

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

**FARKLI ILIK ASFALT KATKILARININ BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Akın İSTEK

(08115202)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Ulaştırma

Danışman: Doç. Dr. Taner ALATAŞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Mart 2017

MART-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI İLİK ASFALT KATKILARININ BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

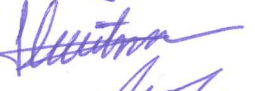
DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Akın İSTEK

(08115202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Mart 2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Nisan 2017

Tez Danışmanı:	Doç. Dr. Taner ALATAŞ (F.Ü)	
Diğer Jüri Üyeleri:	Prof.Dr. Gülbeyi DURSUN (F.Ü)	
	Doç.Dr. Mehmet YILMAZ (F.Ü)	
	Prof.Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU (T.Ü)	
	Yrd.Doç.Dr. Tacettin GEÇKİL (İ.Ü)	

NİSAN-2017

ÖNSÖZ

Doktora eğitimimde gerek ders aşamasında gerekse tez çalışmamın planlaması, yürütülmesi ve tamamlanması aşamalarında değerli katkılarını ve yardımlarını gördüğüm Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanımız Prof.Dr. Necati KULOĞLU'na ve danışman hocam Doç.Dr. Taner ALATAŞ'a saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım sürecinde her türlü bilgi, görüş, destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım, Doç.Dr. Mehmet YILMAZ'a, Doç.Dr. Baha Vural KÖK'e ve Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e teşekkür ederim.

Tezimin özellikle laboratuvar çalışmaları sırasında yardıma her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan Arş. Gör. Erkut YALÇIN'a, Arş. Gör. M. Ertuğrul ÇELOĞLU'na, Arş. Gör. Özge Erdoğan YAMAÇ'a, Arş. Gör. Mustafa AKPOLAT'a ve laboratuvar teknisyenimiz Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Akın İSTEK

Elazığ - 2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XV
KISALTMALAR.....	XVII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Önemi ve Konusu	1
1.2. Araştırmanın Amacı ve İzlenecek Yol	2
2. BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR.....	4
2.1. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Agregalar	4
2.1.1. Agregaların Mineralojik Olarak Sınıflandırılması	5
2.1.2. Agregalarda Gradasyon	5
2.1.3. Agregalarda Porozite	6
2.1.4. Agregalarda Yüzey Alanı ve Boşluk	6
2.1.5. Agregalarda Özgöl Ağırlık	6
2.2. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar	7
2.2.1. Katran	7
2.2.2. Asfalt	8
2.2.2.1. Doğal Asfalt.....	8
2.2.2.2. Rafineri Asfalt	9
2.2.3. Bitümün Kimyasal Bileşenleri.....	12
2.2.4. Bitümün Özgöl Ağırlığı.....	12
2.2.5. Bitümün Hacimsel Genişlemesi	12
2.2.6. Bitümün Isıl Özellikleri ve Isıya Duyarlılığı	12
2.2.7. Bitümün Reolojik Özellikleri	13
2.2.8. Bitümün Adezyonu.....	13
2.3. Bitümlü Karışımlarda Aranılan Özellikler	13
2.3.1. Bitümlü Karışımların Stabilitesi.....	14
2.3.2. Bitümlü Karışımların Rijitliği	14
2.3.3. Bitümlü Karışımların Durabilitesi	14
2.3.4. Bitümlü Karışımların Yorulma Mukavemeti	15
2.3.5. Bitümlü Karışımların Esnekliği.....	15
2.3.6. Bitümlü Karışımların Geçirimsizliği	15
2.3.7. Bitümlü Karışımların Kayma Direnci	16
3. ILIK KARIŞIM ASFALT	17
3.1. Ilık Karışım Asfalt Teknolojisinin Gelişimi	18
3.2. Ilık Karışım Asfalt Üretim Teknikleri	20
4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI	21
4.1. Bitümlü Karışımlarda Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Kullanımı	23
4.2. Bitümlü Karışımlarda Sönmüş Kireç Kullanımı	29

4.3. Ilık Karışım Asfaltlarla İlgili Yapılan Çalışmalar	33
5. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ.....	41
5.1. Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler	42
5.1.1. Aşınma (Los Angeles) Deneyi	42
5.1.2. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi	43
5.1.3. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi.....	45
5.2. Bağlayıcılar Üzerinde Yapılan Deneyler.....	47
5.2.1. Penetrasyon Deneyi	48
5.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi	49
5.2.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi	50
5.2.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi	51
5.2.5. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)	52
5.2.6. Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi.....	53
5.2.7. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi	54
5.3. Bitümlü Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler	56
5.3.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	56
5.3.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi	58
5.3.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi.....	59
5.3.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	60
5.3.5. Dinamik Sünme Deneyi	62
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
6.1. Agregalar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	68
6.2. Bağlayıcı Malzemenin Özellikleri.....	69
6.3. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması	70
6.4. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları.....	71
6.4.1. Penetrasyon Deney Sonuçları	72
6.4.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	74
6.4.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları	75
6.4.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma(RTFOT) Deney Sonuçları	77
6.4.5. DSR ve BBR Deney Sonuçları	78
6.5. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	82
6.5.1. Karışımların Optimum Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi	82
6.5.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları	116
6.5.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları	123
6.5.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	126
6.5.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları	133
7. SONUÇLAR.....	146
KAYNAKLAR.....	148
ÖZGEÇMİŞ	154

ÖZET

Asfalt üretiminde uygulamaya konulan bilimsel gelişmelerden biri de ılık karışım asfalt teknolojisidir. Ilık karışım asfalt teknolojisi ile daha düşük sıcaklıklarda asfalt üretimi ve dökümü mümkün olmaktadır.

Tez çalışmasında Pawma-1 ve Leadcap ılık karışım asfalt katkı maddeleri ile SBS katkı maddesi karışım numunelerinde denenmiştir. Bununla beraber daha önceki çalışmalarda bitümlü sıcak karışımların bazı özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenen sönmüş kirecin ılık karışım asfaltlarda filler olarak kullanımının etkileri incelenmiştir.

Modifiye bağlayıcılar hazırlanmış ve bağlayıcı deneyleri yapılmıştır. Marshall yöntemine göre optimum bitüm oranları belirlenerek karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin yarısında filler yerine %2 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Ilık karışımlarda agrega ve bağlayıcı malzeme daha düşük sıcaklıklarda karıştırılıp sıkıştırılmıştır. Karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma, indirekt çekme rijitlik modülü, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır.

Ilık karışım asfaltlarda stabilite ve ITSM değerleri artmış fakat çekme dayanımı ve sünme modülü değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Sönmüş kireç katkısı ile ılık karışım asfaltlarda çekme dayanımı ve sünme performansları artarak kontrol numunelerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Pawma-1 katkısı yorulma dayanımını bir miktar arttırırken Leadcap katkısı küçük bir miktar azaltmıştır. Kireç katkısı ile Leadcap modifiyeli karışımların yorulma performansları iyileşmiştir. Sönmüş kireç katkısının, Leadcap modifiyeli karışımlara uygulanan tüm deneylerde olumlu sonuçlar verdiği görüldüğü için birlikte kullanılmaları faydalı olacaktır. Pawma-1 katkılı karışımlarda ise sönmüş kireç, indirekt çekme rijitlik modülünü ve yorulma performansını olumsuz etkilerken diğer deneylerde olumlu etki yapmıştır. Sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ilık Karışım Asfalt, Leadcap, Pawma-1, Stiren-Butadien-Stiren, Sönmüş Kireç, Marshall Yöntemi.

SUMMARY

Effect Of Different Warm Asphalt Admixtures On The Mechanical Properties Of Bituminous Mixtures

One of the scientific advances put into practice in asphalt production is warm mix asphalt technology. Warm mix asphalt technology enables asphalt production and casting at lower temperatures.

In the thesis study, Pawma-1 and Leadcap warm mix asphalt admixtures and SBS admixture were tested in mixture samples. In addition, the effects of the use of the hydrated lime as fillers in the warm mix asphalts that were observed to improve some properties of the hot mix asphalts in previous studies have been investigated.

Modified binders were prepared and binder experiments were carried out. Mixture samples were prepared by determining the optimum bitumen contents according to the Marshall method. Half of the mixture samples, 2% hydrated lime was used instead of filler. Aggregate and binder material are mixed in warm mixes at lower temperatures and compacted. Marshall stability and flow, indirect tensile stiffness modulus, resistance to moisture damage, indirect tensile fatigue and dynamic creep tests were applied on the mixtures.

Stability and ITSM values were increased in the warm mix asphalt, but the tensile strength and creep modulus values were found to decrease. The tensile strength and creep performances of the warm mix asphalt with hydrated lime increased, resulting similar to the control samples. While Pawma-1 contributor increased the fatigue strength slightly, Leadcap contributor reduced in a small amount. With the contribution of hydrated lime in Leadcap modified mixtures fatigue performance are improved. It would be beneficial to use together the hydrated lime additive because it appears to give positive results in all experiments on Leadcap modified mixtures. In Pawma-1 modified mixtures, hydrated lime has a negative impact on indirect tensile stiffness modulus and fatigue performance, but has a positive effect on other experiments. SBS modified mixtures with hydrated lime additive were found to give the best results.

Key words: Warm Mix Asphalt, Leadcap, Pawma-1, Styrene-Butadiene-Styrene, Hydrated Lime, Marshall Method

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Asfalt emülsiyonu üretimi (Deniz, 2011).	11
Şekil 3.1. Sıcaklıklara göre sınıflandırma(D'Angelo vd., 2008).	18
Şekil 4.1. SBS'nin molekül yapısı (Cong vd., 2008).	24
Şekil 4.2. Saf bitümün molekül yapısı. (Cong vd., 2008).	24
Şekil 4.3. SBS ile modifiye edilmiş bitümün molekül yapısı (Cong vd., 2008).	24
Şekil 5.1. Los Angeles deney aleti (MEGEP, 2006).	42
Şekil 5.2. Penetrasyon deney aletleri	48
Şekil 5.3. Yumuşama noktası deney aleti	49
Şekil 5.4. Bitümlü bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).	50
Şekil 5.5. Brookfield dönel viskozimetre deney aleti	51
Şekil 5.6. Bohlin DSR deney aleti	52
Şekil 5.7. Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti	53
Şekil 5.8. PAV deney aleti	54
Şekil 5.9. Kiriş eğme reometresi deney aleti	55
Şekil 5.10. Marshall tokmağı ve numune çıkartıcı kriko	57
Şekil 5.11. Marshall stabilite ve akma deney aleti	57
Şekil 5.12. Piknometre ve vakum cihazı	58
Şekil 5.13. UTM deney aleti ve ITSM deney düzeneği	60
Şekil 5.14. İndirekt çekme yorulma deney düzeneği	62
Şekil 5.15. Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi (Kaloush vd., 2002).	62
Şekil 5.16. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi (Kaloush vd., 2002).	63
Şekil 5.17. Dinamik sünme deneyi düzeneği	64
Şekil 6.1. Deneylerin yapılış aşamaları	66
Şekil 6.2. Leadcap	67
Şekil 6.3. Pawma-1	67
Şekil 6.4. SBS	67
Şekil 6.5. Agrega gradasyon eğrisi	69
Şekil 6.6. Modifiye bitüm hazırlama cihazı	71
Şekil 6.7. Bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları	72

Şekil 6.8. Bağlayıcıların PI değerleri.....	72
Şekil 6.9. RTFO deneyine tabi tutulan bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları.....	73
Şekil 6.10. Bağlayıcıların kalıcı penetrasyon değerleri	73
Şekil 6.11. RTFO deneyine tabi tutulan bağlayıcıların PI değerleri.....	74
Şekil 6.12. Bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları	74
Şekil 6.13. RTFO deneyine tabi tutulan bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları	75
Şekil 6.14. Dönel viskozimetre deney sonuçları	76
Şekil 6.15. Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiği	76
Şekil 6.16. Bağlayıcıların 64 °C'deki $G^*/\sin\delta$ değerleri	79
Şekil 6.17. BBR deneyi yapılmış numune örnekleri	81
Şekil 6.18. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi	84
Şekil 6.19. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi	84
Şekil 6.20. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi....	85
Şekil 6.21. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi.....	85
Şekil 6.22. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi	85
Şekil 6.23. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi ...	86
Şekil 6.24. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi	86
Şekil 6.25. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi	86
Şekil 6.26. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi	87
Şekil 6.27. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi	87
Şekil 6.28. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi	87
Şekil 6.29. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi	88
Şekil 6.30. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi	88
Şekil 6.31. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi	88
Şekil 6.32. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi	89

Şekil 6.33. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi	89
Şekil 6.34. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi.....	89
Şekil 6.35. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi.....	90
Şekil 6.36. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi	90
Şekil 6.37. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi	90
Şekil 6.38. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi.	91
Şekil 6.39. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi.....	91
Şekil 6.40. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi	91
Şekil 6.41. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi	92
Şekil 6.42. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi.....	93
Şekil 6.43. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi.....	93
Şekil 6.44. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi.....	93
Şekil 6.45. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi.....	94
Şekil 6.46. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi	94
Şekil 6.47. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi.....	94
Şekil 6.48 . Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi	95
Şekil 6.49. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi	95
Şekil 6.50. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi	95

Şekil 6.51. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi	96
Şekil 6.52. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi	96
Şekil 6.53. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi.....	96
Şekil 6.54. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi	97
Şekil 6.55. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi	97
Şekil 6.56. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi	97
Şekil 6.57. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi	98
Şekil 6.58. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi	98
Şekil 6.59. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi	98
Şekil 6.60. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi.....	99
Şekil 6.61. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi.....	99
Şekil 6.62. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi	99
Şekil 6.63. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi.....	100
Şekil 6.64. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Stabilite-%Bitüm ilişkisi	100
Şekil 6.65. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi	100
Şekil 6.66. Sönmüş kireç katkısı ile optimum bitüm oranlarında meydana gelen değişim	101

Şekil 6.67. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Dp değerleri	107
Şekil 6.68. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Vh değerleri	107
Şekil 6.69. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin VMA değerleri	108
Şekil 6.70. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Vf değerleri	108
Şekil 6.71. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Stabilite değerleri	109
Şekil 6.72. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Akma değerleri.....	110
Şekil 6.73. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Marshall oranı değerleri	110
Şekil 6.74. Koşullandırılmış kireç katkısız numunelerin Marshall stabilite değerlerindeki değişim.....	111
Şekil 6.75. Koşullandırılmış kireç katkısız numunelerin Akma değerlerindeki değişim	112
Şekil 6.76. Koşullandırılmış kireç katkısız numunelerin Marshall oranı değerlerindeki değişim.....	112
Şekil 6.77. Sönmüş kireç katkılı koşullandırılmış numunelerin Marshall stabilite değerlerindeki değişim.....	113
Şekil 6.78. Sönmüş kireç katkılı koşullandırılmış numunelerin Akma değerlerindeki değişim	114
Şekil 6.79. Sönmüş kireç katkılı koşullandırılmış numunelerin Marshall oranı değerlerindeki değişim	114
Şekil 6.80. Numunelerin kalıcı Marshall stabilitesi değerleri	115
Şekil 6.81. Numunelerin Marshall stabilitelerindeki değişim	116
Şekil 6.82. Karışımların ITS değerleri.....	122
Şekil 6.83. Karışımların ITSr değerleri	123
Şekil 6.84. Karışımların ITSM değerleri	124
Şekil 6.85. Saf (50/70) karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi..	126
Şekil 6.86. Leadcap modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi	126
Şekil 6.87. Pawma-1 modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi	127
Şekil 6.88. SBS modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi	127

Şekil 6.89. Kireç içermeyen karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi	127
Şekil 6.90. Kireç katkılı saf (50/70) karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi.....	128
Şekil 6.91. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi	128
Şekil 6.92. Kireç katkılı Pawma-1 modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi	128
Şekil 6.93. Kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi.....	129
Şekil 6.94. Kireç katkılı karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi	129
Şekil 6.95. Kireç içermeyen karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekerrür sayıları	130
Şekil 6.96. Kireç içermeyen karışımların 954 yük tekrarındaki deformasyon miktarları	130
Şekil 6.97. Kireç katkılı karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekerrür sayıları ..	131
Şekil 6.98. Kireç katkılı karışımların 729 yük tekrarındaki deformasyon miktarları..	132
Şekil 6.99. Kireç katkısı ile karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekerrür sayılarındaki değişim	132
Şekil 6.100. Saf (50/70) karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi	133
Şekil 6.101. Saf (50/70) karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	134
Şekil 6.102. Leadcap modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi	134
Şekil 6.103. Leadcap modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	134
Şekil 6.104. Pawma-1 modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	135
Şekil 6.105. Pawma-1 modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi	135
Şekil 6.106. SBS modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	135
Şekil 6.107. SBS modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi	136
Şekil 6.108. Kireç içermeyen karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	136
Şekil 6.109. Kireç içermeyen karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi	137
Şekil 6.110. Kireç katkılı saf (50/70) karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	137
Şekil 6.111. Kireç katkılı saf (50/70) karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	138

Şekil 6.112. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	138
Şekil 6.113. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	138
Şekil 6.114. Kireç katkılı Pawma-1 modifiyeli karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	139
Şekil 6.115. Kireç katkılı Pawma-1 modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	139
Şekil 6.116. Kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi...	139
Şekil 6.117. Kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi ..	140
Şekil 6.118. Kireç katkılı karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	140
Şekil 6.119. Kireç katkılı karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	140
Şekil 6.120. Karışımların 2704 yük tekrarındaki ϵ_c değerleri	141
Şekil 6.121. Karışımların 2704 yük tekrarındaki E_c değerleri	142
Şekil 6.122. Karışımların 5400 yük tekrarındaki ϵ_c değerleri	143
Şekil 6.123. Karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri	144
Şekil 6.124. Sünme ve yorulma deneylerinde kullanılan numune örnekleri	145

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 4.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (Ilıcalı, 2001).	22
Tablo 5.1. Aşınma deneyi için numune tiplerine göre gerekli numune miktarları. (TS EN 1097-2).....	43
Tablo 5.2. Aşınma deneyinde kullanılacak çelik küre miktarları (TS EN 1097-2).	43
Tablo 5.3. Tane büyüklüğü 10 mm - 14 mm dışında olan agrega deneyleri için tavsiye edilen deney kütleleri, deney elekleri ve tel sepetlerin boyutları (TS-1367-2, 2010).	44
Tablo 5.4. Kaba agregaların özgül ağırlık ve su emme deneyleri için gerekli numune miktarları (ASTM-C127, 2012).	46
Tablo 5.5. Bitüm sınıfına göre PAV deney sıcaklıkları (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).	54
Tablo 6.1. Agregaların fiziksel özellikleri	68
Tablo 6.2. Agrega gradasyonu	68
Tablo 6.3. Saf bağlayıcıya ait özellikler	70
Tablo 6.4. Kullanılan katkı maddesi oranları.....	71
Tablo 6.5. Viskozite-sıcaklık grafiğinden tespit edilen sonuçlar.....	77
Tablo 6.6. RTFOT deney sonuçları	78
Tablo 6.7. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları.....	79
Tablo 6.8. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları.....	80
Tablo 6.9. PG 64-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi (McGennis vd., 1994).....	81
Tablo 6.10. Marshall stabilite ve akma testi hesaplamalarında kullanılan kavramlar	83
Tablo 6.11. Sönmüş kireç katkısız karışımların optimum bitüm oranları	92
Tablo 6.12. Sönmüş kireç katkılı karışımların optimum bitüm oranları	101
Tablo 6.13. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış koşullandırılmamış numunelerden elde edilen sonuçlar	103
Tablo 6.14. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar	104
Tablo 6.15. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış sönmüş kireç katkılı koşullandırılmamış numunelerden elde edilen sonuçlar.....	105
Tablo 6.16. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış sönmüş kireç katkılı koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar	106

Tablo 6.17. Nem hasarına karşı dayanım testi hesaplamalarında kullanılan kavramlar...	117
Tablo 6.18. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları ...	118
Tablo 6.19. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	119
Tablo 6.20. Sönmüş kireç katkılı koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	120
Tablo 6.21. Sönmüş kireç katkılı koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	121
Tablo 6.22. ITSM Deney sonuçları	125
Tablo 6.23. Kireç içermeyen karışımların yorulma deney sonuçları.....	130
Tablo 6.32. Kireç katkılı karışımların yorulma deney sonuçları	131
Tablo 6.25. Dinamik sünme deney sonuçları	141

SEMBOLLER LİSTESİ

σ	: Normal gerilme (Çekme gerilmesi)
ϵ	:Eksenel şekil değiştirme (deformasyon)
t	: Yükleme süresi
c	: Düzeltme katsayısı
h	: Numune yüksekliği
D_t	: Bitümlü karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm^3)
W_a	: Agregata ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)
W_b	: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)
G_e	: Agreganın efektif özgül ağırlığı (kN/cm^3)
G_{sb}	: Agreganın hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)
G_b	: Bitümün özgül ağırlığı (kN/cm^3)
WMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)
D_p	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)
V_h	: Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu (%)
V_f	: Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%)
J	: Absorbe su hacmi (cm^3)
B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (g)
B	: Vakum işleminden önce numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (g)
S'	: Doymuşluk derecesi (%)
I	: Hava boşluğu hacmi (cm^3)
V	: Numune hacmi (cm^3)
V_a	: Hava boşluğu yüzdesi (%)
TS	: Çekme dayanımı (kPa)
P_{mak}	: Kırılmaya neden olan maksimum yük (kN)
d	: Numune çapı (m)
t	: Ortalama numune yüksekliği (m)
TSR	: Çekme dayanımı oranı
$TS_{yaş}$	: 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 (N)
L	: Ortalama numune kalınlığı (mm)
R	: Poisson oranı
N_f	: Yorulma ömrü (Yük tekrar sayısı)
ϵ_o	: Başlangıç şekil değiştirmesi
S_o	: Karışımın başlangıç rijitliği
ϵ_c	: Eksenel birim şekil değiştirme
E_c	: Sünme rijitliği modülü (Mpa)
G	: Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)
$L1$	: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm)
$L3n$	: n darbe sayısındaki deplasman (mm)
τ	: Kayma gerilmesi
c	: Kohezyon
θ	: Agregata daneleri arasındaki içsel sürtünme açısı

PI : Penetrasyon İndeksi
P₂₅ : Bitümün 25°C’deki penetrasyon değeri
T_{YN} : Yumuşama noktası



KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
AC	: Asphalt Concrete (Asfalt Betonu)
APA	: Asphalt Pavement Analyzer (Asfalt Kaplama Analiz Cihazı)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
EVA	: Etilen-Vinil-Asetat
FHWA	: Federal Highway Administration (ABD Federal Karayolu İdaresi)
FT	: Fischer Tropsch
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
IDT	: Indirect Tensile (Dolaylı Çekme)
ITS	: Indirect Tensile Strength (Dolaylı Çekme Mukavemeti)
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (Dolaylı Çekme Sertlik Modülü)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LEADCAP	: Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement (Düşük Enerji ve Düşük Karbon Dioksit Asfalt Kaplama)
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
NAPA	: National Asphalt Pavement Association (ABD Ulusal Asfalt Kaplama Birliği)
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program (ABD Ulusal Kooperatif Otoyol Araştırma Programı)
Pa.s	: Pascal-saniye
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basınçlı Yaşlandırma Aleti)
PI	: Penetrasyon İndeksi
PVC	: Polivinil Klorid (Polivinil Klorür)
RPPW	: Recycled Pyrolytic Cross-linked Polyethylene Wax (Geri Dönüştürülmüş Piroolitik Çapraz Bağlı Polietilen Mum)
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Viskozimetre)
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)
S-VECD	: Simplified Viscoelastic Continuum Damage (Basitleştirilmiş Viskoelastik Sürekli Hasar)
TG/DTA	: Termogravimetry/ Differential Thermal Analysis (Termogravimetri / Diferansiyel Termal Analiz)
TRLPD	: Triaxial Repeated Load Permanent Deformation (Üç Eksenli Tekrarlı Yük Kalıcı Deformasyonu)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

TSRST	: Thermal Stress Restrained Specimen Test (Termal Gerilme Sınırlı Numune Testi)
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
UMATTA	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)
ZSV	: Zero Shear Viscosity (Sıfır Kayma Viskozitesi)



1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Önemi ve Konusu

Ilık karışım asfalt, asfalt karışımların üretim ve serim sıcaklıklarının düşürülmesine olanak sağlayan bir grup teknolojiyi ifade etmektedir. Bu teknolojilerin genel amacı, sıcak karışım asfaltlara oranla 20°C ile 55°C daha düşük sıcaklıklarda bağlayıcının viskozitesini düşürerek bağlayıcının agregayı tamamen sarması ile agrega ile bağlayıcı arasında gerekli aderansın sağlanmasıdır. Aynı mekanizma ile karışımın düşük sıcaklıklardaki işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Düşük sıcaklıklardaki karışımın sıkıştırma yeteneğini iyileştirerek kaplamanın yaşlanma sertleşmesine ve nem hasarına sebep olan geçirgenliğini azaltmaktadır. Ayrıca ılık karışım asfalt teknolojisi, soğuk havalarda kaplama yapılacağı durumlarda ya da asfalt karışımının serilmeden önce uzun süre taşınmasının gerekli olduğu durumlarda fayda sağlamaktadır. Karışım ve sıkıştırma sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki farkın azalmasından dolayı sıkıştırma için gerekli olan zaman aralığı artacaktır (D'Angelo vd., 2008).

Ilık karışım asfalt teknolojisi, Kyoto Protokolü'ne cevaben sera gazlarının azaltılması amacıyla Avrupa'da başlatılmıştır. Daha sonra çevresel duyarlılığın artması ve enerji maliyetlerinin yükselmesi sebebiyle dünya genelinde popüleritesi artmıştır. Şu ana kadar pek çok ülkede, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Ilık karışım asfalt teknolojisinin avantajlarını kısaca özetlersek:

- Gaz emisyonunu azaltır.
- Enerji tüketimini azaltır.
- Asfaltın işlenebilirliğini ve sıkıştırma verimliliğini arttırır.
- Soğuma süresini düşürdüğü için yolun trafiğe açılma süresini azaltır.

Düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı ılık asfalt kaplamaların kür süresinin azalmasını ve yolun sıcak asfalt kaplamaya oranla trafiğe daha erken açılmasını sağlar. Havaalanı kaplamalarında yapılacak onarım işlerinde, ekonomik şartlar sebebiyle yolun uzun süre trafiğe kapalı kalmaması gerektiğinden ılık asfalt kullanımı yerinde bir seçim olacaktır (Su vd., 2009).

Pawma-1, ülkemizde üretilen bir ılık karışım asfalt katkı maddesidir. Yurtdışında çeşitli ülkelerdeki arazi deneylerinde kullanılmış ve olumlu sonuçlar vermiştir (URL-1, 2017).

Leadcap, Kumho Petrokimyasal şirketi ile Kore İnşaat Teknoloji Enstitüsü işbirliği ile geliştirilen bir ılık karışım asfalt katkı maddesidir. Laboratuvar çalışmalarında ve çeşitli ülkelerdeki arazi deneylerinde denenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır (URL-2, 2017)

Dünyanın birçok yerinde ılık karışım asfalt ile arazi uygulamaları yapılmıştır. Ülkemizde 2015 yılı haziran ayında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Kimya Enstitüsü ile Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı tarafından yürütülen "Ilık Karışım Asfalt Katkıları Üretim Teknolojilerinin Geliştirilmesi" projesi kapsamında Ankara çevre otoyolunda ilk uygulama gerçekleştirilmiştir (URL-3, 2017).

Bitümlü sıcak karışımların, trafik yüklerine ve ısıya karşı mukavemetlerini arttırmak için katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerinden en yaygın kullanılanı Stiren-Butadien-Stiren (SBS) kopolimeridir. Yapılan çalışmalarda SBS'nin bitümlü sıcak karışımların yorulma, düşük ısı çatlakları ve tekerlek izi oluşumuna karşı mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Sıcak iklimli bölgelerde tekerlek izi oluşumuna karşı SBS kullanımının bağlayıcı sebepli bozulmaların engellenmesine yardımcı olacağı, yüksek bakım ve onarım masraflarının geciktirilmesini sağlayacağı görülmüştür (Jenks vd., 2011; Yılmaz ve Kök, 2008).

