	21,51
	2	$y = -0,0016x^2 + 29,17x + 14228$	9116	3,117	609,3	16,01
	3	$y = -0,0015x^2 + 23,993x + 10300$	7998	3,385	522,5	13,41
	Ort.		8093	2,941	525,9	16,98
1	1	$y = -0,0015x^2 + 30,212x + 19445$	10071	2,913	581,7	17,18
	2	$y = -0,0017x^2 + 32,283x + 18200$	9495	2,751	657,1	18,18
	3	$y = -0,0017x^2 + 32,489x + 17674$	9556	2,727	630,3	18,34
	Ort.		9707	2,797	623,0	17,90
2	1	$y = -0,0012x^2 + 36,352x + 30454$	15147	2,437	699,7	20,50
	2	$y = -0,001x^2 + 35,709x + 37099$	17855	2,465	648,4	20,27
	3	$y = -0,0012x^2 + 38,443x + 24793$	16018	2,469	636,2	20,24
	Ort.		16340	2,457	661,4	20,34
3	1	$y = -0,0006x^2 + 36,597x + 52162$	30498	2,365	670,1	21,14
	2	$y = -0,0007x^2 + 44,45x + 84237$	31750	2,23	678,8	24,91
	3	$y = -0,0006x^2 + 37,306x + 63673$	31088	2,531	656,5	19,74
	Ort.		31112	2,375	668,5	21,93
4	1	$y = -0,0005x^2 + 39,241x + 78465$	39241	2,335	753,3	21,41
	2	$y = -0,0004x^2 + 32,444x + 86535$	40555	2,954	665,9	16,92
	3	$y = -0,0005x^2 + 42,253x + 97499$	42253	2,279	807,7	21,69
	Ort.		40683	2,523	742,3	20,01
5	1	$y = -0,0003x^2 + 36,064x + 98724$	60107	2,700	719,3	18,52
	2	$y = -0,0003x^2 + 39,566x + 83306$	65943	-	-	-
	3	$y = -0,0003x^2 + 46,741x + 111020$	77902	-	-	-
	Ort.		67984	-	-	-



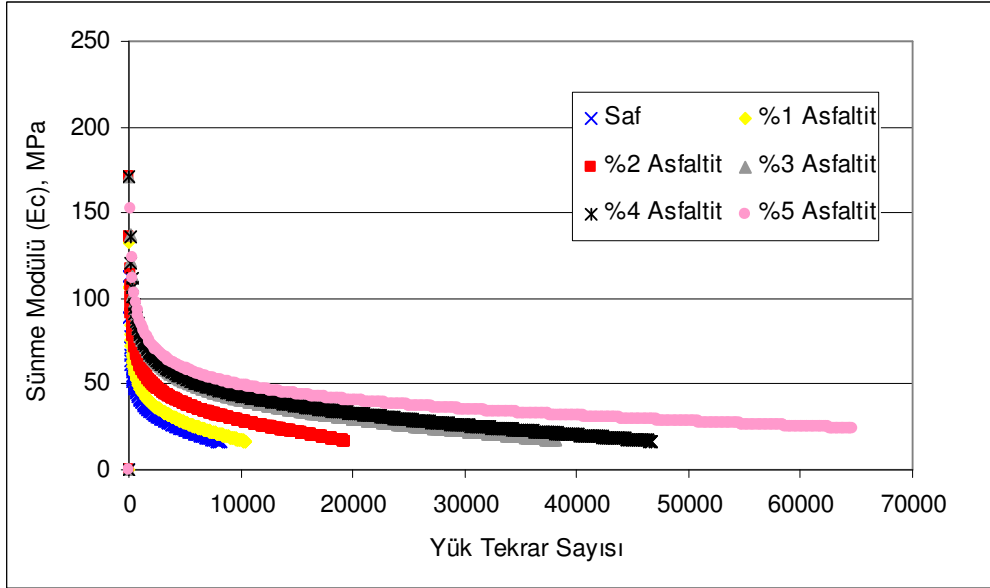
Şekil 7.78. UDY numunelerin %3 kalıcı birim şekil değiştirmedeki yük tekrar sayıları

Şekil 7.78'de görüldüğü üzere %5 asfaltit içeriğine sahip numuneler deney süresince %3 kalıcı birim şekil değiştirmeye ulaşamamıştır. Ayrıca %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine ulaşmaya kadar gerekli olan yük tekrar sayıları asfaltit içeriğinin artması ile artmıştır. Şekil 7.78 incelendiğinde saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımlar ile %3 ve %4 asfaltit içeren karışımların benzer davranış gösterdikleri, en etkin karışımın ise %5 asfaltit içeren karışım olduğu görülmektedir. %2 kalıcı birim şekil değiştirmeler göz önünde tutulduğunda aynı kalıcı birim şekil değiştirmeye ulaşmak için %5 asfaltit içeren karışıma saf karışıma göre 12,5 kat daha fazla yük tekrarı uygulanması gerektiği belirlenmiştir.

Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde %3 kalıcı birim şekil değiştirme meydana gelinceye kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişiminin görüldüğü Şekil 7.79 incelendiğinde ilk 1000–2000 yük tekrarına kadar bütün karışım türlerinde konsolidasyon nedeniyle esneklik modülü değerlerinin arttığı daha sonra yük tekrarının artışı ile sürekli bir azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere saf karışım en fazla elastik birim şekil değişimlere sahip olmasına rağmen kalıcı birim şekil değişimlere karşı dayanımını en az olan karışım türü olmuştur. Esneklik modülünde en yüksek artışın saf karışımda (%42,20), en düşük artışın ise %1 asfaltit içeren karışım (%27,12) ve daha sonra %5 asfaltit içeren karışımda (%29,65) olduğu belirlenmiştir.



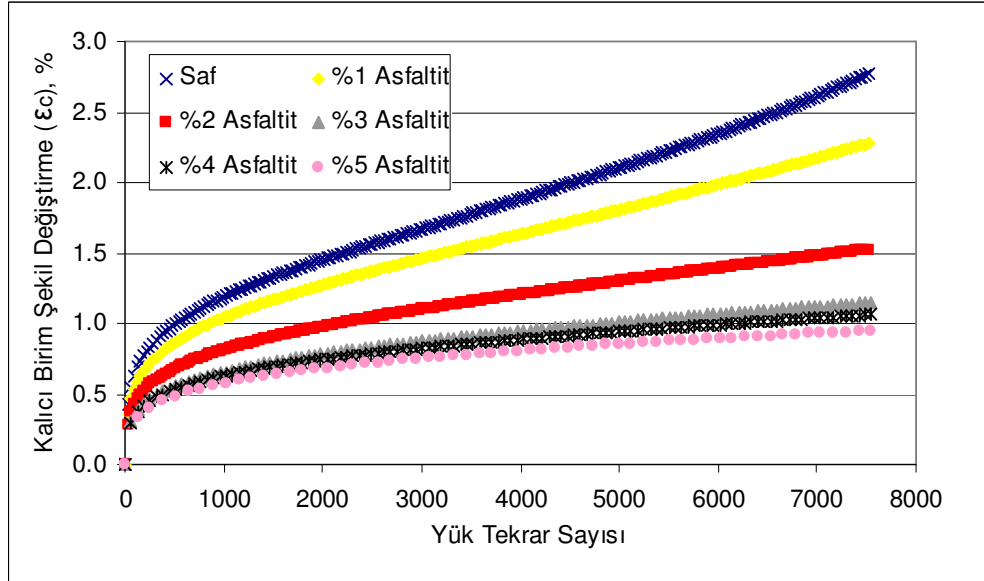
Şekil 7.79. UDY numunelerin %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi



Şekil 7.80. UDY numunelerin %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi

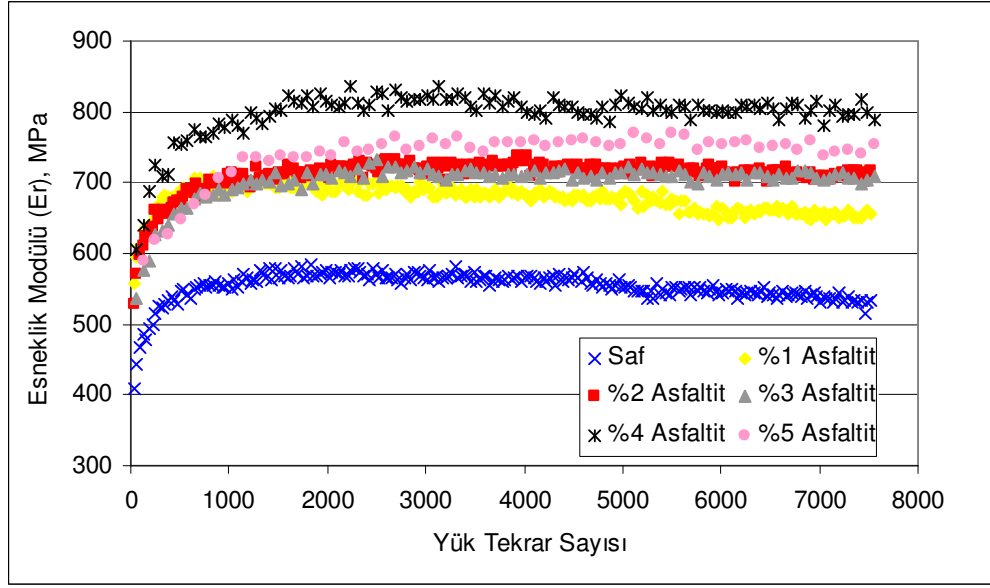
Şekil 7.80’de görüldüğü üzere karışımların sünme modülleri ilk önce hızlı olarak azalmış daha sonra sünme modülündeki azalma miktarı düşmüştür. %5 asfaltit içeren karışım numuneleri deney sonunda dahi %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerine ulaşamadığından sünme modülü değeri diğer karışımlara göre yüksek çıkmıştır. Gerilme

seviyesi ve kalıcı birim şekil değışme değeri sabit tutulduğundan (%3) diğer bütün karışımların en son sünme modülü değeri eşit çıkmıştır. Şekilde görüldüğü üzere başlangıçtan itibaren en düşük sünme modülü değeri saf karışım, en yüksek sünme modülü değeri ise %5 asfaltit içeren karışım sahip olmuştur. Üç numunenin ortalamasından elde edilen uzun dönem yaşlandırılmış saf karışım ve asfaltit içeren karışımlara 7500 yük tekrarı uygulanıncaya kadar yük tekrar sayısı ile kalıcı birim şekil değıştirmenin değışimi Şekil 7.81’de, esneklik modülü değeri yük tekrarı ile değışimi Şekil 7.82’de, sünme modülü değeri yük tekrarı ile değışimi Şekil 7.83’de verilmiştir.



Şekil 7.81. UDY numunelerde 7500 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değışmelerin yük tekrarı ile değışimi

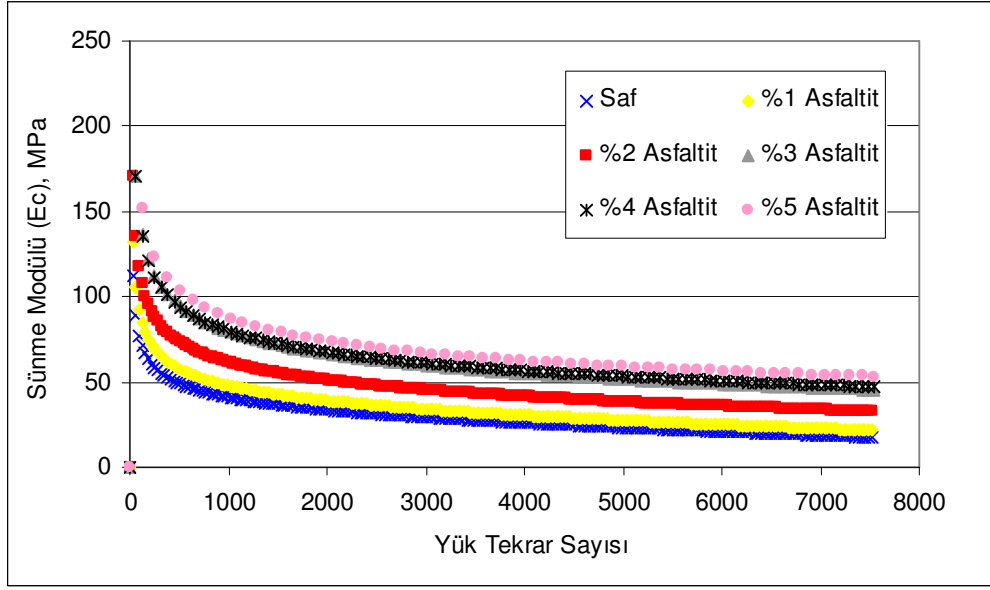
Kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda da 7500 yük tekrarına ulaşıncaya kadar kalıcı birim şekil değıştirmeler asfaltit içeriğinin artması ile azalmıştır. 7500 yük tekrarına kadar en yüksek kalıcı birim şekil değıştirmeye saf karışım, en az kalıcı birim şekil değıştirmeye ise %5 asfaltit içeren karışım sahip olmuştur. 7500 yük tekrar sayısına kadar saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımlar ile %3, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların kalıcı birim şekil değıştirmeleri yük tekrarı ile benzer değışim göstermiştir.



Şekil 7.82. UDY numunelerde 7500 yük tekrarına kadar esneklik modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi

Uzun dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan ilk 7500 yük tekrar sayısına kadar esneklik modülü değerlerinin değişimini gösteren Şekil 7.82 incelendiğinde konsolidasyondan kaynaklanan ilk 1000–2000 yük tekrarına kadarki artışın ardından saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımların esneklik modülü değerlerinde bariz bir azalma meydana gelirken, diğer asfaltit içeren karışımların esneklik modülü değerleri ise sabit ilerlediği belirlenmiştir. Bu durum kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi ilk 1000–2000 yük tekrarından sonra saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımda erken bozulma meydana gelmesine rağmen daha elastik davranış gösterdiğini ifade etmektedir. İlk 7500 yük tekrarı sonucunda en yüksek esneklik modülü değerine %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Yük tekrar sayısının artışı ile %2 ve %3 asfaltit içeren karışımların esneklik modülü değerleri benzer değişim göstermiştir.

İlk 7500 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri incelendiğinde (Şekil 7.83) darbe sayısının artışı ile kalıcı birim şekil değiştirmenin artmasından dolayı sürekli bir azalma gözlenmiştir. Sünme modülü değerlerinde düzenli bir değişim gözlenmiş, en düşük değere saf karışımın en yüksek değere ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Yük tekrar sayısının artışı ile saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışım ile %3, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların sünme modülü değerleri benzer değişim göstermiştir.



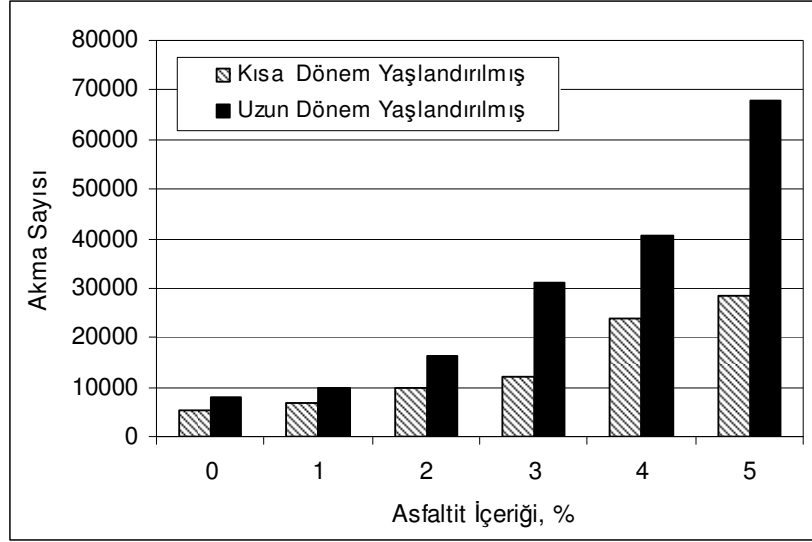
Şekil 7.83. UDY numunelerde 7500 yük tekrarına kadar sünme modülü değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişmesi

7.9.3. Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılmış Karışımların Dinamik Sünme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

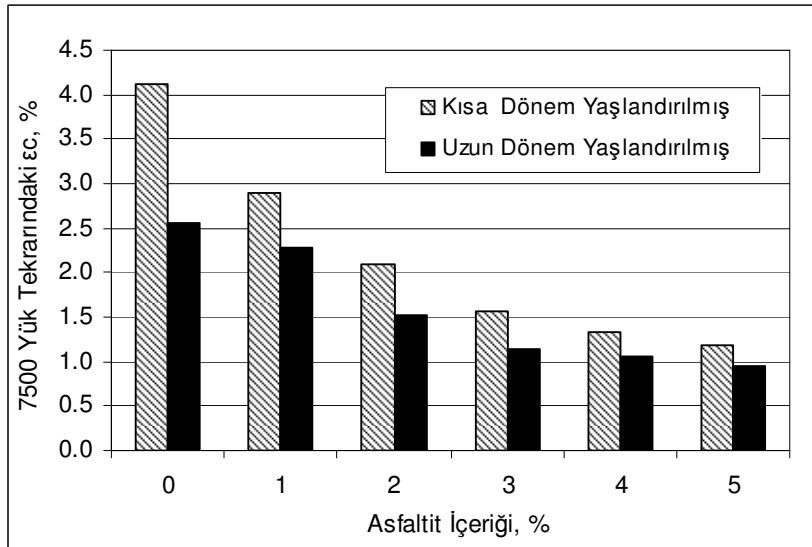
Uzun dönem yaşlandırılmış %5 asfaltit içeren karışımların akma sayısı belirlenmesine rağmen akma sayısı yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirmeler, esneklik ve sünme modülleri belirlenememiştir. Ayrıca yine %5 asfaltit içeren uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin %3 kalıcı birim şekil değiştirmedeki yük tekrar sayıları, esneklik modülleri ve sünme modülleri belirlenemediğinden uzun dönem yaşlanmanın etkisini değerlendirebilmek amacıyla akma sayıları, 7500 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirmeler, esneklik modülleri ve sünme modülleri incelenmiştir. Uzun dönem yaşlanmadan önce ve sonra asfaltit içeriğinin artması ile akma sayısının değişimi Şekil 7.84'te, 7500 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirmelerin değişimi Şekil 7.85'te, esneklik modülü değerlerinin değişimi Şekil 7.86'da ve sünme modülü değerlerinin değişimi Şekil 7.87'de verilmiştir.

Şekil 7.84'te görüldüğü üzere UDY önce ve sonrasında asfaltit içeriğinin artması ile akma sayısı değerleri artmıştır. Uzun dönem yaşlanmadan ötürü saf karışımın akma sayısı değerinde 1,57 kat artış meydana gelirken, %3 asfaltit içeren karışımda 2,60 kat, %5 asfaltit içeren karışımda 2,40 kat artış meydana gelmiştir. Uzun dönem yaşlanmadan ötürü

akma sayısında en fazla artış %3 asfaltit içeren karışımda olurken, en düşük artış %1 asfaltit içeren karışımda (1,45 kat) olmuştur.



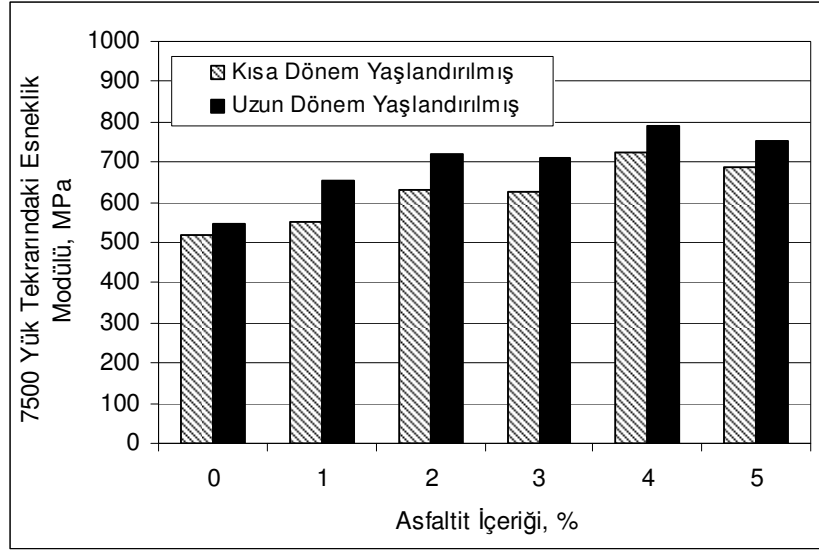
Şekil 7.84. UDY önce ve sonrasında asfaltit içeriği - akma sayısı ilişkisi



Şekil 7.85. UDY önce ve sonrasında 7500 yük tekrarında asfaltit içeriği – kalıcı birim şekil değiştirme ilişkisi

Şekil 7.85’te görülen 7500 yük tekrarı sonrası asfaltit içeriği ile kalıcı birim şekil değiştirmelerin ilişkisi incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile kalıcı birim şekil değiştirmelerin azaldığı görülmektedir. UDY nedeniyle kalıcı birim şekil değiştirme oranları

azalmıştır. Uzun dönem yaşlanmadan ötürü 7500 yük tekrarı sonrası saf karışımın kalıcı birim şekil değiştirme miktarı 1,61 kat azalırken, %3 asfaltit içeren karışımda 1,36 kat, %5 asfaltit içeren karışımda ise 1,25 kat azalma meydana gelmiştir. 7500 yük tekrarı sonrası kalıcı birim şekil değişimindeki en fazla azalma saf karışımda olurken en düşük azalma miktarı %4 ve %5 asfaltit içeren karışımda (1,25 kat) olmuştur.

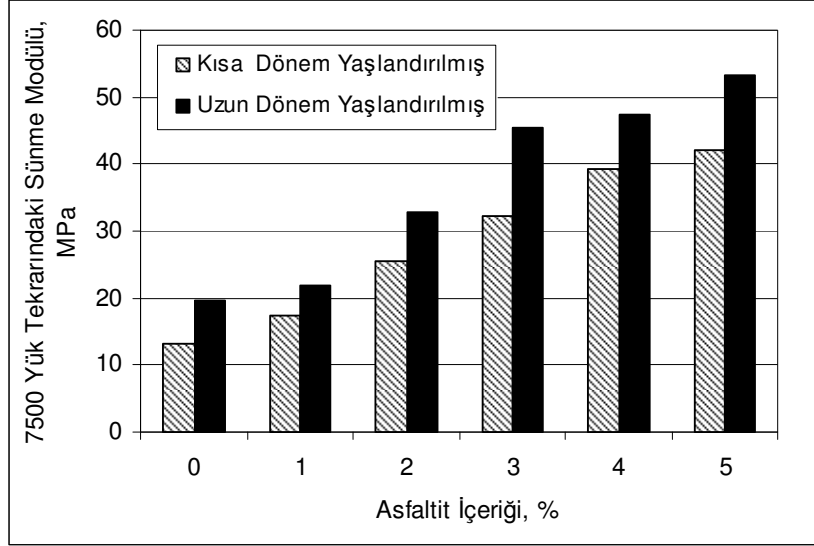


Şekil 7.86. UDY önce ve sonrasında 7500 yük tekrarı asfaltiti içeriği – esneklik modülü ilişkisi

7500 yük tekrarı sonrası esneklik modülü değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi incelendiğinde %4 asfaltit içeriğine kadar esneklik modülü değerlerinde artış olduğu daha sonra ise azalma olduğu belirlenmiştir. Bu durum 7500 yük tekrarı sonrasında en fazla elastik birim şekil değiştirmeye saf karışımın, en az elastik birim şekil değiştirmeye %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğunu göstermektedir. Uzun dönem yaşlanmadan ötürü bütün karışımların esneklik modülü değerleri artmıştır. Bu durum uzun dönem yaşlanmadan ötürü bitümlü sıcak karışım numunelerinde elastik birim şekil değişimlerin azaldığını göstermektedir. Uzun dönem yaşlanmadan ötürü saf karışımın esneklik modülü değeri %4,93 artarken %3 asfaltit içeren karışımda %13,24 , %5 asfaltit içeren karışımda ise %9,60 artış meydana gelmiştir.

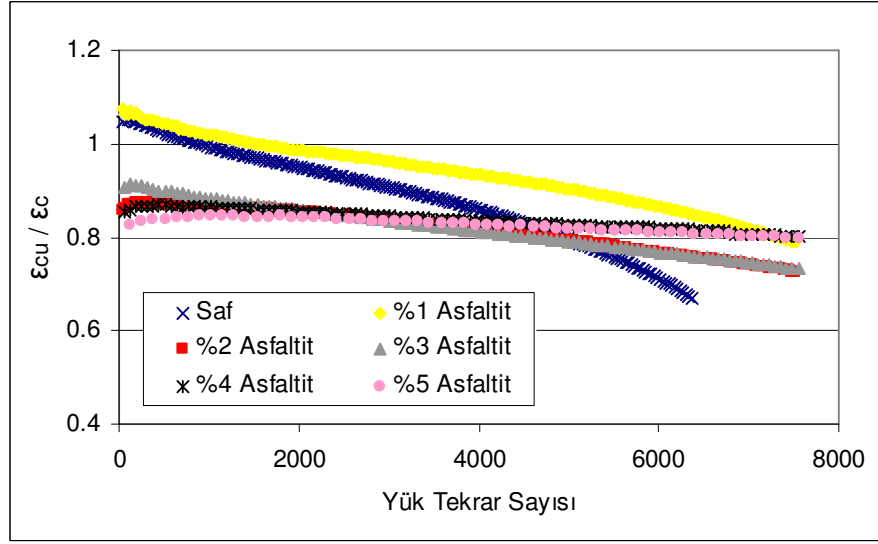
Şekil 7.87’de görülen 7500 yük tekrarı sonrası sünme modülü değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile sünme modülü değerlerinin düzenli olarak arttığı, ayrıca uzun dönem yaşlanmadan ötürü sünme modülü değerlerinde

artış meydana geldiği belirlenmiştir. Uzun dönem yaşlanmadan ötürü saf karışımın sünme modülü değerinde %49,47 artış meydana gelirken %3 asfaltit içeren karışımda %41,17 , %5 asfaltit içeren karışımda ise %26,4 artış meydana gelmiştir. Bu durum uzun dönem yaşlanmadan ötürü kalıcı birim şekil değişme miktarının azaldığını göstermektedir.



Şekil 7.87. UDY önce ve sonrasında 7500 yük tekrarında asfaltiti içeriği – sünme modülü ilişkisi

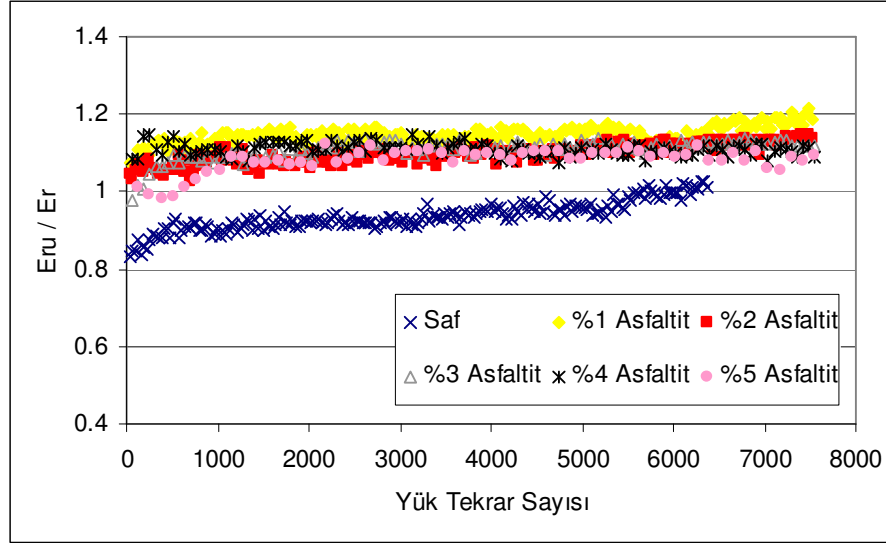
7500 yük tekrarına kadar her bir yük tekrarında kalıcı birim şekil değişmelerin, esneklik modüllerinin ve sünme modüllerinin uzun dönem yaşlanmadan nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla uzun dönem yaşlanmadan önceki her bir yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değişme, esneklik modülü ve sünme modülü değerleri yaşlanmadan sonra aynı yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değişme, esneklik modülü ve sünme modülü değerlerine oranlanarak yaşlanma indeksleri belirlenmiştir. Uzun dönem yaşlanmadan önce ve sonraki değerler, denenen üç numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. 7500 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değiştirme yaşlanma indekslerinin ($\epsilon_{cu} / \epsilon_c$) yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.88’de, esneklik modülü yaşlanma indekslerinin (E_{ru} / E_r) yük tekrarı ile değişimi Şekil 7.89’da, sünme modülü yaşlanma indekslerinin (E_{cu} / E_c) yük tekrarı ile değişimi ise Şekil 7.90’da verilmiştir. Yaşlanma indeksi değerlerinin 1’den büyük olması uzun dönem yaşlanmadan sonraki değerlerin (ϵ_{cu} , E_{ru} , E_{cu}) daha büyük olduğunu, 1’den küçük olması ise yaşlanmadan önceki değerlerin (ϵ_c , E_r , E_c) daha büyük olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 7.88. Kalıcı birim şekil değiştirme yaşlanma indeksi ($\epsilon_{cu} / \epsilon_c$) değerlerinin yük tekrarı ile değişimi

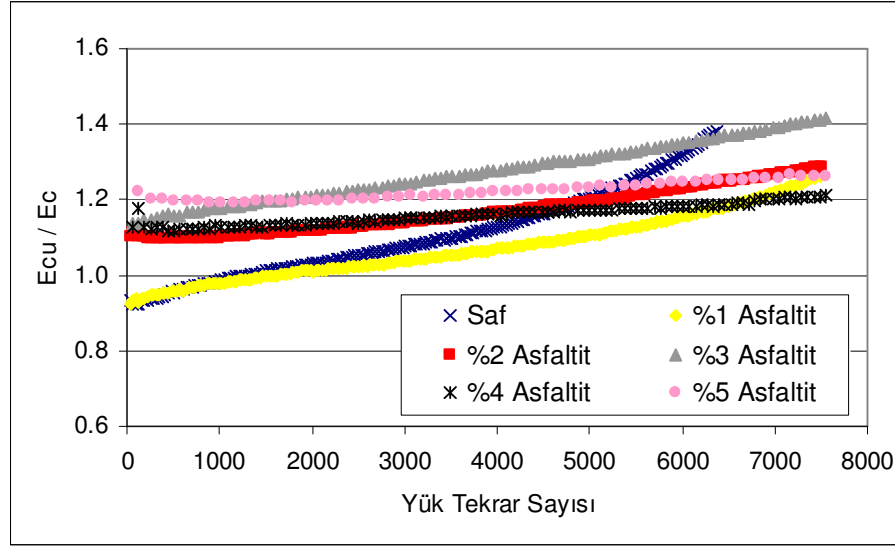
Şekil 7.88’de görülen kalıcı birim şekil değiştirme yaşlanma indekslerinin yük tekrarı ile değişimi incelendiğinde yük tekrarının artması ile bütün karışımların yaşlanma indeksi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum bütün karışımların yaşlanmadan sonra kalıcı birim şekil değişme miktarlarının azaldığını göstermektedir. Saf karışım, yaşlanma öncesi 6500 yük tekrarı kırıldığından bu karışımın 6500 yük tekrarındaki değerler incelenmiştir. Yük tekrarı ile yaşlanma indeksi değerlerindeki değişimin büyük olması karışımın yaşlanmadan daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımın yaşlanma indeksi değerleri başlangıçta 1’den büyük iken darbe sayısının artması ile 1’in altına inmiştir. Şekilde görüldüğü üzere saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımın yaşlanma indeksi değerleri yük tekrarı ile aşırı azalma gösterirken %2 ve %3 asfaltit içeren karışımların yaşlanma indekslerindeki azalma 4000 yük tekrarıdan sonra artmış, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların yaşlanma indeksi değerleri ise fazla etkilenmemiştir. Yaşlanma indeksi – yük tekrar sayısı eğrisinin eğiminin fazla olması karışımın yaşlanmadan fazla etkilendiğini düşük olması ise karışımın yaşlanmadan az etkilendiğini göstermektedir. Saf karışım ve %1 asfaltit içeren karışımın yaşlanma indekslerindeki hızlı azalma, yaşlanmadan ötürü karışımların kalıcı birim şekil değiştirmelerinin azalmasından kaynaklanmıştır. Saf karışımın yaşlanma indeksi 6500 yük tekrarı sonucunda %57,0 azalırken, %1 asfaltit içeren karışımın yaşlanma indeksi 7500 yük tekrarı sonucunda %36,26 , %3 asfaltit içeren karışımında %24,86 , %5 asfaltit kullanılması

durumunda ise %4,47 azalmıştır. Bu durum kalıcı birim şekil değiştirme açısından asfaltit içeriğinin artmasıyla yaşlanmanın azaldığını göstermektedir.