Bitümlü sıcak karışımlara sönmüş kireç eklenmesinin trafik yüklerinden meydana gelen gerilmelerin yayılmasında yardımcı olduğu ve mukavemeti arttırdığı, tekerlek izi oluşumuna karşı direncini arttırdığı görülmüştür (Little vd., 2006).

1.2. Araştırmanın Amacı ve İzlenecek Yol

Bu tez çalışmasının amacı, farklı ılık asfalt katkı maddeleri kullanarak elde edilen ılık asfalt karışımların mekanik özelliklerini incelemek, katkısız ve SBS modifiyeli sıcak asfalt karışımlarla karşılaştırmaktır. Bununla birlikte daha önceki çalışmalarda bitümlü sıcak karışımların bazı özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenen sönmüş kirecin ılık karışım asfaltlarda filler olarak kullanımının etkileri incelenecektir.

Çalışmada öncelikle TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen saf bitüm, standart bağlayıcı deneylerine (penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık) tabi tutulmuş ve kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Superpave bağlayıcı performans deneyleri (dinamik

kayma reometresi, kiriş eğme reometresi, dönel ince film halinde ısıtma, dönel viskozimetre) ile bitümlü bağlayıcının reolojik davranışı daha geniş bir çerçevede incelenmiştir.

Agrega malzemesi olarak kalker kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan agreg malzemesinin fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Agreg karışımını tespit etmek için Superpave şartnamesine uygun üç gradasyon belirlenmiş ve şartname kriterlerini sağlayan en uygun gradasyon, karışım gradasyonu olarak seçilmiştir.

Tez çalışmasında Pawma-1 ve Leadcap ılık karışım asfalt katkı maddeleri ile SBS katkı maddesi karışım numunelerinde denenmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları katkı maddelerinin türüne göre belirlenmiştir. Marshall yöntemine göre optimum bitüm içerikleri tespit edilmiştir.

Optimum bitüm içeriklerinde her bir deney için üç numune hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde;

- Marshall stabilite ve akma deneyi (ASTM D-1559),
- 40°C’de dinamik sünme deneyi (UMATTA deney aleti ile)
- 25°C’de deformasyon kontrollü indirekt çekme yorulma deneyi (UMATTA deney aleti ile)
- 25°C’de indirekt çekme rijitlik modülü deneyi (UMATTA deney aleti ile)
- Nem hasarına karşı dayanım deneyleri yapılmıştır.

2. BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR

2.1. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Bitümlü karışımların hacminin %85'ini agregalar oluşturduğu için, agreganın özellikleri kaplama performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar boyut bakımından kaba agreg, ince agreg ve mineral filler olarak üç gruba ayrılmaktadır. Agreg karışımının 4,75 mm'lik elek üzerinde kalan kısmı kaba agreg, 4,75 mm'lik elekten geçen ve 0,075 mm'lik elek üzerinde kalan kısmı ince agreg, 0,075 mm'lik elekten geçen kısmı ise mineral fillerdir. Mineral filler çok ince boyutlu un kıvamındadır (Jenks vd., 2011).

Kaba agregalar genellikle küresel şekilli çakıllardır. Dere yataklarından elde edilen çakıllar küresel şekilleri sebebiyle kırılmadan bitümlü karışımlarda kullanılmamalıdır. İyi bir şekilde kırılmamış agregalar, bitümlü karışımlarda kullanıldığı zaman yeterli kenetlenme sağlanamayacağından kaplamanın stabilitesi ve tekerlek izine karşı direnci azalacaktır. Fazla köşeli ve yüzeyi pürüzlü agregalar bitümlü karışımlarda kenetlenmeyi daha iyi sağladığı için tercih edilmektedir. Kırılmış agregalardan yassı ve ince uzun daneler bitümlü karışımlarda kullanıldığı zaman kaplamanın stabilitesi azalmaktadır. (Jenks vd., 2011).

İnce agregalar, dere yataklarından elde edilen doğal kumlar ya da taş ocaklarında iri agregaların istenilen boyutta kırılması sonucu imal edilen kumlardır. Taş ocaklarından elde edilen kumlar doğal kumlara göre daha köşeli olduğu için bitümlü karışımların stabilitesini ve tekerlek izine karşı direncini doğal kumlara göre daha fazla arttırırlar. Bitümlü karışımlarda kullanılacak ince agreg seçilirken hassas davranılmalı ve köşelilik durumu test edilmelidir (Jenks vd., 2011).

Mineral filler, agreg karışımında küçük miktarlarda kullanılmasına rağmen, karışımın özelliklerini önemli oranda etkiler. Mineral filler genelde agreg karışımının içinde %3 ile %9 oranları arasında kullanılır. Belli bir yüzdeye kadar mineral filler, karışımdaki boşlukları doldurarak agreg taneleri arasında daha fazla temas noktası oluşturarak daha yoğun karışımların elde edilmesine sebep olur (Terzi, 2000).

Agrega özellikleri ile kaplama performansı arasındaki ilişki uzun zamandır mühendisler tarafından araştırılmaktadır. Tekerlek izi, sökölme, yorulma çatlağı, kayma direnci, nem

hasarı gibi kaplama özelliklerinin tümü agrega özellikleriyle bağlantılıdır. Mühendislerin ve teknisyenlerin agrega özelliklerini ve bu özelliklerin kaplamaya etkilerini tespit ve kontrol etmesi bitümlü karışımların üretilmesi sürecinin önemli bir parçasıdır (Jenks vd., 2011).

2.1.1. Agregaların Mineralojik Olarak Sınıflandırılması

Agregalar kökenlerine göre “Doğal Agregalar” ve “Sunî (yapay) Agregalar” olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğal agregalar kayalardan fiziksel yolla elde edilen kum çakıl gibi granüler malzemelerdir. Dere yataklarından ya da taş ocaklarından temin edilirler. Sunî agregalar endüstriyel işlemler sonucunda elde edilirler. Asfalt kaplamalarda genellikle kullanılan sunî agregalar cüruf, klinker ve çimentodur. Cüruf demir filizinin endüstride indirgenmesi sırasında atık madde olarak elde edilir. Klinker, çimento üretimi sırasında ortaya çıkan kil ve kalker birleşimin topak haline gelmesinden oluşur. Çimento, bitümlü karışımlarda filler olarak kullanılabilir. Sunî agregalar, genelde gevrek ve poroz olmakta ayrıca yeterince üretilmemekte ve üretilen miktarlar da çimento sanayinde kullanılmaktadır. Bu sebeplerle sunî agregalar yol kaplamalarında fazla tercih edilmemektedir. Bitümlü karışımlarda kullanılacak en ideal agrega doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş agregalardır (Keçeciler vd., 1990; Tunç, 2001).

2.1.2. Agregalarda Gradasyon

Gradasyon agrega karışımındaki tanelerin boyut bakımından dağılımını ifade eder. Agrega gradasyonu, bitümlü karışımlarda stabilite ve işlenebilirliği doğrudan etkilemektedir. Karışımındaki maksimum dane boyutu 25,4 mm’den daha büyük olduğu zaman işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, boşluk miktarı ve agrega tanelerinin toplam yüzeyi azalır, yoğunluk, stabilite ve segregasyon artar. Agrega karışımlarında belirli bir karışım için, maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının belirli limitler dâhilinde olması şartnameler ile belirlenmiştir. Bitümlü karışımlarda boşluk miktarının az olması ve yoğunluğun fazla olması stabilitenin artmasını sağlayacaktır. Bu sebeple iri agrega ve ince malzemenin uygun oranlarda kullanılmasıyla elde edilen yoğun-sürekli gradasyona sahip agrega karışımları, kaplamanın boşluk miktarını azaltacağı ve yoğunluğunu arttıracığı için bitümlü karışımlar için ideal olacaktır (Tunç, 2001).

2.1.3. Agregalarda Porozite

Porozite, malzemelerdeki boşluk hacminin, malzemenin tüm hacmine oranı olarak ifade edilmektedir. Agregada danelerinin porozitesinin belirli bir düzeyde olması gerekir. Porozitenin yeterli düzeyde olması, bitümün agregada daneleri tarafından emilerek agregada ile bağlayıcı malzeme arasında kuvvetli bir adezyon kuvveti oluşmasını, stabilitenin ve durabilitenin artmasını sağlar. Porozite belirli bir düzeyden fazla olursa agreganın özgül ağırlığı, stabilitesi ve donma-çözölmeye karşı direnci azalmaktadır (Tunç, 2001).

2.1.4. Agregalarda Yüzey Alanı ve Boşluk

Agregada daneleri arasındaki boşluk miktarı ve danelerin yüzey alanlarının toplamı gradasyona, maksimum dane çapına ve dane biçimi gibi özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Agregaların boyutu küçüldükçe boşluk miktarı ve toplam yüzey alanı artmaktadır. Boşluk hacminin artması yoğunluğun azalmasına, yüzey alanının artması da gerekli bitüm miktarının artmasına sebep olur. Maksimum dane çapının artması ile boşluk miktarı ve toplam yüzey alanı azalmakta, karışımın yoğunluğu artmaktadır. Fakat işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşmaktadır. Karışım için gerekli bitüm miktarının azalması karışımın kohezyonunu azaltarak kaplamanın stabilitesini ve durabilitesini azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bitümlü karışımlarda maksimum dane çapı bu özellikleri optimize edecek şekilde seçilmelidir. Yol kaplamalarında genelde alt tabakalarda kaba gradasyonlu, üst tabakalarda ise daha ince gradasyonlu agregalar kullanılmaktadır (Tunç, 2001).

2.1.5. Agregalarda Özgöl Ağırlık

Agreganın özgül ağırlığı, agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranıdır.

Danenin, hacim tanımlamasına bağlı olarak, üç tane özgül ağırlık türü vardır.

1-Zahiri Özgöl Ağırlık (G_{sa}): Belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.

2-Hacim Özgöl Ağırlığı (G_{sb}): Belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacminin

havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.

3-Efektif Özgöl Ağırlık (Gse): Belirli bir sıcaklıkta agreganın bitüm geçirimli boşlukları hariç geçirimli ve geçirimsiz boşluklarının içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.

Agreganın özgül ağırlığı bitümlü karışımlarda kullanılacak bağlayıcı yüzdesini belirlemek için gereklidir. Kaba agreg, ince agreg ve filler için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Sıkıştırılmış kaplamanın boşluk oranının hesaplanmasında efektif özgül ağırlık kullanılmaktadır (Orhan, 2012).

2.2. Bitümlü Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar, bitümlü karışımların ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturmasına rağmen karışımın özelliklerini belirleyen en önemli malzemedir. Bağlayıcı malzeme agreg danelerini sararak birbirine bağlar ve trafik yükleri altında dağılmalarını önleyerek durabiliteyi, kaplamada düzgün ve geçirimsiz yüzeyler oluşmasını sağlayarak sürüş konforunu artırır. Karışımında kohezyon oluşturarak stabilitenin artmasına sebep olur (Tunç, 2001).

Bitüm, doğal ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da ikisinin bir birleşimi olup katı, yarı katı, sıvı veya gaz halinde bulunabilen, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır. Bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olarak iki ana gruba ayrılır (Keçeciler vd., 1990).

2.2.1. Katran

Katranlar kömür veya odunun kapalı bir sistemde damıtılmasından elde edilen bitümlü malzemedir. Yol inşaatlarında kullanılacak katranın kömür kökenli olması tercih edilir. Damıtma işlemi için kömür özel fırınlarda birkaç saat 1000°C'de ısıtılır. Isıtma işlemi sırasında bazı gazların çıkması ile kömür kok kömürü haline gelir. Çıkan buhar ve gazların soğutulularak ham katran yoğunlaşarak ayrılır. Bu şekilde elde edilen ham katranın içinde benzol gibi değerli çözücüler, bazı boya ve plastik ana ham maddeleri ile kimyasal maddeler ve çok miktarda su bulunur. Katranın kaplamalarda kullanılmasından önce bu maddelerin ayrılması gerekir.

Ham katranın damıtılması işleminde, öncelikle ham katran ısıtılır ve suyu buharlaştırılır. Bu sırada bir miktar benzol elde edilir. Isıtma işlemine devam edildiğinde kaynama noktaları farklı bazı yağlar elde edilir. Damıtma işlemine 360°C'ye kadar devam edilirse geride sadece zift kalır. Zift nispeten sert bir maddedir ve kaplamalarda kullanılmaz. Bu sebeple damıtma işlemi daha önce sonlandırılır ve zifte nispeten daha yumuşak bir katran elde edilir ya da damıtma sonucu elde edilen zifte yine damıtmadan elde edilen hafif ve ağır yağlardan uygun ölçeklerde eklenerek istenilen kıvamda yol katranı elde edilir. RT sembolü ile gösterilen yol katranları kıvamlarına göre, RT-1, RT-2, RT-3, RT-4, RT-5, RT-6, RT-7, RT-8, RT-9, RT-10, RT-11, RT-12, RTCB-5, RTCB-6 olmak üzere 14 sınıfa ayrılırlar. Sembollerin yanındaki numaralar büyüdükçe katranların kıvamı artmaktadır.

RT-1, RT-2, RT-3, RT-4 sınıfındaki nispeten az kıvamlı katranlar astar uygulamalarında ve sathi kaplamalarda; RT-5 ve RT-6 sınıfındaki katranlar sathi kaplamalar ve yolda yapılan karışımlarda; RT-7, RT-8, RT-9 sınıfındaki katranlar yolda yapılan karışımlarda, tesislerde hazırlanan karışımlarda ve koruyucu tabakalarda; RT-10, RT-11, RT-12 sınıfındaki katranlar tesislerde hazırlanan karışımlarda, penetrasyon tipindeki uygulamalarda, çatlak doldurma işlerinde ve koruyucu tabakalarda; RTCB-5 ve RTCB-6 sınıfındaki yüksek kıvamlı katranlar ise yama işlemlerinde ve düşük sıcaklıklarda çabuk sertleşmenin istendiği durumlarda kullanılır.

Ayrıca katranlar suyla karıştırılarak katran emülsiyonları oluşturulup kaplamalarda kullanılabilir (Keçeciler vd., 1990).

2.2.2. Asfalt

Asfalt en eski mühendislik malzemelerinden biridir. Babil'de sokakların asfaltla kaplanmış olduğu bilinmektedir. Asfalt yol inşaatları dışında su yalıtımında, elektrik ve boya sanayiinde ve karo imalatında kullanılmaktadır. Asfalt malzeme kökenine göre doğal asfalt ve rafineri asfalt olarak ikiye ayrılır (Keçeciler vd., 1990).

2.2.2.1. Doğal Asfalt

Doğal asfaltlar doğada mineral maddelerle karışmış durumda bulunurlar. Bulundukları yere göre göl ve kaya asfaltı olarak adlandırılırlar. Venezuela sınırlarında bulunan Trinidad

adasında bulunan göl asfaltı, en yaygın kullanılan göl asfaltıdır Rezervi 10-15 milyon tondur. Buradan temin edilen doğal asfalt rafine edildikten sonra yaklaşık %55 asfalt içerir. Amerika'da Los Angeles yakınlarında La Brea'da da benzer bir asfalt gölü vardır. Kaya asfaltları daha çok kum taşı, kalker vb. mineral maddeler ile maksimum %12 bitüm içerirler. İran ve Amerika'da bulunan gilsonit en çok kullanılan kaya asfaltıdır.

Bitümlü karışımlarda kaya ve göl asfaltları, asfalt çimentosuna eklenerek ya da plentte agregaya ilave edilerek modifiye bitüm ya da modifiye karışım hazırlanmaktadır. Doğal asfaltlar, poroz asfalt, asfalt betonu ve mastik asfalt yapımında kullanılabilir. Doğal asfaltlı karışımlarda, bitüm ile agrega arasındaki adezyon kuvvet ve plastik deformasyonlara karşı direnç artmaktadır (Keçeciler vd., 1990; Orhan, 2012).

2.2.2.2. Rafineri Asfalt

Rafineri (yapay) asfaltlar ham petrolün arıtılması sonucunda elde edilirler. Kuyulardan çıkarılan ham petrol rafineriye gelir ve pompalarla tanklara boşaltılır. Tanklardan ısıtma kulelerine gönderilen ve sıcaklığı yükseltilen ham petrol damıtma kulelerine nakledilir. Ham petrolün kaynama noktası düşük olan kısımları bu kulelerin üst kısımlarından çıkar ve soğutucularda yoğunlaştırılır. Bu şekilde benzin ve hafif çözücüler gibi hafif ürünler elde edilir. Sonra kaynama noktası daha yüksek olan gaz yağı (kerosen) gibi orta ürünler elde edilir. Daha sonra uçuculuğu en az olan dizel yağları (mazot) ve yağlama yağları elde edilir. Bitüm içeren kalıntı madde ise kulenin altında birikir.

Kalıntı maddeler daha sonra ileri damıtma işleminden geçirilir ve SC sınıfı yol yağları elde edilir. Geride kalan malzeme asfalt çimentosudur. Şartları değiştirerek istenilen kıvamda asfalt çimentosu elde edilir (Keçeciler vd., 1990).

2.2.2.2.1. Kaplama Sınıfı Bitümler

Kaplamalarda kullanılan bitümler, karışımlar için özellik ve kıvam bakımından özel olarak hazırlanmış petrol kökenli malzemelerdir. Katı halde bulunan bitümün akıcı duruma gelmesi için ısıtılması gerekir. Kaplama sınıfı bitümler B sembolü ile gösterilir. Kaplama sınıfı bitümler, kıvam durumunu ifade eden penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılır. Kaplama sınıfı bitümler, penetrasyon derecelerine göre aşağıdaki sınıflara ayrılır:

- B 20-30 Penetrasyonlu
- B 30-45 Penetrasyonlu
- B 35-50 Penetrasyonlu
- B 40-60 Penetrasyonlu
- B 50-70 Penetrasyonlu
- B 70-100 Penetrasyonlu
- B 100-150 Penetrasyonlu
- B 160-220 Penetrasyonlu
- B 250-330 Penetrasyonlu
- B 330-430 Penetrasyonlu
- B 500-650 Penetrasyonlu
- B 650-900 Penetrasyonlu

Normal hava sıcaklığında B 20-30 penetrasyonlu bitüm en sert kıvamda bulunur, rakam büyüdükçe sertlik azalır, B 200-300 penetrasyonlu bitüm en yumuşak kıvamdadır. (Keçeciler vd., 1990; TS EN 12591).

2.2.2.2.2. Sıvı Petrol Asfaltı

Sıvı petrol asfaltları, ısıtılan bitümlere benzin, gazyağı veya bakiye yağ karıştırılması ile elde edilir. Sıvı petrol asfaltlarına aynı zamanda katbek asfaltları da denir. Asfalt çimentosu, rafineride sıcak durumdayken karıştırma işlemi yapılır. Sıvı petrol asfaltları, yola uygulandıktan sonra bu çözücü maddeler uçmakta ve geriye asfalt çimentosu kalmaktadır. Bu olaya kür olma denilmektedir. Asfalt çimentosuna;

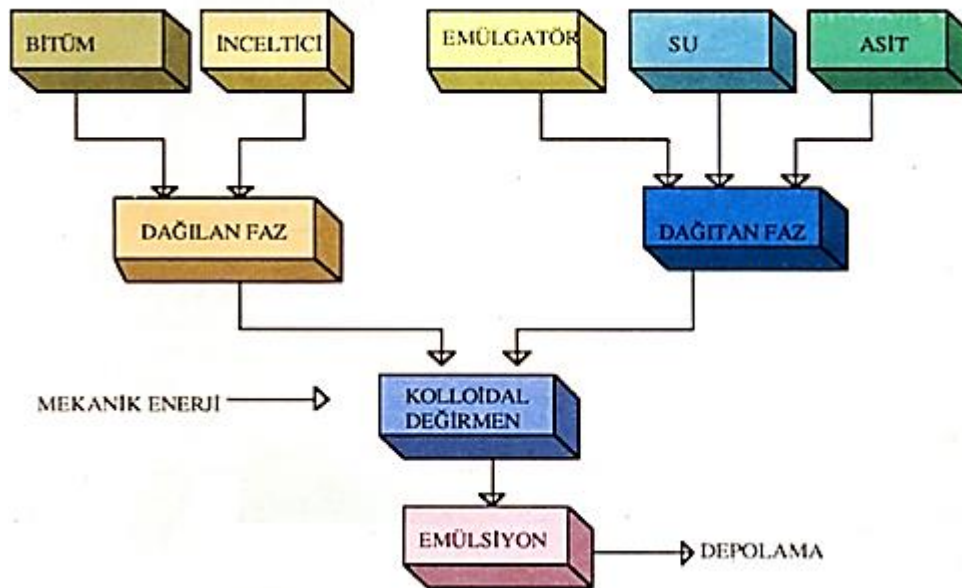
- Kaynama noktası daha düşük olan benzin ilave edilerek çabuk kür olan (RC) sıvı petrol asfaltları,
- Kaynama noktası orta sıcaklıkta olan gazyağı ilave edilerek orta hızda kür olan (MC) sıvı petrol asfaltları,
- Kaynama noktası daha yüksek olan bakiye yağ ilave edilerek yavaş kür olan (SC) sıvı petrol asfaltları, üretilir.

Kullanılan bitüm sınıfı ve bitüm oranı ile çözücü oranına göre, farklı sınıflarda sıvı petrol asfaltı tipleri hazırlanır. Katbek sembollerinin yanına kinematik viskozite alt sınırını

ifade eden 30-70-250-800-300 gibi bir sayı gelir. Bu sayı arttıkça normal sıcaklıkta, kıvam artar. Sıvı petrol asfaltları soğuk karışımlarda ve astar tabakalarında kullanılır(Ağar ve Umar, 1991; Orhan, 2012).

2.2.2.2.3. Asfalt Emülsiyonu

Asfalt çimentosunun küçük kürecikler halinde parçalanarak su içerisinde dağıtılması ile asfalt emülsiyonları elde edilir. Asfalt küreciklerinin zamanla birbirlerine yapışarak sudan ayrılmalarını önlemek amacıyla karışıma gliserin gibi emülsiyon verici katkı maddeleri ilave edilir. Bu maddeler küreciklerin etrafında emülgatör filmi oluşturarak küreciklerin birleşmelerini önler. Asfalt emülsiyonu üretimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Deniz, 2011; Orhan, 2012).



Şekil 2.1. Asfalt emülsiyonu üretimi (Deniz, 2011).

Asfalt emülsiyonları, emülsiyon verici maddenin cinsine göre anyonik ve katyonik asfalt emülsiyonları olarak ikiye ayrılır. Asfalt emülsiyonu, agrega ile karıştırıldığında veya yol yüzeyine püskürtüldüğünde zamanla su ile asfalt kürecikleri birbirinden ayrılır ve kürecikler agregaya yapışır, su da buharlaşır. Bu olaya asfaltın kesilmesi denir. Asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre de çabuk kesilen, orta hızda kesilen ve yavaş kesilen olmak üzere üçe ayrılır. (Orhan, 2012).

2.2.3. Bitümün Kimyasal Bileşenleri

Bitümlerin kimyasal yapıları çok karmaşık olduğundan dolayı mühendislik özellikleri daha çok fiziksel özellikleri vasıtasıyla belirlenir. Bitümlerin çoğu %82-83 oranında Karbon, %8-11 oranında Hidrojen, %1-6 oranında Sülfür, %0-1,5 oranında Oksijen, %0-1 oranında Nitrojen ve çok miktarda metal gibi bileşenlerden meydana gelmektedir (Tunç, 2001).

Bitümlü malzemenin kesin kompozisyonu, temin edildiği ham petrolün kaynağına, imalat esnasında meydana gelen değişime ve takiben kullanma müddetince meydana gelen yaşlanmaya bağlı olarak değişiklik gösterir (Read ve Whiteoak, 2003).

2.2.4. Bitümün Özgül Ağırlığı

Bitümlerin özgül ağırlıkları temin edildikleri ham petrolün kaynağına bağlı olarak 25°C’de 0,97 ile 1,05 arasında değişmektedir. Düşük penetrasyonlu asfalt çimentolarının özgül ağırlıkları yüksek penetrasyonlu asfalt çimentolarına göre daha yüksektir (Tunç, 2004).

2.2.5. Bitümün Hacimsel Genişlemesi

Bitümün hacimsel genişleme katsayısı, $6,1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ civarındadır ve agreganın hacimsel genişleme katsayısından yaklaşık 10 kat daha yüksektir. Bu nedenle asfalt kaplamadaki boşluk miktarı yetersiz ise yüksek sıcaklıklarda bitüm agregadan daha fazla genişler ve kaplama yüzeyine çıkar. Bu olaya terleme denir. Bitüm, beton yollarda derz dolgu malzemesi olarak kullanıldığı zaman, soğuk havalarda daha çok büzülerek geçirimsizliği arttırmakta, sıcak havalarda ise daha çok genişlererek derzin dışına taşmaktadır (Tunç, 2004).

2.2.6. Bitümün Isıl Özellikleri ve Isıya Duyarlılığı

Bitümlerin ısı iletkenlikleri agregaya nazaran daha düşüktür. Bitüm, agregaya göre daha geç ısınmakta, daha geç soğumakta ve ısıyı daha fazla absorbe edebilmektedir. Bu

sebeple bitümlü karışımlarda farklı büzülme ve genleşmelerin neden olduğu ilave gerilmeler meydana gelmektedir (Tunç, 2004).

Bitümler termoplastik malzemelerdir ve viskoziteleri ısıya bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bitümün kıvamının ısıya göre değişmesi, ısıya duyarlı olduğunu göstermektedir. Bitümlerin ısıya duyarlılığının düşük olması, yani sıcaklığın fazla olduğu zamanlarda yeteri kadar sert, sıcaklığın düşük olduğu zamanlarda yeteri kadar esnek olması arzu edilmektedir. Bitümlerin ısıya duyarlılığı, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile tespit edilen penetrasyon indeksi değeri ile belirlenebilmektedir (Tunç, 2004).

2.2.7. Bitümün Reolojik Özellikleri

Yüke ve yükleme süresine göre yapılan reolojik sınıflandırmaya göre bitümler viskoelastik malzeme grubunda yer almaktadırlar. Viskoelastik malzemeler, yüksek hızlı yüklemelerde yüksek dayanım ve elastik davranış gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde düşük dayanım ve viskoz davranış gösterirler. Bağlayıcı malzemenin bu özelliği bitümün ve kaplamanın rijitliğini doğrudan etkilemektedir (Kuloğlu, 2001).

2.2.8. Bitümün Adezyonu

Bitümlü karışımlarda stabilite agrega daneleri ile bitüm arasındaki bağ kuvvetine bağlıdır. Bağ kuvveti de agrega danelerini saran bitüm filminin agregaya yapışma yeteneğine göre yani bitümün adezyonuna göre artmakta veya azalmaktadır. Agregada daneleri kübik şekilde olursa, yüzeyleri temiz ve pürüzlü olursa, danelerin su emme özelliği artarsa ve bitümün viskozitesi azaldıkça adezyon kuvveti artmaktadır (Tunç, 2004).

2.3. Bitümlü Karışımlarda Aranacak Özellikler

Bitümlü karışımların servis ömürleri süresince iyi performans göstermeleri için uygulandıkları yörenin iklim şartlarına bağlı olarak yeterli stabilite, rijitlik, durabilite, yorulma mukavemeti, esneklik, geçirimsizlik ve kayma direncine sahip olmaları gerekmektedir (Tunç, 2004).

2.3.1. Bitümlü Karışımların Stabilitesi

Stabilite tabiri, mukavemet ile ilgili olup bitümlü kaplamaların trafik yükü altında oluşacak şekil değişimlerine karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Stabilite yüksek olduğu zaman, rijitliğin artması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda deformasyon ihtimali azalırken düşük sıcaklıklarda çatlama ihtimali artmaktadır. Bu sebeple stabilitenin belirli uygun bir değerde olması istenilmektedir. Kayma mukavemeti, ısı ve eylemsizlik direnci stabiliteyi etkileyen faktörlerdir. Kayma mukavemeti, agregaların sağladığı içsel sürtünme açısına ve bitümün sağladığı bağ kuvvetine bağlı olarak düşük sıcaklıklarda artmakta yüksek sıcaklıklarda ise azalmaktadır. Eylemsizlik direnci, bitümlü karışımın trafik yükleri altında yer değiştirmeye karşı göstermiş olduğu mukavemet olarak ifade edilir. Yük miktarı azaldıkça, kaplama kalınlığı ve yoğunluğu arttıkça, agreganın yüzey pürüzlülüğü ve köşeliliği arttıkça eylemsizlik direnci de artmaktadır (Tunç, 2004).

2.3.2. Bitümlü Karışımların Rijitliği

Rijitlik, bitümlü karışımlarda yükleme süresi ve ısı tesiri altında oluşan gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkiyi ifade eden bir terimdir. Yükleme süresi ve ısının azalmasıyla, bitümün viskozitesinin ve bitümlü karışımın yoğunluğunun artmasıyla rijitlik artmaktadır (Tunç, 2004).

2.3.3. Bitümlü Karışımların Durabilitesi

Bitümlü karışımlarda durabilite, kaplamanın trafik ve çevre şartları altındaki dayanıklılığını ifade eden bir terimdir. Trafiğin ve çevrenin etkileri ile bitüm sertleşebilir, yaşlanabilir, agrega kırılabilir, ufalanabilir, agrega ile bitüm arasındaki bağ zayıflayarak agrega bitümden ayrılabilir. Yoğun gradasyonlu, sağlam ve kırmataş agregalar ile düşük penetrasyonlu yüksek oranda bitüm kullanılarak elde edilen düşük boşluk oranlı kaplamalarda durabilite artacaktır (Tunç, 2004).

2.3.4. Bitümlü Karışımların Yorulma Mukavemeti

Bitümlü karışımın, taşıyabileceği maksimum çekme mukavemetine ulaşılmadan, yorulma çatlakları oluşuncaya dek geçirebileceği maksimum yük tekrar sayısına yorulma mukavemeti denmektedir. Karışımın rijitliğinin veya elastikiyetinin artması ile yorulma mukavemeti artmaktadır (Tunç, 2004).

2.3.5. Bitümlü Karışımların Esnekliği

Bitümlü karışımların düşük sıcaklıklarda yeterli esnekliğe sahip olmaları gerekir. Karışımın gerekli esnekliğe sahip olması ile düşük sıcaklıklarda büzülmeden kaynaklanan çatlakların oluşması engellenmekte ve kaplamanın ömrü artmaktadır. Karışımın gerekli esnekliğe sahip olmasıyla dolgularda meydana gelen farklı oturmaların sebep olduğu gerilmeler de karşılanabilmektedir (Tunç, 2004).

2.3.6. Bitümlü Karışımların Geçirimsizliği

Geçirgenlik, bitümlü kaplamanın içine doğru ya da içinden hava ve su geçişine karşı göstermiş olduğu direnimi ifade etmektedir. Kaplamadaki boşluk oranı ile boşlukların birbirleri ile bağlantısı, kaplama yüzeyindeki hava, su ve gazların geçmesi için ihtiyaç duyulan koridorları oluşturmaktadır. Kaplamadaki geçirimsizliğin artması sonucu bünyesine giren su ve hava tesiriyle asfaltın yaşlanması hızlanmakta, soyulma direnci azalmakta ve donma-çözülme tekrarları ile kaplamada bozulmalar oluşmaktadır. Karışımın bağlayıcı oranının artması ve iyi bir şekilde sıkıştırılması ile yoğunluğu artar ve boşluk oranı azalır. Bu şekilde boşluk oranı azaltılınca geçirimsizlik de azaltılmış olur. Ancak, kaplamadaki stabilite şartı, sıcak havalarda kuma ve trafik altında sıkışmaya müsaade edilmesi amacıyla bir miktar boşluk bırakılması lüzumludur. Bununla beraber, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını frenlemek ve kaplamanın geçirimsizliğini arttırarak bitümün yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı kısıtlanmaktadır (Ilıcalı, 2001; Tunç, 2004).

2.3.7. Bitümlü Karışımların Kayma Direnci

Kayma direnci, araçların frenleme sırasında emniyetli bir şekilde durabilmeleri ve kurplarda merkezkaç kuvvetinden dolayı yoldan savrulmamaları için teker ile kaplama yüzeyi arasındaki gerekli sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Kayma direnci genellikle; düşük bağlayıcı oranı, cilalanma dayanımı yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeye sahip agrega ile açık ve kaba gradasyonlu karışım kullanılması ile artmaktadır. Kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün artması ile kayma direnci artmakta fakat sürüş konforu azalmaktadır (Tunç, 2004).



3. ILIK KARIŞIM ASFALT

Sıcak karışım asfaltların üretim ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürmek için bir dizi teknoloji geliştirilmektedir. Bu teknolojiler, genel olarak ılık karışım asfalt teknolojisi olarak isimlendirilmektedir. Ilık karışım asfalt teknolojisi sürekli gradasyonlu, poroz, taş mastik ve mastik asfalt gibi bütün kaplama türlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca ılık karışım asfaltlar geniş bir yelpazede farklı kaplama kalınlıklarında ve farklı trafik seviyelerinde kullanılabilir. Ilık karışım asfalt kullanımının avantajları aşağıda verilmiştir (D'Angelo vd., 2008).

- **Emisyonların azalması:** Genel olarak ılık karışım asfalt kullanımı ile karbon dioksit (CO₂) ve sülfür dioksit (SO₂) %30–%40, organik bileşenler %50, karbon monoksit (CO) %10–%30, azot oksitler (NO_x) %60–%70, toz %20–%25 oranlarında azalmaktadır.
- **Yakıt kullanımının azalması:** Genel olarak ılık karışım asfalt kullanımı ile yakıt kullanımındaki azalma oranı %11 ile %35 arasında değişmektedir. Karışımlardaki agreganın suyun kaynama noktasından daha fazla ısıtılmadığı düşük enerjili asfalt karışımlarında bu azalma oranı %50'ye kadar yükselmektedir.
- **Yapım esnasındaki avantajlar:** Düşük sıcaklıklarda karışımın; yoğunluğu korunarak kaplama yapılabilen, daha az çabayla işlenebilirliği azalmadan uzun mesafelere taşınabilmekte ve istenilen boşluk oranında sıkıştırılabilmekte, eski bitümlü karışımların yeniden kullanılma oranını arttırmaktadır.
- **İşçilerin maruz kaldığı emisyonların azalması:** Genel olarak ılık karışım asfalt kullanımı ile koku, duman ve poliaromatik hidrokarbonların emisyonlarında %30 ile %50 arasında değişen azalmaların olduğu görülmüştür (D'Angelo vd., 2008).

Ilık karışım asfaltlarda bazı sınıflandırmalar üretim sıcaklığına göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmalara göre, üretim sıcaklığı 0-30°C arası olanlar soğuk karışım, 65-100°C arası olanlar yarı ılık karışım asfalt, 110-140°C arası olanlar ılık karışım ve son olarak üretim sıcaklığı 140-180°C olanlar ise sıcak karışım asfaltlar olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 3.1. üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırılan karışımları göstermektedir (D'Angelo vd., 2008).



Şekil 3.1. Sıcaklıklara göre sınıflandırma(D'Angelo vd., 2008).

3.1. Ilık Karışım Asfalt Teknolojisinin Gelişimi

Ilık karışım asfaltlarla ilgili ilk çalışmalar 1956 yılında Iowa Eyalet Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda sıcak karışımların karıştırma sıcaklığını düşürmek için sıcak bitüme buhar enjekte edilerek bitüm köpüklendirilmiştir. 1968 yılında Mobil Oil Avusturalya bitümü köpüklendirmek için buhar yerine soğuk su kullanarak işlemi pratik hale getirmiştir (Muthen, 1998).

1970'li yıllarda emülsiyel asfaltlarla stabilize edilmiş kaplamalarla ilgili yeni metotlar geliştirilmiş ve bu çalışmalar 1977 yılında yayınlanmıştır (Chevron, 1977).

1995 yılında Mitteldeutsche Hartstein Endüstrisi tarafından Aspha-min zeolit ılık karışım asfalt katkı maddesi Almanya'da geliştirilmiş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1996 yılında Norveç'te köpük ılık karışım asfalt testleri yapılmıştır (Prowell vd., 2011).

1997 yılında Fischer Tropsch parafin sentezi ile üretilen Sasobit katkılı ılık karışım asfalt kaplamalar Almanya'nın Hamburg şehrinde yapılmıştır. İlk testleri Norveç'te yapılan Aspha-min zeolit köpük asfaltın arazi uygulamaları Almanya'da 1999 yılında gerçekleştirilmiştir (Prowell vd., 2011).

2002 yılında ABD Ulusal Asfalt Kaplama Birliği (NAPA) yöneticileri ılık karışım asfalt teknolojilerini araştırmak için Danimarka, Norveç ve Almanya'ya inceleme gezisi gerçekleştirmişlerdir. 2003 yılında ılık karışım asfalt teknolojileri NAPA'nın uluslararası

kongresinde yer almıştır. 2004 yılında Amerika'nın Florida ve Kuzey Carolina bölgelerinde arazi denemeleri yapılmıştır (Prowell vd., 2011).

2005 yılında NAPA ve ABD Federal Otoyol İdaresi(FHWA) ılık karışım asfalt teknik çalışma grubunu oluşturmuşlardır. Bu çalışma grubunun ana amacı ılık karışım asfalt denemelerinin veri toplama sistemini geliştirmek olmuştur. Bu veri sistemin temel unsuru, ılık karışım asfalt testlerinin yapıldığı yol kesimi ile kontrol kesimi olarak sıcak karışım asfaltların yapıldığı kısımların karşılıklı performans karşılaştırmalarını içermesidir. Toplanan veriler ile ılık karışım asfaltlarla ilgili bir genel kılavuz geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca 2005 yılında Amerika ve Kanada'da birçok yerde arazi uygulamaları yapılmıştır (Prowell vd., 2011).

2006 yılında Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdaresi (AASHTO) ve ABD Ulusal Karayolu Araştırma Programı Kooperatifi (NCHRP) bir takım oluşturarak ılık asfalt karışımlarla ilgili uluslararası bir inceleme gezisi planlamışlardır. Oluşturulan takım 2007 yılı mayıs ayında Avrupa'ya gitmiştir. Takım Belçika, Fransa, Almanya ve Norveç'te incelemelerde bulunmuştur. Avrupa kökenli ılık karışım asfalt üretimi ve uygulaması konularında Amerika Birleşik Devletleri'nde de büyük aşamalar kaydedildiği görülmüştür. Ilık karışım asfaltların tasarım metotları ile ilgili ilk NCHRP projesi 2007 yılında başlamış ve 2011 yılında tamamlanmıştır (Prowell vd., 2011).

2008 yılında ılık karışım asfalt teknik çalışma grubu, karayolu inşaatlarında kullanılmak üzere AASHTO formatında bir ılık karışım asfalt kılavuzu geliştirmişlerdir. NCHRP, ılık karışım asfaltların mühendislik özellikleri, gaz emisyonları ve arazi uygulamalarıyla ilgili bir belge yayınlanmıştır. 2008 yılı kasım ayında Nashville, Tennessee'de ilk uluslararası ılık karışım asfalt konferansı gerçekleştirilmiştir. 2008-2010 yılları arasında Amerika'da arazi uygulamalarında büyük bir artış olmuştur (Prowell vd., 2011).

2015 yılında Ankara Çevre Otoyolu Karapürçek Kavşağı kesiminde 11 Haziran'da "Ilık Karışım Asfalt Deneme Yolu" olarak uygulama yapılmıştır. Söz konusu teknoloji ile plentte karıştırma sıcaklıkları 15-35°C daha azaltılarak 115-140°C sıcaklıklara düşürülmüştür (URL-4, 2015).

3.2. Ilık Karışım Asfalt Üretim Teknikleri

Ilık karışım asfalt, üretim tekniklerine göre köpük asfalt, kimyasal madde katkılı ılık karışımlar ve organik madde katkılı ılık karışımlar olmak üzere 3 şekilde üretilmektedir.

1. Kimyasal Katkılarla Üretim: Kimyasal katkı maddeleri bitümün viskozitesini değiştirmezler, bu katkılar bitüm ile agreganın ara yüzeyindeki sürtünme kuvvetlerini azaltan maddelerdir. Bu katkılar kullanılarak karışım sıcaklığı en az 30°C azaltılabilmekte ve karışım 140°C ile 85°C arasındaki sıcaklıklarda üretilebilmektedir (Sargand vd., 2009).

2. Organik Katkılarla Üretim: Organik katkı maddelerinin kullanıldığı işlemler, vaksın erime noktası üzerinde viskozitenin azalması prensibine bağlıdır. Vaksın erime noktasının, kaplamada beklenen servis sıcaklığından daha yüksek olması gerekmektedir, aksi halde kalıcı deformasyon oluşabilmektedir. Diğer taraftan karışımın düşük sıcaklıklarda da kırılğan olmasının engellenmesi için, vaks tipinin çok özenli seçilmesi gerekmektedir. Organik katkılar, karışımda kullanılan bitümün penetrasyonuna bağlı olarak karışımın sıcaklığının 20 – 30°C azalmasını sağlayarak, yaklaşık 130°C civarında karışım üretilmesine olanak sağlamaktadır (Temren, 2009).

3. Köpüklendirme Tekniğiyle Üretim: Köpük asfalt tekniği olarak adlandırılan yöntemde, bitümün köpük durumuna getirilmesi ya da mineral bir malzeme ilavesi ile malzemenin bünyesindeki suyun açığa çıkarılması yöntemleri kullanılmaktadır. Sıcak bitüme az miktarda su eklenmesi neticesinde atmosferik basınç altında belirli bir hacimdeki su buhar haline dönüşmekte ve bitüm köpük durumuna gelmektedir. Diğer bir yöntemde zeolit gibi bünyesinde kristal su bulunduran bir malzemenin veya rutubetli agreganın bitümlü bağlayıcıya ilavesi ile bağlayıcı genişmekte ve viskozitesi azalmaktadır. İlave edilen suyun miktarına ve bağlayıcı sıcaklığına göre genişleme miktarı değişmektedir. Zeolit bünyesinde %20 kristal su bulunduran bir alüminyum silikat malzemedir. Sıcaklık artışı ile bu madde kristal suyunu kaybetmektedir. Karışıma kontrollü şartlarda eklenen bu malzemeden ayrılan su buharı bitümün hacmini bir miktar artırarak, bağlayıcının viskozitesini azaltmaktadır. Karışım sıcaklığı 100°C'nin altına düşünceye kadar 6 – 7 saat içinde kademeli bir şekilde gerçekleşen su çıkışı sonucunda karışımın işlenebilirliği artmaktadır. Köpüklendirme tekniği ile karışım sıcaklığı yaklaşık 30°C azalmakta ve karışımın işlenebilirliği artmaktadır (Edwards vd., 2006).

4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

Bağlayıcı malzeme ve bitümlü karışımların performansını arttırmak gayesiyle bitüm içerisine veya doğrudan karışım içerisine çeşitli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Katkı maddeleri ile özellikleri değiştirilen bitüme modifiye bitüm, karışıma da modifiye karışım denilmektedir. Modifiye bitüm ve karışımların özelliklerinde meydana gelen değişimler, çeşitli testlerle belirlenmekte ve analiz edilmektedir (İlcalı, 2001).

Bitümlü karışımlarda katkı kullanımı ile yüksek sıcaklıklarda rijit, düşük sıcaklıklarda esnek davranış gösteren, yorulma ve kayma direnci yüksek, yaşlanma ve oksidasyona karşı dayanımı fazla olan ekonomik kaplamalar inşa edilmesi amaçlanmaktadır (Birliker, 1998).

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bağlayıcı kıvamına etkilerini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 4.1’de gösterilmiştir (İlcalı, 2001).

Tablo 4.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (İlcalı, 2001).

Tip	Örnekler	Modifiyerlerin Bağlayıcı Kıvamına Genel Etkisi
1. Filler	➤ Mineral Filler • Taş Tozu • Kireç • Portland Çimentosu • Uçucu Kül ➤ Karbon Siyahı ➤ Sülfür	Sertleştirme
2. Genleştirici (Ekstender)	➤ Sülfür ➤ Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER ➤ Doğal Kauçuk ➤ Stiren-Butadien veya SBR ➤ Stiren-Butadien- Stiren veya SBS ➤ Dönüştürülmüş Kauçuk	-
4. Plastik		Sertleştirme
6. 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 ➤ Sertleştirme ve Doğal Asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	➤ Aminler ➤ Kireç	Yumuşatma

4.1. Bitümlü Karışımlarda Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Kullanımı

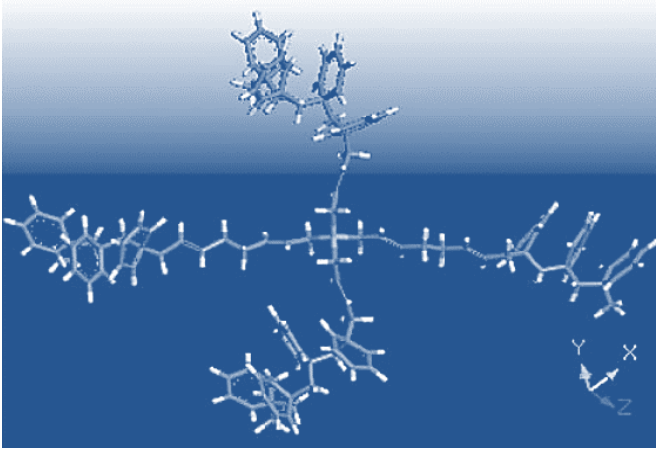
SBS polimeri, elastik polibütadien köprüleri ile birbirlerine bağlanmış doğrusal ya da radyal formda sert polistiren uç bloklardan meydana gelen granüler tanecikli termoplastik sentetik kauçuktur. Polibütadien ve polistiren karıştırıldığında tek fazlı, bir karışım oluşturmazlar, su ve yağ gibi birbirlerinden ayrılırlar. Polistiren ve polibütadien kimyasal olarak SBS deki gibi birbirlerine eklendiklerinde, sadece mikro ölçekte bir faz ayrışması oluşabilir, makro ölçekte bir ayrışma oluşmaz. Bu da polistiren uç bloklarının polistiren bölgeleri oluşturması için diğer SBS moleküllerinin uç blokları ile birleşmelerine izin verir, böylelikle tüm moleküller üç boyutlu elastik bir ağ oluşturmak üzere birbirlerine bağlanırlar. Kimyasal değil fiziksel bağlantılar olduğu için, bu ağ ısıtıldığı zaman ayrılmakta ve soğutulduğu zaman da yeniden oluşmaktadır.

Kontrol edilebilir molekül yapıları ve istenilen moleküler ağırlıklarının elde edilmesi, anyonik polimerizasyon yöntemi ve nano mühendislik tekniği ile mümkün olmaktadır. Dallanma yapısında, molekül ağırlığında ve polimerizasyon koşullarındaki çeşitlilikler ile hedeflenen uygulamalar için geniş ve çeşitli özelliklerde SBS üretilmesi sağlanmaktadır.

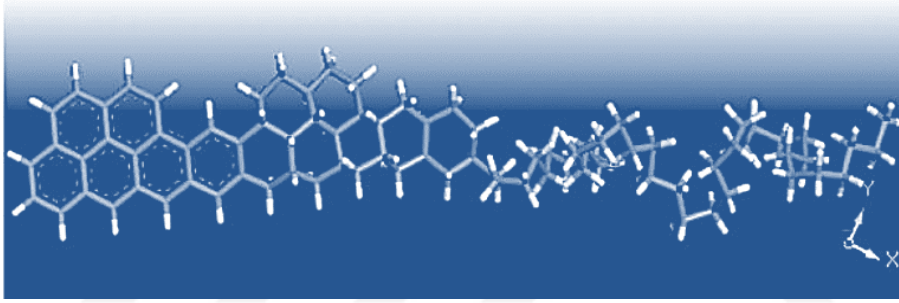
SBS ile bitüm modifikasyonunda, SBS polimerleri, bitümün içindeki maltenleri absorbe ederek hacminin 10 katı kadar şişmektedir. Birbirlerine bağlanmış olan stiren bölgeleri tarafından oluşturulan bu ağ yapısı bitüm içerisinde üç boyutlu bir şekilde genişleyerek uzanır.

SBS'nin üç boyutlu ağ yapısı; geniş bir sıcaklık aralığında bitümün elastik özelliklerini korumasını sağlar ve kaplamanın yorulma mukavemetini artırır. Yüksek hava sıcaklıklarında bitümün viskozitesini artırıp kalıcı deformasyonu önler, düşük hava sıcaklıklarında ise gevrekliği azaltarak yolun çatlama dayanımını artırır (URL-5, 2017).

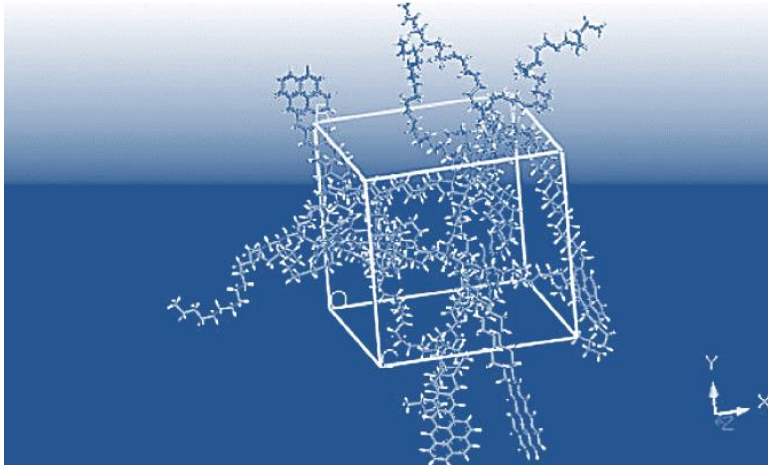
SBS'nin molekül yapısı Şekil 4.1'de, saf bitümün molekül yapısı Şekil 4.2'de, SBS ile modifiye edilmiş bitümün molekül yapısı Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. SBS'nin molekül yapısı (Cong vd., 2008).



Şekil 4.2. Saf bitümün molekül yapısı. (Cong vd., 2008).



Şekil 4.3. SBS ile modifiye edilmiş bitümün molekül yapısı (Cong vd., 2008).

Airey'in yaptığı bir çalışmada, iki farklı kaynaktan temin edilen bitüm numuneleri üç farklı SBS katkı maddesi ile modifiye edilmiştir. Modifiye edilen bitümlerin reolojik özellikleri dinamik mekanik analiz ile araştırılmıştır. Çalışmanın neticesinde modifikasyon derecesinin bitümün kaynağı, bitüm ile polimerin uyumu ve polimerin konsantrasyonunun fonksiyonu olduğunu bildirilmiştir. Polimerin konsantrasyonu ve bitüm-polimer uyumu sürekli bir polimer ağının kurulmasına uygun olduğu takdirde, modifikasyon sonucunda yüksek derecede elastik bir ağ oluşumu ile yüksek sıcaklıklarda viskozite, elastik geri dönüş ve rijitliğin arttığı belirtilmiştir (Airey, 2004).

Metli tarafından yapılan bir çalışmada, SBS polimeri ağırlıkça %2, %3, %4, %5 ve %6 oranlarında saf bitüme eklenmiş ve 5 ayrı tip modifiye bitüm elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitümler ile yumuşama noktası, penetrasyon, RTFOT (ince film halinde ısıtma testi), RTFOT sonrası penetrasyon, RTFOT sonrası yumuşama noktası ve depolanabilirlik stabilitesi deneyleri yapılmıştır. Modifiye ve saf bitümler kullanılarak 54 adet Marshall briketi üretilmiş ve bu briketlerin üçte biri kısa dönem yaşlandırılmış, üçte biri ise uzun dönem yaşlandırılmıştır. Daha sonra bütün numuneler indirekt çekme gerilmesine tabii tutulmuştur. Laboratuvar testleri sonucunda, SBS katkı maddesinin bitümün arttırdığı (penetrasyon testi), yüksek sıcaklıklarda rijitliğini arttırdığı (yumuşama noktası testi) ve yaşlanmaya karşı dayanımını arttırdığı (ince film halinde ısıtma testi) belirtilmiştir. En yüksek kaplama performansının ve en düşük modifikasyon maliyetlerinin sağlandığı optimum polimer konsantrasyonun saf bitümün ağırlık miktarının %3'ü olduğu deklare edilmiştir (Metli, 2007).

Yılmaz ve Kök'ün yaptıkları bir çalışmada, 100/150 penetrasyonlu bitüme üç farklı oranda (%2, %4 ve %6) SBS, eklenerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Dönel viskozimetre (RV) deneyi ile saf ve modifiye karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. Saf ve modifiye bitümler, dönel ince film halinde ısıtma test (RTFOT) yöntemi ile yaşlandırılmıştır. Bağlayıcıların Superpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyeleri, yaşlandırma işleminden önce ve sonra DSR deneyi ile belirlenmiştir. SBS oranının artması ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte DSR deneyleri sonucunda, yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış bağlayıcılarda SBS oranının artması neticesinde yüksek sıcaklık dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değerinin arttığı tespit edilmiştir (Yılmaz ve Kök, 2008).

Demir'in yaptığı bir çalışmada, 50/70 penetrasyonlu bitüm modifiye edilmiştir. Bitüm modifiyesi için Dupont firmasının reaktif elastomerik terpolimeri (Elvaloy RET) , etilen

vinil asetat (EVA) ve stiren butadien stiren (SBS) polimerleri kullanılmıştır. Elde edilen modifiye bitüm karışımından numuneler alınmıştır. Her bir numuneye yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve elastik geri dönme deneyleri yapılmıştır. Saf bitüm, %2 Elvaloy RET, %1 EVA ve %1 SBS içeren numunelere IR spektrumu (FT-IR) ve termogravimetrik analiz / diferansiyel termal analiz (TG/DTA) yapılmıştır. Bitümün modifikasyonu ile düktilite ve penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve elastik geri dönmenin arttığı belirlenmiştir (Demir, 2011).

Kök ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, bitümlü karışımların performansını iyileştirmek sebebiyle SBS ve petrol kökenli bir kayaç olan asfaltit, katkı maddeleri olarak ayrı ayrı ve birlikte kullanılmıştır. Asfaltit, karışıma filler miktarının ağırlıkça %50'si kadar, SBS ise bitümlü bağlayıcı miktarının ağırlıkça %5'i oranında ilave edilmiştir. Karışımlarda orijinal bağlayıcı olarak B 160/220 bitümü ve kalker kökenli agrega kullanılmıştır. Deney numuneleri Marshall standardına göre hazırlanmıştır. Hazırlanan katkılı ve kontrol numuneleri üzerinde indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü ve yorulma deneyleri uygulanmıştır. Neticede, modifiye edilmiş karışım numunelerinin mühendislik özelliklerinin, kontrol numunelerine göre önemli derecede iyileştiği, bu iyileşmenin deney metotları arasında değişik sonuçlar verdiği, bilhassa yorulma deney metodunun katkı maddelerinin etkilerini ölçmede çok etkili olduğu, SBS ve asfaltitin birlikte kullanıldığı karışımların performansının çok iyi olduğu tespit edilmiştir (Kök vd., 2011).

Alataş ve Kizirgil tarafından yapılan bir çalışmada, saf ve iki farklı oranda SBS içeren bağlayıcılar incelenmiştir. İlk olarak saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar ile yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Böylelikle SBS katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının viskozitesi ve ısı hassasiyeti üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Daha sonra saf ve SBS modifiyeli bağlayıcılara dönel viskozimetre deneyi uygulanmış, deney sonuçlarından faydalanılarak agrega ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Dönel viskozimetre deneyleri neticesinde SBS içeriğinin artması ile 135°C ve 165°C sıcaklık değerlerinin ikisinde de bağlayıcıların viskozite değerlerinin arttığı tespit edilmiştir (Alataş ve Kizirgil, 2012).

Modarres'in yaptığı bir çalışmada, SBS modifiyeli bitümlü karışımların yorulma özellikleri ve sıcaklığın karışımların rijitliği üzerine etkileri araştırılmıştır. Üç farklı sıcaklıkta (-10, 20 ve 50°C) indirekt çekme rijitlik modülü ve yorulma deneyleri numunelere uygulanmıştır. SBS ilavesi karışımların sıcaklığa karşı hassasiyetini

azaltmıştır. Yüksek sıcaklıklarda SBS modifiyeli karışımların rijitlik modülü yüksek çıkarken düşük sıcaklıklarda modifiye edilmemiş karışımların rijitlik modülü yüksek çıkmıştır. Düşük sıcaklıklarda ve yüksek yükleme koşullarında yorulma çatlakları oluşumu kritik bir duruma gelirken, düşük yükleme koşullarında yorulma çatlakları oluşumunun kritik seviyede olmadığı görülmüştür (Modarres, 2013).