Şekil 7.89. Esneklik modülü yaşlanma indeksi (E_{ru} / E_r) değerlerinin yük tekrarı ile değişimi

Şekil 7.89’da görülen esneklik modülü yaşlanma indekslerinin yük tekrarı ile değişimi incelendiğinde yük tekrarının artması ile bütün karışımların yaşlanma indekslerinin arttığı belirlenmiştir. Saf karışım dışındaki bütün karışımların yaşlanma indeksi başlangıçtan 7500 yük tekrarı sonuna kadar 1’den büyük olmasına rağmen, saf karışımın yaşlanma indeksi değeri 6000 yük tekrarı sonrası 1 değerinin üzerine çıkmıştır. Bu durum 6000 yük tekrarı kadar saf karışımın yaşlanmadan önceki esneklik modülü değerlerinin yaşlanmadan sonraki değerlere göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Uzun dönem yaşlanmadan sonra esneklik modülünün daha düşük çıkması yaşlanmadan sonraki elastik birim şekil değişimlerinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Saf karışımın uzun dönem yaşlanmadan sonraki elastik birim şekil değiştirme miktarı yaşlanma öncesine göre daha yüksek olmasına rağmen kalıcı birim şekil değişimlerine karşı dayanımı düşük çıkmıştır. Saf karışım dışındaki diğer karışımların yaşlanma indeksleri yük tekrar sayısının artması ile benzer değişim göstermiştir. Yaşlanma indeksindeki en fazla artışın saf karışımında (%21,33), en düşük artışın %4 ve daha sonra %5 asfaltit içeren karışımında (sırasıyla %2,65 ve %8,33) olması yaşlanmadan en fazla etkilenen karışımın saf karışım olduğunu en az etkilenen karışımların ise %4 ve daha sonra %5 asfaltit içeren karışımlar olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.90. Sünme modülü yaşlanma indeksi (E_{cu} / E_c) değerlerinin yük tekrarı ile değişimi

Sünme modülü yaşlanma indekslerinin yük tekrarı ile değişimini gösteren Şekil 7.90 incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile yaşlanma indekslerinin arttığı belirlenmiştir. Sünme modülü yaşlanma indeksi değerlerinden 7500 yük tekrarı sonunda en yüksek değere %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmesine rağmen yük tekrar sayısının artmasıyla en fazla değişim saf karışımda (%48,41) daha sonra ise %1 asfaltit içeren karışımda (%36,99) olduğu belirlenmiştir. En az değişimin ise %5 asfaltit içeren karışımda meydana geldiği (%3,65) tespit edilmiştir.

Akma sayıları değerlendirildiğinde her ne kadar asfaltit içeren karışımların yaşlanma indeksleri büyük çıksa da ilk 7500 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirmeler ve sünme modülleri incelendiğinde saf karışımda yaşlanmanın daha fazla olduğu belirlenmiştir. Esneklik modülü değerleri incelendiğinde en düşük yaşlanma oranına saf karışımın sahip olduğu belirlense de Şekil 7.89'da görüldüğü üzere yük tekrar sayısı ile en fazla değişim saf karışımda meydana gelmiştir. 6000 yük tekrarına kadar yaşlanmadan önceki esneklik modülü değerlerinin 6000 yük darbesinden sonra ise yaşlanmadan sonraki esneklik modülü değerlerinin büyük olması nedeniyle saf karışımın ömrü olan 6500 yük tekrarı sonunda en az yaşlanmanın saf karışımda olduğu belirlenmiştir. Esneklik modülü değerlerinin yük tekrarı ile değişimi incelendiğinde en fazla yaşlanma etkisinin saf karışımda olduğu söylenebilmektedir. Elde edilen sonuçlardan kalıcı deformasyona karşı dayanım açısından filler olarak asfaltit kullanımının bitümlü sıcak karışımların uzun dönem yaşlanmaya karşı dayanımı arttırdığı söylenebilmektedir.

7.10. Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi

Çalışmada, lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) prensiplerine göre deneyler yapılarak karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları değerlendirilmiştir. LEKM prensiplerine uygun olarak EN 12697-44 standardına göre yarım daire numuneler 0°C sıcaklıkta 5 mm/dak. deformasyon hızında kırılmıştır. EPKM yaklaşımına göre ise yarım daire numuneler 25°C sıcaklıkta 0,5 mm/dak. deformasyon hızında kırılmıştır. Çalışmada, saf karışım ve %1-5 arasında beş farklı oranda asfaltit içeren karışımlar hazırlanarak yoğurmalı pres ile 150 mm çapında, 11-12 cm yüksekliğe ve % 4±1 boşluk oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Numunelerin yarısı 85°C'deki hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat bekletilerek uzun dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 7.91). Numuneler, döner testere ile öncelikle 50 mm yüksekliğe sahip iki parçaya ardından yarım daire şekline sahip dört parçaya bölünmüştür (Şekil 7.91). Ardından tezgah tipi testere kullanılarak numunelere 1, 2 ve 3 cm yüksekliğinde çentikler açılmıştır.



Şekil 7.91. Numunelerin uzun dönem yaşlandırılması ve kesilmesi

Numuneler kesilirken ısınmayı engellemek amacıyla su ile soğutulduğundan kesme işleminden sonra 2 gün oda şartlarında güneş görmeyecek şekilde kurumaya bırakılmıştır. Ağırlık kontrolü ile 2 günlük beklemenin kuruma için yeterli olduğu belirlenmiştir. Daha sonra numunelerin bir kısmı lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımlarına uygun olarak EN 12697-44 standardında tanımlanan yarım daire eğilme deneyine tabi tutulmuştur.

Ardından 1-2 ve 3 cm çentik derinliğine sahip numuneler elastik-plastik kırılma mekaniği yaklaşımlarına uygun olarak J-integral deneyine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin bir kısmı ile 1-2 ve 3 cm çentik içeren numuneler Şekil 7.92’de verilmiştir.



Şekil 7.92. Deney numunelerinin bir kısmı ve değişik yükseklikte çentiğe sahip numuneler

Deneylerde FÜBAP desteği ile alınan hızı ayarlanabilen Marshall stabilite aleti kullanılmıştır. Cihaz 50 kN kapasiteli olup hızı 0,000 ile 75,000 aralığında ayarlanabilmektedir. Dijital ekranı sayesinde hız ayarlanabilmekte, geri kalan bütün kontrol cihazın kendi yazılımından yapılabilmektedir. Cihazda bulunan veri toplama sistemi sayesinde her bir değerden saniyede yaklaşık 10 veri bilgisayara aktarılabilir. Cihaz ve deney düzeneği Şekil 7.93’te, dijital ekran ise Şekil 7.94’te görülmektedir.

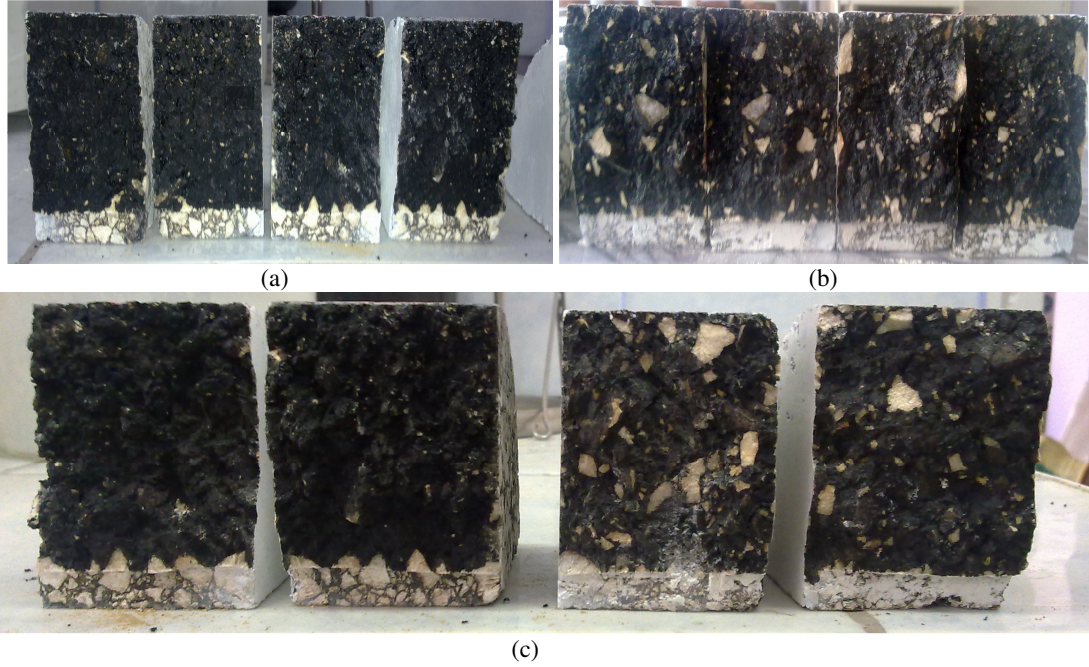


Şekil 7.93. Yarım daire eğilme deney düzeneği



Şekil 7.94. Hızı ayarlanabilir Marshall cihazının dijital göstergesi

Deneylerden sonra kırılmanın meydana geldiği yüzeyler incelendiğinde yükleme hızı ve sıcaklığa bağlı olarak 25°C’de yapılan SCB deneylerinde intergranüler (taneler arası) kırılma meydana gelirken 0°C’de yapılan yarım daire eğilme deneylerinde transgranüler (taneleri keserek) kırılma meydana gelmiştir. Şekil 7.95(a)’da görülen numuneler 25°C’de denenen numunelere, Şekil 7.95(b)’de görülen numuneler ise 0°C’de denenen numunelere örnek olarak verilmiştir. Şekil 7.95(c)’de görüldüğü üzere düşük sıcaklıklarda (0°C) transgranüler, 25°C’de ise intergranüler kırılma meydana gelmiştir.



Şekil 7.95. Numunelerde görülen intergranüler ve transgranüler kırılmalar

7.10.1. LEKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti (EN 12697-44)

Saf karışım ve %1-5 aralığında 5 farklı oranda asfaltit içeren, 1 cm çentik yüksekliğine sahip kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış üçer numune 6 saat süresince 0°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Ardından yükleme aletinde 5 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Elde edilen verilerden maksimum düşey deformasyon ve maksimum yük değerleri elde edilmiştir. Hızı ayarlanabilir Marshall aletinden yük değerleri kg olarak alınmış bu değerler N'a çevrilmiştir. Maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) Formül 6.24 kullanılarak, maksimum gerilme değeri (σ_{mak}) Formül 6.25 kullanılarak, kırılma tokluğu değerleri (K_{IC}), Formül 6.26 kullanılarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu hesabında çatlak yüksekliği $9 \text{ mm} < a < 11 \text{ mm}$ ve numune yüksekliği $70 \text{ mm} < W < 75 \text{ mm}$ olduğundan $f(\frac{a}{W}) = 5,956$ olarak alınmıştır.

Kısa dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan deneylerden elde edilen değerler Tablo 7.60'da, uzun dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan deneylerden elde edilen değerler ise Tablo 7.61'de verilmiştir.

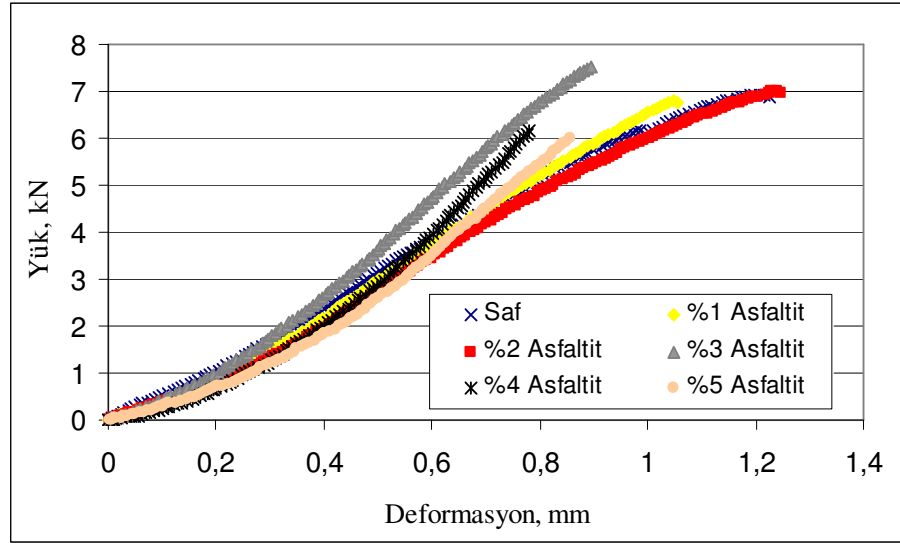
Tablo 7.60. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları

Karışım Türü	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	ϵ_{mak} (%)	Yük-Deformasyon Doğru Denklemi	Doğru Denklemi R ² Değeri	σ_{mak} (N/mm ²)	K _{IC} (N/mm ^{3/2})
Saf	1	50,3	49,9	50,0	50,1	6966,0	1,7384	$y = 576,82x + 30,583$	0,9735	3,9516	23,536
	2	51,2	51,2	51,5	51,3	6998,2	1,7561	$y = 623,2x + 19,195$	0,965	3,8770	23,091
	3	50,6	50,3	50,8	50,6	7094,1	1,7649	$y = 600,5x - 24,547$	0,9938	3,9301	23,408
	Ort.					7019,4	1,753	$y = 632,57x - 5,6559$	0,9935	3,9195	23,345
%1 Asfaltit	1	51,0	51,3	51,3	51,2	6653,5	1,3835	$y = 709,78x - 19,059$	0,9945	3,6932	21,997
	2	51,9	52,1	52,3	52,1	7786,4	1,6141	$y = 715,48x - 54,039$	0,9946	4,2474	25,297
	3	51,4	51,8	51,7	51,6	7231,9	1,6073	$y = 682,55x - 46,167$	0,9928	3,9832	23,724
	Ort.					7223,9	1,535	$y = 704,9x - 40,575$	0,9955	3,9746	23,673
%2 Asfaltit	1	51,2	51,2	51,6	51,3	6974,2	1,7162	$y = 641,59x - 15,481$	0,9856	3,8637	23,012
	2	51,3	51,9	51,7	51,6	7231,9	1,8359	$y = 595,11x - 22,258$	0,9935	3,9832	23,724
	3	51,1	51,5	51,2	51,3	7058,6	1,6541	$y = 644,49x - 54,246$	0,9951	3,9104	23,291
	Ort.					7088,2	1,735	$y = 635,28x - 34,091$	0,9942	3,9191	23,342
%3 Asfaltit	1	51,4	52,1	52	51,8	7471,7	1,1884	$y = 944,41x - 91,498$	0,9836	4,0993	24,416
	2	51,3	50,8	50,7	50,9	7876,3	1,1397	$y = 1037,9x - 48,128$	0,9963	4,3977	26,193
	3	51,6	51,7	52,1	51,8	7739,7	1,4199	$y = 820,02x - 74,832$	0,9859	4,2464	25,291
	Ort.					7695,9	1,249	$y = 926,28x - 71,709$	0,9894	4,2478	25,300
%4 Asfaltit	1	50,1	50,4	50,1	50,2	6899,3	1,0732	$y = 974,47x - 86,168$	0,9843	3,9059	23,264
	2	50,4	50,3	50,3	50,3	6872,3	1,2505	$y = 783,36x - 108,05$	0,9405	3,8829	23,127
	3	51,2	51,7	51,3	51,4	6962,9	1,1529	$y = 864x - 99,234$	0,9565	3,8499	22,930
	Ort.					6911,5	1,159	$y = 823,41x - 83,499$	0,9646	3,8796	23,107
%5 Asfaltit	1	52,7	53,0	53,0	52,9	6761,4	1,3659	$y = 748,39x - 67,485$	0,9893	3,6325	21,635
	2	52,8	53,3	52,6	52,9	6362,8	1,1574	$y = 773,6x - 57,744$	0,9793	3,4183	20,360
	3	51,9	51,6	52,2	51,9	6645,9	1,2722	$y = 754,63x - 106$	0,9425	3,6392	21,675
	Ort.					6590,0	1,265	$y = 737,26x - 70,548$	0,9714	3,5634	21,223

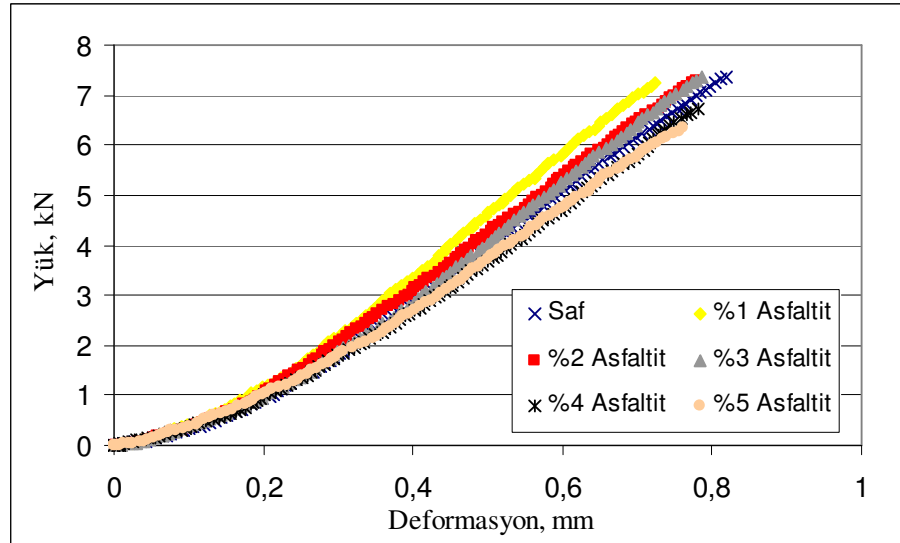
Tablo 7.61. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları

Karışım Türü	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	ε_{mak} (%)	Yük-Deformasyon Doğru Denklemi	Doğru Denklemi R ² Değeri	σ_{mak} (N/mm ²)	K _{IC} (N/mm ^{3/2})
Saf	1	51,0	50,8	51,3	51,0	7857,4	1,1796	y = 1044,7x - 50,222	0,9906	4,3786	26,079
	2	49,9	49,9	49,4	49,7	7647,7	1,0997	y = 1041,4x - 60,558	0,995	4,3732	26,047
	3	50,3	50,9	50,5	50,6	7962,2	1,2948	y = 896,24x - 127,46	0,9438	4,4721	26,636
	Ort.					7822,5	1,191	y = 9,6949x - 0,7878	0,9873	4,4080	26,254
%1 Asfaltit	1	50,9	50,6	50,5	50,7	7336,8	0,9356	y = 1173,3x - 79,234	0,9851	4,1127	24,495
	2	50,4	51,2	50,8	50,8	7909,3	1,0110	y = 1205x - 104,53	0,9799	4,4248	26,354
	3	51,1	50,9	51,5	51,2	7748,2	1,2018	y = 959,13x - 50,271	0,9964	4,3347	25,818
	Ort.					7664,8	1,049	y = 10,748x - 0,7463	0,9874	4,2907	25,556
%2 Asfaltit	1	52,5	52,0	52,4	52,3	8062,1	1,0332	y = 1177,5x - 74,532	0,9952	4,3810	26,093
	2	52,2	51,9	52,5	52,2	7237,9	1,1619	y = 896,59x - 101,69	0,9612	3,9406	23,470
	3	51,7	52,3	52,1	52,0	7696,6	1,2195	y = 990,8x - 44,582	0,9897	4,1664	24,815
	Ort.					7665,5	1,138	y = 10,087x - 0,7575	0,9905	4,1627	24,793
%3 Asfaltit	1	51,6	51,7	51,2	51,5	7894,6	1,0776	y = 1119,1x - 81,883	0,9885	4,3566	25,948
	2	51,6	51,9	51,8	51,8	7996,8	1,1486	y = 996,76x - 75,798	0,9856	4,3874	26,132
	3	50,9	51,4	51,1	51,1	7780,5	1,1884	y = 983,84x - 97,705	0,9841	4,3272	25,773
	Ort.					7890,6	1,138	y = 9,9954x - 0,8055	0,9843	4,3571	25,951
%4 Asfaltit	1	52,9	52,7	53,2	52,9	7196,0	1,1884	y = 868,45x - 87,098	0,9726	3,8660	23,026
	2	53,2	52,9	53,2	53,1	6777,5	1,1086	y = 886,99x - 71,444	0,9817	3,6274	21,605
	3	52,1	52,6	52,6	52,4	7748,1	1,1219	y = 1036,8x - 48,534	0,9962	4,2023	25,029
	Ort.					7240,5	1,140	y = 8,9708x - 0,6495	0,9846	3,8986	23,220
%5 Asfaltit	1	51,0	51,3	50,9	51,1	6102,0	1,2063	y = 767,59x - 40,207	0,9961	3,3937	20,213
	2	51,6	51,7	51,6	51,6	7031,1	1,1486	y = 923,97x - 75,371	0,9771	3,8726	23,065
	3	50,8	51,3	51,1	51,1	6437,9	0,9224	y = 1031,2x - 69,423	0,9847	3,5806	21,326
	Ort.					6523,7	1,092	y = 8,8097x - 0,597	0,9874	3,6156	21,535

Uzun dönem yaşlandırmadan önce ve sonra deneye tabi tutulan her bir karışım türünden üç numuneden elde edilen yük-deformasyon eğrilerinin ortalamaları Şekil 7.96’da ve Şekil 7.97’de verilmiştir.



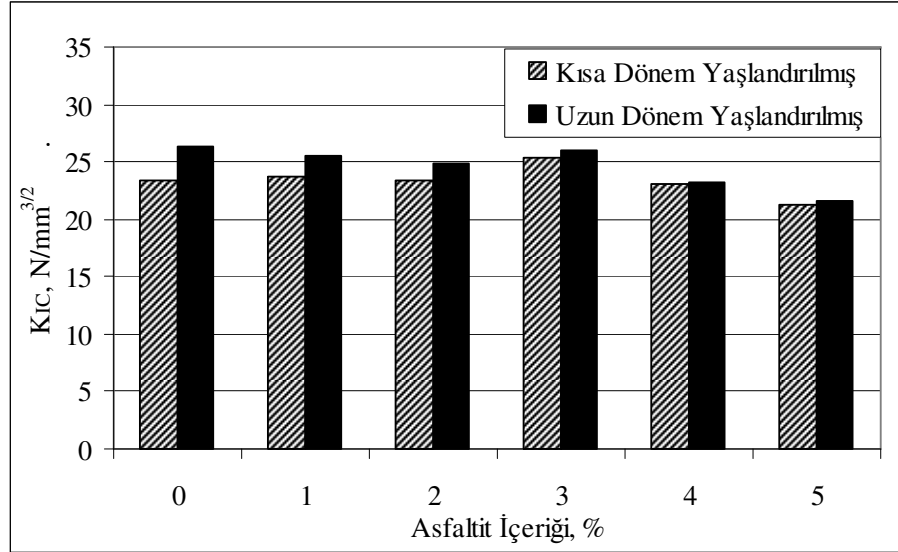
Şekil 7.96. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri



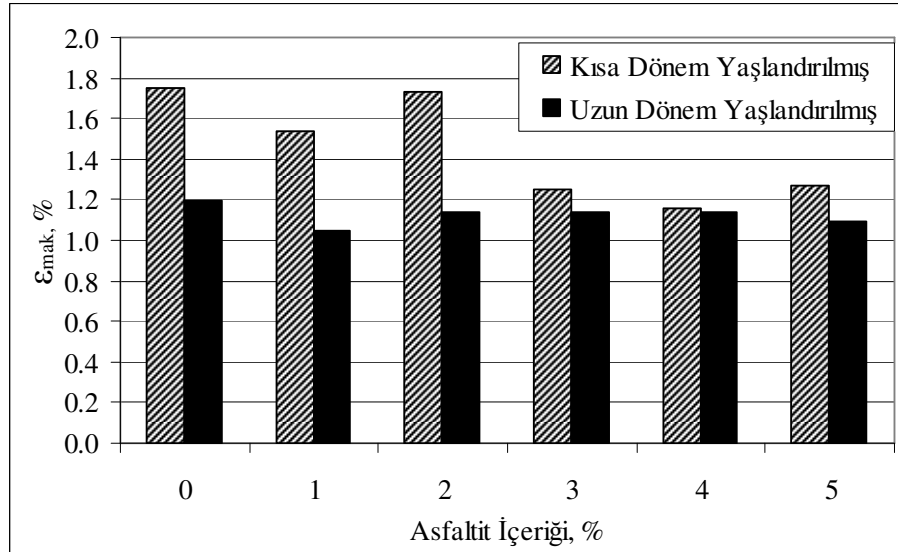
Şekil 7.97. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri

Elde edilen değerlerden yük-deformasyon eğrisine doğru yerleştirildiğinde karışımlardan elde edilen en düşük belirtme katsayısının (R^2) 0,94'ün üzerinde olduğu belirlenmiştir. Yük artışı ile deformasyon arasında lineere yakın bir değişimin olması ayrıca bütün numunelerde Şekil 6.15(a)'da olduğu gibi maksimum yükte kırılmanın

gerçekleşmesi, lineer elastik kırılma mekaniğinin uygulanabileceğini göstermektedir. Özellikle uzun dönem yaşlandırılmış numuneler lineere daha yakın davranış sergilemişlerdir. Asfaltit içeriği ile kırılma tokluğu (K_{IC}) arasındaki ilişki Şekil 7.98’de, asfaltit içeriği ile maksimum şekil değiştirme arasındaki ilişki ise Şekil 7.99’da verilmiştir.



Şekil 7.98. Asfaltit içeriği ile kırılma tokluğu (K_{IC}) ilişkisi

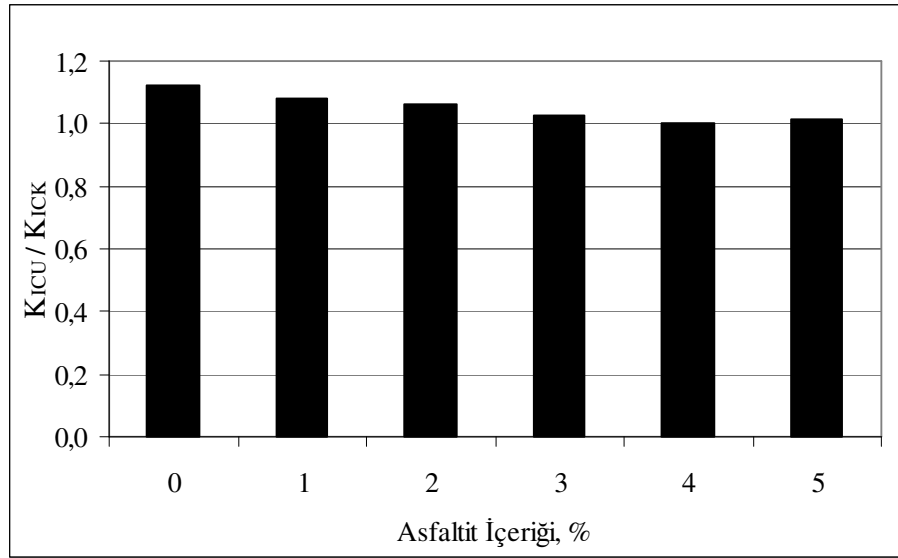


Şekil 7.99. Asfaltit içeriği ile maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) ilişkisi

Şekil 7.98 incelendiğinde kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde en yüksek K_{IC} değerine %3 asfaltit içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. %3 asfaltit kullanılması durumunda K_{IC} değerinde saf karışıma göre %8,4 artış meydana gelmiştir. %4 ve %5 asfaltit içeriklerinde K_{IC} değeri düzenli olarak azalmıştır. En düşük K_{IC} değerine %5 asfaltit içeren numuneler sahip olmuştur. %5 asfaltit kullanılması durumunda K_{IC} değerinde saf karışıma göre %9,1 azalma meydana gelmiştir. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde ise en yüksek K_{IC} değerine saf karışım, daha sonra ise %3 asfaltit içeren karışım sahip olmuştur. En düşük K_{IC} değerine ise yine %5 asfaltit içeren karışımlar sahip olmuştur. Lineer elastik kırılma mekanizmasına göre K_{IC} değerinin yüksek olması kırılmaya karşı dayanımın fazla olacağını göstermektedir. Kısa dönem yaşlanmadan önce kırılmaya karşı en yüksek dayanımı %3 asfaltit içeren karışım, en düşük dayanımı ise %5 asfaltit içeren karışım göstermiştir. Uzun dönem yaşlanmadan sonra ise kırılmaya karşı en yüksek dayanımı saf karışım, en düşük dayanımı ise yine %5 asfaltit içeren karışım göstermiştir. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde 25°C’de yapılan indirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda çatlak ilerleyişine karşı en yüksek dayanımı %5 asfaltit içeren karışımın, en düşük dayanımı ise saf karışımın gösterdiği belirlenmiştir. Kırılma tokluğu deneylerinde ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. Yarım daire numuneler üzerinde yapılan kırılma tokluğu deneyi ile bitümlü sıcak karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları belirlendiğinden deney sıcaklığı ve malzeme davranışı göz önüne alındığında düşük ısı çatlaklarının ilerleyişine karşı veya çeşitli nedenlerle oluşmuş çatlakların düşük sıcaklıklarda ilerleyişine karşı en yüksek dayanımın %3 asfaltit içeren karışımın sahip olacağı, kaplamanın servis ömrünün 7-10 sene sonrasında ise saf karışımın sahip olacağı söylenebilmektedir.

Şekil 7.99 incelendiğinde ise kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde %2 asfaltit içeriğinden sonra asfaltit içeriği arttıkça maksimum şekil değiştirme değerlerinde önemli bir azalma meydana gelmiştir. En yüksek maksimum şekil değiştirme değerine saf karışım sahipken en düşük ϵ_{mak} değerine %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Uzun dönem yaşlandırmadan sonra ise en yüksek maksimum şekil değiştirme değerine saf karışımın en düşük ϵ_{mak} değerine ise %1 asfaltit içeren karışımın daha sonra ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum kırılma meydana gelinceye kadar en fazla elastik şekil değiştirmenin saf karışımında en az elastik şekil değiştirmenin ise genel olarak yüksek oranda asfaltit içeren karışımlarda olduğu söylenebilmektedir.

Uzun dönem yaşlanmanın kırılma tokluğu ve maksimum şekil değiştirme değerleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin K_{IC} ve ϵ_{mak} değerleri kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin K_{IC} ve ϵ_{mak} değerlerine bölünerek yaşlanma indeksi değerleri belirlenmiştir. Kırılma tokluğu değerlerinin yaşlanma indekslerinin (K_{ICU} / K_{ICK}) asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.100’de, maksimum şekil değiştirme değerlerinin yaşlanma indekslerinin ($\epsilon_{maku} / \epsilon_{mak}$) asfaltit içeriği ile değişimi ise Şekil 7.101’de verilmiştir.