Kim ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, köprü tabliye kaplamalarında kullanılan SBS modifiyeli mastik asfalt kaplamaların yorulma performansları araştırılmıştır. İçeriği ve cinsi yenilenen, yeni üretilmiş SBS katkı maddesinin etkileri, tipik bağlayıcı deneyleri kullanılarak araştırılmıştır. SBS katkılı mastik asfaltların yorulma ve çatlama davranışları dört nokta eğilme testi ve indirekt çekme testleri ile belirlenmiştir. C(Karbon)=C çift bağına sahip olmayan SBS modifiyerleri bağlayıcının ve mastik asfalt karışımların mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Modifiye bağlayıcı ve karışımlarda kısa ve uzun dönem yaşlanmadan sonra düşük sertlik, yüksek yorulma ve çatlama dayanımı tespit edilmiştir (Kim vd., 2013).

Shirini ve Imaninasab tarafından yapılan bir çalışmada, bağlayıcı miktarının %10, %15 ve %20'si oranlarında lastik kırıntısı kullanılarak poroz asfalt numuneleri hazırlanmış, %5 SBS içeren ve modifiye edilmemiş poroz asfalt numuneleriyle karşılaştırılmıştır. SBS ve lastik kırıntısının poroz asfaltın permabilitesini azalttığı, öte yandan tekerlek izi direncini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Başlangıçta esneklik modülünün artmasına karşın, lastik kırıntı oranının artması kayma direnci ve nem hassasiyetini olumsuz etkilemiştir (Shirini ve Imaninasab, 2016).

Liang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, çeşitli stiren-butadien yapılarına sahip, farklı kompozisyonlardaki SBS kopolimeri ile modifiye edilmiş asfaltların termik ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Yüzde 30 stiren içeren SBS modifiyeli asfaltın en yüksek viskoziteye ve optimum viskoelastik özelliklere sahip olduğu böylece ısı değişimlerinden daha az etkilendiği görülmüştür. Ayrıca stiren içeriğinin artması ile asfaltın kayma kuvvetlerine karşı hassasiyeti azalmıştır (Liang vd., 2015).

Şengül ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, SBS modifiyeli taş mastik asfaltların kaplama performansı araştırılmıştır. Marshall oranı yaklaşımı ile optimum bitüm içerikleri hesaplanan numuneler üzerinde tekrarlı sünme, indirekt çekme rijitlik modülü ve tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Modifiye edilen numunelerin rijitlik modülleri ve tekerlek izine karşı dirençleri artmıştır (Şengül vd., 2013).

Şengöz ve Işıkyakar'ın yaptıkları bir çalışmada, SBS ve Etilen-Vinil-Asetat (EVA) kopolimerleri içeren modifiye bağlayıcılarla ilgili laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Yumuşama noktası, penetrasyon, dönel ince film halinde ısıtma testi ve viskozite testleri sonucunda EVA ve SBS modifiyeli bitümlerin rijitliği artmış ve sıcaklık hassasiyeti azalmıştır. Daha yüksek polimer içeriğinde SBS katkılı bitümler ile EVA katkılı bitümler karşılaştırıldığında, SBS katkılı bağlayıcılarda daha yüksek oranda gelişmeler görülmüştür. Polimer ilavesi ile sıcak asfalt karışımlardaki agregalar ile bitüm arasındaki adezyonun arttığı sonucuna varılmıştır (Şengöz ve Işıkyakar, 2008).

Tayfur ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, 5 farklı modifiye bitümle hazırlanmış asfalt karışımı kalıcı deformasyon mukavemetleri bakımından incelenmiştir. Selüloz fiber, amorf polifaolefin, poliolefin, SBS ve bitümlü selüloz fiber katkı maddesi olarak kullanılmıştır. SBS katkılı asfalt karışımların, tekerlek izi bakımından en yüksek dayanıma sahip olduğu bulunmuştur. Modifiye edilmiş karışımlarda geleneksel karışımlara göre kalıcı deformasyon direncinin arttığı görülmüştür (Tayfur vd., 2007).

Lu ve Isacsson'un yaptıkları bir çalışmada, SBS modifiyeli bağlayıcıların reolojik özellikleri araştırılmıştır. SBS kopolimer ilavesi ile yüksek sıcaklıklarda bağlayıcının elastisitesinde ve düşük sıcaklıklarda bağlayıcı esnekliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca SBS ilavesi ile bağlayıcının ısı hassasiyeti azalmıştır (Lu ve Isacsson, 1997).

Kuloğlu ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, SBS katkılı bitümlü karışımların arazi performanslarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Kaplamanın bir yıl içinde maruz kaldığı toplam sıcaklık indeksi ile rijitlik modülü ve stabilite arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu, SBS katkılı numunelerin saf karışımlara oranla daha fazla stabiliteye ve rijitlik modülüne sahip oldukları tespit edilmiştir (Kuloğlu vd., 2013).

Wen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, SBS modifiyeli bağlayıcılara sülfür ilave edilmiş ve dinamik kayma reometresi testi yapılmıştır. SBS modifiyeli bitüme sülfür ilavesi ile modifiye bağlayıcılar içinde kimyasal olarak kükürtle sertleşmiş SBS ağı oluşarak bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansının geliştiği ve böylece numunelerin sıcaklık hassasiyetinde büyük ölçüde azalma olduğu görülmüştür. Sülfür oranındaki artışın modifiye bitümlerdeki çapraz bağ artışına yol açtığı ve SBS modifiyeli asfaltların reolojik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir (Wen vd., 2002).

Alataş ve Kizirgil'in yaptıkları bir çalışmada, uçucu kül ve SBS birlikte kullanılmış ve hazırlanan numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. SBS ve uçucu kül kullanımı ile karışımların normal sıcaklıklardaki rijitliklerinin, stabilitelerinin, yorulma ömürlerinin,

nem hasarına ve kalıcı deformasyona karşı dirençlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu katkıların birlikte kullanılması ile de bu olumlu etkilerin artacağı görülmüştür. Katkı maddeleri ayrı ayrı değerlendirildiğinde SBS'nin uçucu küle oranla daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte karışımdaki SBS oranının artması ile uçucu külün etkinliğinin azaldığı görülmüştür (Alataş ve Kizirgil, 2013).

Kumar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, SBS ve düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) bağlayıcı ve bitümlü karışımların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları neticesinde iki katkı maddesinin de kalıcı deformasyona karşı dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir (Kumar vd., 2008).

Yılmaz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, SBS, Amerikan Gilsoniti ve İran Gilsoniti kullanılarak hazırlanan modifiye bağlayıcıların depolama stabilitesi araştırılmıştır. Katkı maddelerinin etkilerini ölçmek için B 160/220 bitümüne her bir katkı maddesinden üç farklı oranda karıştırılarak modifiye bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelere EN 13399 standardına göre depolama stabilitesi deneyi uygulanmıştır. Daha sonra bu numuneler yumuşama noktası, penetrasyon ve dönel viskozimetre deneylerine tabi tutulmuştur. Böylelikle depolanabilirlik açısından en uygun katkı maddesinin belirlenmesine çalışılmıştır. SBS ile hazırlanan bağlayıcı numunelerinin depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası, penetrasyon ve viskozite deneyleri neticesinde tüpün üst kısmında polimerin birikmesinden ötürü, tüpün üst kısmından elde edilen numunelerin yumuşama noktası, penetrasyon ve viskozite değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda depolama stabilitesi yönünden doğal asfalt katkı maddelerinin SBS'ye oranla daha uygun olduğu neticesine ulaşılmıştır (Yılmaz vd., 2015).

Kong ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş SBS modifiyeli asfalt kaplamaların performansları incelenmiştir. Çalışma neticesinde, geri dönüştürülmüş SBS modifiyeli asfaltların, geri dönüştürülmüş modifiye edilmemiş asfaltilara göre tekerlek izi oluşumuna, nem hasarına ve düşük ısı çatlaklarına karşı daha dirençli olduğu ayrıca yorulma dayanımının yüksek olduğu görülmüştür (Cong vd., 2016).

4.2. Bitümlü Karışımlarda Sönmüş Kireç Kullanımı

Kireç, kireç taşının çeşitli derecelerde pişirilmesi sonucu elde edilen, suyla karıştırıldığında, tipine göre havada veya suda katılaşma özelliği gösteren, beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı madde türüdür. Tabii kireç taşı, bileşiminde kütlece en az

%90 oranında kalker (kalsiyum karbonat, CaCO_3) bulunduran tortul bir kayadır (URL-6, 2017).

Literatürde bulunan birçok çalışmada sönmüş kirecin, soyulma önleyici davranış göstererek nem hasarına karşı dayanımı arttırdığı belirtilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, sönmüş kirecin bitümlü karışımlarda başka olumlu etkilerinin de olduğunu göstermiştir. Sönmüş kirecin bitümlü karışımlarda kullanılması ile elde edilen faydalar aşağıda gösterilmiştir (Little vd., 2006).

- Sönmüş kireç soyulmayı azaltmaktadır.
- Mineral filler gibi davranarak bağlayıcının ve karışımın rijitliğini arttırmaktadır.
- Düşük ısı çatlakları oluşumuna karşı direnci arttırmaktadır.
- Oksidasyon kinetiğini ve oksidasyon ürünlerinin yapısını değiştirerek oksidasyonun zararlı etkilerini azaltmaktadır.
- Killerin plastik özelliklerini değiştirerek nem hasarına karşı dayanımı ve durabiliteyi iyileştirmektedir.

Yapılan analizler sonucu sönmüş kireç kullanımı ile bitümlü karışımlarda ton başına yaklaşık 20 dolar kazanç sağlanmakta ve kaplamanın ömründe yaklaşık yüzde 38'lik bir artış görülmektedir (Little vd., 2006).

Johansson tarafından yapılan bir çalışmada, sönmüş kireç soyulma önleyici katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Çalışma neticesinde sönmüş kireç ilavesinin bağlayıcının erken yaşlanmasını geciktirdiği böylelikle adezyon kuvvetini arttırdığı ortaya çıkmıştır (Johansson, 1995).

Lesueur ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, sünme testleri neticesinde sönmüş kireç ilavesi ile yüksek sıcaklıklarda stabilite artışı sağlanmıştır. Sönmüş kirecin bitümün viskozitesini artırırken aynı zamanda suyun zararlı etkilerine karşı direncini de arttırdığını tespit edilmiştir. Bitümlü sıcak karışıma sönmüş kireç ilave edilmesi ile meydana gelen reolojik değişimler ve oksidatif sertleşme değişimleri araştırılmış ve kirecin olumlu sonuçlar sağladığı görülmüştür. Geniş kapsamlı bağlayıcı ve karışım deneyleri yapılarak, karışımın yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi dayanımı ve düşük sıcaklıklardaki çatlak oluşumuna karşı direnci değerlendirilmiştir. Sönmüş kirecin bitümle reaksiyona giren aktif bir kimyasal olduğu ve kireç parçacıklarının bitümün polar bileşenlerini emerek bağlayıcının viskozite değerini arttırdığı görülmüştür. Sönmüş kirecin aktif filler etkisinin bir sıcaklık duyarlılığı olduğu, yüksek sıcaklıklarda filler görevi gören kirecin en yüksek etkinliğe eriştiği, bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda akma dayanımını arttırdığı, sıcaklık

düştükçe kırılabilirliği azaltarak akma ile oluşan enerjinin kaplamaya dağılmasını sağladığı tespit edilmiştir (Lesueur vd., 1998).

Rogge'nin yaptığı bir çalışmada, sönmüş kirecin bitümlü kaplama dayanımını sadece yüksek sıcaklıklarda değil aynı zamanda düşük sıcaklıklarda da olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir (Rogge vd., 1995).

Jones'un yaptığı bir çalışmada, sönmüş kirecin esnek kaplamanın sertleşme özelliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma neticesinde, %1,5 kuru ağırlık oranındaki sönmüş kirecin kaplamanın yaşlanma sertleşmesini azaltmada katkı sağlayacağı tespit edilmiştir (Jones, 1997).

Verhasselt ve Choquet tarafından yapılan bir çalışmada, sönmüş kireç kullanımı ile oksidasyon sebepli sertleşme etkilerine karşı dayanımının arttığı teşhisi yapılarak, Belçika'da, Marimboung ve Nemville arasındaki N5 yolunda, 15 ayrı kısımda uygulamalar yapılmıştır. Sekiz senelik çalışmaların neticesinde sönmüş kireçle modifiye edilmiş asfalt kaplamaların modifiye edilmemiş veya polimer modifiyeli bitüm kullanılmış kaplamalara oranla gösterdikleri performans artışları tespit edilmiştir (Verhasselt ve Choquet, 1993).

Mohammad ve Abadie'nin yaptıkları bir çalışmada, sönmüş kirecin polimer katkılarıyla birlikte kullanıldığı zaman faydalarının daha da arttığı, bu performans artışlarının yalnız başına kullanılmasına kıyasla oldukça fazla olduğu görülmüştür (Mohammad ve Abadie, 2000).

Gençtürk'ün yaptığı bir çalışmada, çimento ve sönmüş kireç katkıları filler azaltılarak %1, %1,5, %2, %3 ve %5 oranlarında, Pr plast ise karışımın %0,3 ve %0,6 oranında doğrudan agrega karışımına ilave edilerek alternatif karışımlar üretilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde 72 adet Marshall briketi üretilmiştir. Briketlerin yarısı, tekrarlı su hasarına maruz bırakılarak koşullandırma gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından yola çıkarak sönmüş kireç ve çimentonun aktif filler olarak kullanılabileceği, Pr plastın ise karışımı güçlendiren katkı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir (Gençtürk, 2011).

Turan tarafından yapılan bir çalışmada, sönmüş kireç, SBS ve her iki katkının birlikte kullanıldığı karışımlar Marshall oranı yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Araştırmada, 100 mm ve 150 mm çaplarında Marshall briketleri üretilerek numune çapının etkisi de incelenmiştir. Çalışma neticesinde şu sonuçlara varılmıştır. Hem 150 mm hem de 100 mm çaplı numunelerde yapılan stabilite deneylerinde genel olarak modifiye edilmiş karışımlarda geleneksel karışımlara göre daha yüksek stabilite değerleri tespit edilmiştir. 150 mm çaplı numunelerde %4 sönmüş kireç modifiyeli karışımlar, 100 mm çaplı

örneklerde de %2 sönmüş kireç katkılı karışımlar, istisna olmuştur. Her iki numune boyutunda da %4 sönmüş kireç + %5 SBS içeren karışımların en yüksek stabilite değerleri verdiği tespit edilmiştir. 150 mm çaplı numunelerden elde edilen stabilite değerleri, 100 mm çaplı numunelerden elde edilenlere göre bütün karışım türleri için daha büyük olmuştur. %2 sönmüş kireç + %5 SBS içeren karışımlarda ortalama stabilite değerlerinin birbirine en yakın olduğu, %2 sönmüş kireç içeren karışımlarda ise en büyük stabilite farkları olduğu görülmüştür. Katkisız numunelerin Marshall oranı her iki numune boyutunda da en düşük çıkmıştır (Turan, 2012).

Khodaii ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, nem hasarına karşı etkinliği sıcak karışım asfaltlarda kanıtlanan sönmüş kirecin, ılık karışım asfaltlarda kullanıldığı zaman nasıl etki edeceği araştırılmıştır. Çalışmada yüzde 0-2 arasında değişen oranlarda sönmüş kireç kullanılmıştır. Çalışma neticesinde sürekli gradasyona sahip ılık asfalt karışımlarda kireç oranının artmasıyla nem hasarına karşı direnç artmıştır. Fakat süreksiz gradasyona sahip ılık karışım asfaltların bir kısmında minimum yüzde 80 olan çekme direnci limitinin sağlanmadığı görülmüştür (Khodaii vd., 2012).

Hesami ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, iki farklı agrega, kireç taşı ve granit, iki farklı ılık asfalt katkısı, sasobit ve asphamin ve soyulma önleyici katkı maddesi olarak sönmüş kireç kullanılmıştır. Agrega ile bitüm arasındaki adezyon bağ kuvvet mekanizması serbest yüzey enerjisi metodu kullanılarak belirlenmiştir. Serbest yüzey enerjisi metoduna göre sönmüş kireç, bitümlü bağlayıcının ıslatabilirliğini artırarak agrega ile bağlayıcı arasındaki adezyon bağ kuvvetini iyileştirmiştir. Sönmüş kireç modifiyeli asfalt karışımların serbest yüzey enerjileri, modifiye edilmemiş karışımlardan daha düşük çıkmıştır, böylelikle soyulma direnci artmıştır (Hesami vd., 2013).

Kim ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, atık lastik modifiyeli karışımlara sönmüş kireç ilave edilerek nem hassasiyetine karşı dayanımı araştırılmıştır. Çalışma neticesinde sönmüş kireç katkılı karışımların nem hassasiyetinde kayda değer iyileştirmeler görülmüştür (Kim, S. vd., 2014).

Shafiei ve Namin'in yaptıkları bir çalışmada, farklı oranlarda sönmüş kireç ilave edilen iki farklı gradasyondaki taş mastik asfalt karışımların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Optimum oranda sönmüş kireç içeren iki farklı gradasyondaki taş mastik asfalt karışımların tekerlek izine karşı dirençleri artmıştır. Sönmüş kirecin viskozite ve sertlikte kayda değer bir etkisi görülmemiştir. Çalışma sonucunda ilave kirecin miktarının ve

karıştırma metodunun taş mastik asfalt karışımının performansında önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür (Shafiei ve Namin, 2014).

Kakade ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, sönmüş kireç modifikasyonunda ıslak ve kuru olmak üzere iki farklı metot kullanılarak hazırlanan karışımların yorulma dayanımları, gerilme kontrollü yorulma kırışi yöntemi ile incelenmiştir. Kuru yöntemde %1,5 oranında sönmüş kireç filler olarak kullanılmıştır. Islak yöntemde bağlayıcının %30'u oranında kireç 160 °C'de 20 dakika süreyle yüksek devirde bir mikser yardımıyla bitümle karıştırılmıştır. Kireç ilavesinde her iki yöntem de genel olarak kaplamanın yorulma ömrünü arttırmıştır. Kaplamaların kalınlığı arttıkça yorulma ömürleri artmıştır. Kalın kaplamalarda, ıslak yöntem ile hazırlanan karışımların yorulma ömürleri kuru yöntemle hazırlanan karışımlara oranla daha yüksek çıkmıştır. Daha ince kaplamalarda kuru yöntemle hazırlanan karışımların yorulma ömürleri ıslak yöntemle hazırlanan karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır (Kakade vd., 2016).

4.3. Ilık Karışım Asfaltlarla İlgili Yapılan Çalışmalar

Xiao ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, Sasobit, Rediset WMX, Cecabase ve Evotherm ılık karışım asfalt katkı maddelerinin bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansına olan etkileri incelenmiştir. Ilık asfalt katkı maddelerinin bağlayıcıya etkilerini belirlemek için viskozite, elastik geri dönme, DSR gibi geleneksel test yöntemleri ve kızılötesi spektroskopisi (FTIR) yöntemi icra edilmiştir. Test sonuçları, ılık asfalt katkı maddelerinin yavaşça viskoziteyi düşürdüğünü ve böylece karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının düştüğünü göstermiştir. Kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında, ılık asfalt katkı maddeleri az bir oranda bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını artırarak kaplamanın tekerlek izine karşı direncini yükseltmişlerdir. Elastik geri dönme ve DSR deneyleri sonucunda Sasobit katkılı bağlayıcıların kompleks kayma modülleri biraz artmıştır fakat diğer katkı maddeli bağlayıcılara göre daha düşük faz açısı ve sünme esnekliği sergilemişlerdir. FTIR analiz sonuçları ılık asfalt katkılı bağlayıcıların reolojik özelliklerinin öğrenilmesinde bağlayıcı tipinin anahtar bir rol oynadığını göstermiştir (Xiao vd., 2012).

Banerjee ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, uzun dönem yaşlandırılmış ılık asfalt karışımların reolojik özellikleri incelenmiştir. Sasobit, Rediset, Evotherm ve Cecabase katkı maddeleri kullanılmıştır. Katkı maddeleri PG 64-22 bağlayıcıya ilave

edilmiş ve 10 farklı yükleme frekansında ve 3 farklı sıcaklık derecesinde oksidatif yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda Rediset katkılı bağlayıcının en düşük kayma modülüne sahip olduğu Rediseti sırasıyla Evotherm, Cecabase ve Sasobitin takip ettiği görülmüştür. Kontrol numunesinde en yüksek kayma modülü görülmüştür. Kısa süreli yaşlanmada ise Sasobit katkılı numunelerin kayma modülü kontrol numunesine göre önemli derecede düşük çıkmıştır, en düşük kayma modülü Rediset katkılı numunelerde görülmüştür (Banerjee vd., 2012).

Biro ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, ılık asfalt bağlayıcıların sıfır kayma viskozitesi belirlenmiştir. Literatürdeki farklı modeller ve test metotları kullanılarak katkısız, Sasobit katkılı ve Asphamin katkılı 5 farklı bağlayıcıların sıfır kayma viskozitesi (ZSV) belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan beş farklı bağlayıcıda da katkı maddeleri sıfır kayma viskozitesini arttırmıştır. Ayrıca çalışmada farklı test metotlarının farklı ZSV değerleri verdiği görülmüştür, bu yüzden test metodunun seçimi ve test değişkenleri önemli parametreler olmaktadır (Biro vd., 2009).

Su ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, ılık karışım asfaltların havaalanı kaplamalarının rehabilitasyonunda kullanımının laboratuvar ölçümleri yapmıştır. Üç farklı ılık asfalt katkısı, (farklı gradasyonlarda) sistematik olarak araştırılmış ve havaalanlarında kullanılan geleneksel sıcak asfalt karışımlarla karşılaştırılmıştır. Tekerlek izi deneyi, su altında tekerlek izi deneyi, sökölme deneyi, statik eğilme ve yorulma eğilmesi testleri yapılmıştır. ılık asfalt karışımları ticari olan katkı maddelerinin özelliklerine göre iki farklı sıcaklıkta (sıcak asfalt karışımlardan 30°C ve 50°C daha düşük) üretilmişlerdir. Test sonuçlarına göre, kaba gradasyonlu ve sıcak asfalt karışımlardan 30°C daha düşük sıcaklıkta üretilen ılık asfalt karışımları, sıcak asfalt karışımlarla benzer özellikler göstermiştir ve kullanımı tavsiye edilmiştir (Su vd., 2009).

Xiao ve Amirkhanian tarafından yapılan bir çalışmada, ılık asfalt karışımlarda sıvı soyulma önleyici katkı maddelerinin karışımın reolojisine ve nem hassasiyetine olan etkileri incelenmiştir. Önce sıvı soyulma önleyici katkı (ASAs) bağlayıcıyla karıştırılmış daha sonra agregayla karıştırılmış ve sonra ılık asfalt katkısı Asphamin karışıma ilave edilmiştir. Viskozite, sünme, elastik geri dönme, performans derecesi, DSR, kaynama noktası ve İndirekt Çekme Direnci (ITS) deneyleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre Asphamin ilavesi viskoziteyi, kompleks kayma modülünü ve sıcaklık bozulmalarını az bir oranda arttırmıştır. Asphamin katkılı numunelerde en düşük indirekt çekme direnci

değerleri görülmüştür. Asphamin katkılı numunelerde ya da Asphamin ve ASAs katkılı karışımlarda soyulma artmıştır (Xiao ve Amirkhanian, 2010).

Şengöz ve Oylumluoğlu'nun yaptıkları bir çalışmada, ılık asfalt karışımların geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda kullanımı araştırılmıştır. Katkı maddesi olarak Rediset kullanılmıştır. %10, %20, %30, %40 ve %50 geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda bitüm ağırlığının %2 si kadar Rediset kullanılmış ve Marshall testi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre Rediset katkısı bitümün özelliklerini iyileştirmiştir. Kontrol numuneleriyle, Rediset kullanılan geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının stabiliteleri benzer çıkmıştır (Şengöz ve Oylumluoğlu, 2013).

Bayazit ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, ılık asfalt karışımların mekanik özellikleri araştırılmıştır. 160/220 penetrasyon derecesindeki bitüme Fischer-Tropsch parafin mumu ve polietilen mum bitüm ağırlığının %6'sı oranında ilave edilmiştir. Asfalt karışımların mekanik özellikleri Marshall testi ve indirekt çekme direnci deneyleri ile belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre Fischer-Tropsch parafin mumu katkılı numunelerin Marshall stabiliteleri ve ITS değerleri kontrol numunelerine göre daha yüksek çıkarken, polietilen mum katkılı numunelerin Marshall stabiliteleri ve ITS değerleri kontrol numunelerine göre daha düşük çıkmıştır (Bayazit vd., 2012).

Akisetty ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, ılık asfalt katkısı içeren kauçuk esaslı asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları araştırılmıştır. Asphamin ve Sasobit beş farklı bağlayıcıya, bağlayıcı ağırlığının %10'u kadar ilave edilmiş ve RTFOT, DSR ve RV deneyleri yapılmıştır. Katkı maddeleri bağlayıcının viskozitesini önemli derecede azaltmıştır. Katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları artmıştır. Kısa dönem yaşlandırılmış ılık asfalt katkısı içeren kauçuk esaslı asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklık bozulmalarına karşı direnci artmıştır. Asphamin ve Sasobitin etkileri arasında istatistiksel olarak önemli bir fark olmamıştır (Akisetty vd., 2009).

Lee ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, laboratuvarında uzun dönem yaşlandırılmış ılık asfalt bağlayıcıların özellikleri belirlenmiştir. Sasobit ve Asphamin katkılı geri dönüştürülmüş asfalt bağlayıcılar RTFOT ve PAV deneyleri ile kısa ve uzun süreli olarak yaşlandırılmıştır. Bu yaşlandırılmış numunelere Superpave deneyleri (RV, DSR ve BBR) yapılmıştır. Geri dönüştürülmüş ılık asfalt bağlayıcıların viskozitesi azalmıştır ve bu azalmanın miktarında kullanılan bağlayıcının performans derecesi önemli rol oynamıştır. ılık asfalt katkılı yaşlandırılmış numunelerin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı dirençleri artmıştır ve bu artışta kullanılan bağlayıcının performans derecesi

benzer olarak önemli rol oynamıştır. Orta servis sıcaklıklarında ılık asfalt katkılarının pozitif bir etkisi görülmemiştir. Geri dönüştürülmüş ılık asfalt bağlayıcıların düşük ısı çatlaklarına direnci kontrol numunelerine göre daha düşük çıkmıştır (Lee vd., 2009).

Xiao ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, ılık asfalt katkılı kauçuk esaslı asfalt betonların yorulma davranışı incelenmiştir. Yorulma kırıları; ılık asfalt katkıları olarak Asphamin ve Sasobit, iki farklı agrega kaynağı, ve tek tip parça kauçuk kullanılarak yapılmış ve 20 °C’de test edilmiştir. Toplamda sekiz karışım oluşturulmuş ve 29 yorulma kırı test edilmiştir. Test sonuçlarına göre parça kauçuk ve ılık asfalt katkıları hem karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını azaltmış hem de kaplamanın uzun dönem performansını geleneksel asfalt kaplamalara göre dikkate değer bir ölçüde arttırmıştır (Xiao vd., 2009).

Silva ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, sentetik parafin balmumu içerikleri ve bağlayıcıların farklı karışımları kullanarak elde edilen ılık karışım asfaltların optimizasyonu araştırılmıştır. Belli bir miktar sentetik parafin balmumu içeren farklı bitümlü karışımların (yumuşaktan sert doğru) özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda karışımların diğer özelliklerinden ödün vermeden, karışımdaki sıcaklık azalmasını, tekerlek izi direncini ve yorulma ömrünü maksimize etmek için farklı karışım tiplerinin seçilebileceği görülmüştür. Sentetik parafin balmumu içeren ılık asfalt karışımlarda sıcaklık azalmasını maksimize etmek için sıcak iklimli bölgeler haricinde daha yumuşak bitümlerin kullanılması gerektiği görülmüştür. Katkı maddeleri bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını önemli derecede arttırmıştır. ılık asfalt karışımların sıkışabilirliği sıcak asfalt karışımlara benzer çıkmıştır. Sentetik parafin balmumları ılık karışım asfaltın suya olan hassasiyetini önemli ölçüde değiştirmemiştir. Yumuşak bitümlerde sentetik parafin balmumları karışımın yorulma ömrünü arttırmışlardır (Silva vd., 2010).