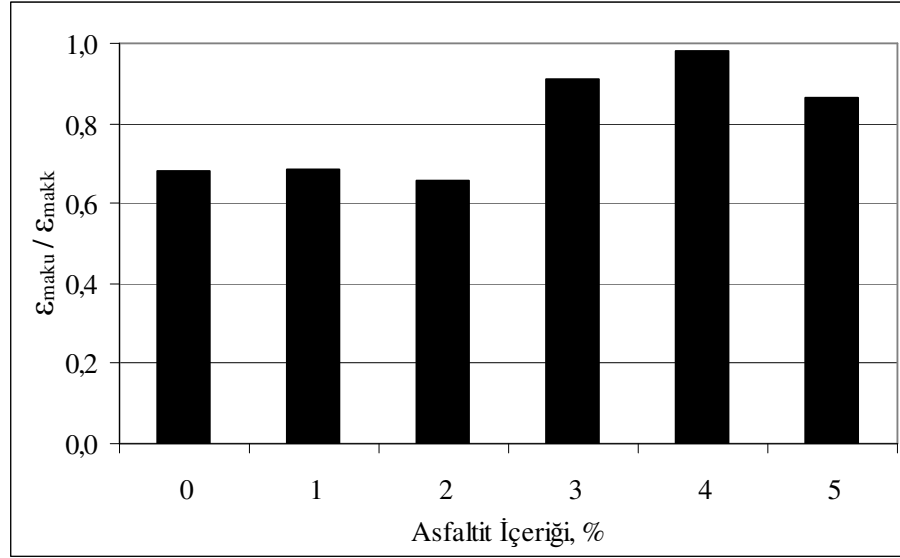


Şekil 7.100. Kırılma tokluğu yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

Uzun dönem yaşlanmadan ötürü bütün karışımların tokluk indeksi değerleri artarken maksimum şekil değiştirme değerleri azalmıştır. Şekil 7.100 incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile tokluk indeksi yaşlanma indekslerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum her ne kadar uzun dönem yaşlanmadan ötürü saf karışım ve düşük oranlarda asfaltit içeren karışımların tokluk indekslerinin arttığını gösterse de diğer taraftan yaşlanmanın etkisinin saf karışım ve düşük oranlarda asfaltit içeren karışımlarda daha fazla olduğunu göstermektedir. Şekil 7.100’den uzun dönem yaşlanmadan en fazla saf karışımın etkilendiği (%12,5 artış), en az ise %4 asfaltit içeren karışımın (%0,5 artış) etkilendiği söylenebilmektedir.

Şekil 7.101 incelendiğinde ise uzun dönem yaşlanmadan ötürü %3 asfaltit içeriğine kadar maksimum şekil değiştirme miktarlarının önemli oranda azaldığı, %3, 4 ve %5 asfaltit içeren karışımlarda ise ise değişimin fazla olmadığı belirlenmiştir. Uzun dönem

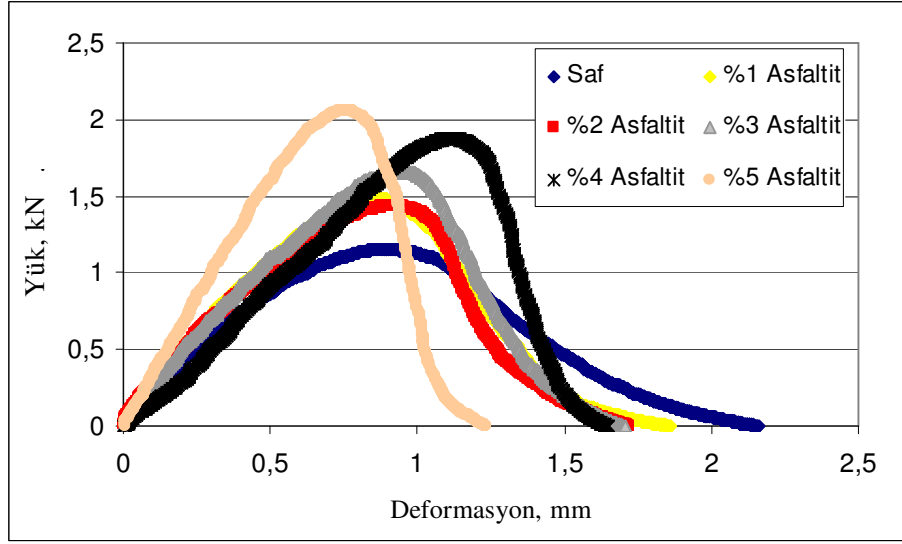
yaşlanmadan ötürü maksimum şekil değiştirme değerlerindeki en büyük değişim miktarı %2 asfaltit içeren karışımda (%32 azalış) gözlenirken, en düşük değişim miktarı %4 asfaltit içeren karışımda (%1,7 azalış) gözlenmiştir.



Şekil 7.101. Maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

7.10.2. EPKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti (J-İntegral Yöntemi)

Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, saf karışım ve %1-5 aralığında 5 farklı oranda asfaltit içeren karışım numunelerinden 1, 2 ve 3 cm çentik yüksekliğine sahip üçer numune 4 saat süresince 25°C sıcaklığa sahip hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir. Ardından yükleme aletinde 0,5 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Deney süresince hızı ayarlanabilir Marshall cihazında bulunan veri toplama sistemi sayesinde her saniyedeki düşey deformasyon ve yük değerleri elde edilmiştir. Bu değerler yardımıyla çizilen yük–deformasyon eğrilerinden maksimum yük–deformasyon eğrisi altında kalan alan (kırılmaya neden olan toplam şekil değiştirme enerjisi) elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verilere örnek olarak 1 cm çentiğe sahip numunelerin yük–deformasyon eğrileri Şekil 7.102’de verilmiştir.



Şekil 7.102. 1 cm çentige sahip numunelerin yük deformasyon ilişkisi

Kısa dönem yaşlandırılmış 1, 2 ve 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelere uygulanan deneylerden elde edilen değerler sırasıyla Tablo 7.62, Tablo 7.63 ve Tablo 7.64'te verilmiştir.

Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerden elde edilen maksimum yük değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.103'te, maksimum yüke ulaşıldığı andaki deformasyon miktarlarının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.104'te, maksimum yüke kadarki yük-deformasyon eğrisi altındaki alanın asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.105'te, maksimum yükten yük boşalınca kadarki yük-deformasyon eğrisi altındaki alanın asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.106'da, yük boşaldığı andaki deformasyonun asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.107'de ve yük-deformasyon eğrisi altındaki toplam alanın asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.108'de verilmiştir.

Tablo 7.62. Kısa dönem yaşlandırılmış 1 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

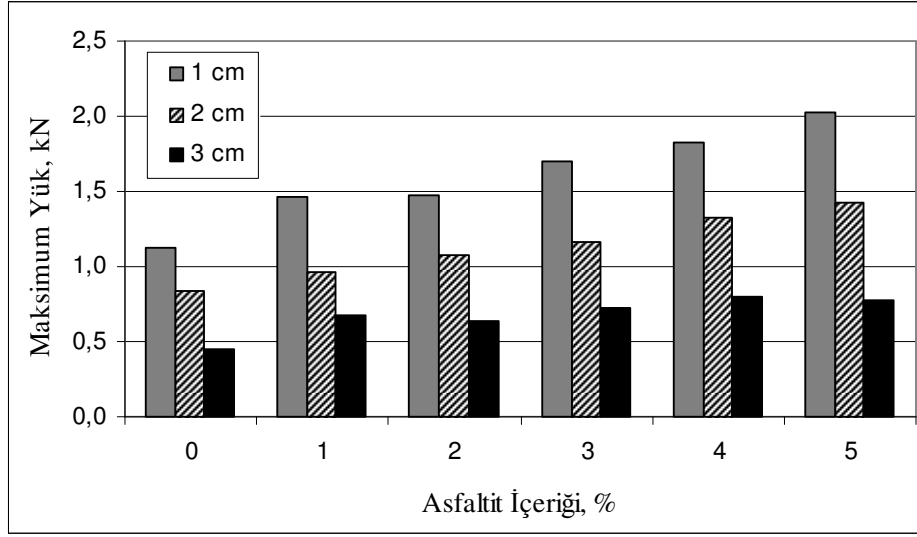
Asfaltit İçeriği (%)	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
0	1	50,3	50,6	50,3	50,4	116,71	0,9061	63,59	54,81	2,2979	118,40
	2	51,0	51,4	51,1	51,2	117,93	0,9257	70,53	61,96	2,1610	132,50
	3	50,7	51,2	50,6	50,8	109,42	1,0267	69,16	45,16	1,9491	114,32
	Ort.					114,69	0,9528	67,76	53,98	2,1360	121,74
1	1	52,4	51,7	52,0	52,0	151,53	0,8735	81,52	59,63	1,8611	141,15
	2	51,9	52,5	52,0	52,1	149,70	0,867	78,69	57,74	1,7047	136,43
	3	52,2	52,2	52,7	52,4	145,48	0,8735	79,77	57,25	1,8579	137,02
	Ort.					148,91	0,8713	79,99	58,21	1,8079	138,20
2	1	51,0	51,6	51,5	51,4	149,40	0,9843	89,46	45,40	1,7405	134,86
	2	50,8	50,8	50,7	50,8	146,34	0,942	87,11	44,94	1,7177	132,04
	3	51,2	50,9	51,4	51,2	153,73	0,9517	85,91	46,66	2,1153	132,56
	Ort.					149,82	0,9593	87,49	45,67	1,8578	133,15
3	1	52,9	52,3	52,7	52,6	183,61	0,8768	101,15	45,19	1,4602	146,34
	2	52,3	52,5	52,4	52,4	169,56	0,9648	97,71	51,83	1,7047	149,54
	3	51,8	51,9	52,4	52,0	165,10	0,9289	98,88	39,42	1,8057	138,29
	Ort.					172,76	0,9235	99,25	45,48	1,6569	144,73
4	1	53,4	53,1	53,5	53,3	188,50	0,8409	90,74	45,07	1,4341	135,82
	2	54,0	53,9	53,5	53,8	191,25	1,1212	114,56	46,74	1,6493	161,30
	3	52,2	52,6	52,7	52,5	178,10	0,88	97,68	44,27	1,4504	141,95
	Ort.					185,95	0,9474	100,99	45,36	1,5113	146,36
5	1	49,8	49,5	49,8	49,7	210,07	0,7757	95,01	42,45	1,2353	137,45
	2	49,8	50,3	50,3	50,1	205,55	0,7725	91,03	47,99	1,4624	139,02
	3	50,6	51,2	51,2	51,0	203,77	0,7594	88,87	41,72	1,2158	130,59
	Ort.					206,46	0,7692	91,64	44,05	1,3045	135,69

Tablo 7.63. Kısa dönem yaşlandırılmış 2 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

Asfaltit İçeriği (%)	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
0	1	50,3	50,6	50,8	50,6	85,01	0,8605	45,22	38,32	1,9328	83,55
	2	51,0	51,0	51,1	51,0	81,88	0,7757	39,75	37,53	1,8839	77,28
	3	51,1	51,2	51,1	51,1	88,26	0,867	52,44	39,26	1,9263	91,69
	Ort.					85,05	0,8344	45,80	38,37	1,9143	84,17
1	1	51,3	51,6	51,3	51,4	98,37	0,7171	43,14	35,80	1,5189	78,93
	2	51,3	51,1	50,9	51,1	97,15	0,8931	60,29	33,38	1,5775	93,67
	3	51,2	51,1	51,2	51,2	98,07	0,9126	56,18	47,04	1,998	103,22
	Ort.					97,87	0,8409	53,20	38,74	1,6981	91,94
2	1	50,5	50,5	50,4	50,5	114,87	0,9811	70,86	43,56	1,7992	114,42
	2	51,9	51,5	51,4	51,6	104,18	0,7203	46,05	45,50	1,6199	91,54
	3	51,3	51,4	51,6	51,4	108,46	0,7692	53,02	37,27	1,5384	90,29
	Ort.					109,17	0,8235	56,64	42,11	1,6525	98,75
3	1	51,7	51,9	52,0	51,9	120,07	0,6551	48,43	29,66	1,2809	78,08
	2	51,8	51,3	52,0	51,7	120,98	0,7497	57,88	36,15	1,5026	94,03
	3	51,0	51,2	50,7	51,0	114,26	0,691	49,76	41,47	1,5058	91,24
	Ort.					118,44	0,6986	52,02	35,76	1,4298	87,79
4	1	52,4	52,2	52,0	52,2	139,01	0,6812	56,78	43,81	1,5221	100,59
	2	52,1	52,4	52,4	52,3	130,76	0,7464	59,55	43,24	1,5352	102,80
	3	51,8	51,8	52	51,9	135,33	0,6617	54,49	34,05	1,307	88,54
	Ort.					135,03	0,6964	56,94	40,37	1,4548	97,31
5	1	50,2	50,7	50,5	50,5	144,08	0,6584	58,14	35,63	1,294	93,77
	2	50,9	50,4	50,6	50,6	148,88	0,6323	56,36	37,35	1,2712	93,71
	3	51,1	50,8	50,7	50,9	141,68	0,6095	52,75	37,44	1,2646	90,19
	Ort.					144,88	0,6334	55,75	36,81	1,2766	92,56

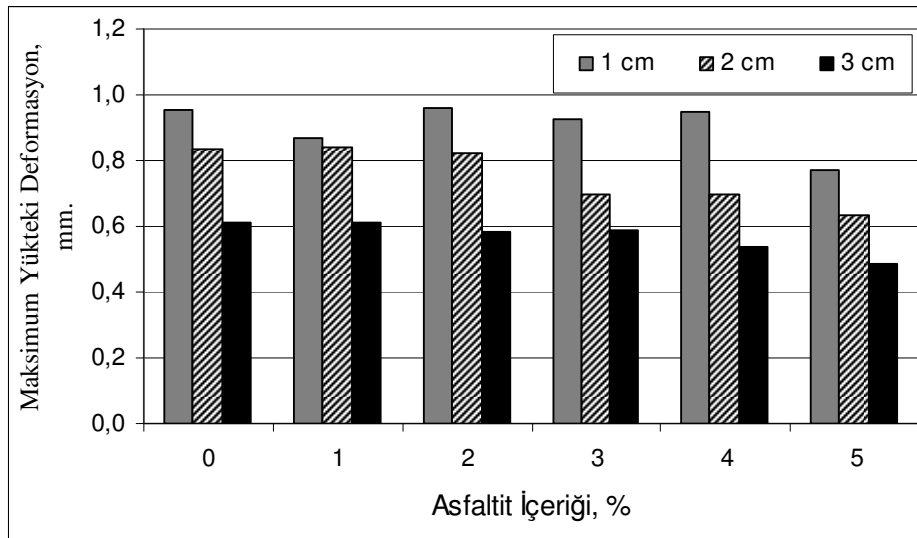
Tablo 7.64. Kısa dönem yaşlandırılmış 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

Asfaltit İçeriği (%)	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalıncaya kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
0	1	49,1	49,1	49,3	49,2	46,44	0,6910	21,07	18,93	1,545	40,00
	2	49,3	49,4	49,6	49,4	45,52	0,5802	17,16	18,98	1,382	36,14
	3	49,6	49,7	49,3	49,5	45,52	0,5616	16,18	19,21	1,3461	35,39
	Ort.					45,83	0,6109	18,14	19,04	1,4244	37,18
1	1	53,3	52,6	53,2	53,0	76,07	0,8018	38,72	28,16	1,4765	66,88
	2	52,3	52,5	52,3	52,4	60,80	0,5150	19,71	19,54	1,2158	39,25
	3	52,1	52,3	52,5	52,3	68,33	0,5117	22,00	20,64	1,1538	42,64
	Ort.					68,40	0,6095	26,81	22,78	1,2820	49,59
2	1	52,1	52,4	52,6	52,4	63,24	0,6486	25,00	23,00	1,4113	48,00
	2	52,1	51,8	52,4	52,1	65,07	0,5182	21,37	19,88	1,1701	41,25
	3	52,2	52,6	52,5	52,4	67,28	0,5802	23,83	25,55	1,3722	49,38
	Ort.					65,20	0,5823	23,40	22,81	1,3179	46,21
3	1	52,2	52,7	52,6	52,5	73,93	0,5997	27,08	28,71	1,4667	55,80
	2	53,3	53,0	52,9	53,1	74,54	0,5965	29,07	25,32	1,3983	54,39
	3	52,1	52,1	52,6	52,3	73,63	0,5639	24,97	27,72	1,4048	52,69
	Ort.					74,04	0,5867	27,04	27,25	1,4233	54,29
4	1	51,5	51,2	51,3	51,3	83,40	0,5019	25,34	22,86	1,1017	48,20
	2	51,4	51,0	51,5	51,3	80,04	0,5541	28,27	25,76	1,3266	54,03
	3	51,1	51,2	50,7	51,0	79,43	0,5606	28,65	23,48	1,3103	52,13
	Ort.					80,96	0,5389	27,42	24,03	1,2462	51,45
5	1	53,3	53,7	53,7	53,6	78,52	0,4889	23,18	21,32	1,2125	44,50
	2	53	53,5	53,5	53,3	79,43	0,4922	23,68	18,91	1,0072	42,59
	3	52,3	52,6	52,4	52,4	77,91	0,4726	22,06	19,71	1,1603	41,77
	Ort.					78,62	0,4846	22,97	19,98	1,1267	42,95



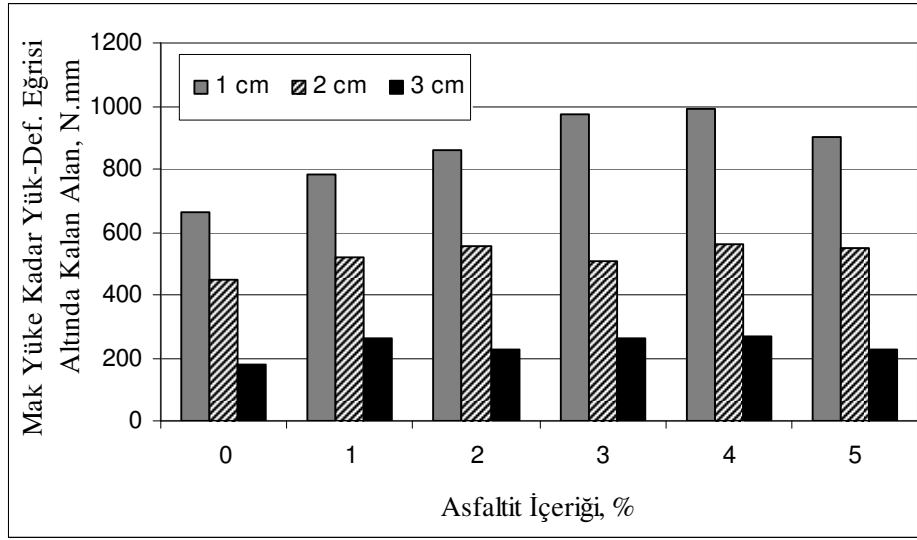
Şekil 7.103. Maksimum yük - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.103'te görüldüğü üzere bütün çentik derinliklerinde asfaltit içeriğinin artması ile elde edilen maksimum yük değerleri düzenli olarak artmıştır. Ayrıca çentik yüksekliği arttıkça maksimum yük değerleri azalmıştır. 1 cm çentik derinliğinde %3 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre %50,6 , %5 asfaltit kullanılması durumunda ise %80 yük artışı meydana gelmiştir. 2 cm çentik derinliğinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda %39,3 artış meydana gelirken %5 asfaltit kullanılması durumunda ise %70,4 artış meydana gelmiştir. 3 cm çentik derinliğinde ise %3 asfaltit kullanılması durumunda %61,6 , %5 asfaltit kullanılması durumunda %71,6 artış meydana gelmiştir.



Şekil 7.104. Maksimum yük anındaki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi

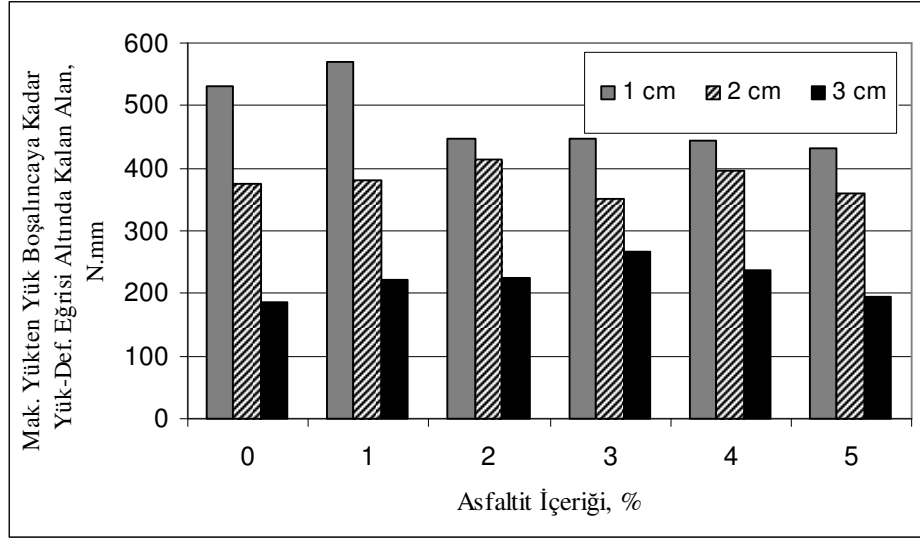
Şekil 7.104'te görülen maksimum yükteki deformasyon değerleri incelendiğinde 1, 2 ve 3 cm çentik derinliklerinde asfaltit içeriğinin artması ile deformasyon değerlerinde genel bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Bütün çentik derinliklerinde en yüksek maksimum yük anındaki deformasyon değeri saf karışımdan elde edilirken en düşük maksimum yük anındaki deformasyon değerine %5 asfaltit içeren karışımdan elde edilmiştir.



Şekil 7.105. Maksimum yüke kadar yük–deformasyon eğrisi altında kalan alan–asfaltit içeriği ilişkisi

Maksimum yük değerine kadar yük–deformasyon eğrisi altında kalan alanın asfaltit içeriği ile değişimi incelendiğinde 1 cm çentik derinliğine sahip numunelerde en yüksek alan değerine %4 asfaltit içeren karışımın daha sonra ise %3 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu, en düşük alan değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 2 cm çentik derinliğinde ise alan değerlerinin birbirine yakın olduğu, en yüksek değere %4 asfaltit içeren karışımın en düşük değere ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 3 cm çentik derinliğinde ise en yüksek değere %4 asfaltit içeriğinde daha sonra ise %3 asfaltit içeren karışımında rastlanırken en düşük değere yine saf karışımında rastlanmıştır. %4 asfaltit kullanılması durumunda saf karışıma göre alan değeri 1 cm çentik derinliğine sahip numunelerde %49 , 2 cm çentik derinliğine sahip numunelerde %24,3 , 3 cm çentik derinliğine sahip numunelerde ise %51,2 oranında artmıştır. Yük- deformasyon eğrisi altında kalan alan kırılmaya kadar depolanan enerjinin fazla olduğunu ifade ettiğinden çatlak oluşuktan sonra maksimum taşıma gücüne kadar en fazla dayanımın %4 asfaltit

içeren karışımda olacağı söylenebilmektedir. %5 asfaltit içeriğine sahip karışımlar tüm karışımlar içerisinde en yüksek maksimum yük değerine sahip olmasına rağmen maksimum yük değerindeki deformasyon değerleri düşük olduğundan alan değerleri düşük çıkmıştır. Maksimum yük değerindeki deformasyon miktarı düşük olmasına rağmen %5 asfaltit içeren karışımların alan değeri saf karışımdan yüksek çıkmıştır.

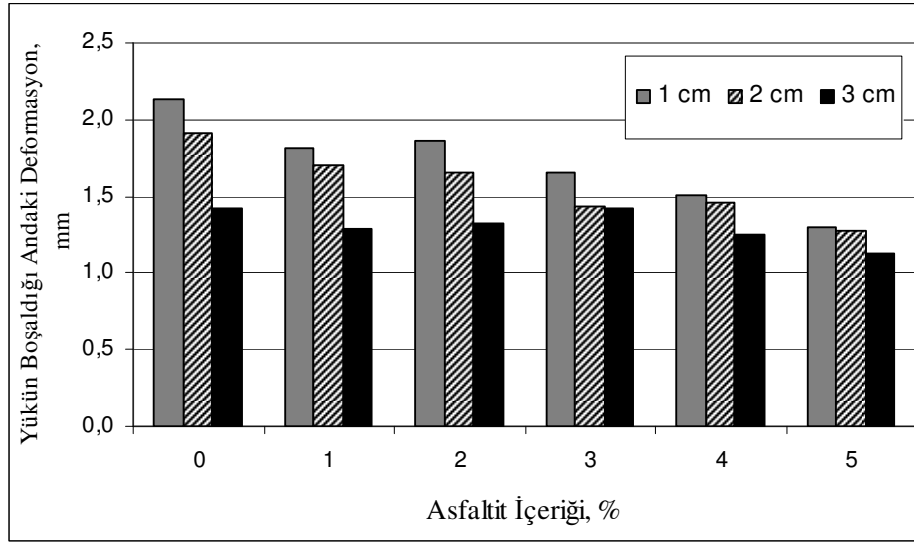


Şekil 7.106. Maksimum yükten yük boşalıncaya kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan – asfaltit içeriği ilişkisi

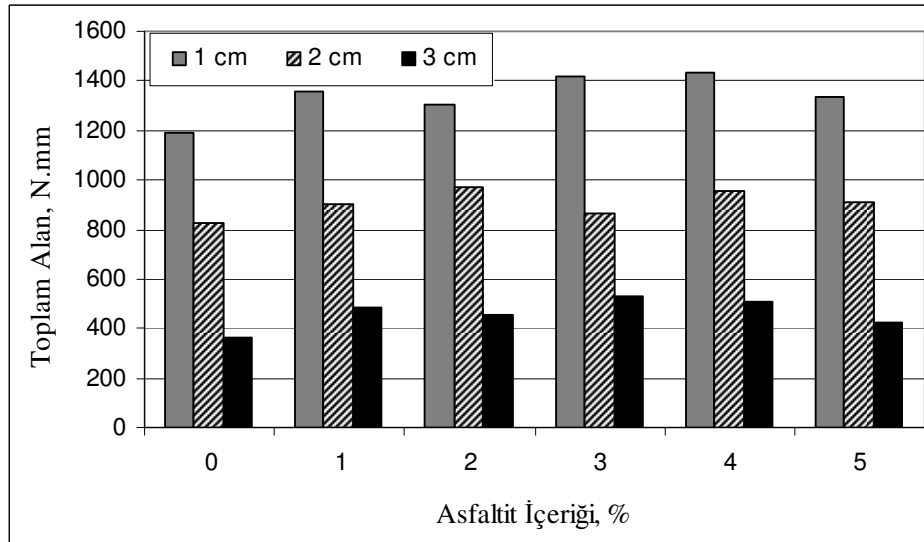
Şekil 7.106’da görülen maksimum yükten sonraki alan değerleri incelendiğinde 1 cm çentik derinliğine sahip numunelerde en yüksek alan değerine %1 asfaltit içeren karışımın, 2 cm çentik derinliğine sahip numunelerde en yüksek alan değerine %2 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğine sahip numunelerde ise en yüksek alan değerine %3 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu görülmektedir. En düşük alan değerleri ise 1 cm çentik derinliğine sahip numunelerde %5 asfaltit içeren karışımlarda, 2 cm çentik derinliğine sahip numunelerde %3 asfaltit içeren karışımlarda, 3 cm çentik derinliğine sahip numunelerde saf karışımda gözlenmiştir. Bu durum maksimum taşıma gücünden sonra depolanan enerji değerlerinin çentik derinliğine ve asfaltit içeriğine göre farklılık gösterdiğini ifade etmektedir.

Yükün boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi (Şekil 7.107) incelendiğinde bütün çentik yüksekliklerinde asfaltit içeriğinin artması ile deformasyon miktarlarının düzenli olarak azaldığı, en yüksek deformasyon değerine saf karışımın en düşük deformasyon değerine ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu

belirlenmiştir. 1 cm çentik yüksekliğinde %5 asfaltit kullanılması durumunda yük boşaldığı andaki deformasyon miktarı değerleri %38,9 , 2 cm çentik yüksekliğinde %33,3 , 3 cm çentik yüksekliğinde ise %20,9 azalmıştır. Bu durum saf karışımın daha yüksek deformasyon değerinde yük taşımaya devam etmesine rağmen daha düşük deformasyon değerlerinde asfaltit içeren karışımların yük taşıma kapasitesinin sonlandığını göstermektedir.



Şekil 7.107. Yükün boşaldığı andaki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi



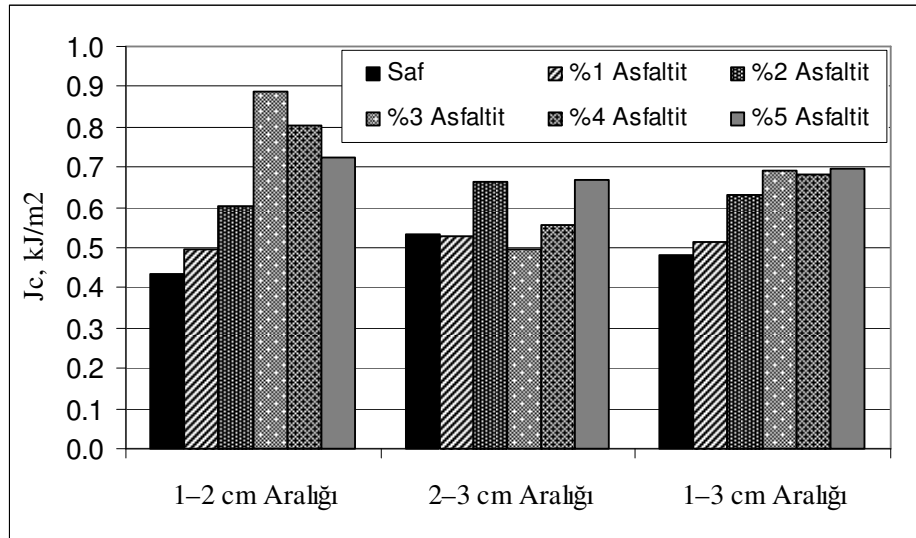
Şekil 7.108. Yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan - asfaltit içeriği ilişkisi

Yük–deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değerleri incelendiğinde en yüksek toplam alan değerinin 1 cm çentik yüksekliğinde %4 asfaltit içeriğine sahip karışımlarda, 2 cm çentik yüksekliğinde %2 asfaltit içeren karışımlarda, 3 cm çentik yüksekliğinde ise %3 asfaltit içeriğine sahip karışımlarda olduğu belirlenmiştir. En düşük değere ise bütün çentik yüksekliklerinde saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum asfaltit içeren karışımların daha düşük deformasyon değerlerinde yük taşıma kabiliyetleri sonlanmasına rağmen daha fazla depolanan enerjiye sahip olduklarını dolayısıyla çatlak ilerleyişi için daha fazla enerji gerektiğini ifade etmektedir.

Formül 6.28 yardımıyla kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri belirlenmiştir. Çalışmada 1–2 cm çentik yükseklikleri, 2–3 cm çentik yükseklikleri ve 1–3 cm çentik yükseklikleri aralıkları kullanılarak kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 7.65’te ve Şekil 7.109’da verilmiştir.

Tablo 7.65. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin J_c değerleri

Asfaltit içeriği (%)	1–2 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)	2–3 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)	1–3 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)
0	0,434	0,532	0,483
1	0,494	0,530	0,512
2	0,603	0,662	0,632
3	0,886	0,496	0,691
4	0,805	0,557	0,681
5	0,723	0,668	0,695



Şekil 7.109. Karışımların J_c değerleri

Şekil 7.109 incelendiğinde 1–2 cm çentik aralığında en yüksek J_c değerine %3 asfaltit içeren karışımın (saf karışımın J_c değerinin 2,04 katı), en düşük J_c değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 2–3 cm çentik aralığı incelendiğinde ise en düşük J_c değerine sahip karışımların saf karışım ile %1 ve %3 asfaltit içeren karışımlar olduğu, en yüksek karışımın ise %2 ve %5 asfaltit içeren karışımlar olduğu belirlenmiştir. 1–3 cm çentik derinliği aralığı incelendiğinde ise en düşük J_c değerine sahip karışımın saf karışım olduğu, en yüksek karışımın ise %5 asfaltit içeren karışım olduğu belirlenmiştir. %5 asfaltit içeren karışımın J_c değeri saf karışıma göre %44,0 yüksek çıkmıştır.

Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri incelendiğinde saf karışım ile %1 ve %2 oranında asfaltit içeren karışımlarda 2–3 cm çentik derinliği arasındaki J_c değerlerinin 1–2 cm arasındaki çentik derinlikleri arasındaki J_c değerinden daha yüksek olduğu diğer karışımlarda ise tam ters bir durum olduğu belirlenmiştir. Bu durum %3, %4 ve %5 oranında asfaltit içeren karışımlarda 1–2 cm aralığında çatlak ilerleyişine karşı dayanımın 2–3 cm aralığındaki çatlak ilerleyişine karşı dayanıma göre daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. 1–3 cm çatlak aralığı incelendiğinde ise asfaltit içeriğinin artması ile J_c değerinde artış sağlanmıştır. Bu durum asfaltit içeriğinin artması ile bitümlü sıcak karışım numunelerinde çatlak ilerleyişine karşı dayanımın artacağını ifade etmektedir.

Uzun dönem yaşlandırılmış 1, 2 ve 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelere uygulanan deneylerden elde edilen değerler sırasıyla Tablo 7.66, Tablo 7.67 ve Tablo 7.68’de verilmiştir. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerden elde edilen maksimum yük değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.110’da, maksimum yüke ulaşıldığı andaki deformasyon miktarlarının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.111’de, maksimum yüke kadarki yük-deformasyon eğrisi altındaki alanın asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.112’de, maksimum yükten yük boşalınca kadarki yük-deformasyon eğrisi altındaki alanın asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.113’te, yük boşaldığı andaki deformasyonun asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.114’te ve yük-deformasyon eğrisi altındaki toplam alanın asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.115’te verilmiştir.

Tablo 7.66. Uzun dönem yaşlandırılmış 1 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

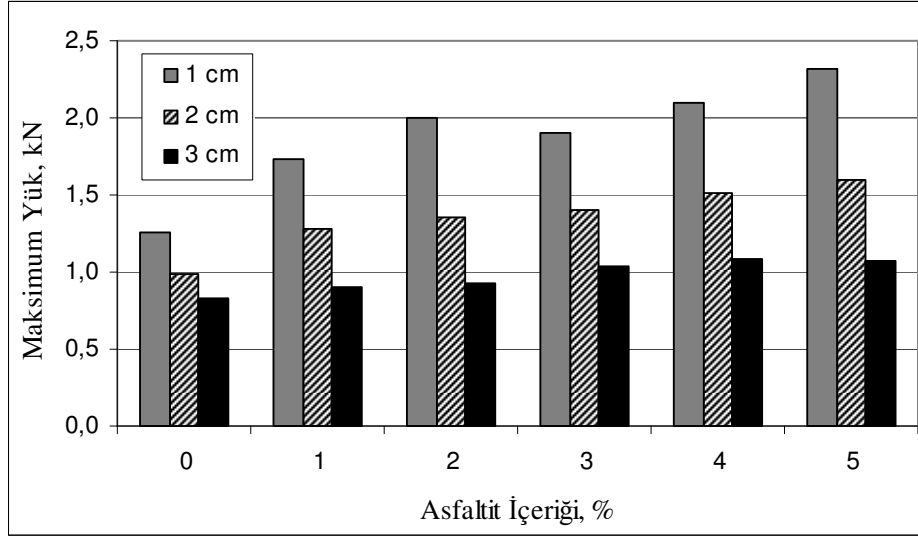
Asfaltit İçeriği (%)	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
0	1	51,6	52,0	51,8	51,8	147,87	1,030	93,22	61,27	1,9556	154,48
	2	51,9	51,8	51,6	51,8	103,87	0,834	56,48	65,63	1,9133	122,11
	3	51,2	51,5	51,8	51,5	131,68	0,509	40,43	38,63	1,3364	79,06
	Ort.					127,81	0,791	63,37	55,18	1,7351	118,55
1	1	51,1	50,6	50,6	50,8	176,28	0,636	68,05	41,96	1,3103	110,01
	2	51,2	51,7	51,4	51,4	174,75	0,831	84,56	38,58	1,4146	123,14
	3	51,6	51,4	51,9	51,6	177,51	0,864	94,20	42,19	1,4178	136,40
	Ort.					176,18	0,777	82,27	40,91	1,3809	123,18
2	1	49,3	49,7	49,7	49,6	193,39	0,746	83,64	31,60	1,1799	115,24
	2	50,1	50,1	50,6	50,3	214,77	0,802	98,23	44,76	1,5254	142,99
	3	50,5	50,5	51,1	50,7	205,18	0,759	89,05	45,78	1,3298	134,83
	Ort.					204,45	0,769	90,30	40,72	1,3450	131,02
3	1	52,0	51,8	51,6	51,8	192,17	0,955	107,10	58,71	2,1479	165,81
	2	50,9	51,2	50,9	51,0	193,39	0,694	77,98	39,79	1,1995	117,76
	3	49,9	49,7	49,8	49,8	197,06	0,720	83,12	36,80	1,2712	119,91
	Ort.					194,20	0,790	89,40	45,10	1,5395	134,49
4	1	49,5	49,8	49,7	49,7	217,82	0,766	94,82	45,74	1,5189	140,56
	2	49,9	49,7	49,8	49,8	205,91	0,753	90,34	30,36	1,2646	120,69
	3	50,3	50,6	50,1	50,3	216,00	0,743	89,15	41,05	1,4602	130,20
	Ort.					213,24	0,754	91,44	39,05	1,4146	130,49
5	1	51,4	51,5	50,9	51,3	238,91	0,861	126,02	28,81	1,1701	154,83
	2	52,4	52,3	52,6	52,4	237,60	0,750	98,28	44,94	1,4765	143,22
	3	51,8	51,3	51,6	51,6	232,07	0,691	93,87	44,36	1,2027	138,23
	Ort.					236,19	0,767	106,06	39,37	1,2831	145,43

Tablo 7.67. Uzun dönem yaşlandırılmış 2 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

Asfaltit İçeriği (%)	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
0	1	51,0	50,5	50,9	50,8	107,54	0,6812	43,67	45,24	1,7340	88,90
	2	50,7	51,1	51,0	50,9	90,74	0,5150	29,72	23,03	1,1310	52,74
	3	50,5	51,2	51,1	50,9	103,57	0,6975	43,67	42,99	1,5743	86,66
	Ort.					100,62	0,6312	39,02	37,08	1,4798	76,10
1	1	50,2	49,5	49,8	49,8	126,48	0,6291	46,57	50,16	1,7633	96,72
	2	49,7	50,2	49,9	49,9	132,59	0,6421	49,54	33,69	1,2940	83,23
	3	50,4	50,1	50,7	50,4	131,98	0,6291	47,79	31,29	1,2744	79,09
	Ort.					130,35	0,6334	47,97	38,38	1,4439	86,35
2	1	50,3	49,9	49,9	50,0	123,43	0,7953	56,32	31,23	1,3266	87,55
	2	49,4	50,3	49,6	49,8	145,12	0,6649	55,95	30,76	1,2386	86,71
	3	50,3	50,8	50,6	50,6	143,90	0,6421	52,93	26,38	1,1799	79,31
	Ort.					137,48	0,7008	55,07	29,46	1,2484	84,52
3	1	50,9	51,2	50,8	51,0	151,84	0,6160	53,78	29,64	1,3070	83,42
	2	51,0	50,4	51,0	50,8	134,12	0,6714	49,12	24,05	1,1310	73,17
	3	50,7	51,2	51,0	51,0	143,93	0,6617	55,15	28,32	1,2125	83,47
	Ort.					143,30	0,6497	52,68	27,34	1,2168	80,02
4	1	52,5	52,2	52,3	52,3	155,51	0,5345	49,56	29,48	1,0984	79,04
	2	52,2	52,7	52,7	52,5	152,45	0,5052	45,54	27,83	0,9485	73,37
	3	52,1	51,8	52,4	52,1	154,89	0,5280	48,05	25,66	1,0756	73,72
	Ort.					154,28	0,5226	47,72	27,66	1,0408	75,38
5	1	52,4	52,1	52,6	52,4	157,34	0,5378	49,55	23,65	1,0169	73,20
	2	51,9	52,1	52,2	52,1	167,73	0,5117	48,89	36,64	1,0593	85,53
	3	52,2	52,2	52,4	52,3	164,98	0,4759	42,36	30,42	0,9941	72,78
	Ort.					163,35	0,5085	46,93	30,24	1,0234	77,17

Tablo 7.68. Uzun dönem yaşlandırılmış 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

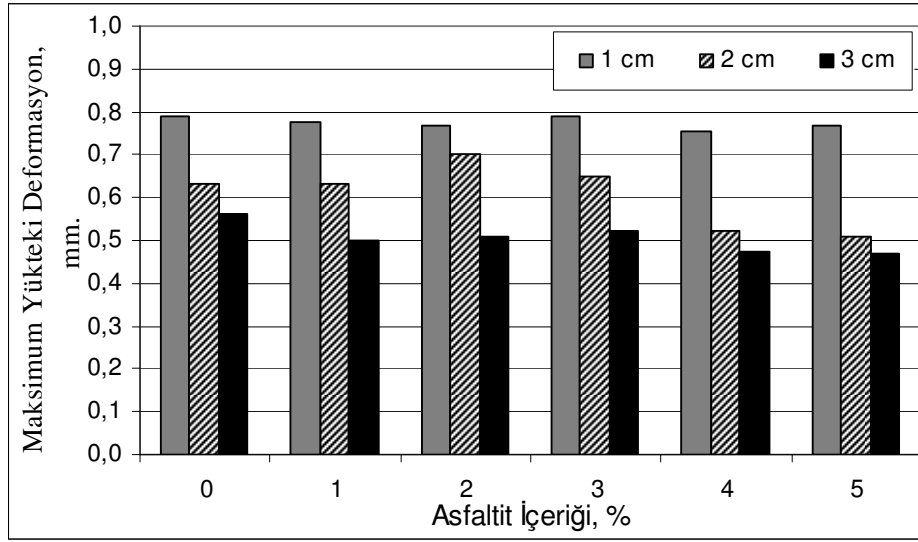
Asfaltit İçeriği (%)	Numune No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	Mak. Yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
0	1	52,3	52,3	52,3	52,3	84,02	0,5345	26,23	24,21	1,1734	50,44
	2	52,2	52,5	52,9	52,5	84,32	0,5932	29,61	26,36	1,2972	55,97
	3	52,2	51,8	52,3	52,1	83,71	0,5541	26,32	25,97	1,2516	52,29
	Ort.					84,02	0,5606	27,39	25,51	1,2407	52,90
1	1	51,8	51,4	51,9	51,7	99,60	0,5606	31,93	29,20	1,3168	61,13
	2	50,9	51,4	50,9	51,1	85,24	0,4498	20,62	17,73	0,9191	38,35
	3	51,1	51,3	51,6	51,3	90,43	0,4856	23,32	17,49	0,9191	40,81
	Ort.					91,76	0,4987	25,29	21,47	1,0517	46,76
2	1	51,6	51,9	52	51,8	96,54	0,5052	27,13	23,98	1,0593	51,11
	2	52	52,2	52,3	52,2	90,74	0,4889	23,51	18,53	0,9354	42,04
	3	51,9	52,2	52,4	52,2	95,93	0,5313	28,68	21,56	1,1440	50,23
	Ort.					94,40	0,5085	26,44	21,35	1,0462	47,79
3	1	51,8	51,1	51,2	51,4	96,24	0,5248	27,75	22,80	1,1506	50,55
	2	52,4	52,2	52,4	52,3	116,40	0,5508	34,38	28,77	1,2907	63,14
	3	51,6	51,8	52,2	51,9	106,20	0,4922	29,13	26,51	1,0463	55,64
	Ort.					106,28	0,5226	30,42	26,03	1,1625	56,45
4	1	52,2	51,7	52	52,0	113,65	0,4889	29,84	19,73	0,8963	49,57
	2	50,9	51,5	51,3	51,2	102,84	0,4009	22,50	23,19	1,0202	45,69
	3	51,3	51,7	51,2	51,4	115,79	0,5280	31,34	28,13	1,2614	59,47
	Ort.					110,76	0,4726	27,89	23,68	1,0593	51,58
5	1	51,6	52	51,9	51,8	109,92	0,4726	31,51	28,54	1,0560	60,05
	2	51,8	51,3	51,2	51,4	111,21	0,4856	32,24	27,09	1,0072	59,32
	3	50,8	51,1	51,3	51,1	108,64	0,4433	28,09	26,38	1,0104	54,47
	Ort.					109,92	0,4672	30,61	27,33	1,0245	57,95



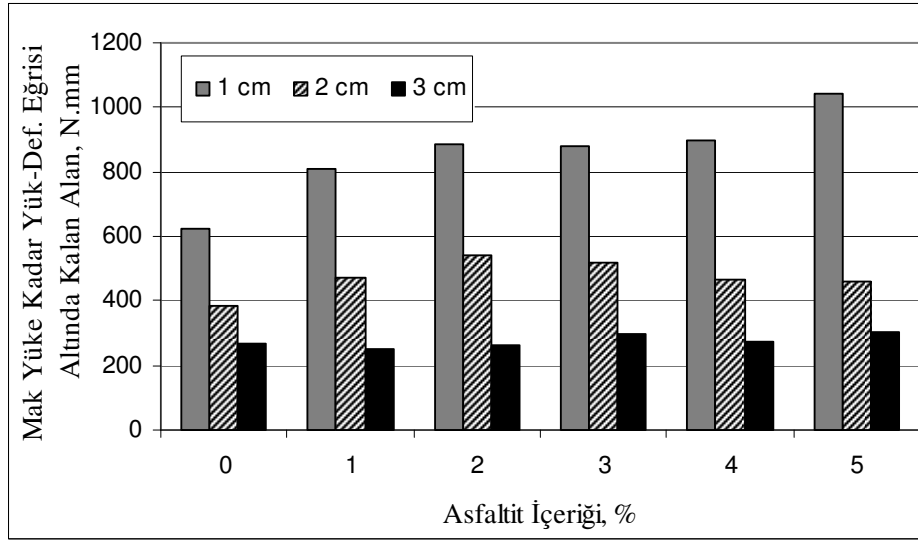
Şekil 7.110. UDY numunelerin maksimum yük - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.110’da görüldüğü üzere 2 ve 3 cm çentik derinliklerinde asfaltit içeriğinin artması ile elde edilen maksimum yük değerleri düzenli olarak artmıştır. 1 cm çentik derinliğinde ise %2 asfaltit içeren karışımın maksimum yük değeri %3 asfaltit içeren karışımın maksimum yük değerinden yüksek çıkmıştır. Bütün çentik derinliklerinde en düşük maksimum yük değeri saf karışımdan en yüksek maksimum yük değeri ise %5 asfaltit içeren karışımdan elde edilmiştir. 1 cm çentik derinliğinde %5 asfaltit kullanılması durumunda maksimum yük değeri saf karışıma göre %84,8 , 2 cm çentik derinliğinde %62,3 , 3 cm çentik derinliğinde ise %30,8 artış meydana gelmiştir. Çentik derinliği arttıkça karışımların maksimum yük değerleri azalmıştır.

Şekil 7.111’de görülen maksimum yükteki deformasyon değerleri incelendiğinde asfaltit içeriğinin artması ile genel olarak bu değerlerde azalma meydana geldiği görülmektedir. 1 ve 3 cm çentik derinliklerinde en yüksek maksimum yükteki deformasyon değerlerine saf karışım sahip iken 2 cm çentik derinliğinde bu değere %2 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük maksimum yükteki deformasyon değerine ise 1 cm çentik derinliğinde %4 asfaltit içeren karışımın 2 ve 3 cm çentik derinliklerinde ise %5 asfaltit içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Asfaltit içeriğinin artması ile maksimum yük değeri artmasına rağmen maksimum yükteki deformasyon değerlerinin azalması, asfaltit içeriğinin artması ile karışımların taşıyabileceği yük değeri artmasına rağmen daha gevrek bir kırılmanın meydana geleceğini ifade etmektedir.



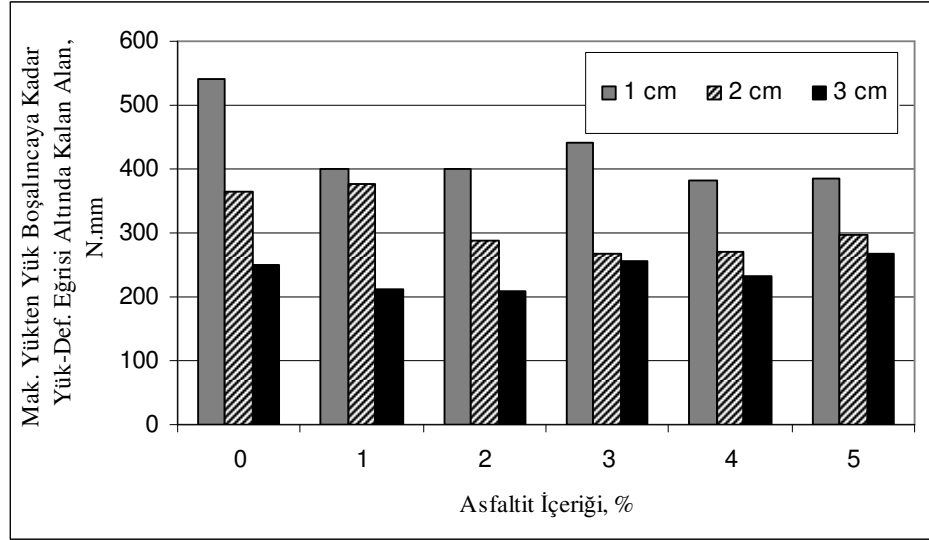
Şekil 7.111. UDY numunelerin maksimum yükteki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi



Şekil 7.112. UDY numunelerin maksimum yüke kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan - asfaltit içeriği ilişkisi

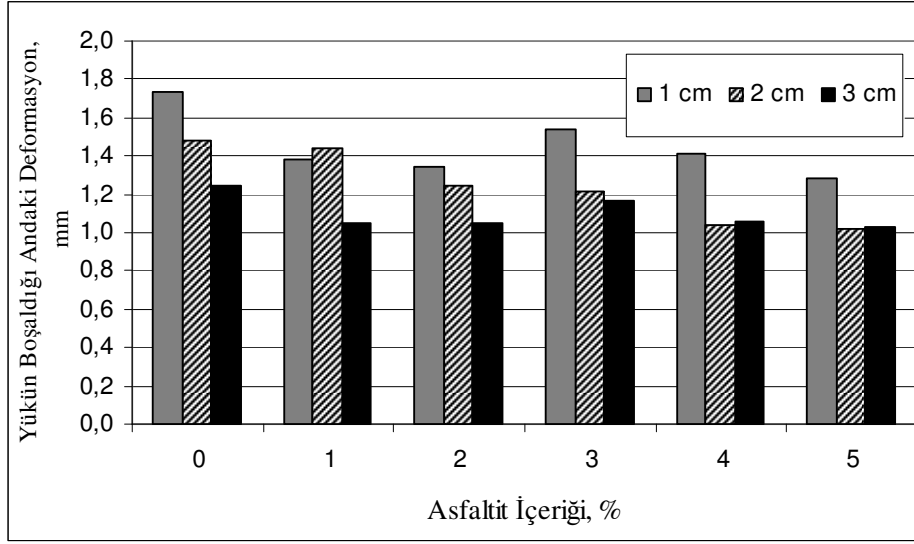
Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin maksimum yük değerine kadar yük–deformasyon eğrisi altında kalan alanın asfaltit içeriği ile değişimi (Şekil 7.112) incelendiğinde 1 cm çentik derinliğine sahip numunelerde en yüksek alan değerine %5 asfaltit içeren karışımın en düşük alan değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 2 cm çentik derinliğinde ise %2 asfaltit içeriğine kadar alan değerlerinin arttığı %2 asfaltit içeriğinden sonra ise alan değerlerinin düzenli olarak azaldığı belirlenmiştir. %2 asfaltit içeriğinden sonra alan değerleri azalmasına rağmen 2 cm çentik

derinliğinde en yüksek alan değerine %2 asfaltit içeren karışımın, en düşük alan değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 3 cm çentik derinliğinde ise en yüksek değere %5 asfaltit içeren karışımın daha sonra ise %3 asfaltit içeren karışımın, en düşük değere %1 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.



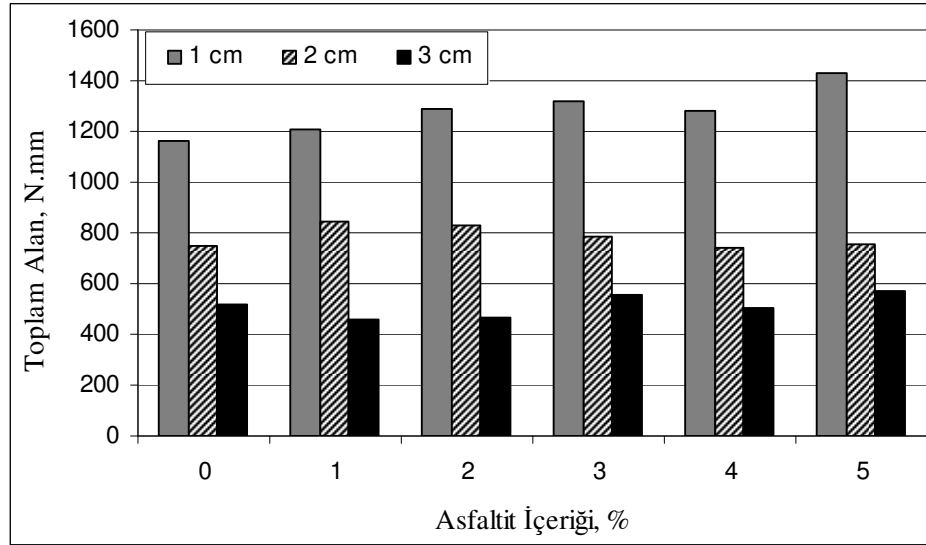
Şekil 7.113. UDY numunelerin maksimum yükten yük boşalıncaya kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.113’de görülen maksimum yükten sonraki alan değerleri incelendiğinde, 1 cm çentik derinliğine sahip numunelerde en yüksek alan değeri saf karışımında, 2 cm çentik derinliğine sahip numunelerde en yüksek alan değeri %1 asfaltit içeren karışımında, 3 cm çentik derinliğine sahip numunelerde ise en yüksek alan değeri %5 asfaltit içeren karışımında gözlenmiştir. En düşük alan değerleri ise 1 cm çentik derinliğine sahip numunelerde %5 asfaltit içeren karışımlarda, 2 cm çentik derinliğine sahip numunelerde %3 asfaltit içeren karışımlarda, 3 cm çentik derinliğine sahip numunelerde %2 asfaltit içeren karışımında gözlenmiştir. Bu durum kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi maksimum taşıma gücünden sonra depolanan enerji değerlerinin çentik derinliğine ve asfaltit içeriğine göre farklılık gösterdiğini ifade etmektedir.



Şekil 7.114. UDY numunelerin yükün boşaldığı andaki deformasyon - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.114 incelendiğinde bütün çentik yüksekliklerinde asfaltit içeriğinin artması ile deformasyon miktarlarının azaldığı, en yüksek deformasyon değerine saf karışımın en düşük deformasyon değerine ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.115. UDY numunelerin yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan - asfaltit içeriği ilişkisi

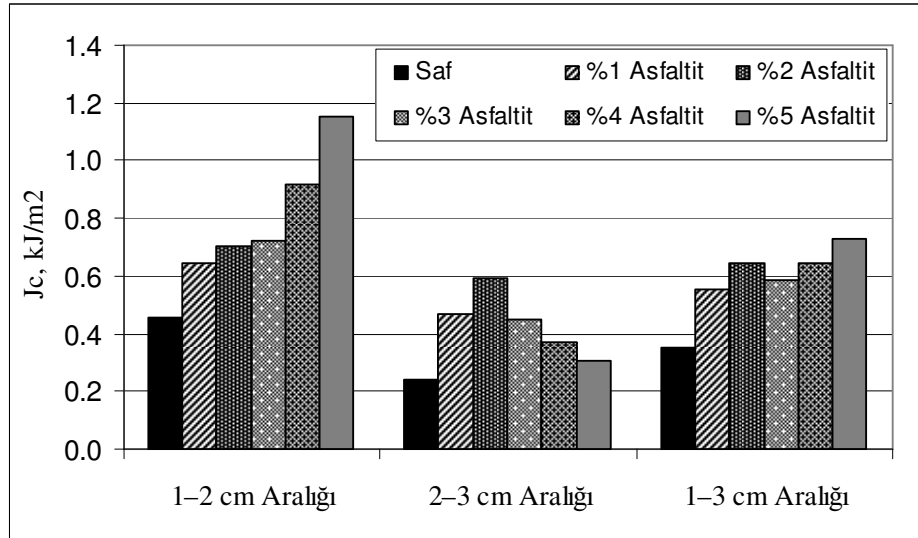
Yük–deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değerleri (Şekil 7.115) incelendiğinde en yüksek toplam alan değerinin 1 cm çentik yüksekliğinde %5 asfaltit

içeriğine sahip karışımlarda, 2 cm çentik yüksekliğinde %1 asfaltit içeren karışımlarda, 3 cm çentik yüksekliğinde ise %5 asfaltit içeriğine sahip karışımlarda olduğu belirlenmiştir. En düşük toplam alan değerinin ise 1 cm çentik yüksekliğinde saf karışımlarda, 2 cm çentik yüksekliğinde %4 asfaltit içeren karışımlarda daha sonra ise saf karışımda, 3 cm çentik yüksekliğinde ise %1 asfaltit içeriğine sahip karışımlarda olduğu belirlenmiştir.

Formül 6.28 yardımıyla belirlenen uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri Tablo 7.69’da ve Şekil 7.116’da verilmiştir.

Tablo 7.69. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin J_c değerleri

Karışım Türü	1–2 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)	2–3 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)	1–3 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)
Saf	0,458	0,243	0,351
%1 asfaltit	0,645	0,466	0,556
%2 asfaltit	0,700	0,591	0,646
%3 asfaltit	0,720	0,449	0,584
%4 asfaltit	0,919	0,371	0,645
%5 asfaltit	1,152	0,304	0,728



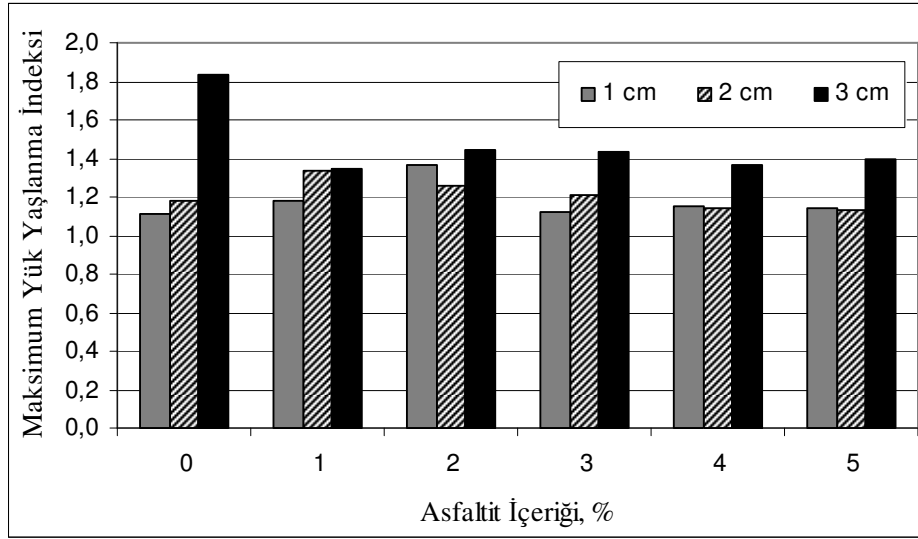
Şekil 7.116. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin J_c değerleri

Şekil 7.116 incelendiğinde 1-2 cm aralığında en yüksek J_c değerine %5 asfaltit içeren karışımın (saf karışımın J_c değerinin 2,51 katı) en düşük J_c değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 2-3 cm aralığı incelendiğinde ise en düşük J_c değerine sahip karışımın saf karışım olduğu, %2 asfaltit içeriğine kadar J_c değerinin arttığı daha sonra azaldığı belirlenmiştir. 1-3 cm çentik yüksekliği aralığı incelendiğinde ise en düşük J_c

değerine sahip karışımın katkısız karışım olduğu en yüksek karışımın ise %5 asfaltit içeren karışım olduğu belirlenmiştir. 1-3 cm çentik yüksekliği aralığında %5 asfaltit içeren karışımın J_c değeri saf karışıma göre %107,5 yüksek çıkmıştır.

Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri incelendiğinde bütün karışımların 1-2 cm çentik yüksekliği arasındaki J_c değerlerinin 2-3 cm çentik yükseklikleri arasındaki J_c değerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum uzun dönem yaşlanmadan sonra bütün karışımlarda 1-2 cm aralığında çatlak ilerleyişine karşı dayanımın 2-3 cm aralığındaki çatlak ilerleyişine karşı dayanıma göre daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. 1-3 cm çatlak aralığı incelendiğinde ise asfaltit içeriğinin artması ile J_c değerinde artış sağlanmıştır. Bu durum kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde olduğu gibi asfaltit içeriğinin artması ile bitümlü sıcak karışım numunelerinde çatlak ilerleyişine karşı dayanımın artacağını ifade etmektedir.

Elastik-plastik kırılma mekaniği yaklaşımına uygun olarak uygulanan J-integral deneylerinden elde edilen verilerin yaşlanma indeksi değerleri uzun dönem yaşlandırılmış numunelerden elde edilen değerlerin kısa dönem yaşlandırılmış numunelerden elde edilen değerlere oranlanması ile elde edilmiştir. Maksimum yükün yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.117’de, maksimum yüke ulaşıldığı andaki deformasyon miktarlarının yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.118’de, maksimum yüke kadarki yük-deformasyon eğrisi altındaki alanın yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.119’da, maksimum yükten yük boşalınca kadarki yük-deformasyon eğrisi altındaki alanın yaşlanma indeksinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.120’de, yük boşaldığı andaki deformasyonun yaşlanma indeksinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.121’de ve yük-deformasyon eğrisi altındaki toplam alanın yaşlanma indeksinin asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 7.122’de verilmiştir.

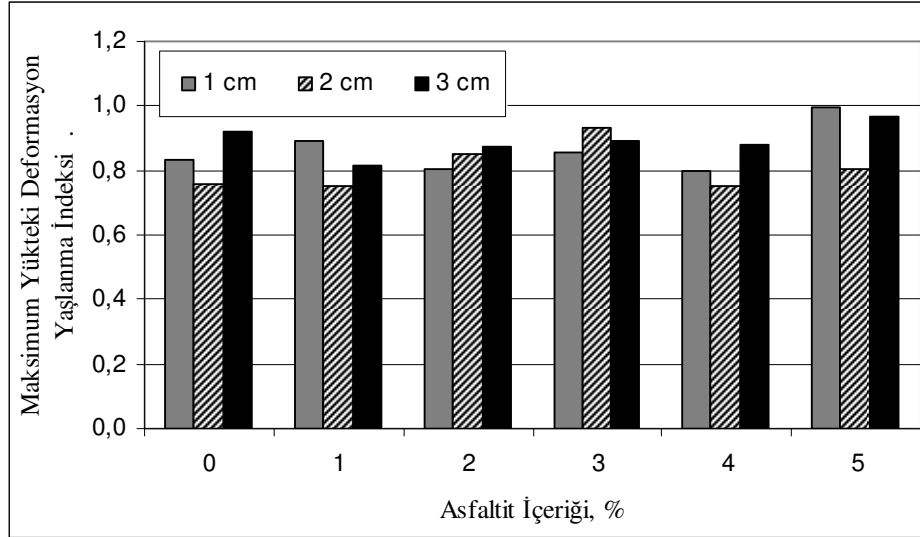


Şekil 7.117. Maksimum yük yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi

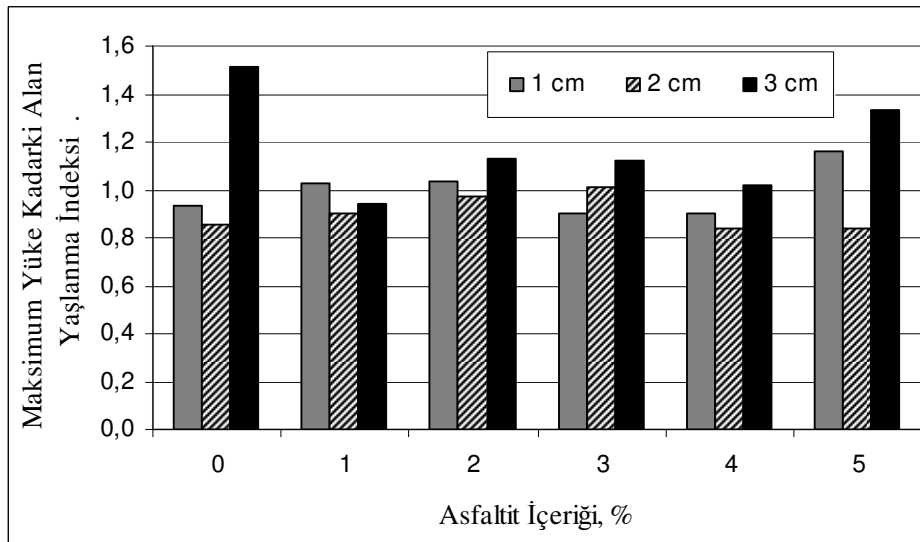
Maksimum yük yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi (Şekil 7.117) incelendiğinde bütün yaşlanma indeksi değerlerinin 1'in üzerinde olduğu dolayısıyla uzun dönem yaşlanmadan dolayı karışımların hepsinde bütün çentik yüksekliklerinde maksimum yük değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Şekil incelendiğinde en yüksek yaşlanma indeksi değerlerinin 3 cm çentik derinliklerinde olduğu görülmektedir. 1 cm çentik derinliğinde en yüksek yaşlanma indeksi değerine %2 asfaltit içeren karışımın, 2 cm çentik derinliğinde %1 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük yaşlanma indeksi değerlerine ise 1 cm çentik derinliğinde %3 asfaltit içeren karışımın, 2 cm çentik derinliğinde %5 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise %1 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Maksimum yükteki deformasyon değerlerinin yaşlanma indekslerinin asfaltit içeriği ile değişimleri (Şekil 7.118) incelendiğinde, bütün karışımların uzun dönem yaşlanmadan dolayı maksimum yükteki deformasyon değerlerinin azaldığı bu nedenle bütün yaşlanma indeksi değerlerinin 1'den küçük olduğu belirlenmiştir. 1 cm çentik derinliğinde en yüksek yaşlanma indeksi değerine %5 asfaltit içeren karışımın, 2 cm çentik derinliğinde %3 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük yaşlanma indeksi değerlerine ise 1 ve 2 cm çentik derinliğinde %4 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise %1 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. %3 ve %5 asfaltit içeren karışımların deformasyon yaşlanma indeksi değerlerinin yüksek olması, uzun dönem yaşlanmadan sonra

deformasyon değerlerinin kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin deformasyon değerlerine yakın olması kadar kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin deformasyon değerlerinin düşük olmasından da kaynaklanmıştır.