Shang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülmüş çapraz bağlı polietilenden pirolize edilmiş balmumunun (RPPW) SBS modifiyeli karışımlarda ılık asfalt katkısı olarak kullanımı araştırılmıştır. Ayrıca RPPW ve Sasobit balmumunun asfalt performansına etkileri ve termal davranışları karşılaştırılmıştır. RPPW ilavesi ile SBS modifiyeli asfaltlarda yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde viskozite azalmıştır. Ayrıca RPPW katkısı SBS katkılı ve SBS katkısız asfaltlarda kompleks kayma modülü değerini arttırıp faz açısı değerini düşürmüştür. Test sonuçlarına göre RPPW katkısı düşük

sıcaklıklarda üretilen ılık asfalt karışımları için kayda değer bir performans göstermiştir (Shang vd., 2011).

Sanchez-Alonso ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, ılık asfalt katkılı bitümlerin mekaniksel özellikleri ve sıkıştırılabilirliği araştırılmıştır. Kimyasal ve organik ılık asfalt katkı maddeleri kullanılmıştır. Üç farklı referans sıcaklığında yapılan test sonuçlarına göre üretim sıcaklığın azalmasıyla daha az sıkıştırma enerjisi gerekmektedir ve referans numunelerine göre katkılı numunelerin suya olan hassasiyeti iyileşmektedir. Tüm katkılı numunelerin rijitlik modülleri referans numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır (Sanchez-Alonso vd., 2011).

Das ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, indirekt çekme direnci deneyi ile ılık karışım asfaltların düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnci araştırılmıştır. 70/100 penetrasyon derecesindeki bitüme katkı maddesi olarak FT parafin balmumu ve Asphalten B ilave edilmiştir. DSR, BBR, Superpave IDT, TSRST testleri yapılmıştır. DSR ve BBR test sonuçlarına göre katkı ilavesi düşük sıcaklıklarda rijitliği arttırmıştır. Superpave IDT deneyinin istatistiksel sonuçlarına göre katkı maddeleri düşük sıcaklıklarda az bir miktar negatif etki oluşturmaktadır. İstatistiksel sonuçlara göre çatlak performansı sıcaklığa bağlı olmakla beraber agrega tipinin çatlak performansında önemli bir rolü yoktur. TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test) test sonuçlarına göre katkı maddeleri düşük sıcaklıklarda az bir miktar negatif etki oluşturmaktadır (Das vd., 2012).

Kim ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, ılık asfalt karışımların nem hasarına karşı dayanım karakteristikleri arazi ve laboratuvar testleri ile araştırılmıştır. Daha gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için ılık asfalt katkılı deneme kaplamaları ve karşıtı sıcak asfalt katkılı test kaplamaları Nebraska'nın Antilop ilçesinde inşa edilmiştir. Arazide kullanılan karışımdan alınan numuneler laboratuvara gönderilmiştir. Laboratuvar test sonuçlarına göre ılık karışım asfaltların nem hasarına karşı dayanımı sıcak asfalt karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Asfalt kaplamaların inşasından sonra 3 yıl içinde alınan erken verilere göre tekerlek izi ve çatlak performansı hem ılık hem de sıcak karışım asfaltilarda laboratuvar test sonuçlarıyla uyumlu ve tatmin edici olmuştur (Kim vd., 2012).

Ünvermez'in yaptığı bir çalışmada, ılık karışım asfaltların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yüksek penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı, polietilen vaks ile modifiye edilmiş ve sasobit ile modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve indirekt çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Yüksek penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan numunelere göre, sasobit katkılı numunelerin Marshall

stabilite değerleri %7,1 oranında artmış ancak, polietilen vaks katılan numunelerin Marshall stabilite değerleri ise %4 oranında azalmıştır. Yüksek penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan numunelere göre, sasobit katkılı karışımlarda indirekt çekme direnci %9,7 oranında azalmış ve polietilen vaks katkılı karışımların indirekt çekme direnci ise %7,8 oranında artmıştır (Ünvermez, 2011).

Bayazit'in yaptığı bir çalışmada, 50/70 penetrasyona sahip bitüme, Fischer Tropsch Vaks, Polietilen Vaks ve Montan Vaks %6 oranında ilave edilerek ılık karışım asfaltlar hazırlanmış ve bu karışımların 50 ve 75 darbe sayısı altındaki Marshall stabiliteleri belirlenmiştir. Ayrıca bu karışımların soyulmaya ve neme karşı hassasiyetlerini belirlemek için, Nicholson soyulma ve AASHTO T-283 deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde vaks katılarak hazırlanan karışımların Marshall stabilitelerinin, farklı sıkıştırma sayıları altında önemli oranda değişmediği görülmüştür. Katkısız bitümlü karışımlarda ise sıkışma sayısının artmasıyla stabilite artmıştır. Sıkıştırma sayılarının değişimiyle akma miktarlarında önemli değişikliklerin olmadığı görülmüştür. Nicholson soyulma deneyleri neticesinde ise karışımların soyulmaya karşı dirençli oldukları tespit edilmiştir. AASHTO T-283 deneyleri neticesinde ise katkıların eklenmesiyle karışımların neme karşı hassasiyetlerinin arttığı görülmüştür (Bayazit, 2012).

Kaya'nın yaptığı bir çalışmada, Sasobit, Rediset, Advera ve bunlara alternatif olabileceği düşünülen doğal zeolit kullanılarak Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri ile ılık karışım asfalt numuneleri üretilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, her iki tasarım yönteminde de katkı maddeleri ile üretilen asfalt numunelerinin optimum bitüm miktarları, geleneksel bitümlü sıcak karışım numunelerine oranla daha düşük çıkmıştır. Böylece, düşük sıcaklıklarda üretilen ılık karışım asfalt teknolojisinin ekonomik olarak avantaj sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, doğal zeolit katkısı hariç diğer tüm katkılar için optimum bitüm oranı Marshall tasarım yönteminde Superpave tasarım yöntemine oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Kaya, 2014).

Köse'nin yaptığı bir çalışmada, ılık karışım asfaltların buz çözücü kimyasal olan NaCl'ye karşı dayanımının belirlenmesi amacıyla, bitümlü sıcak karışım ve bitümlü ılık karışım olmak üzere iki grup Marshall numuneleri üretilmiştir. Her iki gruptan da referans numuneler ayrılarak diğer numuneler aşındırıcı çevre şartlarına maruz bırakılmışlardır. Aşındırıcı çevre şartları olarak saf su ve NaCl kullanılmıştır. NaCl çözeltisinin konsantrasyonları %0,8–%1,6–%2,1–%6,5 ve %10,4 olarak seçilmiştir. Marshall stabilite testi sonuçlarına göre, bitümlü ılık karışımların, bitümlü sıcak karışımlara göre buz çözücü

kimyasal madde olan NaCl'ye karşı dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Köse, 2015).

Abdullah ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, nanokil ve kimyasal ılık karışım asfalt katkısı ile modifiye edilmiş bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları araştırılmıştır. 80/100 Penetrasyon derecesindeki bitüme %1, %2 ve %3 oranlarında kimyasal ılık karışım asfalt katkısı ve %4 oranında nanokil ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Modifiye edilmiş ılık karışım asfaltlar çeşitli karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında üretilmiş ve performansları geleneksel sıcak karışım asfaltlarla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre sıcak karışım asfaltlarla karşılaştırıldığında, modifiye ılık karışım asfaltların esneklik modülü değeri küçük bir miktar azalırken, nem hasarı, kalıcı deformasyon ve tekerlek izi değerlerinde önemli ölçüde iyileşme görülmüştür (Abdullah vd., 2016).

Mansourian ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, düzensiz dağıtılmış jüt lifleri ile güçlendirilmiş ılık karışım asfaltların düşük sıcaklık performansları araştırılmıştır. Sasobit katkısı ve %0–%0,3–%0,5 ve %0,7 oranlarında jüt fiberi içeren ılık karışımların 0°C, -10 °C ve – 20°C sıcaklıklarda kırılma dirençleri ölçülmüştür. Araştırma sonuçlarına göre jüt lifleri ılık karışım asfaltların kırılma direncini arttırmıştır (Mansourian vd., 2016).

Cucalon ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, ılık karışım asfaltların nem hasarına karşı dayanımları laboratuvar testleri ile araştırılmıştır. Soyulma önleyici katkı içeren ve içermeyen, geri dönüştürülmüş asfalt içeren ve içermeyen, Evotherm katkılı ve köpük ılık karışım asfalt numuneleri üretilmiş ve sıcak karışım asfaltlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma neticesinde ılık karışım asfaltların nem hassasiyetinin sıcak karışım asfaltlara göre daha yüksek olduğu, geri dönüştürülmüş asfalt ilavesinin ılık karışım asfaltlarda kayda değer bir faydasının görülmediği fakat soyulma önleyici katkıların karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını önemli oranda iyileştirdiği tespit edilmiştir (Cucalon vd., 2015).

Dokandari ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, organik ılık karışım asfalt katkı maddesinin bitümlü karışımların yaşlanma özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Muhtelif oranlarda organik ılık karışım asfalt katkı maddesi ihtiva eden bitüm ile hazırlanan asfalt karışım numuneleri ve kontrol numuneleri; kısa ve uzun dönem yaşlanmaya tabi tutulduktan sonra yaşlanma oranları ve yaşlanma indeksleri, indirekt çekme mukavemeti deneyleri ile tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre bitümlü sıcak karışımlara oranla organik katkı içeren ılık karışım asfalt numunelerinin yaşlanmaya karşı daha dayanıklı olduğunu görülmüştür (Dokandari vd., 2014).

Lee ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, iki farklı Leadcap katkısının KW3 (toz halinde) ve KW6 (granüler halde) asfalt kaplamalardaki performans karakteristikleri incelenmiştir. Tekerlek izi, yorulma çatlağı ve nem hasarı testleri yapılmıştır. Tekerlek izi performansı, tekrarlı üç eksenli yük deformasyon testi (TRLPD) ve asfalt kaplama analizi (APA) testleri ile belirlenmiştir. Yorulma performansı nemli ve nemsiz ortamda tekrarlı çekme ve basitleştirilmiş viskoelastik sürekli hasar (S-VECD) kuralı ile belirlenmiştir. Farklı kaplama kalınlıklarındaki asfalt kaplamaların yorulma performansını ve nem hasarını ölçmek için son hasar karakteristikleri ve dinamik modül viskoelastik analiz programında kullanılmıştır. Hem TRLPD hem de APA test sonuçlarına göre KW3 ve KW6 katkılı karışımların tekerlek izine karşı sıcak asfalt kaplamalara göre daha iyi performans göstermiştir. KW3 katkılı karışımın tekerlek izine karşı direnci KW6 katkılı karışımdan yüksek çıkmıştır. Sıcak karışım asfaltların ve KW6 katkılı ılık asfalt karışımların yorulma dirençlerinin birbirine yakinken KW3 katkılı karışımların yorulma direnci daha düşük çıkmıştır. Fakat KW6 katkılı karışımların nem hasarına karşı hassasiyeti artmıştır (Lee vd., 2011).

Kim ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, atık lastik parçacıkları ve Leadcap ılık karışım katkısı içeren bağlayıcıların yüksek, orta ve düşük sıcaklıklardaki reolojik özellikleri incelenmiştir. Superpave bağlayıcı deneyleri yapılmıştır. Ilık karışım asfalt katkı ilavesi ile bağlayıcının viskozitesi düşmüş, yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri iyileşmiş, düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımı artmıştır. Atık lastik ilavesi de asfalt bağlayıcının tekerlek izi ve çatlak oluşumuna karşı dayanımını olumlu bir şekilde etkilemiştir (Kim, H. vd., 2014).

Mazumder ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, Sasobit ve Leadcap katkılı bağlayıcıların performans özellikleri incelenmiştir. Katkı ilavesi ile bağlayıcıların viskozite değerleri azalmıştır. Her iki katkı maddesinde de viskozitedeki azalma benzer çıkmıştır. Kontrol numunelerine göre katkılı numunelerin tekerlek izine karşı dirençleri artmıştır. Katkılı ve katkısız karışımların düşük ısı çatlaklarına karşı dirençleri benzer çıkmıştır (Mazumder vd., 2016).

5. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ

Tez çalışmasında agregalar, katkılı-katkısız bağlayıcılar ve modifiye edilmiş-edilmemiş karışımlar üzerinde çeşitli laboratuvar testleri yapılmıştır. Bu test metotları aşağıda verilmiştir.

Agregalar üzerinde yapılan deneyler:

- Aşınma
- Hava tesirlerine karşı dayanıklılık
- Özgül ağırlık ve su emme

Bağlayıcılar üzerinde yapılan deneyler:

- Penetrasyon
- Yumuşama noktası
- Dönel viskozimetre
- Dinamik kayma reometresi
- Döner ince film halinde ısıtma
- Basınçlı yaşlandırma kabı
- Kiriş eğme reometresi

Karışımlar üzerinde yapılan deneyler:

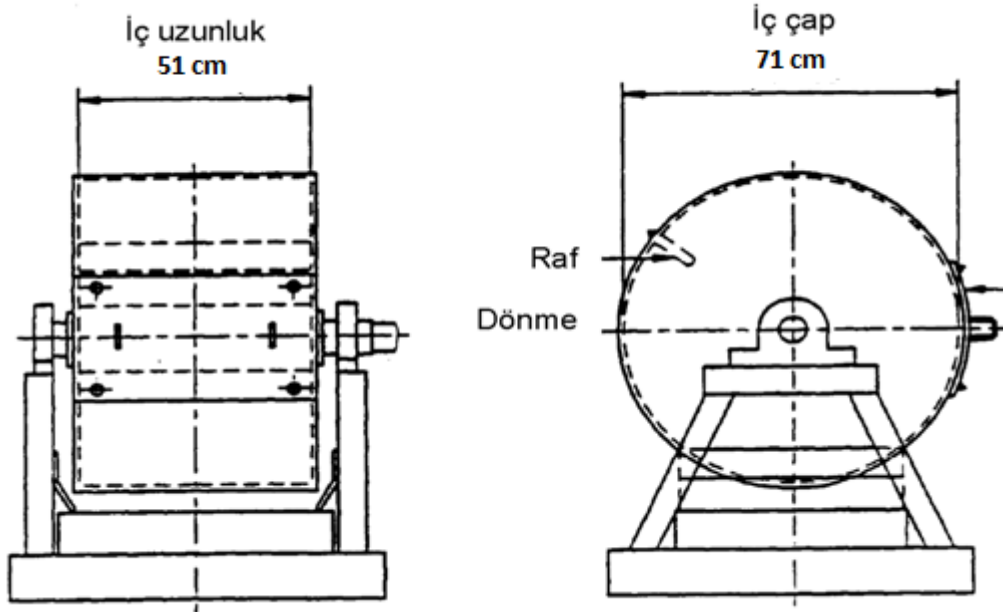
- Marshall stabilite ve akma
- Nem hasarına karşı dayanım
- İndirekt çekme rijitlik modülü
- İndirekt çekme yorulma
- Dinamik sünme

5.1. Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler

Bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılarak, agregaların fiziksel ve mekaniksel özellikleri tespit edilmektedir.

5.1.1. Aşınma (Los Angeles) Deneyi

Aşınma deneyi ASTM C131 ve TS EN 1097-2 standardı ile tanımlanmaktadır. Agregaların aşınmaya karşı dirençlerini belirlemek için yapılan bu deneyde Los Angeles deney aleti kullanılmaktadır. Bu alet iki ucu kapalı, iç çapı 71 cm iç uzunluğu 51 cm olan içi boş çelik bir silindirden ibarettir. Silindir içinden geçmeyen aksla enine durumda dönmeyi sağlayacak şekilde yapılmıştır. Los Angeles deney aleti Şekil 5.1’de gösterilmiştir (Keçeciler vd., 1990).



Şekil 5.1. Los Angeles deney aleti (MEGEP, 2006).

Numune sınıflarına göre belirlenen eleklerde kalan malzemelerden belirli miktarlarda alınır, kil ve tozdan temizleninceye kadar yıkanır ve değişmez ağırlığa gelene kadar 110°C’lik etüvde kurutulur. Numune sınıflarına göre belirli sayıda 4,68 cm çapında 390-445 gram ağırlığında çelik küreler numune ile birlikte silindire konur. Silindir dakikada 30-

33 devir yapacak şekilde numune sınıflarına göre 500 veya 1000 devir döndürülür. Sonra numune silindirden çıkarılır, 1,70 mm'lik elekten elenir. Elek üzerinde kalan malzeme yıkanır ve değişmez ağırlığa gelene kadar 110°C'lik etüvde kurutulur. Deney başlangıcı ile deney sonu arasındaki ağırlık kaybı yüzde cinsinden aşınma değeri olarak hesaplanır. Numune sınıflarına göre gerekli deney numunesi miktarları Tablo 5.1'de, gerekli küre sayısı Tablo 5.2'de verilmiştir (Keçeciler vd., 1990).

Tablo 5.1. Aşınma deneyi için numune tiplerine göre gerekli numune miktarları. (TS EN 1097-2).

Elek Boyutları		Numune Sınıflarına Göre Gerekli Numune Miktarları (g)						
Geçen (mm)	Kalan (mm)	A	B	C	D	E	F	G
75	63					2500		
63	50					2500		
50	37,5					5000	5000	
37,5	25	1250					5000	5000
25	19	1250						5000
19	12,5	1250	2500					
12,5	9,5	1250	2500					
9,5	6,3			2500				
6,3	4,75			2500				
4,75	2,36				5000			
Toplam		5000	5000	5000	5000	10000	10000	10000
Tolerans (±)		10	10	10	10	100	75	50

Tablo 5.2. Aşınma deneyinde kullanılacak çelik küre miktarları (TS EN 1097-2).

Numune Sınıfı	Çelik Küre Sayısı	Yükleme Ağırlığı (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4575 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

5.1.2. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi TS 1367-2 standardı ile tanımlanmaktadır. Agregaların hava tesirlerine karşı direncini belirlemek için yapılan bu deneyde doymuş magnezyum sülfat çözeltisi kullanılır. Magnezyum sülfatlı çözeltilerde her litre su için 350

gram saf ve susuz magnezyum sülfat tuzu veya 1500 gram kristalize magnezyum sülfat tuzu kullanılır. Tuz ilave edilirken çözelti sürekli karıştırılır. Kullanılmadan evvel topaklanmayı önlemek için çözelti iyice karıştırılarak özgül ağırlığı belirlenir. Magnezyum sülfatlı çözeltilerde özgül ağırlık $1,295 \text{ g/cm}^3$ 'den az, $1,308 \text{ g/cm}^3$ 'den fazla olmamalıdır (Keçeciler vd., 1990).

Magnezyum sülfatlı deneylerde tane büyüklüğü 10 mm ile 14 mm arasında olan agrega numunelerinden $420 \pm 0,1$ ile $430 \pm 0,1$ gram aralığında alınır. Tane büyüklüğü 10 mm - 14 mm aralığı dışında olan agrega deneyleri için tavsiye edilen deney kütleleri, deney elekleri, tel sepetlerin boyutları Tablo 5.3'de verilmiştir (TS-1367-2, 2010).

Tablo 5.3. Tane büyüklüğü 10 mm - 14 mm dışında olan agrega deneyleri için tavsiye edilen deney kütleleri, deney elekleri ve tel sepetlerin boyutları (TS-1367-2, 2010).

Tane Büyüklüğü (mm)	Deney Kısımının Kütlesi (gram)	Deney Eleği (mm)		Tel Sepetler (mm)		
		Elek altı	Elek üstü	Göz açıklığı	Yükseklik	Çap
14'den büyük	800-830	28,00	20,00	3,35	160	120
	600-630	20,00	14,00	3,35	160	120
10'dan küçük	300-310	10,00	6,30	1,18	120	95
	200-210	6,30	5,00	1,18	120	95
	200-210	5,00	3,35	0,60	120	95
	200-210	3,35	2,36	0,60	120	95
	100-110	2,36	1,18	0,15	80	65
	100-110	1,18	0,60	0,15	80	65
	100-110	0,60	0,30	0,15	80	65

Her sepetteki agrega üzeri 20 mm'lik çözelti ile kaplanacak biçimde $17 \pm 0,5$ saat süresince doymuş magnezyum sülfat çözeltisi kova içerisine daldırılır. Her sepet ile yığılmış tuz depolanmaları ve kap kenarları arasında en azından 20 mm açıklık bulunmalıdır. Deneyin her kademesinde sepetlerden herhangi bir agrega tanesinin kaybolmamasına dikkat edilmelidir. Kirlenmeden ve buharlaşmadan korunmak için kabın kapağı kapatılmalıdır. Daldırma işleminden sonra her sepet çözeltiden çıkartılarak $2 \pm 0,25$ saat süresince suyu süzülür. Ardından her bir sepet $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'lik etüvde 24 ± 1 saat süresince kurutulur ve $5 \pm 0,25$ saat süresince laboratuvar sıcaklığına erişmesi için soğutulur. Bir sonraki daldırma işleminde, kabın tabanında toplanan tuz çökeltileri önce çözülür ve çözelti iyice karıştırılarak 30 dakika süre ile beklemeğe bırakılır. Kaptaki çözeltinin

yoğunluğu kontrol edilir. Yoğunluk belirli aralığın dışında ise çözelti hazırlanmış doymuş taze magnezyum sülfat çözeltisi ile değiştirilir. Daldırma işlemi sırasında agrega tanelerinin aşırı şekilde etrafa sıçraması durumunda çözeltinin ölçülen yoğunluğu, süspansiyon halindeki ince taneler veya iyon değiştirme etkileri sebebiyle tam olmayabilir. Bu durumda çözelti taze bir çözelti ile değiştirilir. Çalışma periyodu 48 ± 2 saat süre ile 5 defa tatbik edilmelidir. İşlemlerin 5 defa tekrar edilmesinden sonra agrega soğutulur ve her bir sepetteki agrega magnezyum sülfattan temizlenene kadar musluk suyuyla yıkanır. Deney başlangıcı ile deney sonu arasındaki ağırlık kaybı yüzde cinsinden hesaplanır (TS-1367-2, 2010).

5.1.3. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi

Kaba agrega, ince agrega ve fillerin özgül ağırlıkları farklı yöntemlerle hesaplanmaktadır. Kaba ve ince agregaların, hacim ve zahiri özgül ağırlık ile su emme değerleri hesaplanırken fillerin sadece zahiri özgül ağırlığı hesaplanmaktadır.

Kaba agregaların özgül ağırlıkları ve su emme oranları ASTM C127 standardı ile tanımlanır. Karışım gradasyonunu temsil eden agrega numunelerinden standartta belirtilen miktarda alınır ve $23 \pm 2^\circ\text{C}$ suyun içinde 24 saat bekletilerek suya doymuş hale getirilir. Daha sonra bir bez veya havlu ile agregaların yüzeyindeki su filmi kurutulur. Yüzeyleri kurutulan agregaların doymuş kuru yüzey ağırlığı tartılır (W_1). Numunenin sudaki ağırlığını belirlemek için, numune tel sepete konularak su içinde tartımı yapılır (W_2). Suda tartım yapılan agregaların kuru ağırlığını bulmak için, numune geniş bir tepsiye konularak $110 \pm 10^\circ\text{C}$ 'deki etüve konularak 24 saat boyunca bekletilir. Kurumuş olan numune etüvden çıkartıldıktan sonra soğuması için oda sıcaklığında yaklaşık 4 saat bekletilir ve oda sıcaklığında soğuyan numune tartılır (W_3). Aşağıdaki denklemlerle kaba agreganın özgül ağırlıkları ve su emme oranı hesaplanır (ASTM-C127, 2012).

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{W_3}{W_1 - W_2} \quad (5.1)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{W_3}{W_3 - W_2} \quad (5.2)$$

$$\text{Su emme yüzdesi(\%)} = \frac{W_1 - W_3}{W_3} \times 100 \quad (5.3)$$

Deneyde kullanılması gereken numune miktarları Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Kaba agregaların özgül ağırlık ve su emme deneyleri için gerekli numune miktarları (ASTM-C127, 2012).

Elek Boyutu (mm)	Gerekli numune miktarı (kg)
12,5 veya daha küçük	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
125	75

İnce agregaların özgül ağırlıkları ve su emme oranları ASTM C128 standardı ile tanımlanır. Karışım gradasyonunu temsil eden agrega numunelerinden 1000 gram alınarak geniş bir tepsi içerine konulur ve üzerine su eklenilerek 24 saat süresince bekletilir. Doygun hala gelen numune titizlikle süzülür ve emici olmayan bir yüzeye serilir. Doygun kuru yüzey ağırlığının belirlenmesi amacıyla numune üzerine saç kurutma makinası veya benzer bir aletle sıcak kuru hava üflenerek karıştırılır. Bu işleme numune serbest akar duruma gelinceye kadar devam edilir. Numunenin çok kurumamasına dikkat edilmelidir. Hazırlanan 1000 gramlık numuneden 500 ± 10 g alınır ve tartılır (W_1). Tartılan malzeme bir piknometrenin içerisine konulur ve referans çizgisinin (500 ml) bir miktar altına kadar saf su ilave edilir. Sonra piknometrenin kapağı kapatılır ve piknometre çalkanarak numune içerisindeki hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Hava kabarcığı kalmadığından emin olunan malzemenin üstü referans çizgisine kadar saf su ile doldurulur. Numune oda sıcaklığında tartılır (W_2). Tartılan numune bir tepsiye dökülür ve kuru ağırlığı bulmak için $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de 24 saat süresince etüvde bekletilir. Kuruyan numune oda sıcaklığında yeniden tartılır (W_3). Daha sonra piknometreye referans çizgisine kadar saf su ile doldurulur ve oda sıcaklığında tartılır (W_4). Su emme oranını belirlemek için, 1000 g numuneden geriye kalan 500 ± 10 gram alınır ve tartılır (W_5). Ardından numune 24 saat

sıcaklığı $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ olan etüvde kurutulur. Kurutulan numune oda sıcaklığında sonra tartılır (W_6). Aşağıdaki denklemlerle ince agreganın özgül ağırlıkları ve su emme oranı hesaplanır (ASTM-C128, 2012).

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{W_3}{W_1 + W_4 - W_2} \quad (5.4)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{W_3}{W_1 + W_3 - W_2} \quad (5.5)$$

$$\text{Su emme yüzdesi}(\%) = \frac{W_5 - W_6}{W_6} \times 100 \quad (5.6)$$

Fillerin zahiri özgül ağırlığının belirlenmesinde Le Chatelier kabı kullanılır. Belirli bir miktar numune 24 saat sıcaklığı $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ olan etüvde kurutulur ve oda sıcaklığına gelmesi beklenir. Deneyde su kullanıldığı zaman filler malzemede tam olarak çökme sağlanamadığından deney, yoğunluğu daha düşük olan gazyağı ile yapılmaktadır. Le Chatelier şişesi belirli bir noktaya kadar gazyağı ile doldurulur. Soğutulan filler malzemesinden 60 gram alınır (W) ve malzeme kaybı olmayacak şekilde şişeye doldurulur. Şişedeki işaretli kısımlardan yararlanılarak hacim değişikliği saptanır (V) ve aşağıdaki formülle fillerin zahiri özgül ağırlığı belirlenir (Ilıcalı, 2001).

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{W}{V} \quad (5.7)$$

5.2. Bağlayıcılar Üzerinde Yapılan Deneyler

Bitümlü karışımlarda kullanılan bağlayıcılar üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılarak, bağlayıcıların fiziksel, mekaniksel, ısı ve yaşlanma özellikleri tespit edilmektedir.