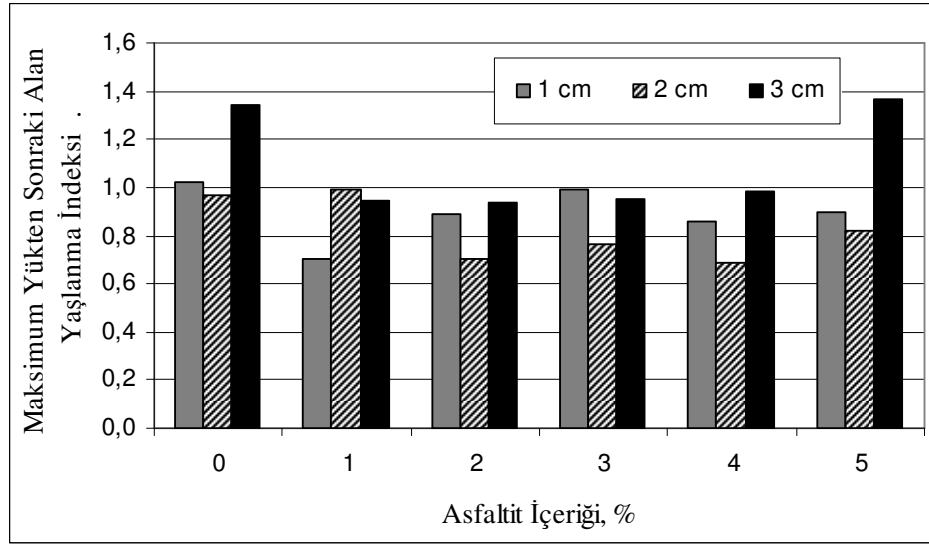
Şekil 7.118. Maksimum yükteki deformasyon yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi



Şekil 7.119. Maksimum yüke kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi

Maksimum yüke kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan değerlerinin yaşlanma indekslerinin asfaltit içeriği ile değişimleri (Şekil 7.119) incelendiğinde bazı değerlerin

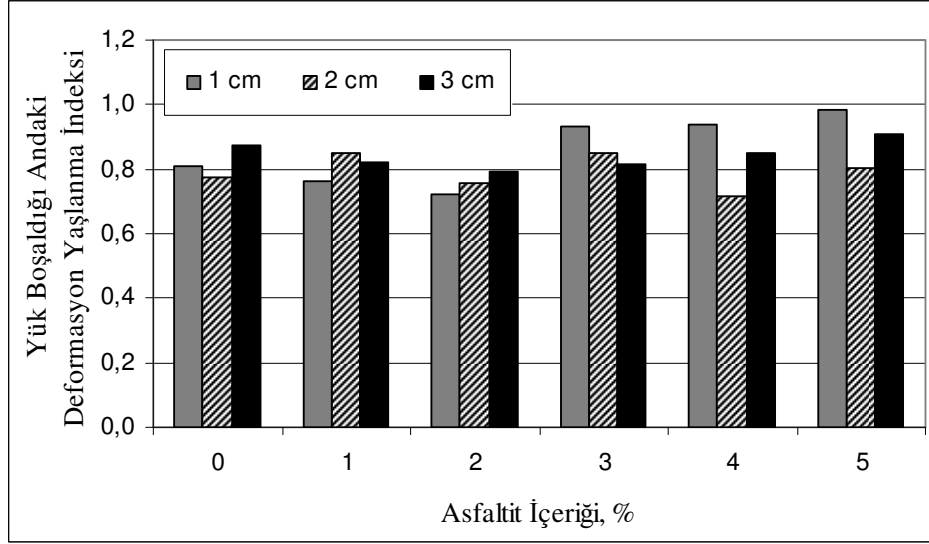
1'in altında bazı değerlerin ise 1'in üzerinde olduğu belirlenmiştir. 1 cm çentik derinliğinde en yüksek yaşlanma indeksi değerine %5 asfaltit içeren karışımın, 2 cm çentik derinliğinde %3 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük yaşlanma indeksi değerlerine ise 1 cm çentik derinliğinde %3 asfaltit içeren karışımın ve 2 cm çentik derinliğinde %4 ve %5 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise %1 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.120. Maksimum yükten sonra yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi

Maksimum yükten yük boşalıncaya kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan değerlerinin yaşlanma indekslerinin asfaltit içeriği ile değişimleri (Şekil 7.120) incelendiğinde maksimum yük değerine kadarki alan yaşlanma indekslerinde olduğu gibi bazı değerlerin 1'in altında bazı değerlerin ise 1'in üzerinde olduğu belirlenmiştir. Yaşlanma indeksi değerlerinin 1'in altında olması numunede depolanabilen enerjinin azaldığını, 1'in üzerinde olması ise enerjinin arttığını göstermektedir. 1 ve 2 cm çentik derinliklerinde çoğu yaşlanma indeksi değerinin 1'in altında olması, yük değeri artmasına rağmen bu çentik derinliklerinde deformasyon değerlerinin azalmasından kaynaklanmıştır. 1 cm çentik derinliğinde en yüksek yaşlanma indeksi değerine saf karışımın, 2 cm çentik derinliğinde %1 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük yaşlanma indeksi değerlerine ise 1 cm çentik derinliğinde

%1 asfaltit içeren karışımın ve 2 cm çentik derinliğinde %4 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik derinliğinde ise %1 ve %2 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

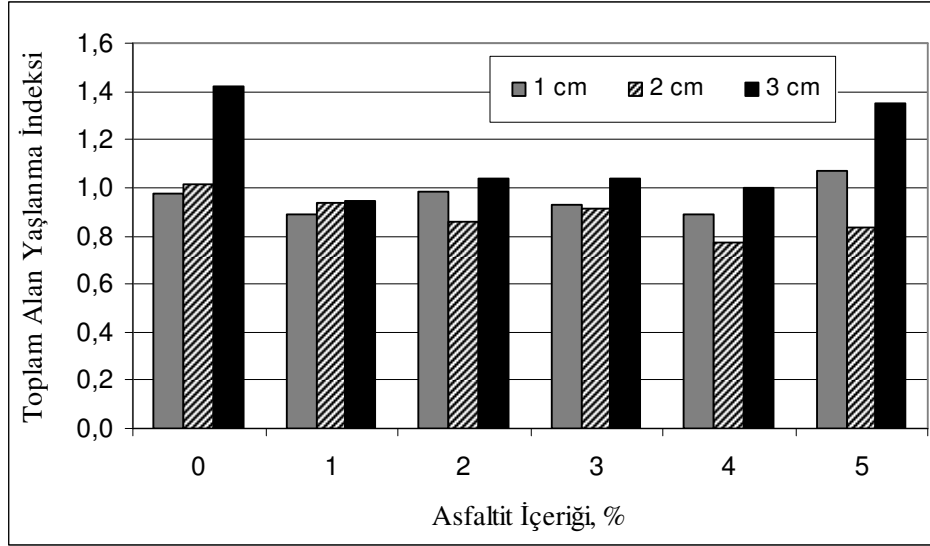


Şekil 7.121. Yük boşaldığı andaki deformasyon yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi

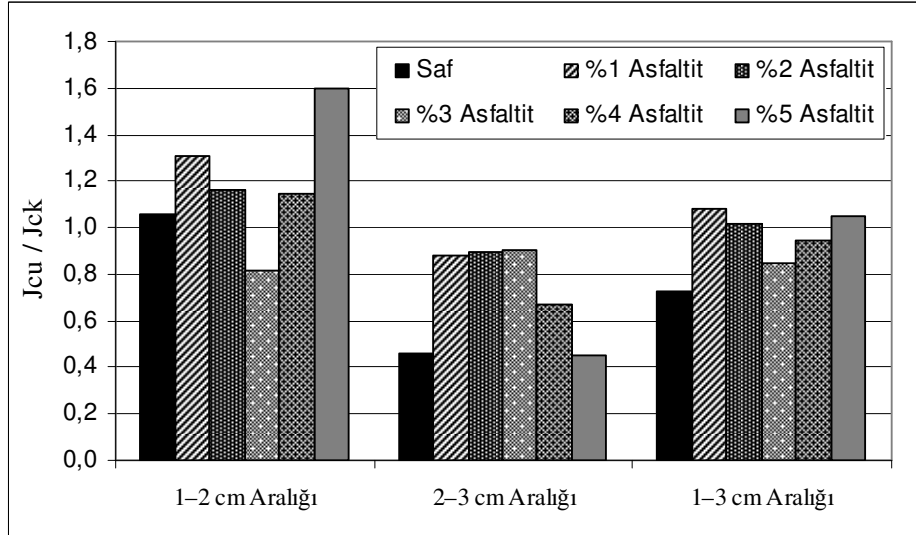
Şekil 7.121’de görülen yük boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin yaşlanma indeksleri incelendiğinde bütün değerlerin 1’den küçük olduğu dolayısıyla uzun dönem yaşlanmadan dolayı yük boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin uzun dönem yaşlanma nedeniyle azaldığı belirlenmiştir. Asfaltit içeriğinin artması ile deformasyon değerleri azalmasına rağmen en yüksek yaşlanma indeksi değerlerine %5 asfaltit içeren karışımın sahip olması, kısa dönem yaşlanmış numunelerin deformasyon değerlerinin düşük olmasından kaynaklanmıştır. 1 ve 3 cm çentik derinliklerinde en yüksek indeks değerine %5 asfaltit içeren karışımın, 2 cm çentik derinliğinde ise %3 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük yaşlanma indeksi değerlerine ise 1 ve 3 cm çentik derinliğinde %2 asfaltit içeren karışımın, 2 cm çentik derinliğinde ise %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 7.122’de görülen toplam alan yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi incelendiğinde diğer alan yaşlanma indeksi değerlerinde olduğu gibi çentik yüksekliğinin veya asfaltit içeriğinin artması ile düzensiz bir değişim olduğu belirlenmiştir. 3 cm çentik derinliğinde %1 asfaltit içeren karışım dışında yaşlanma indeksi değerlerinin 1’den büyük olması yaşlanmadan sonra yük değerlerindeki artışın diğer çentik

derinliklerinde meydana gelen artıştan daha fazla olmasından kaynaklanmıştır. f_{Kritik} enerji salıverme hızı (J_c) yaşlanma indeksi değerleri diğer yaşlanma indeksi değerlerinde olduğu gibi yaşlanmadan sonraki değerlerin yaşlanmadan önceki değerlere oranlanması ile elde edilmiştir.



Şekil 7.122. Toplam alan yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi



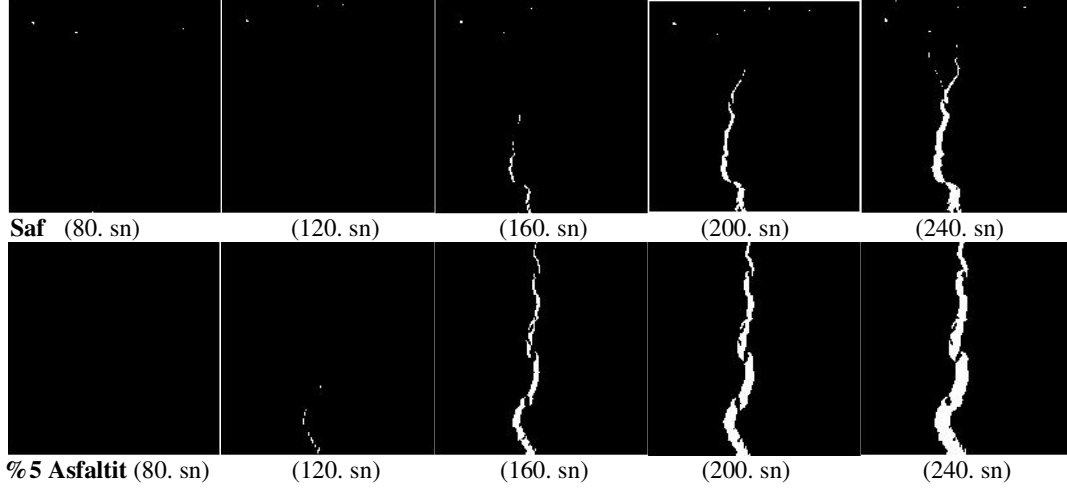
Şekil 7.123. Kritik enerji salıverme hızı yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

Şekil 7.123'te görülen farklı çentik yükseklikleri arasındaki J_c yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimi incelendiğinde 1-2 cm çentik yüksekliği aralığında

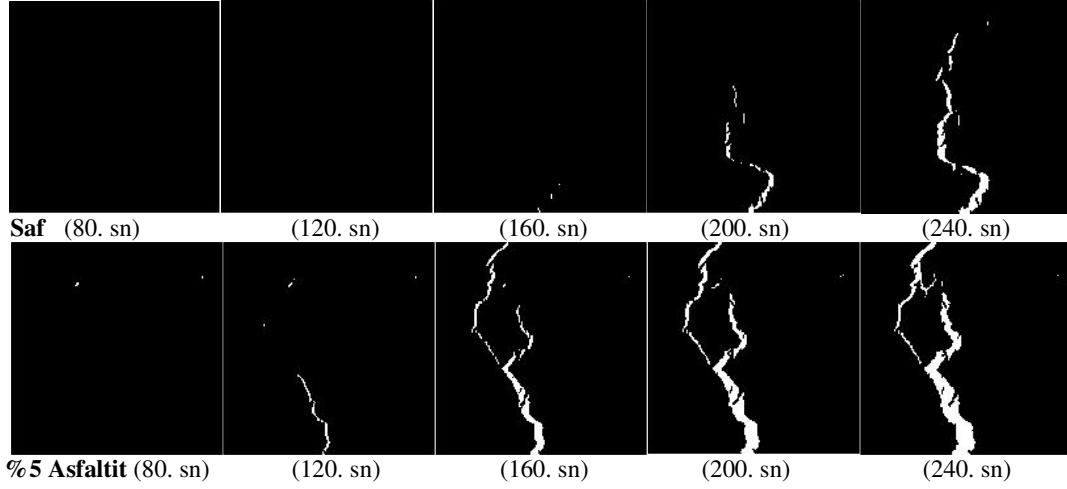
%3 asfaltit içeriğine kadar değerlerin azaldığı daha sonra ise arttığı belirlenmiştir. 2-3 cm çentik yüksekliği aralığında ise %3 asfaltit içeriğine kadar J_c yaşlanma indeksi değerlerinin arttığı daha sonra ise azaldığı belirlenmiştir. 1-2 cm aralığında %3 asfaltit içeriği dışında bütün karışımların yaşlanma indeksi değerleri 1'in üzerinde çıkmıştır. 2-3 cm çentik yükseklikleri arasında ise bütün karışımların yaşlanma indeksi değerleri 1'den düşük çıkmıştır. Bu durum çatlak uzunluğu az iken (1-2 cm aralığı) yaşlanmadan ötürü çatlak ilerleyişine karşı dayanımın arttığını, çatlak uzunluğu 2-3 cm aralığında olduğunda ise yaşlanmadan ötürü çatlak ilerleyişine karşı dayanımın azaldığını göstermektedir. 1-3 cm aralığı çatlak ilerleyişi yaşlanma indeksi değerleri incelendiğinde en düşük değere saf karışımının sahip olması yaşlanmadan en fazla etkilenen karışımın saf karışım olduğunu göstermektedir.

7.10.3. Çatlak İlerleyişinin Görüntü Analizi İle Tespit Edilmesi

Tez çalışmasında J-integral deneylerinde numunelerde meydana oluşan çatlak ilerleyişi kamera ile görüntülenmiştir. Deneye tabi tutulacak numunelerin yüzeyi beyaz boya ile dayanıma etki etmeyecek şekilde ince bir biçimde boyanmıştır. Böylelikle çatlak ilerleyişinin kolaylıkla görüntülenmesi sağlanmıştır. Bütün numuneler aynı noktadan, aynı uzaklıktan ve videonun özellikleri aynı olacak şekilde görüntülenmiştir. Hata miktarını azaltmak amacıyla 640x320 piksel olan resimler, kesilerek 240x180 piksellik resimlere dönüştürülmüştür. Kısa dönem yaşlandırılmış numuneler 5 dakika, uzun dönem yaşlandırılmış numuneler ise 4 dakika süresince kaydedilmiştir. MATLAB Video Toolbox kullanılarak videolar fotoğraf karelerine ayrılmış, deney başladıktan sonraki 80. saniyeden sonra sürenin sonuna kadar rasgele 81 resim seçilerek sayısal görüntü işleme prosedürü uygulanmıştır. Prosedürde siyah noktalar 0 olarak beyaz noktalar ise 1 olarak etiketlenmiştir. Beyaz noktaların toplamından çatlak alanı piksel olarak belirlenmektedir. Kısa dönem yaşlandırılmış 1 cm yüksekliğinde çentik içeren saf ve %5 asfaltit içeren karışımların 80., 120., 160., 200. ve 240. saniyelerdeki görüntüleri Şekil 7.124'te, uzun dönem yaşlandırılmış saf ve %5 asfaltit içeren karışımların 80., 120., 160., 200. ve 240. saniyelerdeki görüntüleri ise Şekil 7.125'te örnek olarak verilmiştir.

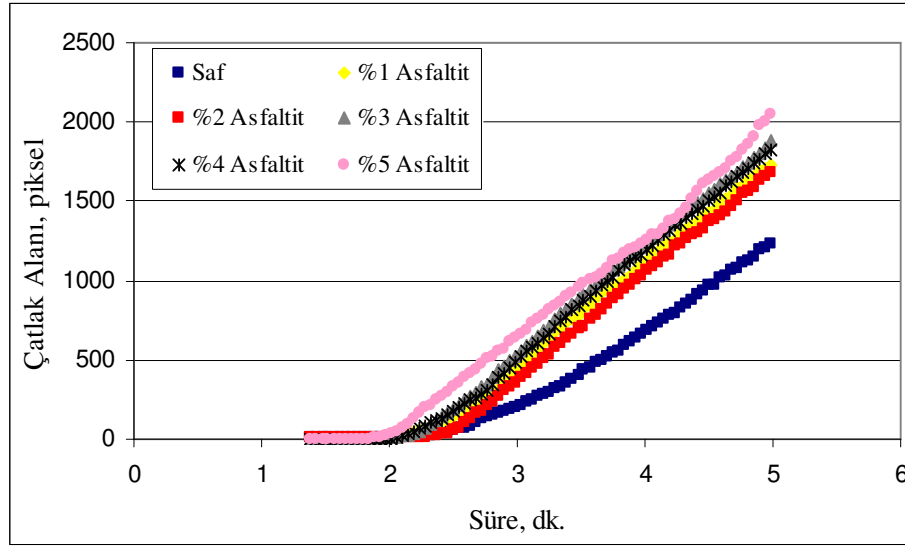


Şekil 7.124. KDY ve 1 cm çentik içeren numunelerin farklı sürelerdeki çatlak görüntüleri



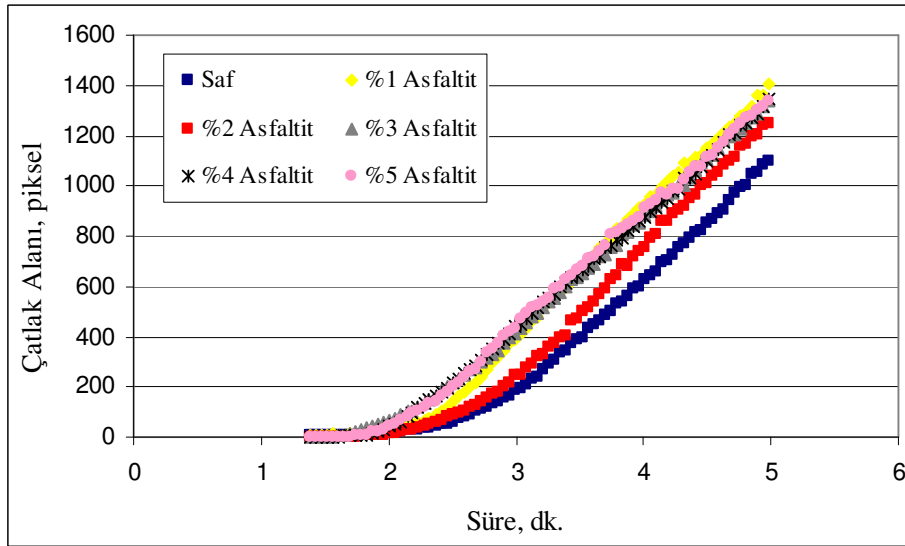
Şekil 7.125. UDY ve 1 cm çentik içeren numunelerin farklı sürelerdeki çatlak görüntüleri

Kısa dönem yaşlandırılmış, 1 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerin çatlak alanının zamanla değişimi Şekil 7.126’da, 2 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerin çatlak alanının zamanla değişimi Şekil 7.127’de ve 3 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerin çatlak alanının zamanla değişimi Şekil 7.128’de verilmiştir. Çatlak alanları, üç numuneden elde edilen değerlerin ortalamasından hesaplanmıştır.



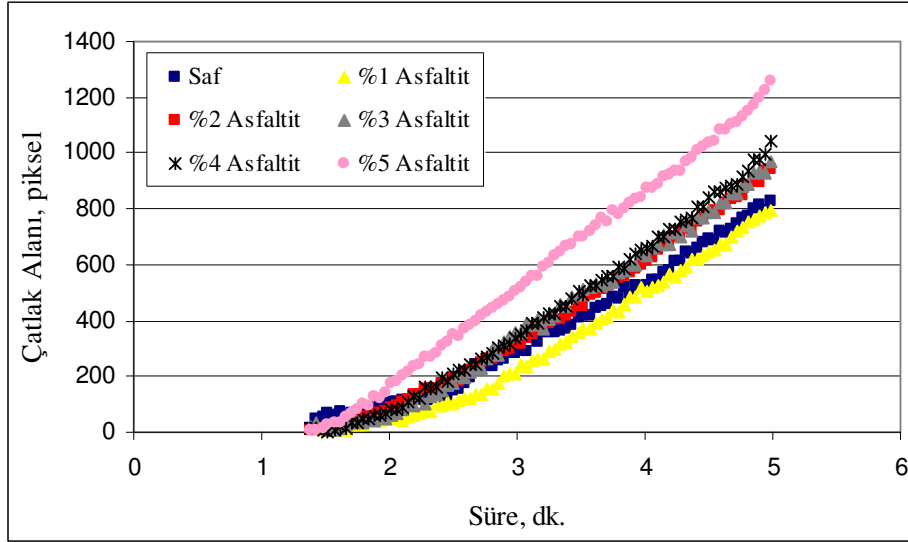
Şekil 7.126. 1 cm. çentik yüksekliğine sahip KDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi

Şekil 7.126’da görüldüğü üzere bütün numunelerde çatlak ilerlemeye başladıktan sonra çatlak alanı zamanla doğru orantılı olarak artmıştır. 1 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerde genel olarak 2. dakikadan itibaren çatlak ilerlemeye başlamıştır. Saf ve %5 asfaltit içeren karışımlar dışındaki bütün karışımlarda zamanla çatlak ilerleyişi benzer değişim göstermiştir. Zamanla çatlak ilerleyişi en az saf karışımda olurken, en fazla %5 asfaltit içeren karışımda olmuştur.



Şekil 7.127. 2 cm. çentik yüksekliğine sahip KDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi

Şekil 7.127’de görüldüğü üzere yaklaşık 100. saniyeden itibaren karışımlarda çatlak alanı artışı başlamıştır. Saf ve %2 asfaltit içeren karışımlar dışında bütün karışımlarda benzer zamanla çatlak alanı değişimi gözlenmiştir. Zamanla çatlak alanında en az artış saf karışımda olmuştur.



Şekil 7.128. 3 cm. çentik yüksekliğine sahip KDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi

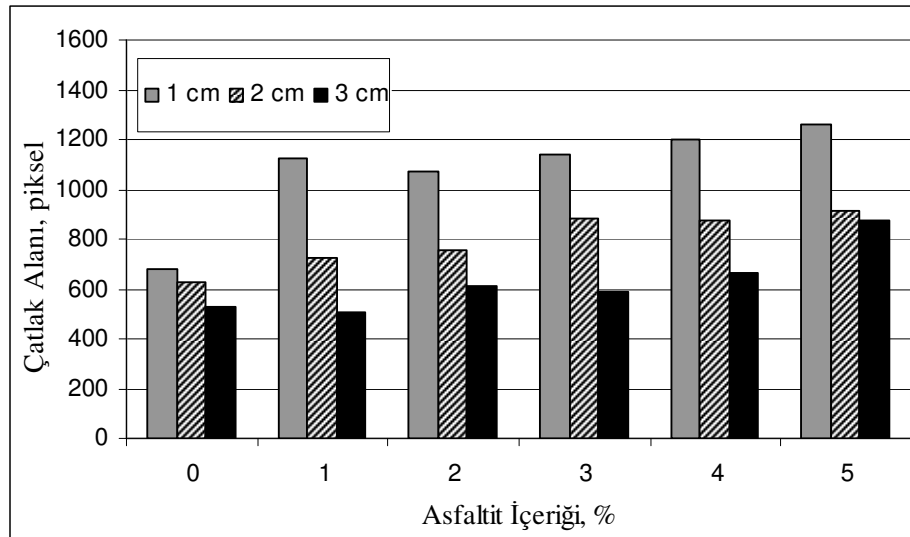
Şekil 7.128’de görüldüğü üzere 80–90. saniyeden itibaren çatlak alanı artmaya başlamıştır. %5 asfaltit içeren karışım dışındaki bütün karışımlarda zamanla çatlak alanı benzer şekilde değişmiştir. Zamanla çatlak alanındaki en fazla artış %5 asfaltit içeren karışımlarda olurken en az artış saf ve %1 asfaltit içeren karışımlarda olmuştur.

Çalışmada, maksimum yük anındaki çatlak alanları karşılaştırılmak istenmiştir. Bütün karışımlarda maksimum yük değerine ilk 1–2 dakika içerisinde ulaşılmıştır. Karışımlarda ilk 1–2 dakika içerisinde çatlak ilerlemesi yeni başladığından bu karşılaştırma yapılamamıştır. Bu nedenle yük boşaldığı andaki çatlak alanları karşılaştırılmıştır. Ayrıca uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde 4 dakika süresince görüntü alındığından bütün karışımlarda 4. dakikadaki çatlak alanı değerleri karşılaştırılmıştır. Karışımların yük boşaldığında, 4. ve 5. dakika sonundaki çatlak alanları Tablo 7.70’de verilmiştir.

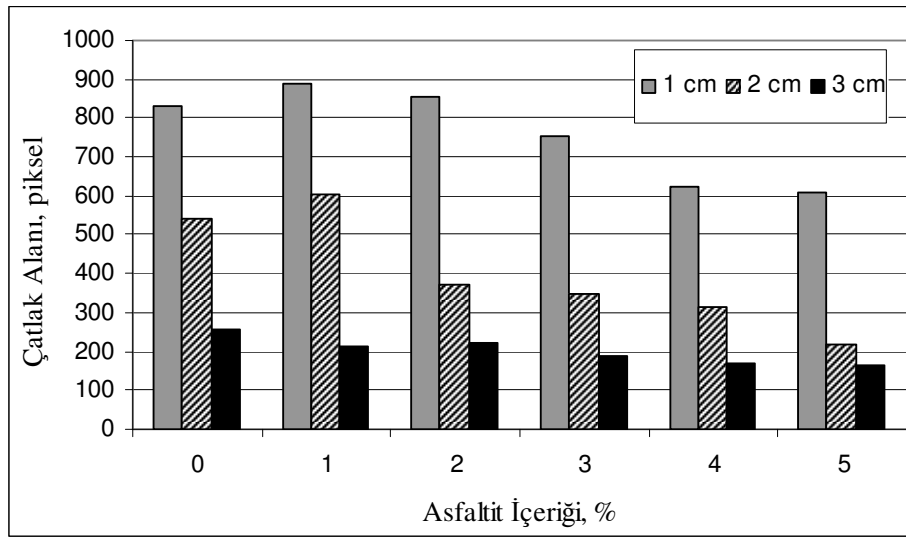
Tablo 7.70. Karışımların farklı zamanlardaki çatlak alanları

Asfaltit içeriği, %	Çentik yüksekliği, cm	Yük boşaldığı andaki deformasyon, mm	Yük boşaldığı andaki çatlak alanı	4 dakika sonunda çatlak alanı	5 dakika sonunda çatlak alanı
0	1	2,1360	831	683	1235
	2	1,9143	540	625	1097
	3	1,4244	257	528	826
1	1	1,8079	887	1124	1735
	2	1,6981	602	928	1406
	3	1,2820	112	502	797
2	1	1,8578	855	1071	1687
	2	1,6525	371	757	1250
	3	1,3179	224	611	944
3	1	1,6569	756	1240	1880
	2	1,4298	348	881	1342
	3	1,4233	129	487	780
4	1	1,3045	222	1201	1829
	2	1,4548	392	877	1344
	3	1,1267	67	661	792
5	1	1,5113	669	1257	2047
	2	1,2766	216	910	1337
	3	1,2462	206	873	1046

4. dakika sonundaki çatlak alanlarının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.129’da, yük boşaldığı andaki çatlak alanlarının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.130’da görülmektedir.

**Şekil 7.129.** 4. dakika sonundaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

Şekil 7.129’da görüldüğü üzere bütün çatlak yüksekliklerinde asfaltit içeriği arttıkça çatlak alanları artmıştır. Bu durum asfaltit içeriği arttıkça BSK numunelerinin daha kırılgan bir hal aldığını göstermektedir. Bütün çentik yüksekliklerinde en yüksek çatlak alanı değerine %5 asfaltit içeren karışımın, en düşük çatlak alanı değerine ise 1 ve 2 cm çentik yüksekliklerinde saf karışımın, 3 cm çentik yüksekliğinde ise saf ve %1 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 1 cm çentik yüksekliğinde çatlak alanında saf karışıma göre %84, 2 cm çentik yüksekliğinde %46, 3 cm çentik yüksekliğinde ise %65 artış meydana gelmiştir.

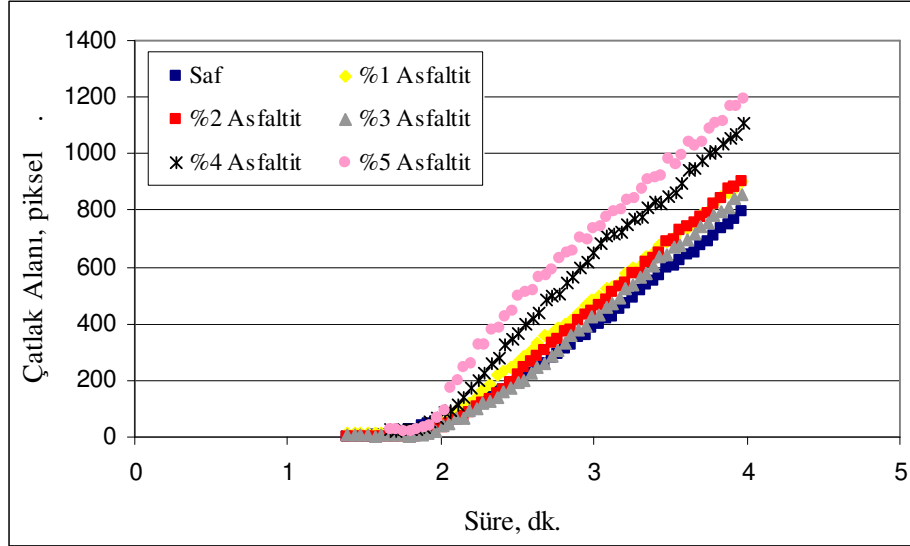


Şekil 7.130. Yük boşaldığı andaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

Şekil 7.130 incelendiğinde bütün çentik derinliklerinde asfaltit içeriği arttıkça yük boşaldığı andaki çatlak alanları azalmıştır. Bu durum, asfaltit içeriği arttıkça yük boşalma sürelerinin azalmasından kaynaklanmıştır. Bütün çentik yüksekliklerinde en düşük yük boşaldığı andaki çatlak alanı değerlerine %5 asfaltit içeren karışımın sahip olduğunu göstermektedir. En yüksek alan değerlerine ise 1 ve 2 cm çentik yüksekliklerinde %1 asfaltit içeren karışımın daha sonra ise saf karışımın, 3 cm çentik yüksekliğinde ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Uzun dönem yaşlandırılmış, 1 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerin çatlak alanının zamanla değişimi Şekil 7.131’de, 2 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerin çatlak alanının zamanla değişimi Şekil 7.132’de ve 3 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerin

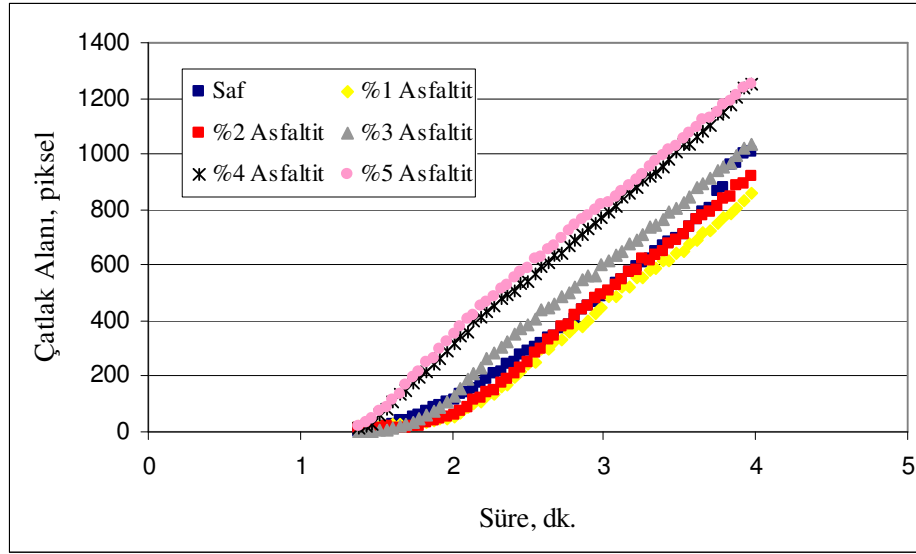
çatlak alanının zamanla değişimi Şekil 7.133'te verilmiştir. Çatlak alanları, üç numuneden elde edilen değerlerin ortalamasından hesaplanmıştır.



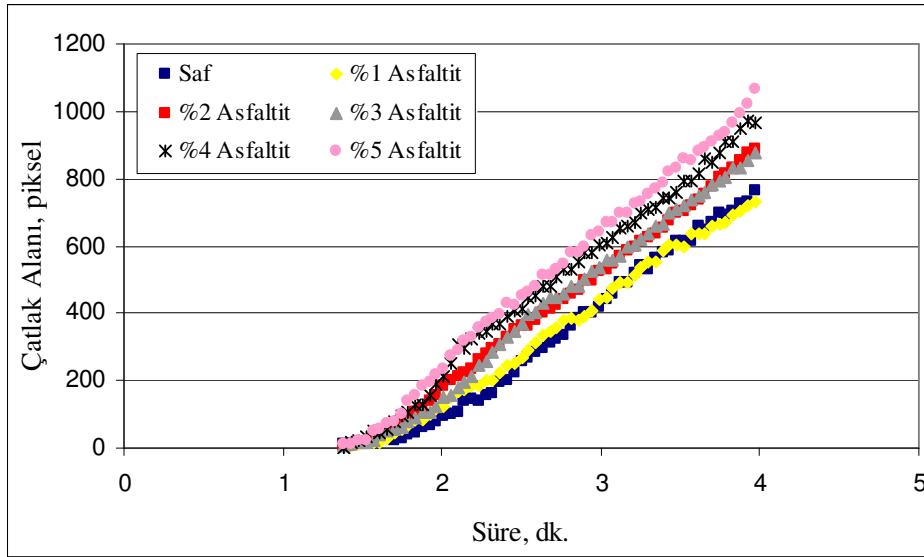
Şekil 7.131. 1 cm. çentik yüksekliğine sahip UDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi

Şekil 7.131'de görüldüğü üzere bütün numunelerde çatlak ilerlemeye başladıktan sonra çatlak alanı zamanla doğru orantılı olarak artmıştır. 1 cm çentik yüksekliğine sahip numunelerde genel olarak 100. saniyeden itibaren çatlak ilerlemeye başlamıştır. %4 ve %5 asfaltit içeren karışım dışındaki bütün karışımlarda zamanla çatlak ilerleyişi benzer değişim göstermiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi zamanla çatlak ilerleyişi en az saf karışımında olurken, en fazla çatlak oluşumu %5 asfaltit içeren karışımında olmuştur.

Şekil 7.132'de görüldüğü üzere yaklaşık 80–90. saniyeden itibaren karışımlarda çatlak alanı artışı başlamıştır. 1 cm çentik yüksekliğinde olduğu gibi 2 cm çentik yüksekliğinde de %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlar dışında bütün karışımlarda zamanla çatlak alanı artışında benzer değişim gözlenmiştir. Zamanla çatlak alanında en az artış saf, %1 ve %2 asfaltit içeren karışımlarda olmuştur. Zamanla çatlak alanında en fazla artış ise %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlarda olmuştur.



Şekil 7.132. 2 cm. çentik yüksekliğine sahip UDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi



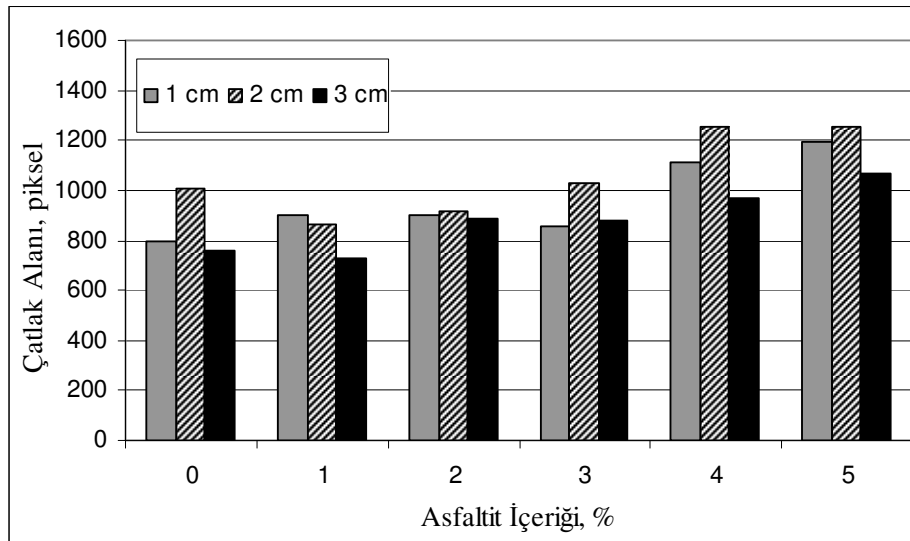
Şekil 7.133. 3 cm. çentik yüksekliğine sahip UDY numunelerde zamanla çatlak alanının değişimi

Şekil 7.133'te görüldüğü üzere 80. saniyeden itibaren çatlak alanı artmaya başlamıştır. Saf ve %1 asfaltit içeren karışımların, %2 ve %3 asfaltit içeren karışımların, %4 ve %5 asfaltit içeren karışımların zamanla çatlak alanı değişimi benzer değişim göstermiştir. Zamanla çatlak alanındaki en fazla artış %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlarda olurken en az artış saf ve %1 asfaltit içeren karışımlarda olmuştur. Karışımların yük boşaldığında ve 4. dakika sonundaki çatlak alanları Tablo 7.71'de verilmiştir.

Tablo 7.71. UDY Karışımların farklı zamanlardaki çatlak alanları

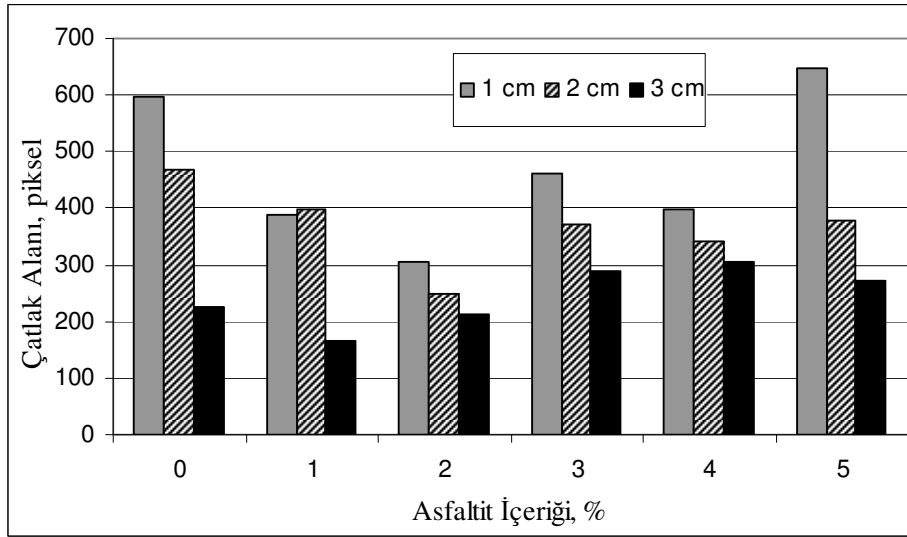
Asfaltit içeriği, %	Çentik yüksekliği, cm	Yük boşaldığı andaki deformasyon, mm	Yük boşaldığı andaki çatlak alanı	4 dakika sonunda çatlak alanı
0	1	1,7351	597	799
	2	1,4798	469	1010
	3	1,2407	224	762
1	1	1,3809	388	901
	2	1,4439	399	861
	3	1,0517	167	729
2	1	1,3450	304	904
	2	1,2484	248	919
	3	1,0462	211	888
3	1	1,5395	460	853
	2	1,2168	373	1032
	3	1,1625	287	879
4	1	1,2831	397	1109
	2	1,0234	343	1251
	3	1,0593	306	967
5	1	1,4146	647	1193
	2	1,0408	379	1255
	3	1,0245	272	1065

4. dakika sonundaki çatlak alanlarının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.134'te, yük boşaldığı andaki çatlak alanlarının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.135'te görülmektedir.



Şekil 7.134. UDY numunelerin 4. dakika sonundaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

Şekil 7.134'te görüldüğü üzere genel olarak asfaltit içeriği arttıkça çatlak alanları artmıştır. Bu durum asfaltit içeriği arttıkça BSK numunelerinin daha kırılgan bir hal aldığını göstermektedir. Bütün çentik yüksekliklerinde %5 asfaltit içeren karışımın en yüksek çatlak alanı değerine sahip olduğu, en düşük çatlak alanı değerine ise 1 cm çentik yüksekliğinde saf karışımın, 2 ve 3 cm çentik yüksekliğinde ise %1 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 1 cm çentik yüksekliğinde çatlak alanında saf karışıma göre %44, 2 cm çentik yüksekliğinde %24, 3 cm çentik yüksekliğinde ise %40 artış meydana gelmiştir.

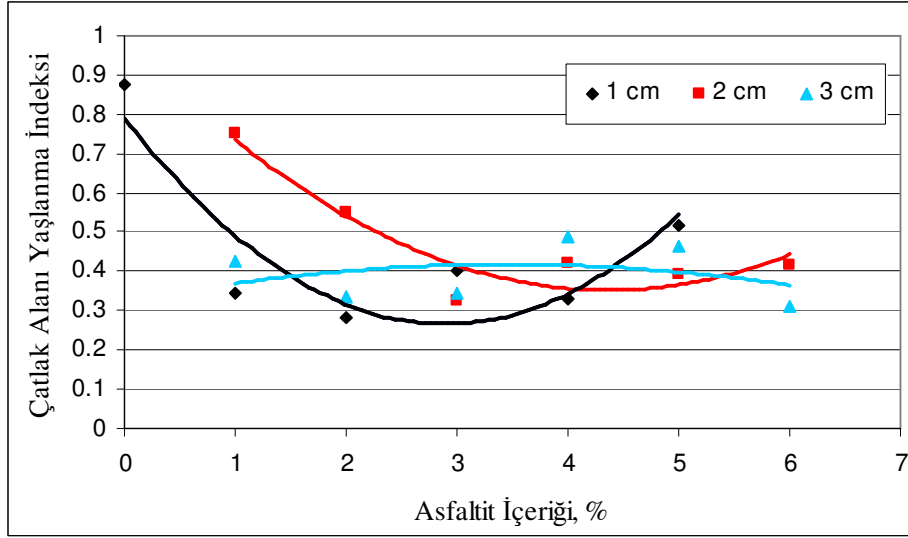


Şekil 7.135. Yük boşaldığı andaki çatlak alanı değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

Şekil 7.135 incelendiğinde en düşük yük boşaldığı andaki çatlak alanı değerlerine 1 ve 2 cm çentik yüksekliğinde %2 asfaltit içeren karışımın, 3 cm çentik yüksekliğinde ise %1 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek çatlak alanı değerlerine ise 1 cm çentik yüksekliğinde %5 asfaltit içeren karışımın daha sonra ise saf karışımın, 2 cm çentik yüksekliğinde saf karışımın, 3 cm çentik yüksekliğinde ise %4 asfaltit içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Çatlak alanı değerleri üzerinde uzun süreli yaşlanmanın etkisini incelemek amacıyla UDY yaşlandırılmış numunelerin 4. dakika sonundaki çatlak alanı değerleri, KDY numunelerin 4. dakika sonundaki çatlak alanı değerlerine bölünerek yaşlanma indeksi ($YI_{\text{ÇA}}$) değerleri elde edilmiştir. Çatlak alanı yaşlanma indeksi değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 7.136'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde 1 ve 2 cm çentik

yüksekliklerinde YI_{CA} değeri asfaltit içeriği arttıkça azalmakta daha sonra yükselmektedir. 3 cm çentik yüksekliğinde ise yaşlanma indeksi değerlerinde fazla bir değişim görülmemiştir. Bütün karışımların YI_{CA} değeri 1'den küçük çıkmıştır. Bu durum UDY dolayısıyla karışımların çatlak alanının azaldığını göstermektedir.

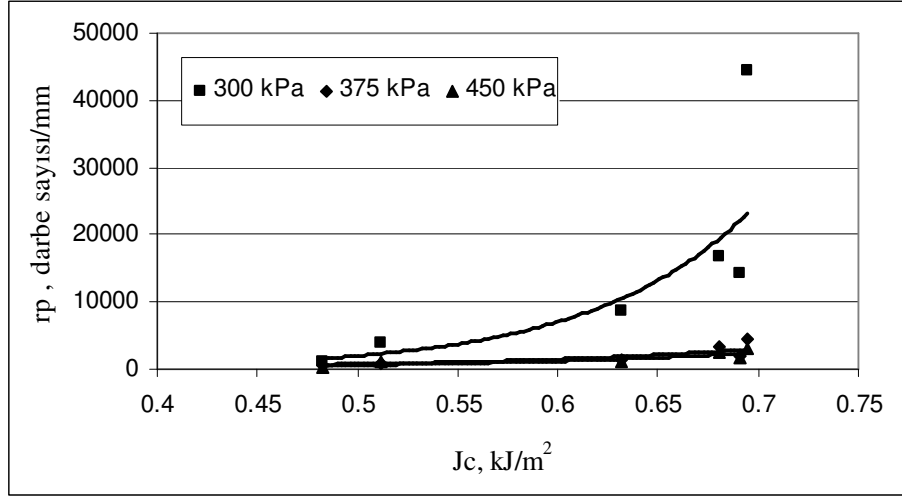


Şekil 7.136. YI_{CA} değerlerinin asfaltit içeriği ile değişimi

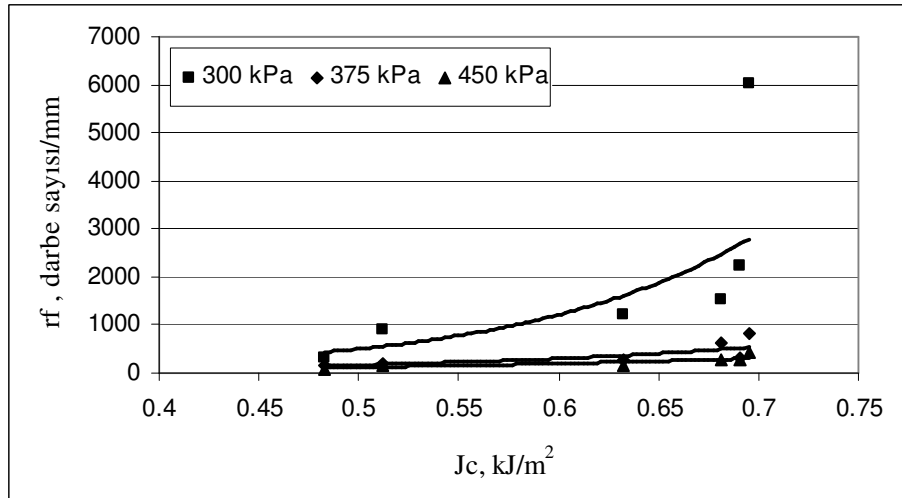
7.10.4. Çatlak İlerlemesi Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında yapılan yorulma deneyleri sonucunda saf ve asfaltit içeren karışımların $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı (r_p) ve $N_f - N_{\text{mak}}$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerleri belirlenmiştir. Kırılma tokluğu ve J-integral deneyleri ile çatlak ilerleyişine karşı dayanımın göstergesi olan K_{IC} ve J_c değerleri belirlenmiştir. Bu kısımda r_p ve r_f değerleri K_{IC} ve J_c değerleri arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneylerinden elde edilen çatlak ilerleme oranı değerleri ile K_{IC} ve J_c arasındaki fonksiyon türü tespit edilmiş ve ilişki formülize edilmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı (r_p) ve $N_f - N_{\text{mak}}$ arası çatlak ilerleme oranı değerlerinin K_{IC} ve J_c değerlerine bağlı olarak değişimi Şekil 7.137-7.140'ta verilmiştir. Uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde grafiksel olarak benzer değişim göstermiştir. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde r_p ve r_f değerleri K_{IC} ve J_c

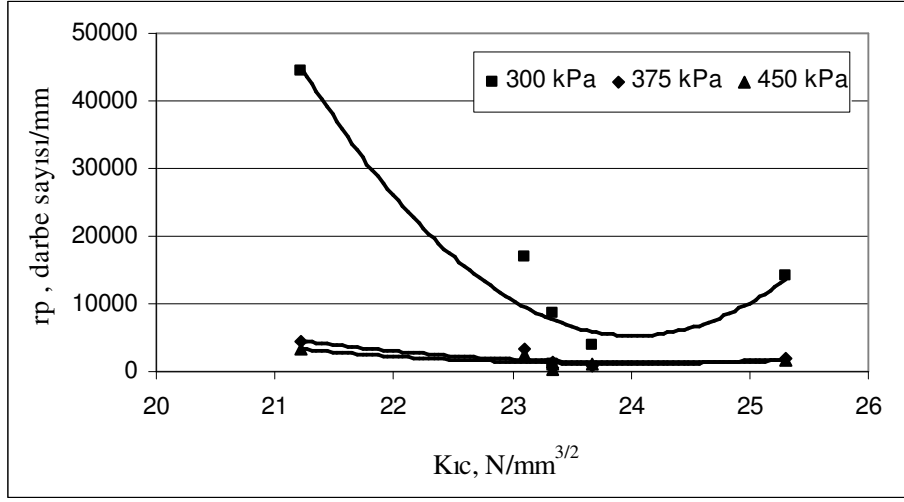
değerleri arasındaki bağıntılar Tablo 7.72 ve Tablo 7.73'te verilmiştir. Fonksiyonun türü belirlenirken belirtme katsayısının (R^2) en az 0,7 olması hedeflenmiştir.



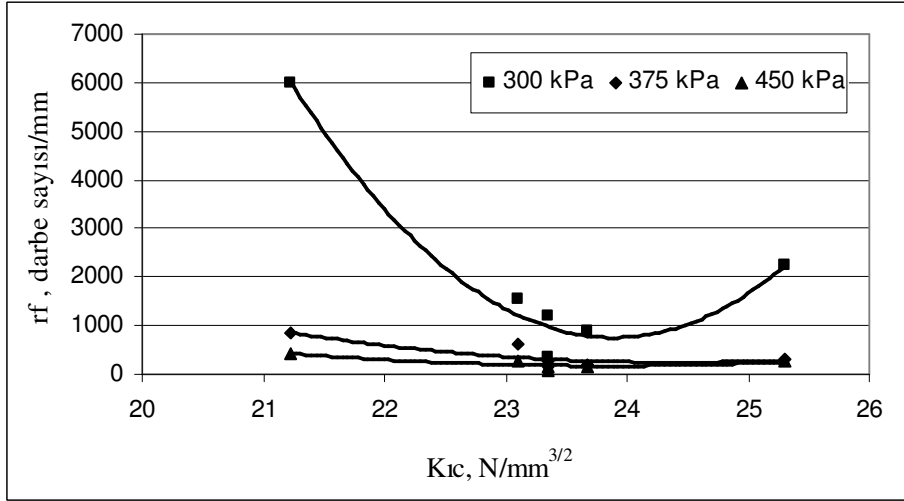
Şekil 7.137. $r_p - J_c$ ilişkisi



Şekil 7.138. $r_f - J_c$ ilişkisi



Şekil 7.139. $r_p - K_{1c}$ ilişkisi



Şekil 7.140. $r_f - K_{1c}$ ilişkisi

Tablo 7.72’de görüldüğü üzere r_p ve r_f ile J_c arasında kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde üstel bir ilişki olduğu, uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde ise ikinci derece ilişki olduğu tespit edilmiştir. r_p ve r_f ile K_{1c} arasında ikinci derece ilişki olduğu elde edilmiştir. Elde edilen R^2 değerlerinden r_p ve r_f ile K_{1c} arasında daha yakın bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 7.72. r_p ve r_f ile J_c arasındaki bağıntılar

			Denklem	R^2
$r_p - J_c$ ilişkisi	300 kPa	KDY	$r_p = 3,7593e^{12,561 J_c}$	0,8649
		UDY	$r_p = 1119188 J_c^2 - 970018 J_c + 209287$	0,7200
	375 kPa	KDY	$r_p = 23,528e^{6,9287 J_c}$	0,8084
		UDY	$r_p = 141384 J_c^2 - 123347 J_c + 27568$	0,7223
	450 kPa	KDY	$r_p = 18,502e^{6,9873 J_c}$	0,7785
		UDY	$r_p = 76865 J_c^2 - 65201 J_c + 14772$	0,7606
$r_f - J_c$ ilişkisi	300 kPa	KDY	$r_f = 6,2229e^{8,7839 J_c}$	0,7401
		UDY	$r_f = 120704 J_c^2 - 106581 J_c + 23415$	0,7409
	375 kPa	KDY	$r_f = 8,6754e^{5,918 J_c}$	0,7244
		UDY	$r_f = 16329 J_c^2 - 14151 J_c + 3214,5$	0,7469
	450 kPa	KDY	$r_f = 11,709e^{4,6885 J_c}$	0,7394
		UDY	$r_f = 8208,2 J_c^2 - 6843,3 J_c + 1612,4$	0,8104

Tablo 7.73. r_p ve r_f ile K_{IC} arasındaki bağıntılar

			Denklem	R^2
$r_p - K_{IC}$ ilişkisi	300 kPa	KDY	$r_p = 5068,65 K_{IC}^2 - 243499,46 K_{IC} + 2929717,03$	0,9200
		UDY	$r_p = 3938,51 K_{IC}^2 - 206607,64 K_{IC} + 2727854,47$	0,8200
	375 kPa	KDY	$r_p = 369,93 K_{IC}^2 - 17876 K_{IC} + 217256$	0,6719
		UDY	$r_p = 219,38 K_{IC}^2 - 12906 K_{IC} + 189758$	0,8845
	450 kPa	KDY	$r_p = 275,56 K_{IC}^2 - 13222 K_{IC} + 159757$	0,6117
		UDY	$r_p = 148,26 K_{IC}^2 - 8453,9 K_{IC} + 121774$	0,8445
$r_f - K_{IC}$ ilişkisi	300 kPa	KDY	$r_f = 740,58 K_{IC}^2 - 35386 K_{IC} + 423450$	0,9723
		UDY	$r_f = 153,07 K_{IC}^2 - 9295,4 K_{IC} + 139570$	0,9014
	375 kPa	KDY	$r_f = 61,18 K_{IC}^2 - 2984,4 K_{IC} + 36638$	0,7029
		UDY	$r_f = 7,431 K_{IC}^2 - 642,65 K_{IC} + 12029$	0,9215
	450 kPa	KDY	$r_f = 37,716 K_{IC}^2 - 1798,3 K_{IC} + 21606$	0,7507
		UDY	$r_f = 4,6979 K_{IC}^2 - 376,1 K_{IC} + 6921$	0,8669

7.11. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Asfaltit katkısının bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki tüm olumlu ve olumsuz etkilerini karşılaştırmak amacıyla deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 7.74'te özet olarak verilmiştir. Asfaltit içeriğinin olumlu etkileri “+”, olumsuz etkileri ise “-” işareti ile gösterilmiştir.

Tablo. 7.74. Deney sonuçları

Deney adı		Deneylerden elde edilenlerin anlamı	Asfaltitin etkisi	
			KDY	UDY
Marshall stabilite ve akma	Stabilite	Maksimum taşıma gücü	+	+
	Akma	Maksimum yükteki deformasyon	%0-1-2-3 => + %4-5 => -	%0-1-2-3 => + %4-5 => -
	Marshall oranı	Kalıcı deformasyona karşı dayanım	+	+
Kalıcı Marshall Stabilitesi	RMS	Nem hasarına karşı dayanım	+	+
Çekme dayanımı oranı	TS	Çekme dayanımı	+	+
	TSR	Nem hasarına karşı dayanım	+	+
İndirekt Çekme Rijitlik Modülü	ITSM	Rijitlik	+	+
İndirekt Çekme Yorulma	N_i	Çatlak başlangıcı	+	+
	N_p	Çatlak ilerlemesi	+	+
	N_f	Yorulma ömrü	+	+
	N_{mak}	Maksimum yük tekrar sayısı	+	+
	δ_i	Çatlak başlangıcındaki deformasyon	-	-
	δ_f	Yorulma ömründeki deformasyon	-	-
	δ_{mak}	Maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon	-	-
	r_p	N_i - N_f arası çatlak ilerleme hızı	+	+
	r_f	N_f - N_{mak} arası çatlak ilerleme hızı	+	+
Tekrarlı sünme	E_r	Esneklik Modülü	-	-
	E_c	Sünme Modülü	+	+
	Akma sayısı	Kalıcı deformasyona karşı dayanım	+	+

Tablo. 7.74. Deney sonuçları (Devamı)

Deney Adı	Elde Edilenler	Deneyin yapım amacı	Asfaltit içeriği arttıkça nasıl değiştiği	
			KDY	UDY
LEKM deneyi (EN 12697-44)	ε_{mak}	Kırılma anındaki düşey birim şekil değiştirme	–	–
	K_{IC}	Kırılma tokluğu	%0–1–2–3 => + %4–5 => –	%0–1–2–3 => ± %4–5 => –
EPKM deneyi (J-integral)	Mak. yük	Maksimum taşıma gücü	+	+
	δ_{mak}	Maksimum yükteki deformasyon	–	–
	Maksimum yüke kadarki alan	Depolanan enerji	+	+
	Yük boşaldığı andaki deformasyon	Toplam deformasyon	–	–
	J_c	Çatlak ilerleyişine karşı dayanım	+	+

Marshall deneyleri sonucunda; asfaltit içeriği arttıkça stabilite değerlerinin arttığı, akma değerlerinin %3 asfaltit içeriğine kadar azaldığı, %4 ve %5 asfaltit içeriklerinde arttığı, kalıcı deformasyona karşı dayanımın bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değerlerinin asfaltit içeriğine bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerlerinden asfaltit içeriği arttıkça RMS değerlerinin, dolayısıyla BSK numunelerinin nem hasarına karşı dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.

Çekme dayanımı oranı deneyleri sonucunda karışımlarda kullanılan asfaltit içeriği arttıkça karışımların çekme dayanımı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Diğer bir nem hasarına karşı dayanım deneyi olan çekme dayanımı oranı (TSR) deney sonuçlarından RMS deneyinde olduğu gibi asfaltit içeriği arttıkça karışımların nem hasarına karşı dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Tahribatsız bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi, karışımlara 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklıklarda uygulanmıştır. ITSM deneyleri sonucunda bütün sıcaklıklarda asfaltit içeriği arttıkça numunelerde 5 µm yatay deformasyon oluşabilmesi için daha fazla düşey yük uygulanması gerektiği dolayısıyla asfaltit içeriği arttıkça karışımların rijitliklerinin arttığı belirlenmiştir.

Gerilme kontrollü indirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça çatlak başlangıcı (N_i), çatlak ilerlemesi (N_p), yorulma ömrü (N_f) ve maksimum yük tekrar

sayısı (N_{mak}) değerlerinin arttığı dolayısıyla karışımların yorulma ömürlerinin arttığı belirlenmiştir. Yorulma deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça çatlak başlangıcındaki deformasyon (δ_i), yorulma ömründeki deformasyon (δ_f) ve maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon (δ_{mak}) değerlerinin azalması, asfaltit içeriği arttıkça karışımlarda gevrek kırılmanın oluşacağına işaret etmektedir. N_i - N_f arası çatlak ilerleme hızı (r_p) ve N_f - N_{mak} arası çatlak ilerleme hızı (r_f) değerlerinden asfaltit içeriği arttıkça karışımlarda çatlak ilerleme hızının azaldığı belirlenmiştir. Yorulma ömrü ile ITSM deneylerinden elde edilen rijitlik değerleri karşılaştırılmış ve yorulma ömrü ile karışımların rijitliği arasında büyük oranda uyum olduğu, karışımların rijitliği arttıkça yorulma ömürlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Tekrarlı sünme deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça esneklik modülü, sünme modülü ve akma sayısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Asfaltit içeriği arttıkça karışımların esneklik modülünün artması karışımların dinamik yükler sonucunda elastik birim şekil değiştirmelerinin azaldığını göstermektedir. Bu durum karışımların elastikiyetini azalttığına işaret etmektedir. Asfaltit içeriği arttıkça sünme modülü ve akma sayısının artması, karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının artacağını göstermektedir. MQ değerlerindeki değişimin sünme modülü ve akma sayısı ile uyum göstermesi, MQ değerlerinin kalıcı deformasyona karşı dayanım parametresi olduğunu desteklemektedir.