5.2.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi, bitümün sertliğinin veya kıvamının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Penetrasyon deneyi TS EN 1426 standardı ile tanımlanır. Penetrasyon; 25°C sıcaklıkta, 100 gram ağırlığındaki bir iğnenin 5 saniye süre ile bitüm içerisinde dikey olarak kat ettiği mesafe olarak tanımlanmaktadır. Penetrasyonun birimi 0,1 mm'dir. Numune yumuşama noktası sıcaklığını geçmeyecek şekilde ısıtılır, içerisinde hava kabarcığı kalmayana kadar karıştırılır ve numune kabına dökülerek soğumaya bırakılır. Ardından numune kabı aktarma kabının içine konularak 25°C sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir ve 1-1,5 saat bekletilir. İçinde numune kabı bulunan aktarma kabı aletin tablası üzerine konulur. 100 gram ağırlık ile yüklenmiş iğne, numunenin yüzeyine temas edecek ama numuneye batmayacak şekilde yerleştirilerek deneye hazır duruma getirilir. Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine en az 1 cm uzaklıktaki noktalardan en az 3 ölçüm yapılır ve kabul edilebilir bu ölçümlerin aritmetik ortalaması numunenin penetrasyon değeri olarak kabul edilir (TSEN-1426, 2015). Penetrasyon deney aletleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Penetrasyon deney aletleri

5.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi

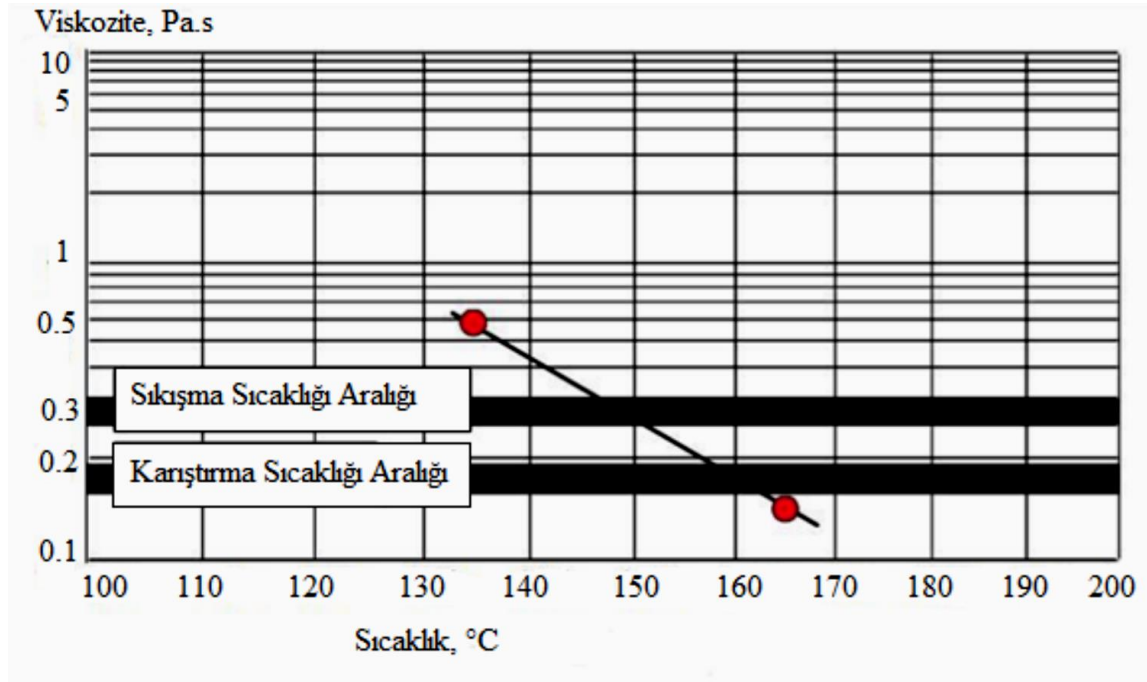
Bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini ölçmek amacıyla yapılan bir deneydir. Yumuşama noktası deneyi TS EN 1427 standardı ile tanımlanır. Bu deneyde, bitüm doldurulan standart halka su banyosu içerisindeki deney düzeneğine yerleştirilmekte ve bitüm üzerine 2,5 cm yükseklikten standart bir çelik bilye bırakılmaktadır. Deneyin başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve deney süresince sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümün yumuşadığı ve bilyenin beherin tabanına değdiği anda termometrede okunan değerdir. İki numunede okunan değerlerin aritmetik ortalaması alınmaktadır. Yumuşama noktası 80°C'nin üzerinde olan numunelerde su yerine gliserin kullanılmakta ve deneyin başlangıç sıcaklığı $30 \pm 1^\circ\text{C}$ olmaktadır (TSEN-1427, 2015). Yumuşama noktası deney aleti Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Yumuşama noktası deney aleti

5.2.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel viskozimetre deneyi bağlayıcıların karıştırma, taşıma ve sıkıştırma esnasında yeterli akışkanlığa sahip olup olmadıklarını belirlemek için yapılmaktadır. Bu sebeple dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanmamaktadır. Dönel viskozite değeri, sabit bir sıcaklıkta silindirik bir milin, bağlayıcı numunesi içerisinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile tespit edilmektedir. Superpave şartnamesine göre 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması gerekmektedir. Dönel viskozimetre değerleri ile aynı zamanda bitümlü karışımların viskozite değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını belirlenmektedir. Bu sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi amacıyla dönel viskozimetre deneyi ilk olarak 135°C sıcaklıkta, daha sonra 165°C sıcaklıkta yapılmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları çizilen viskozite-sıcaklık grafiği ile belirlenmektedir. Buna göre karıştırma sıcaklığı için 170 ± 20 cP, sıkıştırma sıcaklığı için 280 ± 30 cP viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerlerinin kullanılması önerilmiştir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bitümlü bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi Şekil 5.4'te, deneylerde kullanılan Brookfield dönel viskozimetre deney aleti Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Bitümlü bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).



Şekil 5.5. Brookfield dönel viskozimetre deney aleti

5.2.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

Dinamik kayma reometresi deneyinde, bağlayıcı numune sinüs eğrisi biçiminde salınımlı bir gerilmeye tabi tutularak numunenin viskoelastik özellikleri belirlenmektedir. Bu deneyde ince bir bitüm tabakası biri sabit diğeri hareketli iki plaka arasına yerleştirilmekte ve sabit sıcaklıkta hareketli plaka saniyede 10 radyanlık bir frekansta birbirini takip eden 10 devir yapmaktadır. Yaşlandırılmamış veya kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde 1 mm aralık ve 25 mm çaplı plakalar, uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde ise 2 mm aralık ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır. Deney sıcaklığı yaşlandırılmamış veya kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde 46°C ile 82°C aralığında, uzun dönem yaşlandırılmış numunelerde ise 4°C ile 40°C aralığında değişmektedir. Deney sonucunda asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülü ve faz açısı belirlenerek bitümlü kaplamaların tekerlek izi oluşumuna karşı direnci ve yorulma

davranışları tespit edilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Deneylerde kullanılan Bohlin DSR deney aleti Şekil 5.6’da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Bohlin DSR deney aleti

5.2.5. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sürecindeki kısa dönem yaşlanması, laboratuvarında dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile temsil edilmektedir. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film gibi hareket eden bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklığın ve havanın birlikte yaptığı etki değerlendirilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcı numunelerinin ısıtılması sonucu meydana gelen uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ve bununla birlikte sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimin tespit edilmesi için gereken malzeme elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1’de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve

yerleştirilen 8 adet cam şişe kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulmakta ve 75 dakika süreyle düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmektedir. Dönme sırasında deney aletinin tabanındaki bir hava üfleyici şişelere, akışı 4000 ± 200 ml/dak olacak şekilde hava vermektedir. Dönme hareketi, sıcaklık ve verilen havanın etkisiyle bitüm, şişelerin iç yüzeyini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve böylece yaşlanma oluşturulmaktadır. Deneyin sonunda iki şişe kütle kaybının belirlenmesi amacıyla, diğer altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (TS EN-12607-1, 2015). Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti

5.2.6. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi

Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), bitümlü kaplamada servis ömrü süresince meydana gelen uzun dönemli yaşlanma özelliklerinin laboratuvar ortamında tespit edilmesi için kullanılmaktadır. PAV deneyi, dönel ince film halinde ısıtma deneyinden elde edilen

bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFO deneyinden elde edilen kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcı numuneleri konulmaktadır. PAV deneyinde bitüm sınıfına göre değişen sabit bir sıcaklıkta numunelere 20 saat $\pm$ 10 dakika süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bitüm sınıfına göre PAV deney sıcaklıkları Tablo 5.5'te deney aleti Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Bitüm sınıfına göre PAV deney sıcaklıkları (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Bitüm 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 5.8. PAV deney aleti

5.2.7. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Kiriş eğme reometresi deneyi, bitümlü bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarındaki sertliğinin ve termal çatlak oluşumuna karşı direncinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deney için basınçlı yaşlandırma kabı deneyinden elde edilen uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kiriş şeklinde numuneler kullanılmaktadır. Deney boyunca bitümlü kiriş

numunesi bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde bitüm kırıının orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir. Deney sonunda elde edilen yük ve defleksiyon değerleri, bağlayıcının sünme sertliğini $S(t)$ ve sünme oranını (m-değeri) tespit etmek için kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı direncini temsil ederken, sünme oranı (m-değeri) ise sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı temsil etmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri tespit edildikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren grafikteki eğriye teğet olan doğrunun eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. Deney sonunda sünme sertlik değerinin en yüksek 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise en düşük 0,3 olması gerekmektedir (McGennis vd., 1994; Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Kiriş eğme reometresi deney aleti Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Kiriş eğme reometresi deney aleti

5.3. Bitümlü Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler

Çalışmada, Marshall karışım numuneleri hazırlanmış ve hazırlanan bu numuneler üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılarak, bitümlü karışımların fiziksel ve mekaniksel özellikleri tespit edilmiştir.

5.3.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Hazırlanan Marshall numunelerinin fiziksel özellikleri ile stabilite ve akma değerleri bulunarak, bitümlü karışımlarda kullanılacak optimum bitüm muhtevası tespit edilmektedir. Bu deney için belirlenen gradasyonda yaklaşık 1100-1200 gram agrega numunesi alınıp, bir kaba konulmakta ve kullanılacak bitümün viskozimetre deneyi ile bulunan karıştırma sıcaklığına kadar belirli bir süre etüvde ısıtılmaktadır. Daha sonra agrega numunesi karıştırma kabına dökülürken, ortası çukurlaştırılmakta ve önceden ısıtılmış bitüm dökülerek malzeme kaybı olmadan agrega daneleri tamamen bitümle kaplanana kadar bir mikserle karıştırılmaktadır. Karıştırma işleminden sonra karışım kalıplara doldurularak şişlendikten sonra Marshall tokmağı yardımıyla sıkıştırılmaktadır. Kaplamanın cinsine ve trafik seviyelerine bağlı olarak Marshall tokmağı ile karışımın her iki yüzüne 50 veya 75 darbe uygulanmaktadır. Daha sonra numuneler işaretlenerek soğumaya bırakılmaktadır. Soğuyan numuneler bir kriko yardımıyla kalıptan çıkarılmakta, yükseklikleri ölçülmekte, havada ve suda gerekli tartımları yapılarak fiziksel özellikleri tespit edilmektedir. Stabilite ve akma değerlerini tespit etmek için numuneler 30-40 dakika $60 \pm 1^\circ\text{C}$ su banyosunda bekletildikten sonra Marshall aletine yerleştirilmekte ve dakikada 50,8 mm'lik bir hızda yükleme yapılmaktadır. Bu deneyde standart numune yüksekliği 63,5 mm'dir. Eğer numune yüksekliği bu değerden farklı ise düzeltme katsayısı uygulanmaktadır. Düzeltme katsayısı aşağıdaki Formül 5.8 ile bulunmaktadır. Kalıcı Marshall stabilitesi yönteminde numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır. Deney sonunda bu numunelerin stabilite değerlerinin normal stabilite değerlerine oranı kalıcı Marshall stabilitesi değerini vermektedir (Ağar ve Umar, 1991; Önal ve Kahramangil, 1993). Marshall tokmağı ve numune çıkartıcı kriko Şekil 5.10'da, Marshall stabilite ve akma deney aleti Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

Stabilite düzeltme katsayısı(c)= $5,24 \times e^{-0,0258 \times h}$

(5.8)



Şekil 5.10. Marshall tokmağı ve numune çıkartıcı krikö



Şekil 5.11. Marshall stabilite ve akma deney aleti

5.3.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi

Bitümlü karışımların nem hasarına karşı direncini tayin etmek için çeşitli laboratuvar testleri geliştirilmiştir. Bu testler arazi koşullarını tam olarak yansıtmaları da faydalı bilgiler sağlamaktadırlar. Bu testler ile sıkıştırılmış bitümlü karışımlardaki bağlayıcının agrega yüzeyinden nem sebebiyle soyulması ile oluşan kuvvet kaybı hesaplanmaktadır.

AASHTO T 283 yöntemi, bitümlü karışımlarda nem hasarına karşı direnci belirlemede en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde %6 - 8 oranında hava boşluğu içeren 6 adet Marshall numunesi kullanılmaktadır. Bu numuneler koşullandırılmış ve koşullandırılmamış olarak iki gruba ayrılmaktadır. Koşullandırılan numuneler bir piknometre içerisine konularak hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar 10-26 in.Hg. (13-67 kPa) vakum uygulanmaktadır. Vakum işleminden sonra numunelerin öncelikle -18°C sıcaklıkta 16-18 saat ardından 60°C su banyosunda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürenin ardından hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numuneler 25°C'deki su banyosunda 2 saat bekletilmekte ve Marshall cihazı ile dakikada 50,8 mm hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin, koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerine oranının Superpave şartnamesine göre en az %80 olması istenmektedir (Liang, 2008). Vakum işleminin yapıldığı piknometre ve vakum cihazı Şekil 5.12'de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Piknometre ve vakum cihazı

5.3.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

İndirekt çekme rijitlik modülünün deneysel olarak tespit edilmesi için, indirekt çekme, direk basınç ve burulma gibi deneyler uygulanmaktadır. Bütün bu deney yöntemleri, viskoelastik malzemelerin kısa süreli yükleme durumlarında elastik davranış gösterdiği kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri, malzemeye periyodik olarak yük uygulandığı sırada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Çap doğrultusunda yük uygulanan deney yöntemleri, direk basınç uygulanan deney yöntemlerine göre karışımdaki bağlayıcının tesirine karşı daha duyarlı oldukları için daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Kök, 2007).

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan meydana gelmektedir. Standart deney sıcaklığı 20°C olmasına karşın, iklimlendirme kabini sayesinde deneyin farklı sıcaklıklarda yapılabilmesi mümkündür. Deneye başlamadan önce numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmelidir. Numune çapı, yüksekliği, hedef yatay deformasyon, tahmini rijitlik modülü, yük etki süresi ve yük artış süreleri, gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Ardından numune yükleme çerçevesine yerleştirilmekte ve yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, önce numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrar edilen ön yükleme esnasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki formül kullanılarak ITSM değerleri tespit edilmektedir (Yılmaz, 2011).

$$S_m = \frac{F(R+0,27)}{LH} \quad (5.9)$$

Denklemden S_m , indirekt çekme rijitlik modülü, F maksimum düşey yük, R poisson oranı, H ortalama numune yüksekliği, L ise 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyondur. Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney yeniden yapılmaktadır. İki değer arasında %10'dan fazla sapma olması halinde numune bir kez daha 90° döndürülerek deney tekrar edilmektedir. Aralarında %10'dan az sapma olan iki

değerin ortalaması alınarak numunenin ITSM değeri belirlenmektedir (Yılmaz, 2011). ITSM deney düzeneği ve UTM deney aleti Şekil 5.13'te gösterilmektedir.



Şekil 5.13. UTM deney aleti ve ITSM deney düzeneği

5.3.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Yorulma davranışı, bitümlü karışımların üst yapı performansında önemli bir değişkendir. Bitümlü karışımların yorulma davranışının incelenmesi ile sıkışma, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik düzeyleri, daha net bir şekilde belirlenebilmektedir. Kaliforniya Ulaştırma Bölümünde yapılan bir çalışmada, %5 asfalt ve %5 hava boşluğunda üretilmiş bitümlü karışımlarda hava boşluğunun %1 artmasının yorulma ömrünü %30, asfalt içeriğinin ise hedeflenen değerden %1 az olmasının yorulma ömrünü %12 azalttığını belirlemişlerdir (Harvey vd., 1995).

Bitümlü kaplamaları oluşturan karışımdaki bağlayıcı malzemelerde, her taşıt geçişi sırasında kısa süreli bir yüklemeye maruz kalmaları ve malzemenin rijitliğinin azalmasıyla çok küçük hasarlar meydana gelmektedir. Bu küçük hasarların uzun süre birikmesi sonucu malzeme bozulmaktadır. Yorulma dayanımı, asfalt betonunun mükerrer trafik yüklerine, dolayısıyla mükerrer eğilme yüklemesine kırılmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yorulma, genel olarak asfalt betonu kullanılan üstyapılarda tekrarlı yükleme ile ilerleyen bir çatlak formudur. Yorulma çatlakları trafik yüklerinin belirli bir tekrerrür sayısından sonra yavaş yavaş meydana gelmektedir. İnce kaplama veya zayıf alt tabakalar olması

durumunda ağır trafik yükleri altında muazzam defleksiyonlar oluşmaktadır. Bu defleksiyonlar kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerini artırarak yorulma çatlaklarına sebep olmaktadır (Harvey vd., 1995).

Yorulma karakteristikleri genellikle birim şekil değişirmesi veya başlangıç gerilmesi ile bozulmaya neden olan yükleme sayısı arasındaki ilişki kullanılarak açıklanabilir. Bitümlü karışımların yorulma karakteristikleri çoğunlukla gerilme veya şekil değişirme kontrollü olmak üzere, direkt çekme, tekrarlı eğilme kirişi ve çap doğrultusunda yük uygulanan deney yöntemleri ile belirlenmektedir. Bitümlü karışımların yorulma davranışı logaritmik eksenlerde gerilme veya şekil değişirmenin bozulmaya sebep olan yük tekrar adedi arasındaki eğim olarak karakterize edilebilmekte ve bu ilişki Formül 5.10'daki gibi tanımlanabilmektedir (Pellinen vd., 2004).

$$N_f = a \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \cdot \left(\frac{1}{S_0} \right)^c$$

(5.10)

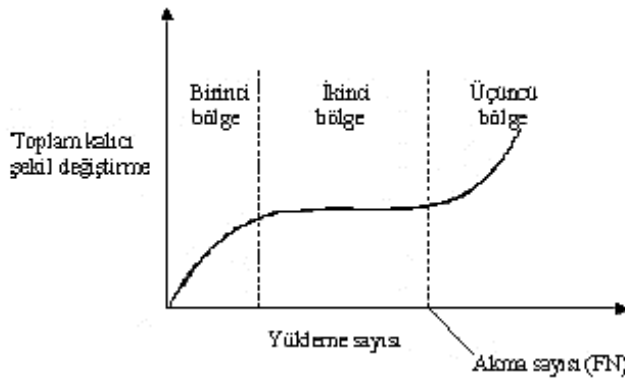
Bu formülde; N_f , yorulma ömrü (yük tekrar sayısı), ε_0 , başlangıç şekil değişirmesi, S_0 , karışımın başlangıç rijitliği, a,b,c, deneysel olarak belirlenen katsayılarıdır. Şekil değişirme kontrollü deneylerde şekil değişirme sabit kalırken gerilme ise azalmaktadır. Gerilme kontrollü deneylerde ise gerilme sabit kalırken şekil değişirme yük tekrarı ile artmaktadır. Gerilme kontrollü deneyde bozulma, numunenin kırılması olarak tanımlanırken, şekil değişirme kontrollü deneylerde bozulma, rijitlikte %50 azalmanın meydana gelmesi olarak tanımlanmaktadır. Yorulma çatlağı, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesi olarak iki kademedeki değerlendirilmektedir (Pellinen vd., 2004). Test düzeneği Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



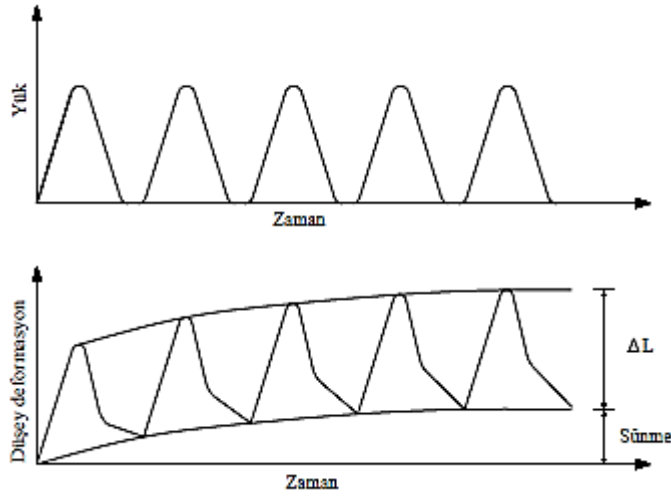
Şekil 5.14. İndirekt çekme yorulma deney düzeneği

5.3.5. Dinamik Sünme Deneyi

Dinamik sünme deney yönteminde sabit bir yük, silindirik karışım numunesinin yatay yüzeyine belirli devir ile mükerrer olarak uygulanmaktadır. Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon miktarı, tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Bu deney ile ayrıca belli bir poisson oranı kabul ederek ve yatay deformasyonun ölçülmesi ile esneklik modülü de tespit edilebilmektedir. Dinamik sünme deneyinde genellikle yük tekrar sayısı ve toplam kalıcı şekil değiştirme eğrisi sonuç olarak verilmektedir. Şekil 5.15’de örnek olarak gösterilen eğri 3 bölgeden oluşmaktadır. Burada akma sayısı üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı olarak tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Yapılan çalışmalarda dinamik sünme deneyinin arazide ölçülen tekerlek izi derinliği ile çok iyi ilgileşim verdiği görülmüştür. Şekil 5.16’da yük zaman ve yük deformasyon arasındaki ilişki gösterilmektedir (Kaloush vd., 2002).



Şekil 5.15. Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi (Kaloush vd., 2002).



Şekil 5.16. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi (Kaloush vd., 2002).

Dinamik sünme deneyinde toplam eksenel birim şekil değiştirme ($\mu\epsilon$) ve sünme rijitliği E_c Formül 5.11 ve 5.12 ile hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (5.11)$$

$$E_c = \sigma / \epsilon_c \quad (5.12)$$

Burada $L3_n$, n darbe sayısındaki deplasman (mm), $L1$, başlangıç referans deplasmanı (mm), G , numunenin başlangıç yüksekliği (mm), σ , maksimum düşey gerilmedir (kPa) (Kaloush vd., 2002). Test düzeneği Şekil 5.17’de gösterilmiştir.

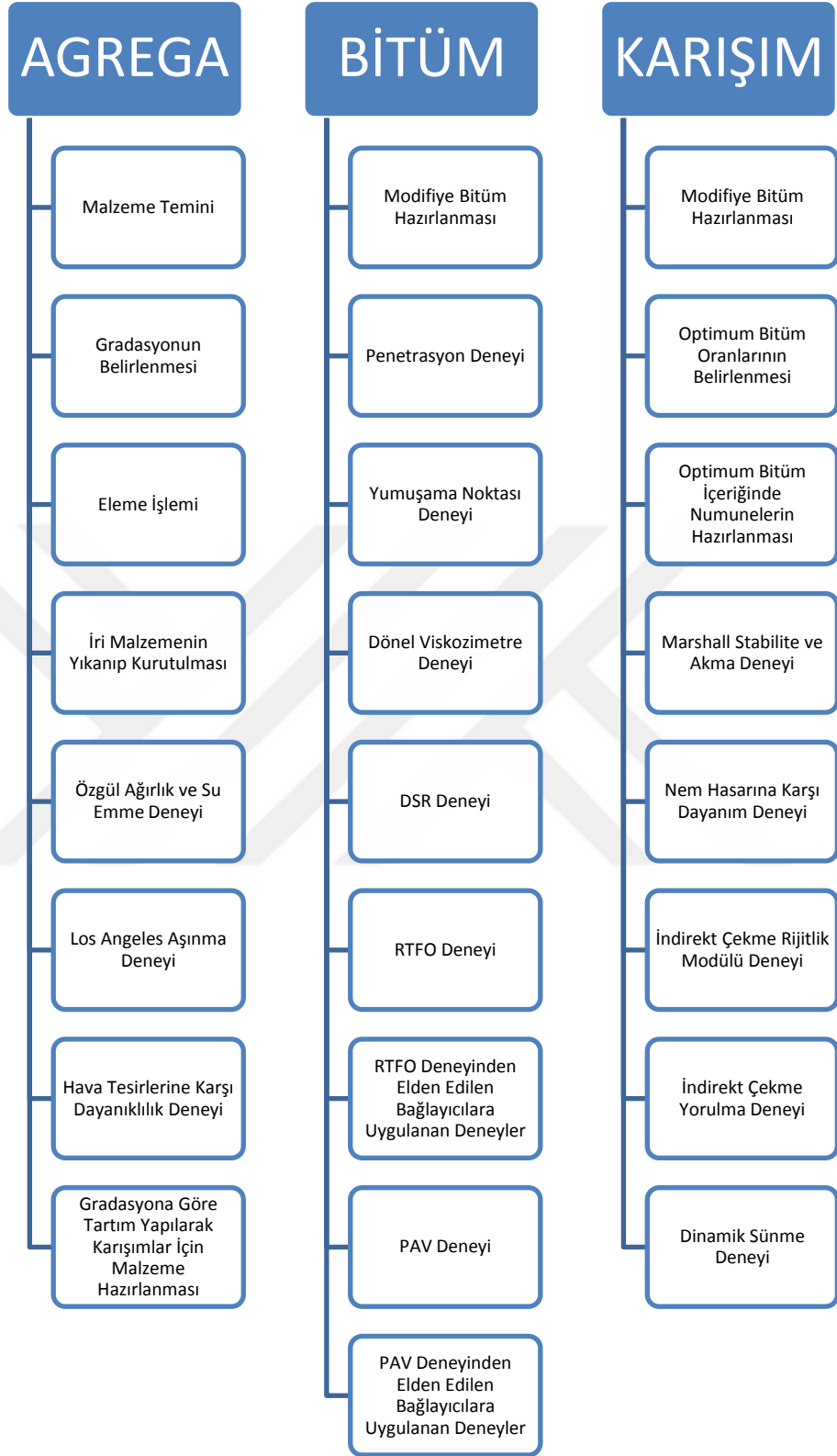


Şekil 5.17. Dinamik sünme deneyi düzeneği

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyisel çalışmalarda bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı bitüm, agrega olarak Elazığ Hankendi bölgesinden temin edilen kalker türü kırmataş malzeme kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak İstanbulteknik firmasında üretilen Pawma-1, Kumho firması tarafından üretilen Leadcap (Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement), Shell firması tarafından üretilen SBS (Stiren-Butadien-Stiren) ve sönmüş kireç kullanılmıştır. Bu katkı maddelerinden Leadcap ve Pawma-1 ılık karışım asfalt katkı maddeleri, SBS sıcak karışım asfalt katkısı olup bağlayıcıya ilave edilmiştir. Sönmüş kireç ise agrega karışımındaki fillerin bir kısmının yerine kullanılmıştır.