Çalışmada iki farklı yöntemle karışımların çatlak ilerlemesine karşı dayanımları incelenmiştir. Birinci yöntemde lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) prensiplerine göre ikinci yöntemde ise elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) prensiplerine uygun olarak karışımların çatlak ilerlemesine karşı dayanımları tespit edilmiştir. LEKM deneyleri sonucunda karışımlarda kırılma meydana gelinceye kadar oluşan düşey birim şekil değiştirme (ϵ_{mak}) değerlerinin azalması, asfaltit içeriği arttıkça karışımların daha gevrek davranış sergileyeceğini göstermektedir. Çatlak ilerlemesine karşı dayanım parametresi olan kırılma tokluğu (K_{IC}) değerlerinden %3 asfaltit içeriğine kadar karışımların K_{IC} değerlerinin birbirine yakın olduğu, %4 ve %5 asfaltit içeriğinde ise K_{IC} değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

EPKM prensiplerine göre uygulanan J-integral deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça maksimum yük, maksimum yüke kadarki alan ve çatlak ilerleyişine karşı dayanım parametresi olan J_c değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum, 25°C'de yapılan SCB deneyleri sonucunda asfaltit içeriği arttıkça karışımların çatlak ilerleyişine karşı

dayanımlarının artacağını ifade etmektedir. Yorulma ve kırılma tokluğu deneylerindeki deformasyon değerlerinin asfaltit içeriğiyle değişimine benzer olarak maksimum yükteki deformasyon değerlerinin azalması, asfaltit içeriği arttıkça karışımların daha gevrek davranış göstereceğini ifade etmektedir. Yorulma deneyinden elde edilen çatlak ilerleme hızları (r_p ve r_f) ile J_c ve K_{Ic} değerleri arasındaki ilişki matematiksel olarak modellenmiştir. Sonuçta r_p ve r_f ile J_c arasında kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde üstel bir ilişki olduğu, uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde ise ikinci derece ilişki olduğu tespit edilmiştir. r_p ve r_f ile K_{Ic} arasında ikinci derece ilişki olduğu belirlenmiştir.

8. SONUÇLARIN İSTATİSTİKSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmada, SPSS paket programı kullanılarak deney sonuçları ile değişkenler arasındaki ilişki modellenerek birinci dereceden denklem haline getirilmiştir. İstatistiksel olarak değişkenler bağımlı ve bağımsız olarak isimlendirilmektedir. Bağımlı değişkenler, etkilenen parametreleri, bağımsız değişkenler ise etkileyen parametreleri ifade etmektedir (Kutluhan, 2008). Regresyon analizinde, değişkenler arasındaki ilişkiyi fonksiyonel olarak açıklamak ve bu ilişkiyi bir modelle tanımlayabilmek amaçlanmaktadır (URL–8, URL–9, 2011). Regresyon analizi; tek bağımsız değişkene bağlı olarak yapılıyorsa basit doğrusal regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişkene bağlı olarak yapılıyorsa çoklu doğrusal regresyon analizi olarak isimlendirilmektedir.

Marshall deneyinde sonuçlar asfaltit içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle deney sonucunda elde edilenler (stabilite, akma, MQ, RMS) bağımlı değişken, asfaltit oranı ise bağımsız değişken olarak alınmıştır. Çekme dayanımı oranı, tekrarlı sünme ve kırılma tokluğu deneylerinde bağımlı değişken olarak deney sonuçları, bağımsız değişken olarak ise asfaltit içeriği alınmıştır. Bu nedenle bu deneylerde basit doğrusal regresyon analizi uygulanarak birinci derece bağıntı elde edilmiştir.

ITSM, deneyinde deney sonucu asfaltit içeriği ve sıcaklığa bağlı olarak değişmiştir. Yorulma deneyinde deney sonuçları asfaltit içeriği ve gerilmeye bağlı olarak değişmiştir. J-integral yöntemine göre çatlak ilerlemesine karşı dayanım deneyinde, sonuçlar asfaltit içeriği ve çentik yüksekliğine bağlı olarak değişmiştir. Bu deneylerde iki bağımsız değişken olduğundan bu deneylerin modellenmesinde çoklu doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır.

8.1. Marshall Deney Sonuçlarının Modellenmesi

Marshall stabilite değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.1’de, akma değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.2’de, MQ değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.3’te ve RMS değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.4’te verilmiştir.

Tablo 8.1. Stabilite modelinin özeti

Model	Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,830	0,000	18	$S=17,046+0,637*A$
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,928	0,000	18	$S=13,254+0,923*A$
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,800	0,000	18	$S=18,400+0,587*A$
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,949	0,000	18	$S=14,560+0,978*A$

Tablo 8.1 incelendiğinde belirtme katsayısı olan R^2 değerlerinin en az 0,800 olduğu görülmektedir. Bu durum karışımlarının stabilite değerlerindeki değişimin %80 oranında asfaltit içeriği ile açıklanabileceğini göstermektedir. Ayrıca p değerlerinden kurulan modellerinin anlamlı olduğu ($p=0,000$) belirlenmiştir. Formülde S, stabiliteyi (kN), A ise asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

Tablo 8.2. Akma modelinin özeti

Model	Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,003	0,832	18	$Akma=3,604-0,008*A$
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,047	0,188	18	$Akma=3,876-0,050*A$
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,146	0,060	18	$Akma=3,534-0,063*A$
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,061	0,166	18	$Akma=3,703-0,067*A$

Tablo 8.2 incelendiğinde belirtme katsayısı olan R^2 değerlerinin en fazla 0,146 olduğu görülmektedir. Bu durum karışımlarının stabilite değerlerindeki değişimin sadece %14,6 oranında asfaltit içeriği ile açıklanabileceğini göstermektedir. Ayrıca p değerlerinden kurulan modellerin anlamlı olmadığı ($p>0,05$) belirlenmiştir. Sonuçlar akma değerlerindeki değişimin asfaltit içeriği ile açıklanamayacağını, kurulan bağıntının anlamsız olduğunu göstermektedir. Deneysel sonuçlarda da asfaltit içeriğinin artışı ile akma değerlerinde düzenli bir değişme olmadığı belirtilmiştir.

Tablo 8.3. MQ modelinin özeti

Model	Düzeltilmiş R ²	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,214	0,031	18	MQ=4,955+0,145*A
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,670	0,000	18	MQ=3,629+0,255*A
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,390	0,003	18	MQ=5,546+0,210*A
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,574	0,000	18	MQ=4,141+0,332*A

Tablo 8.3 incelendiğinde koşullandırılmamış numunelerde belirtme katsayısının en fazla 0,39 olduğu, koşullandırılmış numunelerde ise belirtme katsayılarının en az 0,574 olduğu görülmektedir. Bu durum, koşullandırılmamış numunelerin MQ değerlerinde meydana gelen değişimin en fazla %39'unun asfaltit içeriğindeki artış ile açıklanabileceği, koşullandırılmış numunelerde ise MQ değerlerindeki değişimin en az %57,4'ünün asfaltit içeriğindeki artış ile açıklanabileceğini ifade etmektedir. Anlamlılık değerlerinden kurulan modellerin anlamlı olduğu ($p<0,05$) belirlenmiştir. Formülde MQ Marshall oranını (kN/mm), A ise asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

Tablo 8.4. RMS modelinin özeti

Model	Düzeltilmiş R ²	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
Kısa dönem yaşlandırılmış	0,559	0,000	18	RMS=78,650+2,020*A
Uzun dönem yaşlandırılmış	0,717	0,000	18	RMS=79,663+2,375*A

Tablo 8.4'te verilen R² değerlerinden RMS değerlerinde meydana gelen değişimin en az %55,9 oranında asfaltit içeriğindeki artış ile açıklanabileceği söylenebilmektedir. Anlamlılık değerlerinden kurulan modellerin anlamlı olduğu ($p<0,05$) belirlenmiştir. Formülde, RMS kalıcı Marshall stabilitesini (%), A ise asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

8.2. Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçlarının Modellenmesi

Çekme dayanımı (TS) değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.5'te ve çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.6'da verilmiştir.

Tablo 8.5. TS modelinin özeti

Model	Düzeltilmiş R ²	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,942	0,000	18	TS=859,756+82,980*A
Kısa dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,948	0,000	18	TS=712,206+91,575*A
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmamış	0,854	0,000	18	TS=1002,937+63,381*A
Uzun dönem yaşlandırılmış koşullandırılmış	0,920	0,000	18	TS=845,892+76,581*A

Tablo 8.6. TSR modelinin özeti

Model	Düzeltilmiş R ²	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
Kısa dönem yaşlandırılmış	0,278	0,014	18	TSR=83,421+1,781*A
Uzun dönem yaşlandırılmış	0,236	0,024	18	TSR=84,849+1,725*A

Tablo 8.5'te verilen R² değerlerinden TS değerlerindeki değişimin çok yüksek bir oranda (en az %85,4) asfaltit içeriğindeki artış ile açıklanabileceği, p değerlerinden ise kurulan modelin anlamlı olduğu söylenebilmektedir. TS değerlerinde belirlenen değişimin asfaltit içeriği ile yüksek orandaki açıklanabilirliği TSR değerlerinde düşmüştür (en fazla 27,8). Tabloda verilen p değerlerinden kurulan modelin anlamlı olduğu (p<0,05) anlaşılmaktadır. Formüllerdeki TS, çekme dayanımını (kPa), TSR, çekme dayanımı oranını (%) ve A asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

8.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçlarının Modellenmesi

ITSM değerlerinin modellenmesinde bağımsız değişken olarak sıcaklık ve asfaltit içeriği kullanılmıştır. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITSM değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.7 ve Tablo 8.8’de verilmiştir.

Tablo 8.7. Değişkenler arasındaki korelasyonlar

		Kısa Dönem Yaşlandırılmış			Uzun Dönem Yaşlandırılmış		
		ITSM	Sıcaklık	Asfaltit	ITSM	Sıcaklık	Asfaltit
Pearson korelasyonu	ITSM	1,000	-0,834	0,463	1,000	-0,905	0,339
	Sıcaklık	-0,834	1,000	0,000	-0,905	1,000	0,000
	Asfaltit	0,463	0,000	1,000	0,339	0,000	1,000

Korelasyon katsayısı, değişkenlerin yönü ve etkileşimlerin nasıl olduğu hakkında bilgi vermektedir. Korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değişen değerler almaktadır. Katsayı, etkileşimin olmadığı durumda 0, tam ve kuvvetli bir etkileşim varsa 1, ters yönlü ve tam bir etkileşim varsa -1 değerini almaktadır. Korelasyon katsayısının yorumunu, tam değerler dışında ara değerler için yapmak oldukça güçtür. Ara değerler için katsayı değerlendirilirken, örnek gözlem sayısı (n) oldukça önemlidir. Çok fazla gözleme dayanan değerlendirmelerde 0,25'e kadar düşmüş bir korelasyon katsayısı bile anlamlı sayılabilmektedir. Fakat az sayıda, 10-15 gözleme dayanan değerlendirmelerde korelasyon katsayısının 0.71 üstünde olması beklenir. Anakütleye göre normal sayılacak kadar bir gözlem sayısı alınarak bakılmış gözlem grupları için genellikle, 0–0,49 arasında ise korelasyon zayıf, 0,5–0,74 arasında ise orta derecede, 0,75–1 arasında ise kuvvetli ilişki vardır denilmektedir (URL–10).

Tablo 8.7 incelendiğinde ITSM değerlerinin hem sıcaklıktan hem de asfaltit içeriğinden etkilendiği görülmektedir. ITSM değerleri ile sıcaklık arasında yüksek oranda ve ters yönlü bir etkileşimin olduğu, ITSM değerleri ile asfaltit içeriği arasında ise doğru orantı ve zayıf bir etkileşimin olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık ve asfaltit arasındaki korelasyon katsayılarının sıfır olması, bağımsız parametreler arasında içsel bağımlılık olmadığını göstermektedir.

Tablo 8.8. Modelin özeti

Model	Düzeltil. R^2	Anlamlılık	Veri sayısı	Formül
KDY	0,909	0,000	108	ITSM=8398,401 –204,218.S+541,497.A
UDY	0,934	0,000	108	ITSM=14265,723–352,549.S+631,179.A

Tablo 8.8’de görülen R^2 değerlerinden kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda ITSM değerlerinin %90,9 oranında, uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda ise ITSM değerlerinin %93,4 oranında sıcaklığa ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. Her iki modelde de p değerinin sıfır olması kurulan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tabloda ayrıca asfaltit içeriğine ve sıcaklığa bağlı olarak ITSM’nin değişimi ile ilgili formül verilmiştir. Formülde ITSM, indirekt çekme rijitlik modülünü (MPa), S sıcaklığı (°C) ve A, asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

8.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçlarının Modellenmesi

İndirekt çekme yorulma deney sonuçlarının modellenmesinde bağımsız değişken olarak gerilme ve asfaltit içeriği kullanılmıştır. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin N_i , N_f , N_p , N_{mak} değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.9 ve Tablo 8.10’da verilmiştir.

Tablo 8.9 incelendiğinde N_i , N_f , N_p ve N_{mak} değerlerinin hem gerilmeden hem de asfaltit içeriğinden etkilendiği görülmektedir. N_i , N_f , N_p ve N_{mak} değerleri ile asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının 0,43-0,48 arasında, N_i , N_f , N_p ve N_{mak} ile gerilme arasındaki korelasyon katsayısının ise 0,63-0,66 arasında değiştiği belirlenmiştir. Yük tekerrür sayıları (N_i , N_f , N_p ve N_{mak}) ile asfaltit içeriği arasında doğru orantı ve zayıf bir etkileşimin olduğu, yük tekerrür sayıları ile gerilme arasında ise ters yönlü ve orta derecede bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Gerilme ve asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının sıfır olması, bağımsız parametreler arasında içsel bağımlılık olmadığını göstermektedir.

Tablo 8.9. N_i , N_f , N_p , N_{mak} değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar

			Kısa Dönem Yaş.			Uzun Dönem Yaş.		
			N	Asfaltit	Gerilme	N	Asfaltit	Gerilme
N_i	Pearson korelasyonu	N_i	1,000	0,477	-0,638	1,000	0,450	-0,636
		Asfaltit	0,477	1,000	0,000	0,450	1,000	0,000
		Gerilme	-0,638	0,000	1,000	-0,636	0,000	1,000
N_f	Pearson korelasyonu	N_f	1,000	0,476	-0,651	1,000	0,453	-0,656
		Asfaltit	0,476	1,000	0,000	0,453	1,000	0,000
		Gerilme	-0,651	0,000	1,000	-0,656	0,000	1,000
N_p	Pearson korelasyonu	N_p	1,000	0,450	-0,650	1,000	0,432	-0,655
		Asfaltit	0,450	1,000	0,000	0,432	1,000	0,000
		Gerilme	-0,650	0,000	1,000	-0,655	0,000	1,000
N_{mak}	Pearson korelasyonu	N_{mak}	1,000	0,473	-0,651	1,000	0,453	-0,654
		Asfaltit	0,473	1,000	0,000	0,453	1,000	0,000
		Gerilme	-0,651	0,000	1,000	-0,654	0,000	1,000

Tablo 8.10. N_i , N_f , N_p , N_{mak} modellerinin özeti

Model		Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık	Veri sayısı	Formül
N_i	KDY	0,621	0,000	54	$N_i = 36989,778 + 2575,133.A - 96,138.\sigma$
	UDY	0,592	0,000	54	$N_i = 76519,429 + 5029,429.A - 198,249.\sigma$
N_f	KDY	0,637	0,000	54	$N_f = 53313,571 + 3612,083.A - 137,933.\sigma$
	UDY	0,621	0,000	54	$N_f = 118668,324 + 7586,333.A - 306,353.\sigma$
N_p	KDY	0,611	0,000	54	$N_p = 16323,794 + 1036,949.A - 41,796.\sigma$
	UDY	0,601	0,000	54	$N_p = 42148,896 + 2556,905.A - 108,104.\sigma$
N_{mak}	KDY	0,634	0,000	54	$N_{mak} = 57494,193 + 3876,463.A - 148,830.\sigma$
	UDY	0,618	0,000	54	$N_{mak} = 124780,190 + 8008,857.A - 322,267.\sigma$

Tablo 8.10’da görülen R^2 değerlerinden kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda yük tekrarlarının en az %61 oranında, uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda ise yük tekrarlarının en az %59 oranında gerilmeye ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. Bütün modellerde p değerinin sıfır olması kurulan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tabloda ayrıca asfaltit içeriğine ve gerilmeye

bağlı olarak yük tekrar sayılarının değişimi ile ilgili formüller verilmiştir. Formülde σ , gerilmeyi (kPa) ve A, asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.11 ve Tablo 8.12’de verilmiştir.

Tablo 8.11. δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar

			Kısa Dönem Yaş.			Uzun Dönem Yaş.		
			δ	Asfaltit	Gerilme	δ	Asfaltit	Gerilme
δ_i	Pearson korelasyonu	δ_i	1,000	-0,632	0,149	1,000	-0,815	-0,099
		Asfaltit	-0,632	1,000	0,000	-0,815	1,000	0,000
		Gerilme	0,149	0,000	1,000	-0,099	0,000	1,000
δ_f	Pearson korelasyonu	δ_f	1,000	-0,777	0,108	1,000	-0,856	-0,090
		Asfaltit	-0,777	1,000	0,000	-0,856	1,000	0,000
		Gerilme	0,108	0,000	1,000	-0,090	0,000	1,000
δ_{mak}	Pearson korelasyonu	δ_{mak}	1,000	-0,849	-0,005	1,000	0,432	-0,655
		Asfaltit	-0,849	1,000	0,000	0,432	1,000	0,000
		Gerilme	-0,005	0,000	1,000	-0,655	0,000	1,000

Tablo 8.11 incelendiğinde δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerlerinin özellikle asfaltit içeriğinden etkilendiği görülmektedir. δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerleri ile asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının 0,43-0,85 arasında, δ_i , δ_f ve δ_{mak} ile gerilme arasındaki korelasyon katsayısının ise 0,005-0,66 arasında değiştiği belirlenmiştir. Yük tekerrür sayılarındaki deformasyon miktarları (δ_i , δ_f ve δ_{mak}) ile asfaltit içeriği arasında doğru orantı olduğu belirlenmiştir. Gerilme ve asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının sıfır olması, bağımsız parametreler arasında içsel bağımlılık olmadığını göstermektedir.

Tablo 8.12’de görülen R^2 değerlerinden kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda yük tekrarlarındaki deformasyon miktarlarının en az %39,9 oranında, uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda ise yük tekrarlarındaki deformasyon miktarlarının en %66,2 oranında gerilmeye ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. Bütün modellerde p değerinin sıfır olması kurulan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tabloda ayrıca asfaltit içeriğine ve gerilmeye bağlı olarak yük tekrar

sayılarının değişimi ile ilgili formüller verilmiştir. Formülde σ , gerilmeyi (kPa) ve A, asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

Tablo 8.12. δ_i , δ_f ve δ_{mak} modellerinin özeti

Model		Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık	Veri sayısı	Formül
δ_i	KDY	0,399	0,000	54	$\delta_i = 1,424 - 0,174.A + 0,001.\sigma$
	UDY	0,662	0,000	54	$\delta_i = 1,799 - 0,190.A - 0,001.\sigma$
δ_f	KDY	0,600	0,000	54	$\delta_f = 2,454 - 0,276.A + 0,001.\sigma$
	UDY	0,731	0,000	54	$\delta_f = 2,917 - 0,315.A - 0,001.\sigma$
δ_{mak}	KDY	0,711	0,000	54	$\delta_{mak} = 3,813 - 0,321.A - 0,0005.\sigma$
	UDY	0,782	0,000	54	$\delta_{mak} = 3,996 - 0,381.A - 0,001.\sigma$

Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin r_p ve r_f değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.13 ve Tablo 8.14'te verilmiştir.

Tablo 8.13. r_p ve r_f değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar

			Kısa Dönem Yaş.			Uzun Dönem Yaş.		
			r	Asfaltit	Gerilme	r	Asfaltit	Gerilme
r_p	Pearson korelasyonu	r_p	1,000	0,466	-0,504	1,000	0,493	-0,558
		Asfaltit	0,466	1,000	0,000	0,493	1,000	0,000
		Gerilme	-0,504	0,000	1,000	-0,558	0,000	1,000
r_f	Pearson korelasyonu	r_f	1,000	0,440	-0,520	1,000	0,480	-0,525
		Asfaltit	0,440	1,000	0,000	0,480	1,000	0,000
		Gerilme	-0,520	0,000	1,000	-0,525	0,000	1,000

Tablo 8.13 incelendiğinde r_p ve r_f değerlerinin hem gerilmeden hem de asfaltit içeriğinden etkilendiği görülmektedir. r_p ve r_f değerleri ile asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının 0,44-0,49 arasında, r_p ve r_f ile gerilme arasındaki korelasyon katsayısının ise 0,50-0,56 arasında değiştiği belirlenmiştir. Çatlak ilerleme hızı (r_p ve r_f) ile asfaltit içeriği arasında doğru orantı, gerilme ile asfaltit içeriği arasında ise ters orantı

olduğu görülmektedir. Gerilme ve asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının sıfır olması, bağımsız parametreler arasında içsel bağımlılık olmadığını göstermektedir.

Tablo 8.14. r_p ve r_f modellerinin özeti

Model		Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık	Veri sayısı	Formül
r_p	KDY	0,450	0,000	54	$r_p = 31857,462 + 2909,997.A - 87,833.\sigma$
	UDY	0,537	0,000	54	$r_p = 88472,159 + 7687,203.A - 242,593.\sigma$
r_f	KDY	0,443	0,000	54	$r_f = 4471,720 + 363,749.A - 11,982.\sigma$
	UDY	0,486	0,000	54	$r_f = 8649,841 + 768.708.A - 23,450.\sigma$

Tablo 8.14'te görülen R^2 değerlerinden kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda çatlak ilerleme hızlarının en az %44,3 oranında, uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda ise yük tekrarlarındaki deformasyon miktarlarının en %48,6 oranında gerilmeye ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. Bütün modellerde p değerinin sıfır olması kurulan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tabloda yer alan formüllerde σ , gerilmeyi (kPa) ve A, asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

8.5. Tekrarlı Sünme Deney Sonuçlarının Modellenmesi

Sünme deneyinden elde edilen %3 ϵ_c 'deki yük tekrarı, %3 ϵ_c 'deki esneklik modülü, 7500 yük tekrarındaki ϵ_c , esneklik modülü ve sünme modülü, akma sayısı değerleri, akma sayısındaki ϵ_c , esneklik modülü ve sünme modülü değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.15'te verilmiştir.

Tablo 8.15'te verilen R^2 değerlerinden %3 ϵ_c 'deki yük tekrarındaki, 7500 yük tekrarındaki sünme modülü değerlerindeki, akma sayısındaki değişimin yüksek bir oranda (en az %82,8) asfaltit içeriğindeki artış ile açıklanabileceği, p değerlerinden ($p < 0,05$) ise kurulan modelin anlamlı olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca %3 ϵ_c 'deki esneklik modülü, 7500 yük tekrarındaki ϵ_c , 7500 yük tekrarındaki esneklik modülü, akma sayısındaki esneklik modülü değerlerindeki değişimin en az %50,5'inin asfaltit içeriğindeki artış ile açıklanabileceği, p değerlerinden ise ($p < 0,05$) kurulan modelin anlamlı olduğu söylenebilmektedir. Akma sayısındaki ϵ_c ve akma sayısındaki sünme

modüllerinin R^2 değerlerinden, bu değerlerdeki değişimin en fazla %14'ünün asfaltit içeriğindeki değişim ile açıklanabileceği söylenebilmektedir. Ayrıca akma sayısındaki ϵ_c ve akma sayısındaki sünme modüllerinin p değerleri incelendiğinde kurulan modellerin anlamlı olmadığı ($p>0,05$) görülmektedir.

Tablo 8.15. Dinamik sünme deney sonuçlarına ait modellerin özeti

Model		Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
%3 ϵ_c 'deki yük tekrarı	KDY	0,854	0,000	18	$N_{\%3 \epsilon_c} = 2211,810 + 6005,943 * A$
	UDY	0,915	0,000	15	$N_{\%3 \epsilon_c} = 3660,8 + 10480,0 * A$
%3 ϵ_c 'deki esneklik modülü	KDY	0,578	0,000	17	$E_{r \%3 \epsilon_c} = 531,578 + 19,887 * A$
	UDY	0,505	0,002	15	$E_{r \%3 \epsilon_c} = 553,780 + 36,913 * A$
7500 yük tekrarındaki ϵ_c	KDY	0,682	0,000	17	$\epsilon_{c 7500} = 3,505 - 0,538 * A$
	UDY	0,847	0,000	18	$\epsilon_{c 7500} = 2,560 - 0,375 * A$
7500 yük tekrarındaki esneklik modülü	KDY	0,737	0,000	17	$E_{r 7500} = 526,723 + 38,585 * A$
	UDY	0,588	0,000	18	$E_{r 7500} = 586,068 + 42,477 * A$
7500 yük tekrarındaki sünme modülü	KDY	0,828	0,000	17	$E_{c 7500} = 12,641 + 6,222 * A$
	UDY	0,882	0,000	18	$E_{c 7500} = 17,410 + 7,604 * A$
Akma sayısı	KDY	0,867	0,000	18	$AS = 2175,222 + 4838,333 * A$
	UDY	0,873	0,000	18	$AS = -96,048 + 11633,019 * A$
Akma sayısındaki ϵ_c	KDY	0,052	0,365	18	$\epsilon_{c AS} = 2,577 - 0,045 * A$
	UDY	0,140	0,085	16	$\epsilon_{c AS} = 2,825 - 0,092 * A$
Akma sayısındaki esneklik modülü	KDY	0,683	0,000	18	$E_{c AS} = 19,553 + 0,428 * A$
	UDY	0,620	0,000	16	$E_{c AS} = 17,796 + 0,721 * A$
Akma sayısındaki sünme modülü	KDY	0,021	0,259	18	$E_{r AS} = 556,741 + 22,312 * A$
	UDY	0,120	0,103	16	$E_{r AS} = 555,234 + 42,824 * A$

8.6. Kırılma Tokluğu Deney Sonuçlarının Modellenmesi

EN 12697-44 standardına göre yapılan kırılma tokluğu deneylerinden elde edilen maksimum düşey birim şekil değiştirme, maksimum gerilme ve kırılma tokluğu değerlerinin modellenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8.16’da verilmiştir.

Tablo 8.16. Kırılma tokluğu deney sonuçlarına ait modellerin özeti

Model		Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
ϵ_{mak}	KDY	0,586	0,000	18	$\epsilon_{mak} = 1,739 - 0,116 * A$
	UDY	0,013	0,652	18	$\epsilon_{mak} = 1,141 - 0,006 * A$
σ_{mak}	KDY	0,081	0,134	18	$\sigma_{mak} = 4,041 - 0,050 * A$
	UDY	0,536	0,000	18	$\sigma_{mak} = 4,475 - 0,141 * A$
K_{IC}	KDY	0,081	0,134	18	$K_{IC} = 24,071 - 0,296 * A$
	UDY	0,536	0,000	18	$K_{IC} = 26,655 - 0,841 * A$

Tablo 8.16’da verilen R^2 değerlerinden kısa dönem yaşlandırılmış ϵ_{mak} , uzun dönem yaşlandırılmış σ_{mak} ve K_{IC} değerlerindeki değişimin en az %50’sinin asfaltit içeriği ile açıklanabileceği, uzun dönem yaşlandırılmış ϵ_{mak} , kısa dönem yaşlandırılmış σ_{mak} ve K_{IC} değerlerindeki değişimin ise en fazla %8’inin asfaltit içeriği ile açıklanabileceği belirlenmiştir. Modellerin p değerlerinden, kısa dönem yaşlandırılmış ϵ_{mak} , uzun dönem yaşlandırılmış σ_{mak} ve K_{IC} değerleri için oluşturulan modellerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($p < 0,05$), uzun dönem yaşlandırılmış ϵ_{mak} , kısa dönem yaşlandırılmış σ_{mak} ve K_{IC} değerleri için oluşturulan modellerin ise anlamlı olmadığı ($p > 0,05$) anlaşılmaktadır.

8.7. J-İntegral Deney Sonuçlarının Modellenmesi

J-integral deney sonuçlarının modellenmesinde bağımsız değişken olarak çentik yüksekliği (ÇY) ve asfaltit içeriği alınmıştır. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin maksimum yük (F_{mak}) değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.17 ve Tablo 8.18’de verilmiştir.

Tablo 8.17. Maksimum yük değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar

		Kısa Dönem Yaş.			Uzun Dönem Yaş.		
		F _{mak}	Asfaltit	ÇY	F _{mak}	Asfaltit	ÇY
Pearson korelasyonu	F _{mak}	1,000	0,448	-0,867	1,000	0,444	-0,837
	Asfaltit	0,448	1,000	0,000	0,444	1,000	0,000
	ÇY	-0,867	0,000	1,000	-0,837	0,000	1,000

Tablo 8.17 incelendiğinde F_{mak} değerlerinin hem asfaltit içeriğinden hem de çentik yüksekliğinden etkilendiği görülmektedir. Tablodan F_{mak} değerleri ile asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının yaklaşık 0,45 olduğu, F_{mak} ile çentik yüksekliği arasındaki korelasyon katsayısının ise yaklaşık 0,85 olduğu görülmektedir. Maksimum yük (F_{mak}) ile asfaltit içeriği arasında doğru orantı ve orta seviyede bir etkileşimin olduğu, maksimum yük ile çentik yüksekliği arasında ise ters yönlü ve yüksek derecede bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Çentik yüksekliği ve asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının sıfır olması, bağımsız parametreler arasında içsel bağımlılık olmadığını göstermektedir.

Tablo 8.18. Maksimum yük modellerinin özeti

Model		Düzeltilmiş R ²	Anlamlılık	Veri sayısı	Formül
F _{mak}	KDY	0,951	0,000	54	F _{mak} = 180,800 + 11,651.A - 47,129.ÇY
	UDY	0,894	0,000	54	F _{mak} = 206,398 + 11,739.A - 46,245.ÇY

Tablo 8.18’de görülen R² değerlerinden kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda maksimum yük değerlerinin %95,1 oranında, uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda ise maksimum yük değerlerinin %89,4 oranında çentik yüksekliğine ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. Bütün modellerde p değerinin sıfır olması kurulan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tabloda asfaltit içeriğine ve gerilmeye bağlı olarak yük tekrar sayılarının değişimi ile ilgili formüller verilmiştir. Formülde F_{mak}, maksimum yükü (N), ÇY, çentik yüksekliğini (cm) ve A, asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin maksimum yükteki deformasyon miktarları (δ_{mak}) ve yük boşaldığı andaki deformasyon miktarları (δ_{son}) değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.19 ve Tablo 8.20’de verilmiştir.

Tablo 8.19. δ_{mak} ve δ_{son} değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar

			Kısa Dönem Yaş.			Uzun Dönem Yaş.		
			δ	Asfaltit	ÇY	δ	Asfaltit	ÇY
δ_{mak}	Pearson korelasyonu	δ_{mak}	1,000	-0,184	-0,831	1,000	-0,197	-0,786
		Asfaltit	-0,184	1,000	0,000	-0,197	1,000	0,000
		ÇY	-0,831	0,000	1,000	-0,786	0,000	1,000
δ_{son}	Pearson korelasyonu	δ_{son}	1,000	-0,613	-0,578	1,000	-0,395	-0,543
		Asfaltit	-0,613	1,000	0,000	-0,395	1,000	0,000
		ÇY	-0,578	0,000	1,000	-0,543	0,000	1,000

Tablo 8.19 incelendiğinde δ_{mak} ve δ_{son} değerlerinin hem asfaltit içeriğinden hem de çentik yüksekliğinden etkilendiği görülmektedir. δ_{mak} ve δ_{son} değerleri ile asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının 0,18-0,61 arasında, δ_{mak} ve δ_{son} ile çentik yüksekliği arasındaki korelasyon katsayısının ise 0,54-0,83 arasında değiştiği belirlenmiştir. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda, δ_{mak} ile asfaltit içeriği arasında ters yönlü ve zayıf bir etkileşimin olduğu, δ_{mak} ile çentik yüksekliği arasında ise ters yönlü ve yüksek bir etkileşimin olduğu belirlenmiştir. Kısa önem yaşlandırılmış karışımlarda, δ_{son} ile asfaltit içeriği ve çentik yüksekliği arasında ters yönlü ve orta seviyede bir etkileşimin olduğu belirlenmiştir. Uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda, δ_{son} ile asfaltit içeriği arasında ters yönlü ve zayıf bir etkileşimin olduğu, δ_{son} ile çentik yüksekliği arasında ise ters yönlü ve orta derecede bir etkileşimin olduğu tespit edilmiştir. Çentik yüksekliği ve asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının sıfır olması, bağımsız parametreler arasında içsel bağımlılık olmadığını göstermektedir.