Çalışmada öncelikle agrega malzemeleri belirlenen gradasyona göre belirli eleklerde elenmiş ve elek üzerinde kalan malzemeler kovalara konulmuştur. Bu malzemelerin bir kısmı ile agrega deneyleri yapılarak agregaların fiziksel özellikleri tespit edilmiş, geri kalan malzemeler de gradasyona uygun olarak tartılarak karışım deneylerinde kullanılmak üzere saklanmıştır. Daha sonra katkı maddeleri ile modifiye bitümler hazırlandıktan sonra saf ve modifiye bitümler üzerinde bağlayıcı deneyleri uygulanmış ve bağlayıcının özelliklerindeki değişimler tespit edilmiştir. Bitümlü saf ve modifiye karışımlar sönmüş kireç katkılı ve katkısız olmak üzere iki grup olarak Marshall numuneleri halinde hazırlanarak, karışım deneyleri yapılmıştır. Deneylerin yapılış aşamaları Şekil 6.1’de, Pawma-1 katkı maddesi Şekil 6.2’de, Leadcap katkı maddesi Şekil 6.3’te, SBS katkı maddesi Şekil 6.4’te gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Deneylerin yapılış aşamaları



Şekil 6.2. Leadcap



Şekil 6.3. Pawma-1



Şekil 6.4. SBS

6.1. Agregalar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

Tez çalışmasında kullanılan kalker türündeki kırmataş malzemenin fiziksel özellikleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

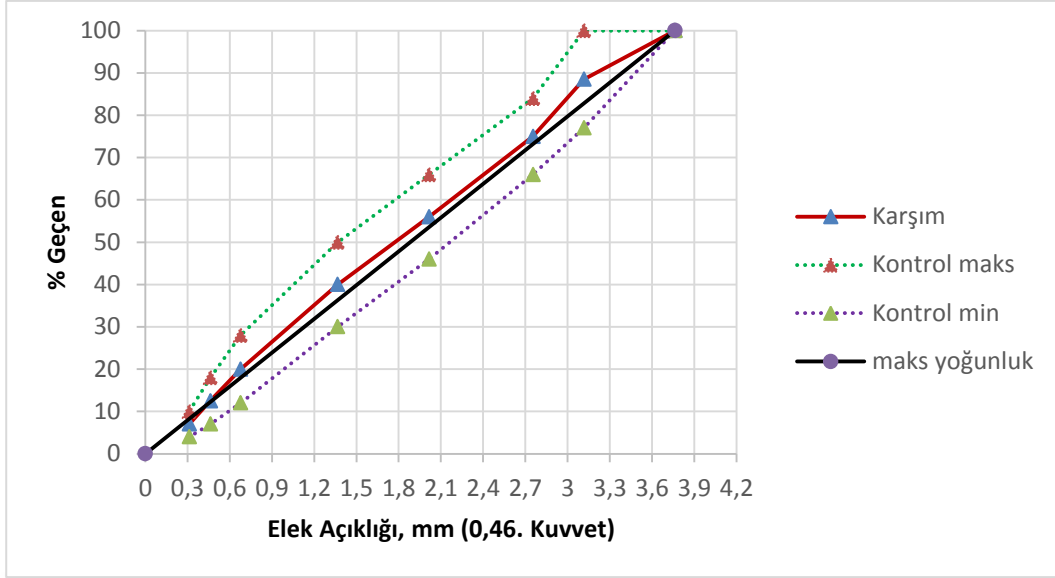
Tablo 6.1. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Şartname Limitleri	Kaba	İnce	Filler
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma Kaybı), %	TS EN 1097-2	maks 30	24		
Sağlamlık (MgSO ₄ ile Donma Kaybı), %	TS 1367-2	maks 18	6,5		
Su Absorpsiyonu %	ASTM C127	maks 2	0,3		
Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	ASTM C127		2,677		
Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	ASTM C128			2,628	
Zahiri Özgül Ağırlık	ASTM C127		2,698		
Zahiri Özgül Ağırlık	ASTM C128			2,675	
Zahiri Özgül Ağırlık	ASTM D854				2,717

Çalışmada kullanılan agregada gradasyonu Tablo 6.2’de, gradasyon eğrisi Şekil 6.5’ te verilmiştir.

Tablo 6.2. Agregada gradasyonu

Elek Boyutu (mm)	19,00	12,50	9,50	4,75	2,00	0,420	0,180	0,075
%Geçen	100	88,5	75	56	40	20	12,5	7
Karışımındaki Agregada Yüzdeleri								
Kaba	44							
İnce	49							
Filler	7							



Şekil 6.5. Agrega gradasyon eğrisi

Gradasyonda maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm'dir. Kaba agregalar yıkanarak tozdan arındırılmış daha sonra deneylerde kullanılmıştır.

6.2. Bağlayıcı Malzemenin Özellikleri

Çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetleri arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksinin +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu, -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu göstermektedir. Penetrasyon İndeksi aşağıda gösterilen Formüller 6.1 ve 6.2 kullanılarak belirlenmektedir (Ullidtz, 1987).

$$A = \frac{\text{Log}800 - \text{Log}P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (6.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (6.2)$$

Formül 6.1'deki P_{25} bağlayıcının 25°C'deki penetrasyon değeri, T_{YN} ise yumuşama noktası değeridir. Saf bağlayıcıya ait tespit edilen özellikler Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Saf bağlayıcıya ait özellikler

Özellikler	Standart	Sonuç	Şartname Limiti
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	53	50-70
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	49,9	46-54
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-1,09	-
Özgül ağırlık	-	1,039	-
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	400	-
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	125	-
Karıştırma sıcaklığı (°C)	-	157	-
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	-	144	-
RTFOT Sonrası			
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0,314	maks 0,5
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	27	-
Kalıcı penetrasyon, (%)	-	51	min 50
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	54,3	-
Yumuşama noktasındaki artış (°C)	-	4,4	maks 9
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-1,52	-

Deneyle neticesinde bağlayıcı malzemenin şartname ölçütlerini sağladığı görülmüştür.

6.3. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması

Çalışmada Pawma-1, Leadcap ve SBS katkı maddeleri ile modifiye bitümler elde edilmiştir. Bunlardan Pawma-1 ve Leadcap ılık karışım asfalt katkı maddeleridir. Modifiye bağlayıcıları hazırlamak için kullanılan cihaz Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Leadcap ve Pawma-1 katkılı modifiye bitümler 157°C'de 1000 devir/dakika sahip hızdaki karıştırıcıda 10 dakika süreyle karıştırılarak hazırlanmıştır. SBS katkılı modifiye bitümler 180°C'de 1000 devir/dakika sahip hızdaki karıştırıcıda 1 saat süreyle karıştırılarak hazırlanmıştır.



Şekil 6.6. Modifiye bitüm hazırlama cihazı

Leadcap ve Pawma-1 katkı maddeleri üretici firmaların tavsiye ettikleri oranlarda kullanılmıştır. Karşılaştırmaların daha doğru yapılabilmesi için modifiye bağlayıcıların aynı yüksek sıcaklık performans seviyesine sahip olması istenmiştir. Leadcap ve Pawma-1 katkılı modifiye bitümler ile aynı performans derecesine %2'lik SBS içeriğinde ulaşılmış ve SBS içeriği olarak bu oran kullanılmıştır. Bitüm ağırlığına göre katkı maddesi oranları Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Kullanılan katkı maddesi oranları

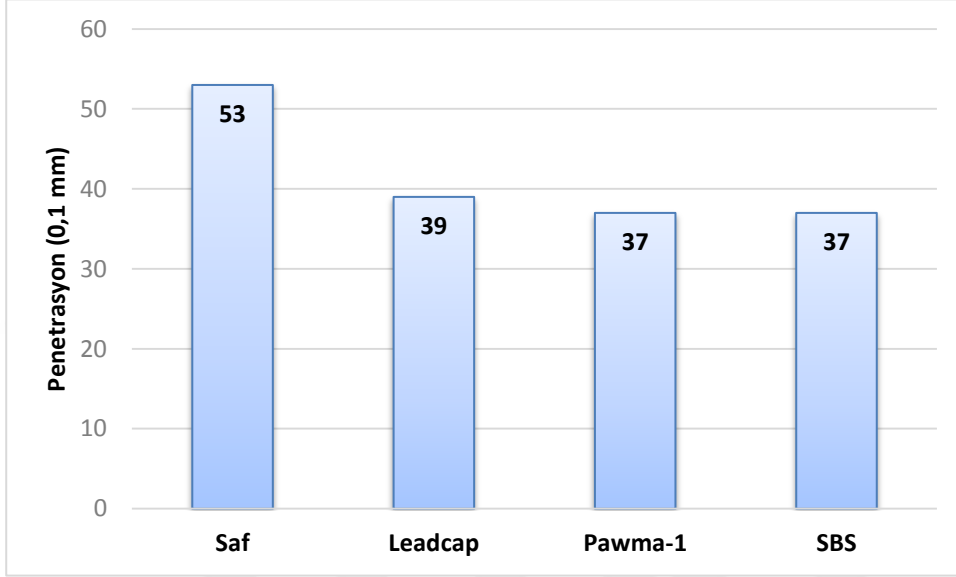
Leadcap (%)	Pawma-1 (%)	SBS (%)
1,5	0,35	2

6.4. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

Bağlayıcılar üzerinde öncelikle penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR deneyleri yapılmıştır. Daha sonra RTFO deneyi yapılmış ve RTFO deneyine maruz kalan numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, DSR ve PAV deneyleri uygulanmıştır. PAV deneyine maruz kalan numunelere de DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır.

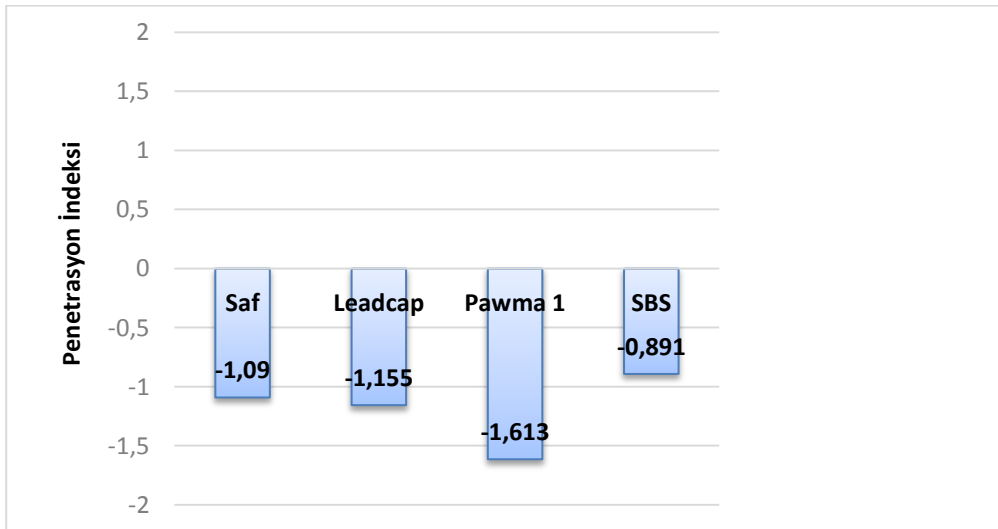
6.4.1. Penetrasyon Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde uygulanan penetrasyon deney sonuçları Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



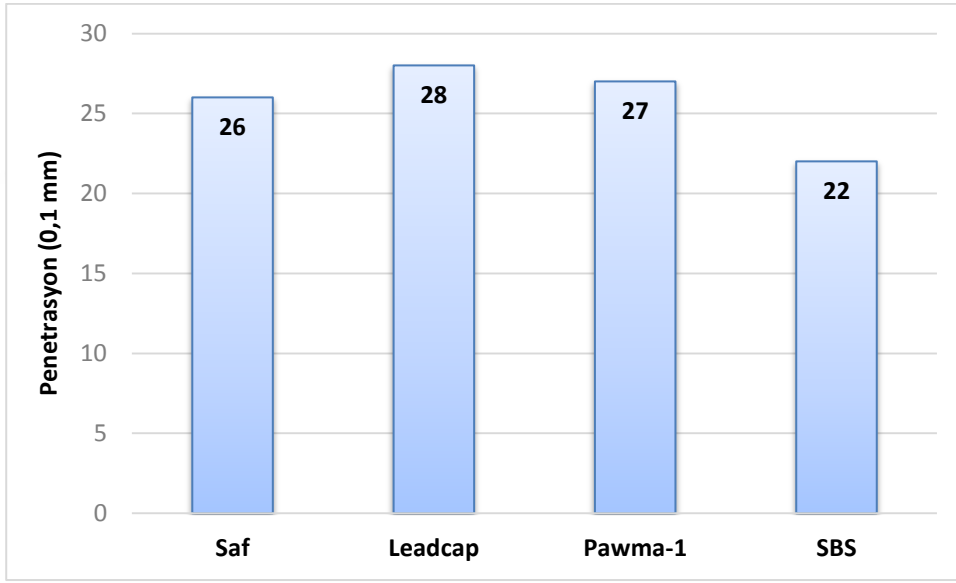
Şekil 6.7. Bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları

Bütün katkı maddeleri bağlayıcının penetrasyonunu azaltıcı yönde etki yapmışlardır. Bu azalma oranı, Leadcap modifiyeli bağlayıcıda %26,41 olurken Pawma-1 ve SBS modifiyeli bağlayıcılarda %30,18 olmuştur. Penetrasyon indeksi değerleri Şekil 6.8’de gösterilmiştir.

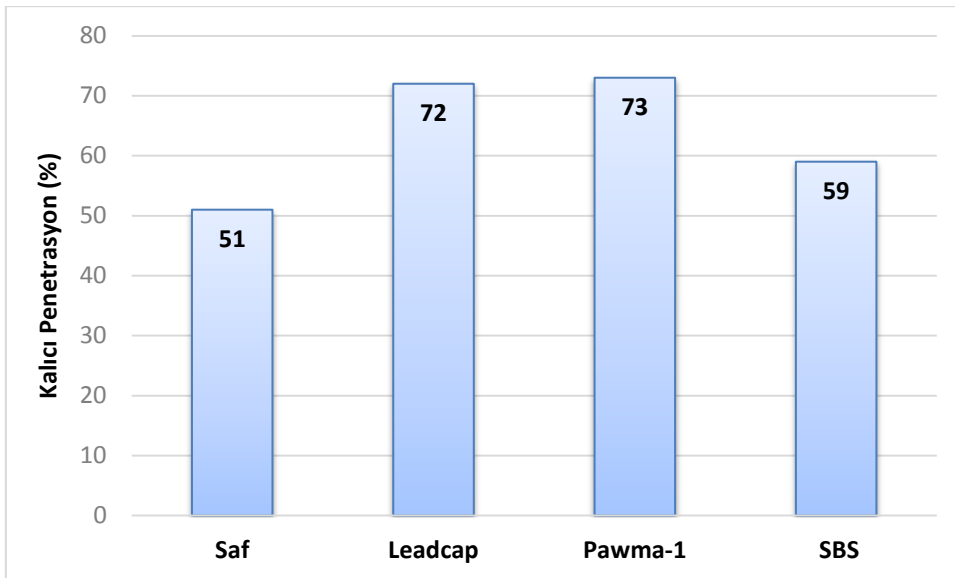


Şekil 6.8. Bağlayıcıların PI değerleri

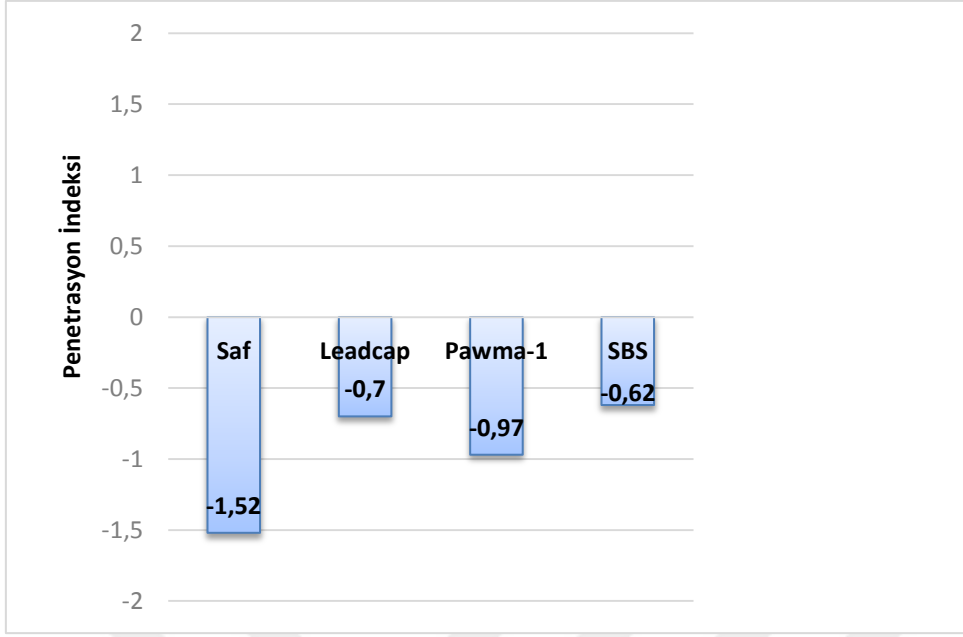
Leadcap ve Pawma-1 katkıları ile PI değerleri azalırken SBS katkı maddesi PI değerini arttırmıştır. Leadcap modifiyeli bağlayıcıda bu azalma oranı %5,96 olurken, Pawma-1 modifiyeli bağlayıcıda %47,98 olmuştur. SBS modifiyeli bağlayıcıda %18,25 artış olmuştur. Leadcap ve Pawma-1, bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığını artırırken SBS azaltmıştır. RTFO deneyine tabi tutulmuş bağlayıcıların penetrasyon değerleri Şekil 6.9’da, kalıcı penetrasyon değerleri Şekil 6.10’da PI değerleri Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.9. RTFO deneyine tabi tutulan bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları



Şekil 6.10. Bağlayıcıların kalıcı penetrasyon değerleri

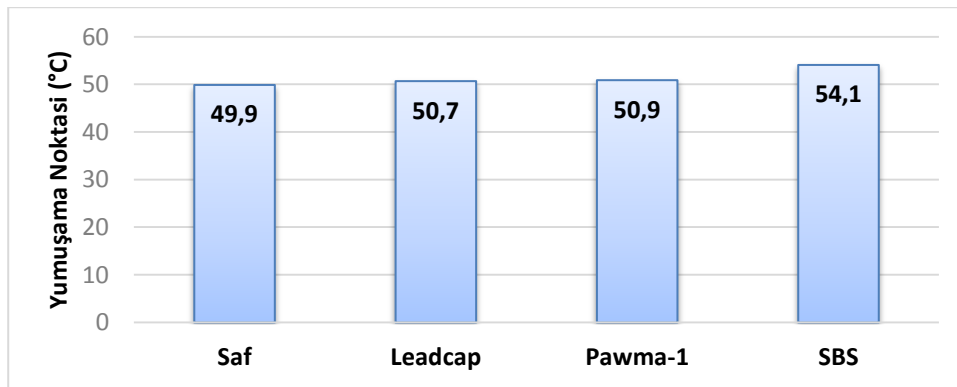


Şekil 6.11. RTFO deneyine tabi tutulan bağlayıcıların PI değerleri

RTFO deneyine tabi tutulan numunelerin penetrasyon değerleri birbirlerine yakın çıkarken en düşük penetrasyon SBS katkılı bağlayıcıda görülmüştür. En yüksek kalıcı penetrasyon değerleri Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli bağlayıcılarda görülürken, en düşük kalıcı penetrasyon değeri SBS katkılı bağlayıcıda görülmüştür. En yüksek PI değeri SBS katkılı bağlayıcıda görülürken saf bağlayıcıda en düşük PI değeri görülmüştür.

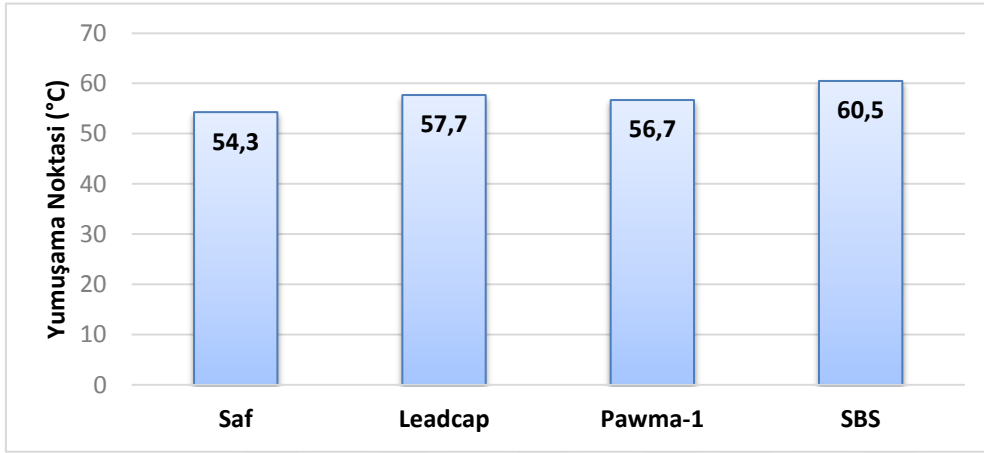
6.4.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde uygulanan yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 6.12’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları

Bütün katkı maddeleri bağlayıcının yumuşama noktasını arttırıcı yönde etki yapmışlardır. Bu artış oranı, Leadcap modifiyeli bağlayıcıda %1,6, Pawma-1 modifiyeli bağlayıcıda %2, SBS modifiyeli bağlayıcıda %8,41 olmuştur. En fazla artış SBS modifiyeli bağlayıcıda görülmüştür. RTFO deneyine tabi tutulmuş bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

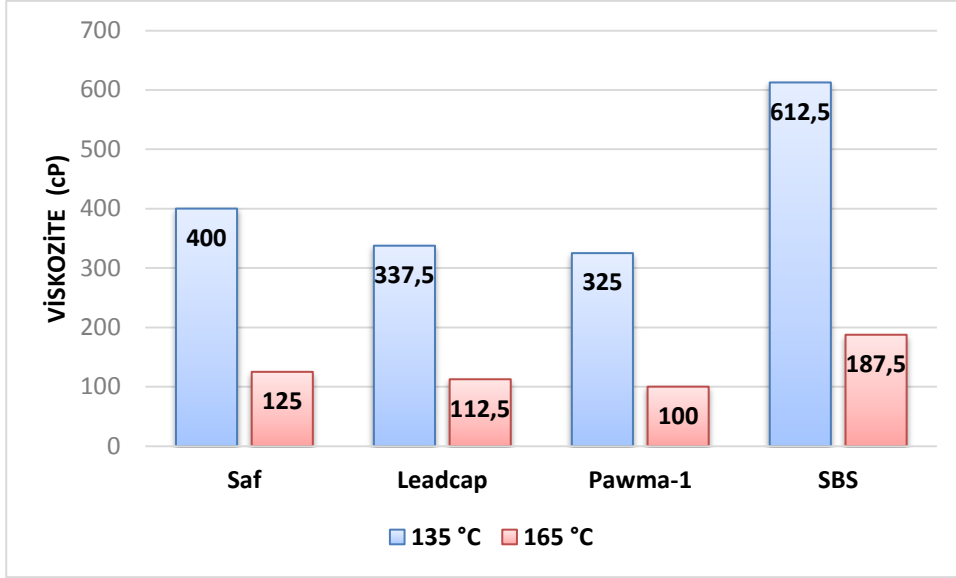


Şekil 6.13. RTFO deneyine tabi tutulan bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları

RTFO deneyine tabi tutulmuş bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerine göre, saf bağlayıcıda 4,4°C, Leadcap modifiyeli bağlayıcıda 7°C, Pawma-1 modifiyeli bağlayıcıda 5,8°C, SBS modifiyeli bağlayıcıda 6,4°C'lik bir artış olmuştur. En fazla artış Leadcap modifiyeli bağlayıcıda görülmüştür.

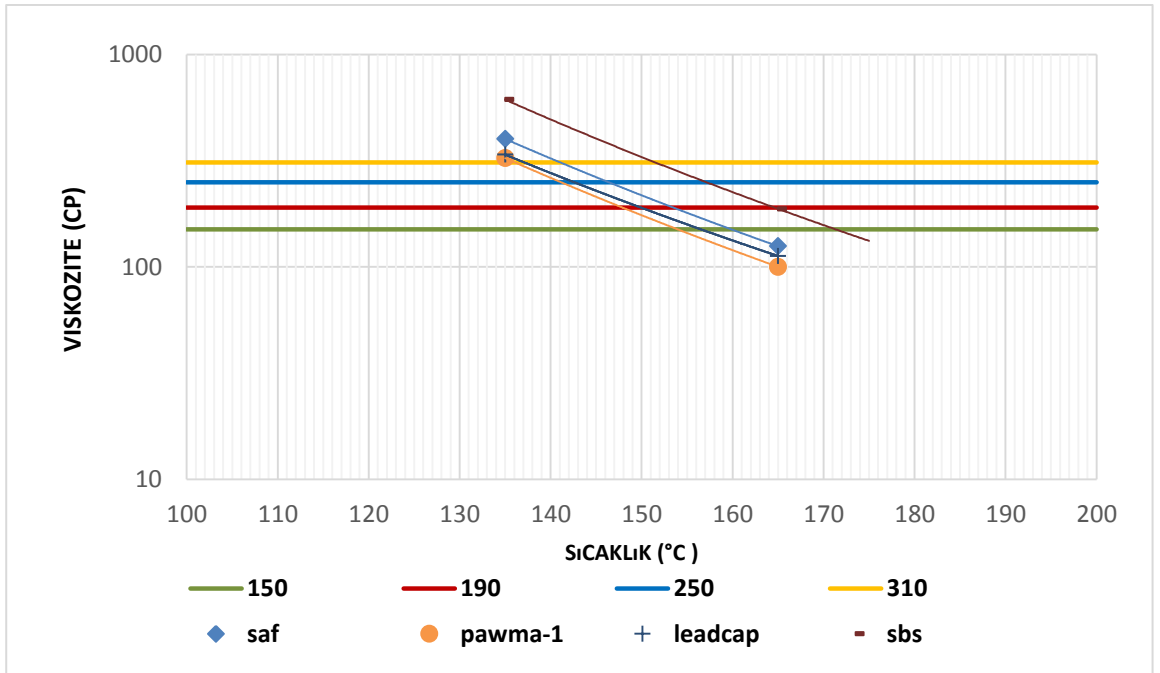
6.4.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

Dönel viskozimetre deneyi ile bitümlü karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmektedir. Deney 135°C ve 165°C'de yapılmaktadır. Dönel viskozimetre deney sonuçları Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Dönel viskozimetre deney sonuçları

Deney sonuçlarına göre hem 135°C hem de 165°C’de Leadcap ve Pawma-1 katkı bağlayıcıların viskozitelerinde azalma görülmüştür. SBS katkı bağlayıcının viskozitesi ise hem 135°C hem de 165°C’de artmıştır. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının bulunduğu viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 6.15’te, bu grafikten tespit edilen sonuçlar Tablo 6.5’te gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiği

Tablo 6.5. Viskozite-sıcaklık grafiğinden tespit edilen sonuçlar

Özellik	Saf	Leadcap	Pawma-1	SBS
Viskozite (cP, 135°C)	400	337,5	325	612,5
Viskozite (cP, 165°C)	125	112,5	100	187,5
Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	160-154	156-149	154-148	171-165
Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	146-141	142-137	141-136	157-152
Karıştırma sıcaklığı (°C)	157	152,5	151	168
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	143,5	139,5	138,5	154,5

Deney neticesinde saf bağlayıcının karıştırma sıcaklığı 157°C, SBS katkılı bağlayıcının karıştırma sıcaklığı 168°C bulunmuş, numuneler hazırlanırken agrega karışımı ve bağlayıcı malzeme bu sıcaklıklarda karıştırılmıştır. Leadcap ve Pawma-1 katkılı bağlayıcılarda ise karıştırma sıcaklıklarının bir miktar düşmesine karşın arzu edilen seviyelerde bir düşüş görülmemiştir. Bu sebeple bu katkıların daha önceki çalışmalarda kullanıldıkları gibi kullanılmaları yoluna gidilmiştir. Bu çalışmada ılık karışım numuneleri hazırlanırken Pawma-1 modifiyeli bağlayıcılar 151°C'ye, Leadcap modifiyeli bağlayıcılar 153°C'ye kadar ısıtılırken, agregalar 135 °C'ye kadar ısıtılarak ılık karışım asfaltlar hazırlanmıştır.

6.4.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma(RTFOT) Deney Sonuçları

Bu deney 163 °C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet cam şişe kullanılarak yapılmıştır. Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulmuş ve 75 dakika süreyle düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. RTFO deneyinin sonunda iki şişe kütle kaybının belirlenmesi amacıyla, diğer altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla PAV, DSR, penetrasyon ve yumuşama noktası gibi deneylerde kullanılmıştır. Deney sonucunda bulunan kütle kayıpları Tablo 6.6'da gösterilmiştir.