Tablo 8.20. δ_{mak} ve δ_{son} modellerinin özeti

Model		Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık	Veri sayısı	Formül
δ_{mak}	KDY	0,714	0,000	54	$\delta_{\text{mak}} = 1,122 - 0,018.A - 0,168.ÇY$
	UDY	0,643	0,000	54	$\delta_{\text{mak}} = 0,939 - 0,016.A - 0,135.ÇY$
δ_{son}	KDY	0,698	0,000	54	$\delta_{\text{son}} = 2,197 - 0,104.A - 0,204.ÇY$
	UDY	0,430	0,000	54	$\delta_{\text{son}} = 1,768 - 0,061.A - 0,176.ÇY$

Tablo 8.20’de görülen δ_{mak} ’a ait R^2 değerlerinden kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda maksimum yükteki deformasyon değişimin %71,4’ünün, uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda maksimum yükteki deformasyon değişimin %64,3’ünün çentik yüksekliği ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. δ_{son} ’a ait R^2 değerlerinden Kısa dönem yaşlandırılmış karışımlarda yük boşaldığı andaki deformasyon değişimin %69,8’inin, uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda yük boşaldığı andaki deformasyon değişimin %43,0’ının çentik yüksekliği ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. Bütün modellerde p değerinin sıfır olması kurulan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tabloda yer alan formüllerde, δ , deformasyonu (mm), ÇY, çentik yüksekliğini (cm) ve A, asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin yük-deformasyon eğrisinden elde edilen maksimum yüke kadarki alan ($Alan_1$), maksimum yükten yük boşalıncaya kadarki alan ($Alan_2$) ve toplam alan ($Alan_3$) değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.21 ve Tablo 8.22’te verilmiştir.

Tablo 8.21 incelendiğinde alan değerlerinin hem gerilmeden hem de asfaltit içeriğinden etkilendiği görülmektedir. $Alan_1$ ve $Alan_3$ değerleri ile asfaltit içeriği arasında aynı yönlü ve zayıf bir etkileşimin olduğu, $Alan_1$ ve $Alan_3$ değerleri ile çentik yüksekliği arasında ise ters yönlü ve güçlü bir etkileşimin olduğu belirlenmiştir. $Alan_2$ değerleri ile asfaltit içeriği arasında ters yönlü zayıf bir etkileşim bulunurken $Alan_2$ değerleri ile çentik yüksekliği arasında ters yönlü güçlü bir etkileşim olduğu tespit edilmiştir. Çentik yüksekliği ve asfaltit içeriği arasındaki korelasyon katsayılarının sıfır olması, bağımsız parametreler arasında içsel bağımlılık olmadığını göstermektedir.

Tablo 8.21. Alan₁, Alan₂ ve Alan₃ değerlerinin değişkenleri arasındaki korelasyonlar

			Kısa Dönem Yaş.			Uzun Dönem Yaş.		
			Alan	Asfaltit	ÇY	Alan	Asfaltit	ÇY
Alan ₁	Pearson korelasyonu	Alan ₁	1,000	0,166	-0,947	1,000	0,183	-0,894
		Asfaltit	0,166	1,000	0,000	0,183	1,000	0,000
		ÇY	-0,947	0,000	1,000	-0,894	0,000	1,000
Alan ₂	Pearson korelasyonu	Alan ₂	1,000	-0,105	-0,901	1,000	-0,204	-0,725
		Asfaltit	-0,105	1,000	0,000	-0,204	1,000	0,000
		ÇY	-0,901	0,000	1,000	-0,725	0,000	1,000
Alan ₃	Pearson korelasyonu	Alan ₃	1,000	0,092	-0,971	1,000	0,076	-0,915
		Asfaltit	0,092	1,000	0,000	0,076	1,000	0,000
		ÇY	-0,971	0,000	1,000	-0,915	0,000	1,000

Tablo 8.22. Alan₁, Alan₂ ve Alan₃ modellerinin özeti

Model		Düzeltilmiş R ²	Anlamlılık	Veri sayısı	Formül
Alan ₁	KDY	0,922	0,000	54	Alan ₁ = 112,069 + 2,668.A - 31,779.ÇY
	UDY	0,826	0,000	54	Alan ₁ = 106,347 + 2,889.A - 29,567.ÇY
Alan ₂	KDY	0,816	0,000	54	Alan ₂ = 64,677 - 0,730.A - 13,071.ÇY
	UDY	0,550	0,000	54	Alan ₂ = 55,488 - 1,292.A - 9,578.ÇY
Alan ₃	KDY	0,948	0,000	54	Alan ₃ = 176,532 + 2,023.A - 44,849.ÇY
	UDY	0,937	0,000	54	Alan ₃ = 161,963 + 1,555.A - 39,144.ÇY

Tablo 8.22’de görülen R² değerlerinden Alan₁ değerlerindeki değişimin en az %82’sinin, KDY numunelerin Alan₂ değerlerindeki değişimin %82’sinin, UDY numunelerin Alan₂ değerlerindeki değişimin %55’inin ve Alan₃ değerlerindeki değişimin en az %94’ünün çentik yüksekliğine ve asfaltit içeriğine bağlı olarak açıklanabileceği söylenebilmektedir. Bütün modellerde p değerinin sıfır olması kurulan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tabloda yer alan formüllerde ÇY, çentik yüksekliğini (cm) ve A, asfaltit içeriğini (%) ifade etmektedir.

Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin 1–3 cm arası kritik enerji salıverme hızı (J_C) değerlerinin modellenmesi sonucu elde edilen değerler Tablo 8.23’te verilmiştir.

Tablo 8.23. J_c modellerinin özeti

Model		Düzeltilmiş R^2	Anlamlılık, p	Veri sayısı	Formül
J_c	KDY	0,611	0,000	18	$J_c = 0,500 + 0,046 * A$
	UDY	0,278	0,014	18	$J_c = 0,435 + 0,060 * A$

Tablo 8.23'te verilen R^2 değerlerinden KDY numunelerde J_c değerlerindeki değişimin %61,1'inin, UDY numunelerde J_c değerlerindeki değişimin %27,8'inin asfaltit içeriğindeki artış ile açıklanabileceği, p değerlerinden ($p < 0,05$) ise kurulan modelin anlamlı olduğu söylenebilmektedir.

9. SONUÇLAR

Tez çalışmasında, filler malzemesi olarak Silopi asfaltiti kullanımının bitümlü sıcak karışımların mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Silopi asfaltiti %1-5 aralığında 5 farklı oranda kullanılmış, elde edilen sonuçlar saf karışımla karşılaştırılmıştır. Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen sıcaklık verileri kullanılarak Elazığ için uygun bağlayıcı sınıfının PG 64-22 olduğu tespit edilmiştir. Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 70-100 sınıfı bitümün performans sınıfının PG 64-34 olduğu, Elazığ için şartname kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker türü kırmataş malzemesi, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave gradasyonuna uygun şekilde elenerek kullanılmıştır.

Saf ve asfaltit içeren karışımların tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmıştır. Karışımda kullanılan asfaltit oranı arttıkça bitüm içeriğinin azaldığı, saf karışımın optimum bitüm içeriğinin %5,27 olduğu, %5 asfaltit içeren karışımın ise optimum bitüm içeriğinin %5,04 olduğu belirlenmiştir. %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlar VMA şartname kriterini (min. %14) sağlamamasına rağmen asfaltitin etkisini daha geniş bir aralıkta değerlendirebilmek için çalışmanın geri kalan bölümünde %4 ve %5 asfaltit içeren karışımlar da kullanılmıştır. Karışımlar kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırma işlemlerine tabi tutularak asfaltitin uzun dönem yaşlanmaya etkisi de araştırılmıştır.

Çalışmada, karışımlar AASHTO R30 standardına göre uzun dönem yaşlandırılmıştır. UDY numuneler üzerinde de aynı deneyler uygulanmıştır. UDY numunelerden elde edilen sonuçlar KDY numunelerden elde edilen sonuçlara oranlanarak yaşlanma indeksi değerleri elde edilmiştir. Asfaltit içeriği arttıkça bütün deney sonuçlarında yaşlanma indeksi değerlerinde düzenli değişme olmamasına rağmen genel olarak asfaltit içeriği arttıkça karışımlarda uzun dönem yaşlanmanın etkisi azalmıştır.

Bütün deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda asfaltit içeriği arttıkça karışımların kalıcı deformasyona, yorulma çatlaklarına, nem hasarına ve çatlak ilerleyişine karşı dayanımının ve rijitliğin arttığı fakat karışımlarda daha gevrek kırılmanın görüleceği belirlenmiştir. Hacimsel tasarım göz önüne bulundurulduğunda filler olarak kullanılacak en uygun oranın %3 olduğu belirlenmiştir. Filler olarak %3 asfaltit kullanılması durumunda

kaplamanın performansının önemli oranda artacağı elde edilen deney sonuçlarından açıkça görülmektedir.

Asfaltit içeriğinin artması ve sıcaklığın azalması ile bitümlü sıcak karışımların rijitliğinin artması ayrıca esnekliğin azalması nedeniyle, bundan sonra yapılacak çalışmalarda asfaltit içeren karışımların düşük ısı çatlakları bakımından değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

1. **AASHTO PP1-98**, 1998. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
2. **AASHTO PP2-01**, 2001. Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA), *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
3. **AASHTO R30-02**, 2002. Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt. Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
4. **AASHTO T166**, 1999. Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
5. **AASHTO T209**, 1999. Bulk Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
6. **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.
7. **AASHTO TP1-98**, 1998. Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
8. **AASHTO TP4**, 2000. Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor
9. **AASHTO TP5-98**, 1998. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
10. **AASHTO 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.
11. **Abraham, H.**, 1960. Historical Review and Natural Raw Materials (v. 1), in *Asphalts and Applied Substances*, pp. 370, 6th ed., Van Nostrand, New York.

12. **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.
13. **Ağar, E. ve Umar, F.**, 1991. Yol Üst Yapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat fakültesi Matbaası Yayını, 339 s., İstanbul.
14. **Aksoy, A., Şamlıoğlu, 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.
15. **Alavi, H.A., Ameri, M., Gandomi, A.H. ve Mirzahosseini, M.R.**, 2011. Formulation of Flow Number of Asphalt Mixes Using a Hybrid Computational Method, *Construction and Building Materials*, **25** (3), 1338-1355.
16. **Alfa, M.M.**, 2008. Utilization of Syrian Natural Asphalt in Hot-Mix Concrete Mixtures, *Ph.D. Thesis*, Faculty of Engineering at Cairo University, Cairo.
17. **Alfa, M., Nouredin, M.S. ve Ghaly, N.F.**, 2009. Optimum and Economic Utilization of Al-Beshery Modified Asphalt in Syrian Road Paving Industry, *Second Syrian International Road Conference*, Damascus, Syrian, November 10-12, 18 p.
18. **Alp, İ.**, Asfaltit, 1997. *MTA Dergi*, **16** (3), 5-9.
19. **Alshamsi, K.S.**, 2006. Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures, *PhD Thesis*, Louisiana State University, Louisiana.
20. **Altaş, Ö.Y.**, 2002. Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
21. **Alyamaç, K.E.**, 2008. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanik Prensipleriyle İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
22. **Anderson, R.M. ve McGennis, R.B.**, 1994. Superpave Asphalt Mixture Design Illustrated Level 1 Lab Methods, *National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, FHWA-SA-95-004*, 80 p., Asphalt Institute, Lexington, KY.
23. **Anochie-Boateng, J. ve Tutumluer, E.**, 2009(a). Shear Strength Properties of Naturally Occurring Bituminous Sands, *8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields (BCRA)*, Illinois, USA, 29 June-2 July, 1029-1128.
24. **Anochie-Boateng, J. ve Tutumluer, E.**, 2009(b). Characterizing Volumetric Deformation Behavior of Naturally Occurring Bituminous Sand Materials, *7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Rhodes, Greece, 27-29 May, 1-10.

25. **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.
26. Asphalt Institute, 1996. Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), 128 p., USA.
27. **Bakker, M.**, 2001. SCB Test Results, Statiscical Analysis, *TNO (Dutch Organisation for Applied Scientific Reserch) Report*, **TNO-report FSP-RPT-010048**, Netherlands.
28. **Bausano, J. ve Williams, C.**, 2007. A new Approach to Calculating Flow Number, Unpublished Paper.
29. **Bell, K.G. ve Hunt, J.M.**, 1963. Native Bitumens Associated with Oil Shales, Organic geochemistry: Earth Science Series; monograph no. 16, Macmillan Co., New York.
30. **Bell, C.A. ve Sosnovske, D.**, 1994. Aging: Binder Validation, *Strategic Highway Research Program*, **SHRP-A-384**, National Research Council, Washington D.C.
31. **Bell, C.A., Wahab, A.Y., Cristi, M.E. ve Sosnovske, D.**, 1994(a). Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures, *Strategic Highway Research Program*, **SHRP-A-383**, National Research Council, Washington D.C.
32. **Bell, C.A., Wieder, J.A. ve Fellin, J.M.**, 1994(b). Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures, *Strategic Highway Research Program*, **SHRP-A-390**, National Research Council, Washington D.C.
33. **Bilkady, Z.**, 1984. Bitumen-A History, *Aramco World Magazine*, **35**(6), 2-9.
34. **BS DD 213**, 1993. Method for Determination of the Indirect Tensile Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures, *British Standards Institution*, London.
35. **Cao, W.**, 2007. Study on Properties of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process, *Construction and Building Materials*, **21**, 1011–1015.
36. **Chen, X. Li, H., ve Qian, Z.**, 2009. On the Fracture Properties of Epoxy Asphalt Mixture with SCB Test, Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Taylor and Francis Group, 531-540, London.
37. **Chilingarian, G.V. ve Yen, T.F.**, 1978. Bitumen, Asphalt and Tar Sands, Elsevier Scientific Pub. Co., New York, USA.
38. **Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W. ve Anderson, M.**, 1994. The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, *Strategic Highway Research Program*, **SHRP-A-407**, 184 p., National Research Council, Washington, DC.

39. **Çolak, K.M.**, 2006. Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
40. **Dokken, K. ve Evensen, T.**, http://www.americangilsonite.com/asphalt_oslo.html
Gilsonite Resin - A Modifier for High Stability Pavements, American Gilsonite Company, 03.03.2010.
41. **Dow, A.W.**, 1903. Asphalt Experiments at Washington, *Engineering News Record*, **47**, 18-25.
42. DPT, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Enerji Hammaddeleri Alt komisyonu, Kömür Çalışma Grubu Raporu, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Müsteşarlığı, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Yayın no: DPT : 2440 – ÖİK: 496, 142 s., Ankara, 2001.
43. ELE, 1994. Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Reference and Operating Manual, ELE International Ltd., Hertfordshire, UK.
44. **Forbes, R.J.**, 1964. Studies in Ancient Technology, Leiden Publication, Brill, Netherlands.
45. **Francken, L.**, 1998. Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, E & FN Spon, 352 p. London and New York.
46. **Garcia, O. F.**, 2002. Asphalt Mixture and Loading Effects on Surface-Cracking of Pavements, *Ms Thesis*, University of Florida, Florida.
47. **Geçkil, T.**, 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
48. **Ghile, D.B.**, 2006. Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, *MSc Thesis*, Delfth University of Technology, Delfth.
49. **Goh, S.W. ve You, Z.**, 2009. A Simple Stepwise MEthod to Determine and Evaluate the Initiation of Tertiary Flow for Asphalt Mixtures Under Dynamic Creep Test, *Construction and Building Materials*, **23**, 3398–3405.
50. **Güngör, A.G. ve Sağlık, A.**, 2008. Türkiye Bitümlerinin Performans Sınıflarının Belirlenmesi, *1. Ulusal Karayolu Kongresi*, 1-3 Nisan, Ankara.
51. **GÜNGÖR, A.G. ve Sağlık, A.**, 2009. Normal ve Modifiye Bitümlerin Kalıcı Deformasyonlara Karşı Direncinin Sıfır Kesme Viskozitesi ile Belirlenmesi, 18-19 Kasım, *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi*, Ankara, 142-152.

52. **Hadidi, F.**, 2009. Employing Al-Bishri Natural Sand Asphalt In Hot Mix Asphalt With Dense Graded Crushed Stone In Flexible Pavement In Highways In Syria, *Second Syrian International Road Conference*, Damascus, Syrian, November 10-12, 28 p.
53. **Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E. ve Loria, L.**, 2008. Reflective Cracking of Flexible Pavements Phase II: Review of Analysis Models and Evaluation Tests, Nevada Department of Transportation, **Research Report No. 13JF-1**, 87 pp., Carson City, Nevada.
54. **Hamidi, H.**, 1998. Stiffness Modulus and Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mix Containing Gilsonite, *Ms Thesis*, Bandung Technology Institute, Bandung, Indonesian.
55. **Harigan, E.T., Leahy, R.B. ve Youtcheff, J.S.**, 1994. The Superpave Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices, *Strategic Highway Research Program, SHRP-A-379*, National Research Council, Washington D.C.
56. **Haryanto, I. ve Takahashi, O.**, 2007. Crack Initiation Assessment of Wearing Course Asphalt Mixtures Using Aggregate Gradation Characteristic, *ITB Journal of Engineering Science*, **39** (1), 28-42.
57. **Haryanto, I. ve Takahashi, O.**, 2008. Ductile fracture assessment of Indonesian wearing course mixtures using critical J integral and crack tip opening angle, *International Journal of Pavement Engineering*, **9** (3), 165–176.
58. **Hımıshoğlu, S., ve Hattatoğlu, F.**, 2003. Asfalt Betonunun Yorulma Ömrünün Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tahmin Edilmesi, *TÜBİTAK Projesi*, Erzurum.
59. **Hımıshoğlu, S. ve Açar, E.**, 2004. Use of the Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, *Materials Letters*, **58**, 267-271.
60. **Hoffman, R., Oosterbaan, B., Erkens, S.M.J.G. ve Kooij, J.V.D.**, 2003. Semi-Circular Bending Test to Assess the Resistance Against Crack Growth, *Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Proceedings of the 6. International RILEM Symposium*, Zurich, April 13-16, 257-263.
61. **Huang, B., Shu, X. ve Tang, Y.**, 2005. Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strength Tests for HMA Mixtures, *Geo-Frontiers 2005, Advances in Pavement Engineering*, **GSP 130**, 155-169.
62. **Huang, B., Li, G. ve Shu, X.**, 2006. Investigation into Three-Layered HMA Mixtures, *Composites: Part B*, **37**, 679–690.
63. **İlcalı, M.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s., İstanbul.
64. **İnce, R.**, 1994. Çimento Bazlı Malzemelerin Kırılmasında Boyut Tesirinin (Non-Linear Kırılma Mekanik) Yapay Sinir Ağları ile İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

65. **İnce, R.**, 1998. Betonarme Yapı Elemanlarında Basınç-Kesme Kırılmasının ve Boyut Etkisinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
66. **Jajliardo, A.P.**, 2003. Development of Specification Criteria to Mitigate Top-Down Cracking, *Ms Thesis*, University of Florida, Florida.
67. **Juan, J. ve Xiaoning, Z.**, 2005. Modification of the Rolling Thin Film Oven Test for Modified Asphalt, *Proceedings of the 24th Southern African Transport Conference (SATC 2005)*, Pretoria, South Africa, July 11-13, 979-986.
68. **Kabir, M.S.**, 2008. Effect of Hydrated Lime on the Laboratory Performance of Superpave Mixtures, *Ms Thesis*, Louisiana State University, Louisiana.
69. **Karaşahin, M. ve Terzi, S.**, 2007. Evaluation of Marble Waste Dust in the Mixture of Asphalt Concrete, *Construction and Building Materials*, **21**(3), 616–620.
70. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü.
71. **Katz, D.A.**, The Athabasca Tar Sands Fort McMurray, Alberta, Canada, David A. Katz resmi internet sitesi, <http://www.chymist.com/Athabasca%20Tar%20Sands.pdf>, 03.03.2011.
72. **Khodaii, A. ve Mehrara, A.**, 2009. Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test, *Construction and Building Materials*, **23** (7), 2586-2592.
73. **Kingery, W.R.**, 2004. Laboratory Study of Fatigue Characteristics of HMA Surface Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP), *Ms thesis*, The University of Tennessee, Knoxville.
74. **Kök, B.V.**, 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
75. **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.
76. **Kök, B.V., Yılmaz, M., Kuloğlu, N. ve Turgut, P.**, 2010. Laboratory Investigation of Syrian Natural Asfalt in Asphalt Concrete, *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Trabzon, Turkey, September 27-30, 1-6.
77. **Kuloğlu, N.**, 2001. Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, *TÜBİTAK, Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, **25**, 61-67.

78. Kuloğlu, N., Yılmaz, M., Kök, B.V. ve Geçkil, T., 2009. Silopi Asfaltiti Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Hasarına Karşı Dayanımına Etkisi, *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi*, Ankara, 18-19 Kasım, 309-317.
79. Kutluhan, S., 2008. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun Modellenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
80. Lav, A.H. ve Lav, M.A., 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
81. Lebküchner, R.F., 1969. Güneydoğu Türkiye'deki Asfaltik Maddelerin Zuhur Ve Teşekkülleri, *MTA Dergi*, **72**, 124-145.
82. Lim, I.L., Johnston, I.W. ve Choi, S.K., 1993. Stress Intensity Factors for Semi-Circular Specimens Under Three-Point Bending, *Engineering Fracture Mechanics*, **44** (3), 363-382.
83. Marasteanu, M.O., Li, X., Clyne, T.R., Voller, V.R., Timm, D.H. ve Newcomb, D.E., 2004. Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete Pavements, *Minnesota Department of Transportation, MN/RC – 2004-23*, 229 p., Minnesota.
84. 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.
85. McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W. ve Solaimanian, M., Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-95-003*, 172 p., Washington, DC.
86. Meyer, R.F. ve Witt, W., Definition and World Resources of Natural Bitumens, *U.S. Geological Survey Bulletin*, **1944**, 1-14.
87. Mohammad, L., Saadeh, S. ve Cooper, S., 2008. Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Sasobit® Warm Mix Additive, *Proceedings of GeoCongress 2008*, March 9-12, 1016-1023, Orleans, Louisiana, USA,
88. Molenaar, A.A.A. ve Medani, T.O., 2000. Rational Testing Methods for Performance Based Specifications, *Proceedings of the 1st International Conference World of Asphalt Pavements*, Sydney, Australia, July 7-10, 484-500.
89. Molenaar, J.M.M., 2003. Performance Related Characterisation of the Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat Road and Hydraulic Engineering Institute, 396 pp., Delfth, Netherlands.
90. Mull, M. A., Stuart, K., ve Yehia, A., 2002. Fracture Resistance Characterization of Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt Pavement, *Journal of Materials Sciences*, **37**, 557-566.

91. **Nakoman, E.**, 1977. Güneydoğu Anadolu Asfaltik Madde Zuhurları, *Madencilik Dergisi*, **16** (6), 41-51.
92. **Orhun, F.**, 1969. Güneydoğu Türkiye'deki Asfaltik Maddelerin Kimyasal Özellikleri, Metamorfoz Dereceleri Ve Klasifikasyon Problemleri, *MTA Dergi*, **2**, 146-157.
93. **Oruç, Ş. ve Eren, Ü.**, 2008. Asfaltitin Asfalt Betonunda Mineral Filler Olarak Kullanılabilirliği, *Yapı Dünyası Dergisi*, **150**, 10-14.
94. **Othman, A.M.**, 2010. Effect of Low-Density Polyethylene on Fracture Toughness of Asphalt Concrete Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **22** (10), 1019-1024.
95. **Özdemir, A.**, 2006. Seramik Malzemelerin kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu elemanlar Yöntemi ile Teorik Olarak Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
96. **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.
97. **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: Test Methods, *Strategic Highway Research Program, SHRP A-370*, 197 p., National Research Council Washington, DC.
98. **Raghavendra, S., Zapata, C.E., Houston, M.W.N., Witczak, M. ve Mirza, M.W.**, 2006. Verification of the Rate of Asphalt Mix Aging Simulated by AASHTO PP2-99 Protocol, *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul, Turkey, October, 11-13, 10 p.
99. **Sah, S.L.**, 2007. Encyclopaedia of Petroleum Science and Engineering, Kalpaz Publication, Delhi, India.
100. **Shu, X., Huang, B. ve Vukosavljevic, D.**, 2010. Evaluation of Cracking Resistance of Recycled Asphalt Mixture Using Semi-Circular Bending Test, *Paving Materials and Pavement Analysis*, **GSP 203**, 58-65.
101. **Simms, S.A.**, 1998. Use of Coal Fly Ash in Asphalt Concrete Mixes, *MSc Thesis*, Dalhousie University, Daltech, Canada.
102. **Siswosoebrotho, B.I., Kusnianti, N. ve Tumewu, W.**, 2005. Laboratory Evaluation of Lawele Buton Natural Asphalt in Asphalt Concrete Mixture, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **5**, 857 – 867.

103. Sönmez, İ., Deniz, M.T., Tayfur, S., Özen, H., Yıldırım, S.A. ve Eren, B.K., 2005. Modifiye Katkı Maddelerinin Bitümlü Sıcak Karışıma Etkisi ve Performans Üstünlükleri, 6. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 23-25 Mayıs, 334-348.
104. 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.
105. Subagio, B.S., Karsaman, R.H., Adwang, J. ve Fahmi, I., 2005. Fatigue Performance Of HRA (Hot Rolled Asphalt) and Superpave® Mixes Using Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) as Fine Aggregates and Filler, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **6**, 1207 -1216.
106. 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.
107. Şengöz, B., 2003. Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına ve Suya Duyarlılığına Etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
108. Şengüler, İ., 2007. Asfaltit ve Bitümlü Şeylin Türkiye’deki Potansiyeli ve Enerji Değeri, *EMO Türkiye VI. Enerji Sempozyumu – Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği*, Ankara, 22-24 Ekim, s. 186-195.
109. Tapkın, S., Uşar, Ü., Tuncan, A. Ve Tuncan M., 2009. Repeated Creep Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Bituminous Mixtures, *Journal of Transportation Engineering*, **135**, 240-249.
110. 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.
111. Traxler, R.N., 1963. Durability of Asphalt Cements, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, **32**, 44-58.
112. TS 118 EN 1426, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
113. TS 119, 1964. Bitümlü Maddelerin Duktilite Deneyi İçin Metot, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
114. TS 120 EN 1427, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilye Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
115. TS 1081 EN 12591, 2003. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Kaplama sınıfı bitümler-Özellikler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

116. **TS 1087**, 1972. Bitümlü Maddelerde Özgöl Ağırlık Tayini (Hidrometre, Piknometre ve Su İçinde Tartma Metotları İle), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
117. **TS EN 12593**, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Fraas Kırılma Noktasının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
118. **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.
119. **TS EN 12697-24+A1**, 2004. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 24: Yorulma Direnci, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
120. **TS EN 12697-34+A1**, 2007. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
121. **TS EN 12697-44**, 2010. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 44: Yarım Daire Eğilme Deneyi ile Çatlak İlerlemesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
122. **Tunç, A.**, 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, 352 s., Ankara.
123. Türkiye Maden Mühendisleri Odası Başkanlığı, 1976. Asfaltitler üzerine, *Madencilik Dergisi*, 15 (6), 5-7.
124. **Uğuz, A.** 1996. Kırılma Mekaniğine Giriş, Uludağ Üniversitesi Basımevi, 160 s., Bursa.
125. **Ullidtz, P.**, 1987. Pavement Analysis, Elsevier, pp. 318, Amsterdam.
126. **Uluçaylı, M.**, 1976. Türkiye’de Asfalt Betonlu Kaplamalar ve Alternatifleri, *Karayolları Teknik Bülten*, **65**(16), 317-442.
127. URL-1, <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> Karayolları Genel Müdürlüğü Resmi İnternet Sitesi. 01.03.2011.
128. URL-2, <http://www.maden.hacettepe.edu.tr/dmmrt/> Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Resmi İnternet Sitesi, 03.03.2011.
129. URL-3, http://training.ce.washington.edu/wsdot/modules/03_materials/033_body.htm Washington State Department of Transportation, 03.03.2011.
130. URL-4, www.americangilsonite.com/ AMG, Gilsonite in Paving Applications American Gilsonite Company, resmi internet sitesi, 04.03.2010.

131. URL-5, <http://www.cshrp.org/products/brief-17.pdf> Superpave 2000 – Improved Standards for a New Millennium, Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), C-SHRP Technical Brief # 17, Ontario, 8p., 28.03.2011.
132. URL-6, 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., 31.03.2011.
133. URL-7, <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/km/lecture5.pdf>, Prof. Dr. İrfan AY Kırılma Mekaniği Ders Notları, 01.04.2011.
134. URL-8, <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~tonta/courses/spring2009/bby208/bby208-11-regresyon-analizi.ppt>, Prof. Dr. Yaşar TONTA Ders Notları, 15.04.2011.
135. URL-9, www.baskent.edu.tr/~matemel/courses/veri_analizi_regresyon_analizi.ppt, Doç. Dr. Mehtap AKÇİL Ders Notları, 15.04.2011.
136. URL-10, www.istatistikmerkezi.com/makale,istatistik-korelasyon-analizi,147.html, 15.04.2011.
137. Ünver, Ö., 1995. Uygulamalı İstatistik Yöntemler, Siyasal Kitabevi, 545 s., Ankara.
138. Vallerga, B.A., 1981. Pavement Deficiencies Related to Asphalt Durability, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, **50**, 481-491.
139. Vukosavljevic, D., 2006. Fatigue Characteristics of Field HMA Surface Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP), *Ms Thesis*, The University of Tennessee, Knoxville.
140. Wagoner, M.P., Butlar, W.G. ve Paulino, G.H., 2005. Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, *Society for Experimental Mechanics*, **45** (3), 270-277.
141. Walubita, L.F., Umashankar, V., Hu, X., Jamison, B., Zhou, F., Scullion, T., Martin, A.E. ve Dessouky, S., 2010. New Generation Mix-Designs: Laboratory Testing and Construction of the APT Test Sections, *Texas Transportation Institute*, **FHWA/TX-10/0-6132-1**, p. 180, Texas.
142. Whiteoak, D. ve Read, J., 2003. The Shell Bitumen Handbook, London, Thomas Telford Ltd., 464 p.
143. Widyatmoko, I. ve Elliott, R., 2008. Characteristics of Elastomeric and Plastomeric Binders in Contact with Natural Asphalts, *Construction and Building Materials*, **22**, 239-249.
144. Witczak, M.W., Kaloush, K.E., Pellinen, T., El-Basyouny, M. ve Von Quintus, H., 2002. Simple Performance Test for Superpave Mix Design, The National Cooperative Highway Research Program, **NCHRP Rep 465**, p. 465, Washington, DC.

145. **Yılmaz, M. ve Kök, B.V.**, 2009. Effects of Ferrochromium Slag with Neat and Polymer Modified Binders in Hot Bituminous Mix, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, **16** (5), 310-318.
146. **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.
147. **Zoorob, S.E. ve Suparma, 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

Mehmet YILMAZ, 1981 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlkokulu, ortaokulu ve liseyi Elazığ'da tamamlamıştır.

1999 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2003 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başlamış, 2005 yılında yüksek mühendis olarak mezun olmuştur. 2005 yılında aynı anabilim dalında doktora eğitime başlamıştır. 2010 yılında doktora eğitime ara vermiş, kısa dönem er olarak vatani görevini tamamlamıştır.

Evli ve bir çocuk babası olan YILMAZ, 2007 yılından beri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.