Tablo 6.6. RTFOT deney sonuçları

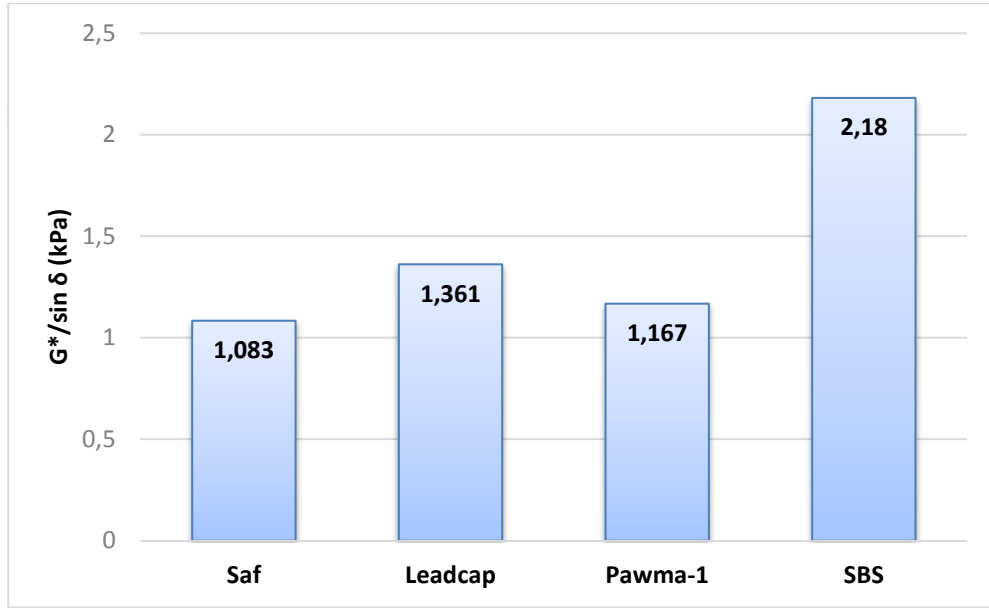
Bağlayıcı	Kap Ağırlığı	Kap + Bitüm Ağırlığı(Önce)	Kap + Bitüm Ağırlığı (Sonra)	Kütle Kaybı, maks (%0,5)
Saf 1	155,38	190,38	190,32	0,314
Saf 2	160,33	195,33	195,17	
Pawma-1 1	153,16	188,41	188,27	0,382
Pawma-1 2	153,48	189	188,87	
Leadcap 1	155,34	189,99	189,88	0,299
Leadcap 2	160,27	195,85	195,75	
SBS 1	160,25	195,28	195,18	0,442
SBS 2	153,43	188,5	188,29	

6.4.5. DSR ve BBR Deney Sonuçları

DSR ve BBR deneyleri ile bağlayıcıların performans seviyeleri belirlenmektedir. DSR deneyleri yaşlandırılmamış, RTFO deneyi ile kısa dönem yaşlandırılmış ve PAV deneyi ile uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanmıştır. BBR deneyi ise PAV deneyi ile uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanmıştır. RTFO deneyinde, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe yatay eksen etrafında 75 dakika süresince dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür PAV deneyi RTFO deneyi ile yaşlandırılmış numuneler üzerinde 100°C sıcaklıkta 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanarak yapılmıştır. PAV deneyi İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Yaşlandırılmamış bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyleri neticesinde bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyesi değerinin 64 olduğu, RTFO deneyine tabi tutulan bağlayıcıların da 64°C'de şartname limiti olan 2,2 kPa olan $G^*/\sin\delta$ değerini sağladıkları görülmüştür. Bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyelerinin belirlenmesi amacıyla PAV deneyine tabi tutulan bağlayıcılar üzerinde DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları Tablo 6.7'de gösterilmiştir. Bağlayıcıların performans seviyeleri olan 64 °C'deki tekerlek izi parametrelerini temsil eden $G^*/\sin\delta$ değerleri Şekil 6.16'da gösterilmiştir.

Tablo 6.7. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Bağlayıcı	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)			Performans Seviyesi
	Sıcaklık (°C)			
	58	64	70	
Saf	2,440	1,083	0,515	PG 64
Leadcap	2,804	1,361	0,687	PG 64
Pawma-1	2,612	1,167	0,503	PG 64
SBS	5,010	2,180	0,992	PG 64



Şekil 6.16. Bağlayıcıların 64 °C'deki G*/sinδ değerleri

Tüm katkı maddeleri G*/sinδ değerini arttırmıştır. G*/sinδ değerini Leadcap %25,67, Pawma-1 %7,76, SBS %101,29 oranında arttırmıştır. SBS modifiyeli bağlayıcıda en yüksek artış görülmüştür. Bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki DSR ve BBR deney sonuçları Tablo 6.8'de gösterilmiştir.

Tablo 6.8. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları

DSR Deney Sonuçları				
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) Yaşlandırılmamış (Şartname limiti min. 1 kPa)			
	Saf	Leadcap	Pawma-1	SBS
64	1,083	1,361	1,167	2,18
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) RTFOT ile Yaşlandırılmış (Şartname limiti min. 2,2 kPa)			
	Saf	Leadcap	Pawma-1	SBS
64	2,358	2,889	2,222	5,762
70	-	-	-	2,529
Sıcaklık (°C)	G*. sinδ (kPa) PAV ile Yaşlandırılmış (Şartname limiti maks 5000 kPa)			
	Saf	Leadcap	Pawma-1	SBS
25	1746	-	-	-
28	-	1095	1743	1224
BBR Deney Sonuçları				
Sıcaklık (°C)	m-değeri (Şartname limiti min. 0.300)			
	Saf	Leadcap	Pawma-1	SBS
-6	0,295	0,478	0,327	0,373
-12	0,524	0,292	0,272	0,255
Sıcaklık (°C)	Sünme sertliği (Mpa) (Şartname limiti maks. 300 MPa)			
	Saf	Leadcap	Pawma-1	SBS
-6	30,93	66,05	58,72	36,83
-12	270,18	151,26	140,00	114,37
Performans Seviyesi				
	64-22	64-16	64-16	64-16

BBR deneyleri -6 ve -12°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Saf bağlayıcı -12°C sıcaklıkta şartname sınırlarını sağlarken Leadcap, Pawma-1 ve SBS modifiyeli bağlayıcılar -6°C sıcaklıkta şartname sınırlarını sağlamıştır. PAV deneyi ile uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde DSR deneyleri 25 ve 28°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Bütün numuneler şartname sınırını sağlamışlardır. Deneyler neticesinde saf bağlayıcının performans seviyesi 64-22, modifiye bağlayıcıların performans seviyesi 64-16 olarak tespit edilmiştir. PG 64-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi Tablo 6.9'da gösterilmiştir. BBR deneyi yapılan numunelerin bir kısmı Şekil 6.17'de gösterilmiştir.

Tablo 6.9. PG 64-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi (McGennis vd., 1994)

Performans Sınıfı	PG64				
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	16	22	28	34	40
	<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 YASLANDIRMA 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



Şekil 6.17. BBR deneyi yapılmış numune örnekleri

6.5. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

Karışımların öncelikle optimum bitüm oranları Marshall stabilite ve akma deneyi ile belirlenmiştir. Daha sonra optimum bitüm oranlarında numuneler hazırlanarak Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri yapılmıştır.

6.5.1. Karışımların Optimum Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi

Karışımlar, belirlenen gradasyonda 1100 gram agrega ile agrega ağırlığının %4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 oranlarında bitüm kullanılarak hazırlanmıştır. Her bir oranda üçer numune hazırlanmıştır. Saf ve modifiye karışımlar sönmüş kireç katkılı ve katkısız olarak iki grup halinde hazırlanmıştır. Sönmüş kireç katkısız karışımlarda gradasyona uygun olarak %7 oranında filler kullanılmıştır. Sönmüş kireç katkılı karışımlarda %5 oranında filler, %2 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Marshall tokmağı ile karışımların her iki yüzüne 75 darbe uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin yükseklikleri ölçülmüş, havada ve suda tartımları yapılarak, hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde denenerek stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan değerlerden çıkarılan grafiklerden maksimum stabiliteyi veren yüzde, maksimum hacim özgül ağırlığı veren yüzde, boşluk oranı %4'ü veren yüzde ve asfalt ile dolu boşluk oranı %70'i veren yüzdenin aritmetik ortalaması optimum bitüm oranı olarak bulunmuştur. Hesaplamalarda kullanılan kavramlar Tablo 6.10'da, formüller tablonun altında verilmiştir. Saf bitüm ile hazırlanan karışımlardan elde edilen grafikler Şekiller 6.18-6.23'de gösterilmiştir. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlardan elde edilen grafikler şekiller 6.24-6.29'da gösterilmiştir. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlardan elde edilen grafikler şekiller 6.30-6.35'de gösterilmiştir. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlardan elde edilen grafikler şekiller 6.36-6.41'de gösterilmiştir.

Tablo 6.10. Marshall stabilite ve akma testi hesaplamalarında kullanılan kavramlar

Hesaplamalarda Kullanılan Kavramalar	
G_{sb}	Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı
G_{sa}	Agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı
$\%K, \%I, \%F$	Agregaların ağırlıkça yüzdeleri
G_{kb}, G_{ib}	Agregaların hacim özgül ağırlıkları
G_{ka}, G_{ia}, G_{fa}	Agregaların zahiri özgül ağırlıkları
G_{ef}	Agrega efektif özgül ağırlığı
W_a	Agreganın yüzdesi olarak bitüm
D_T	Bitümlü karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı
G_b	Bitümün özgül ağırlığı
P_{ba}	Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm
D_p	Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
VMA	Agregalar arası boşluk yüzdesi
V_h	Sıkıştırılmış kaplama içindeki hava boşluğu
V_f	Asfaltla dolu boşluk
A	Sıkıştırılmış karışımın havadaki ağırlığı
B	Sıkıştırılmış karışımın sudaki ağırlığı
C	Sıkıştırılmış karışımın doymun kuru yüzey ağırlığı
V	Sıkıştırılmış karışımın hacmi
W_b	Karışımın yüzdesi olarak bitüm

$$V = B - C \quad (6.3)$$

$$D_p = A / V \quad (6.4)$$

$$G_{sb} = 100 / (\% K / G_{kb} + \% I / G_{ib} + \% F / G_{fa}) \quad (6.5)$$

$$G_{sa} = 100 / (\% K / G_{ka} + \% I / G_{ia} + \% F / G_{fa}) \quad (6.6)$$

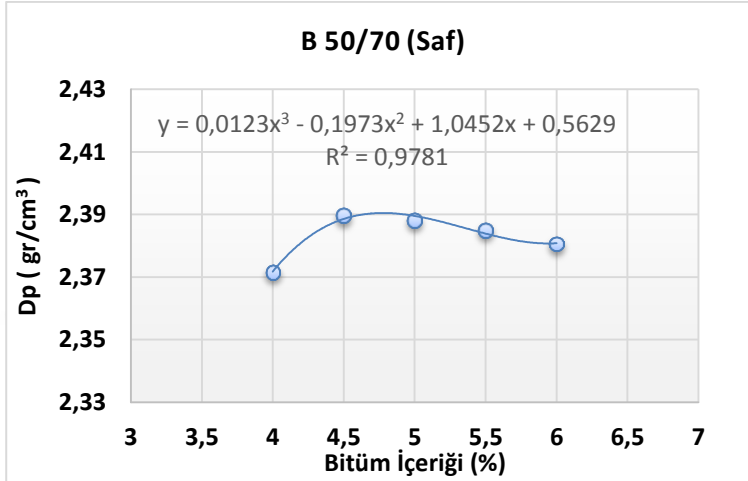
$$D_T = (100 + W_a) / ((100 / G_{ef}) + (W_a / G_b)) \quad (6.7)$$

$$P_{ba} = 100 \times G_b \times (G_{ef} - G_{sb}) / (G_{ef} \times G_{sb}) \quad (6.8)$$

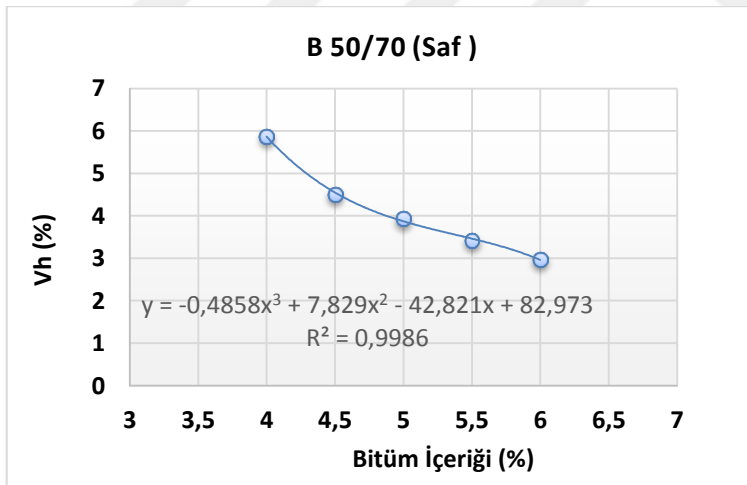
$$V_h = (D_T - D_p) \times 100 / D_T \quad (6.9)$$

$$VMA = 100 - ((D_p / G_{sb}) \times (100 / (100 + W_a))) \times 100 \quad (6.10)$$

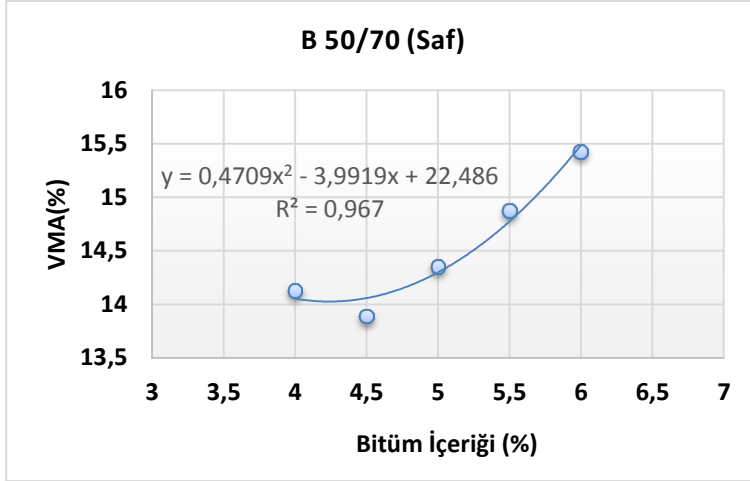
$$V_f = (VMA - V_h) \times 100 / VMA \quad (6.11)$$



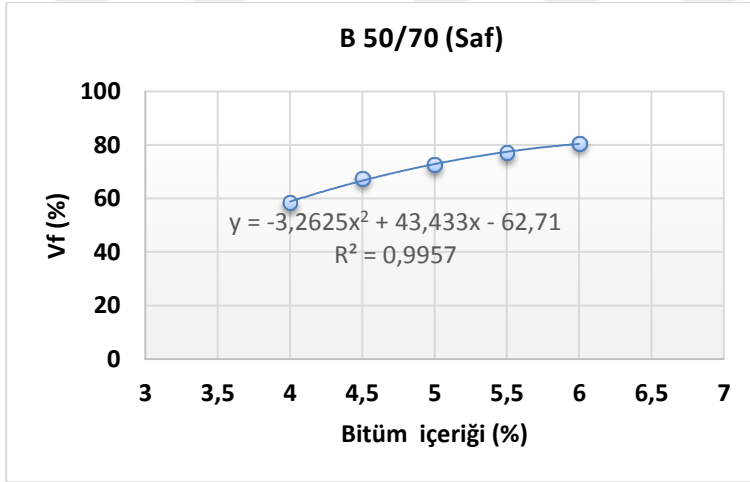
Şekil 6.18. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi



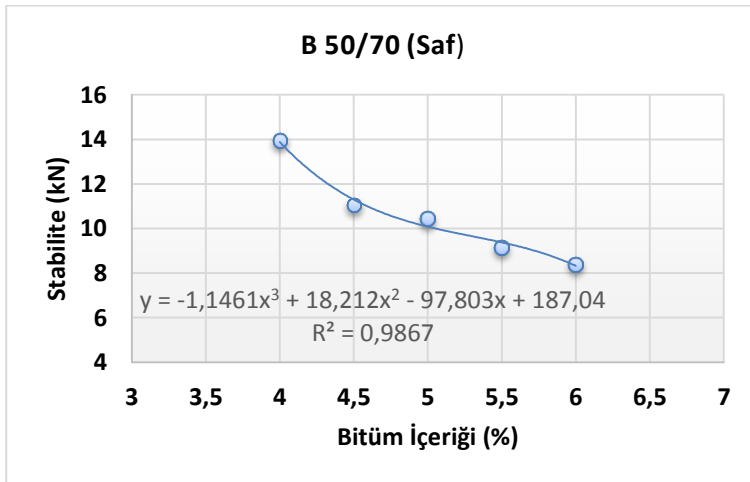
Şekil 6.19. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi



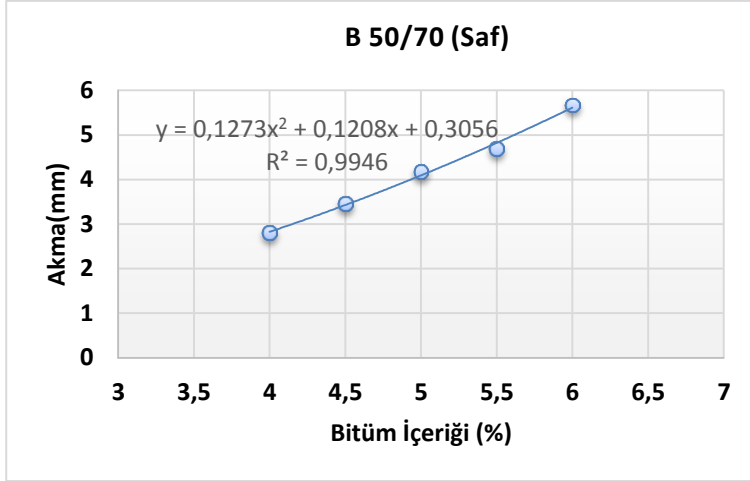
Şekil 6.20. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi



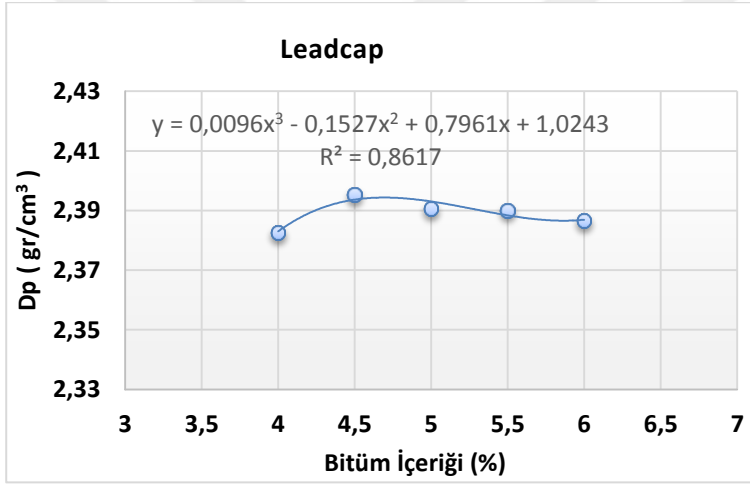
Şekil 6.21. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



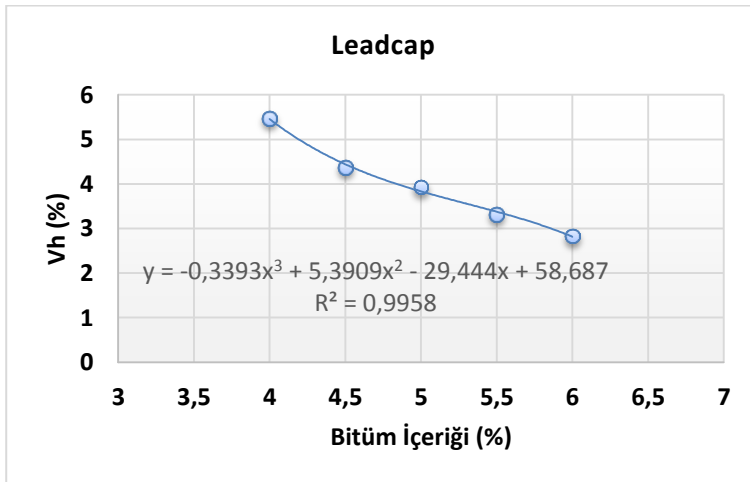
Şekil 6.22. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



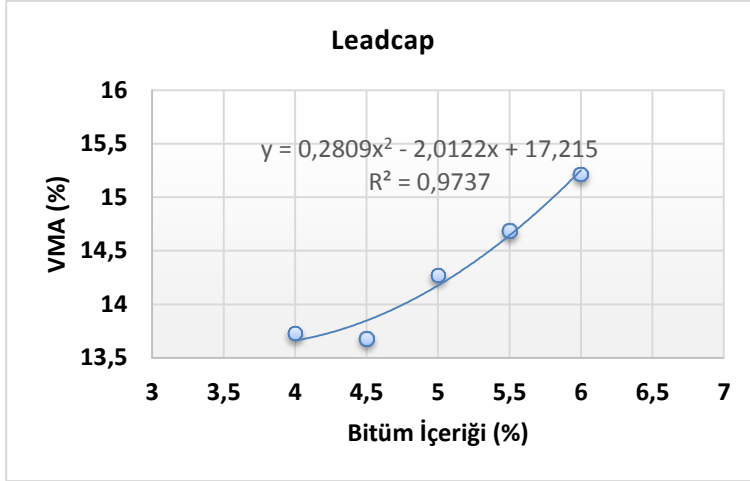
Şekil 6.23. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi



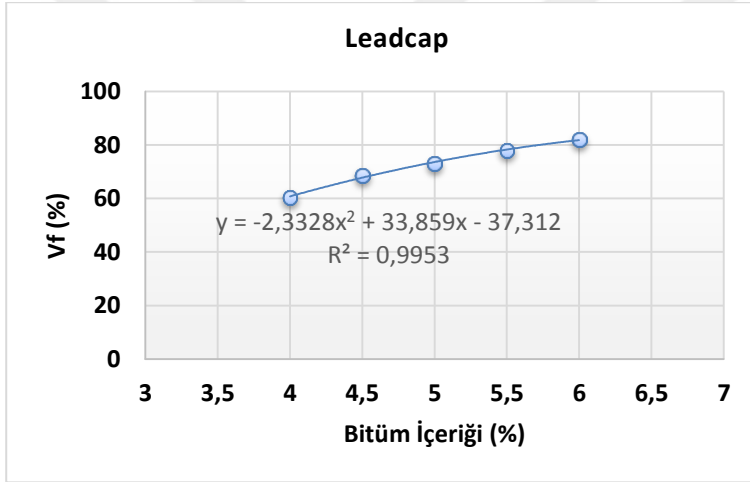
Şekil 6.24. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi



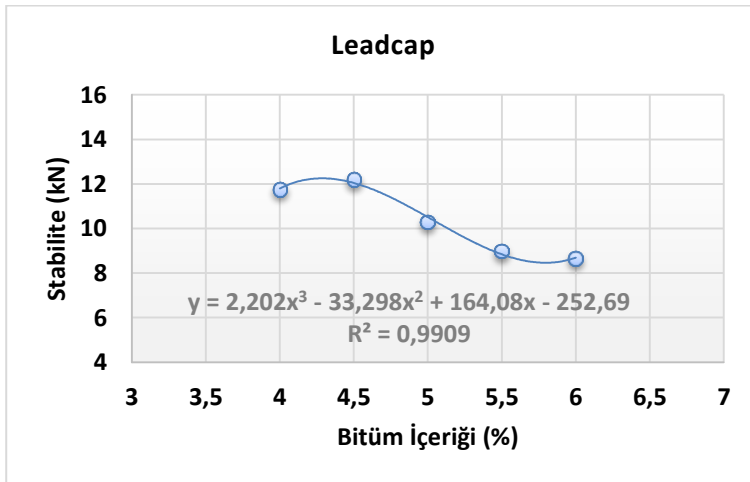
Şekil 6.25. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi



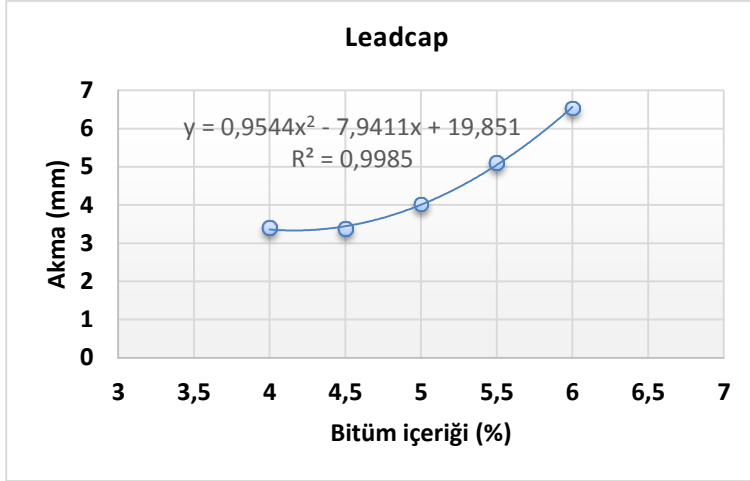
Şekil 6.26. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi



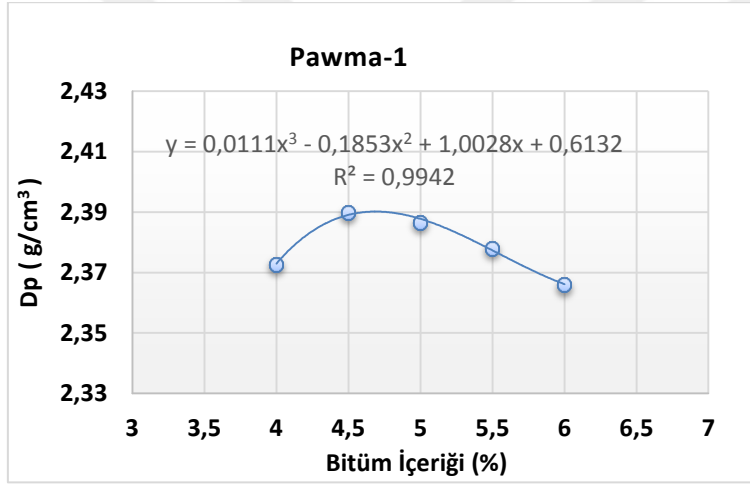
Şekil 6.27. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



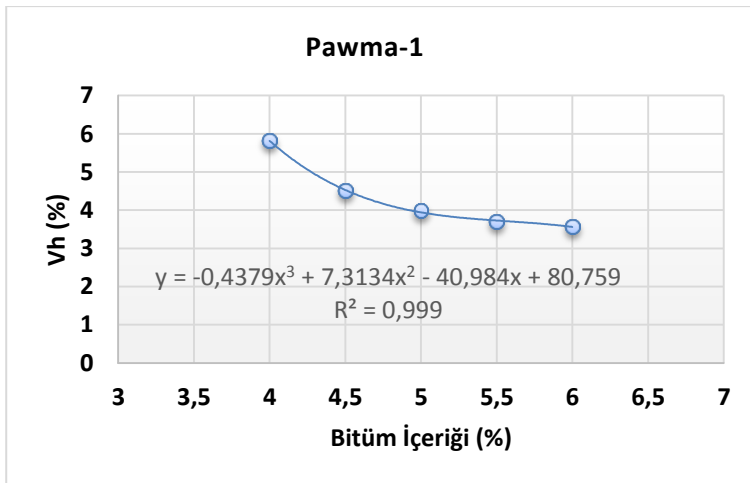
Şekil 6.28. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



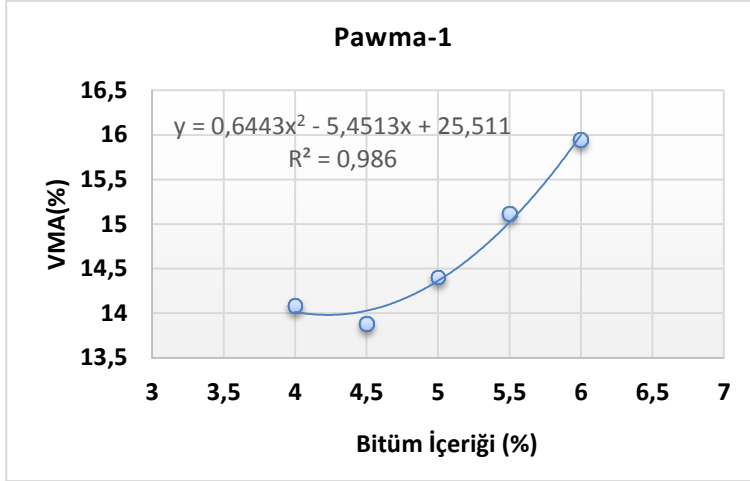
Şekil 6.29. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi



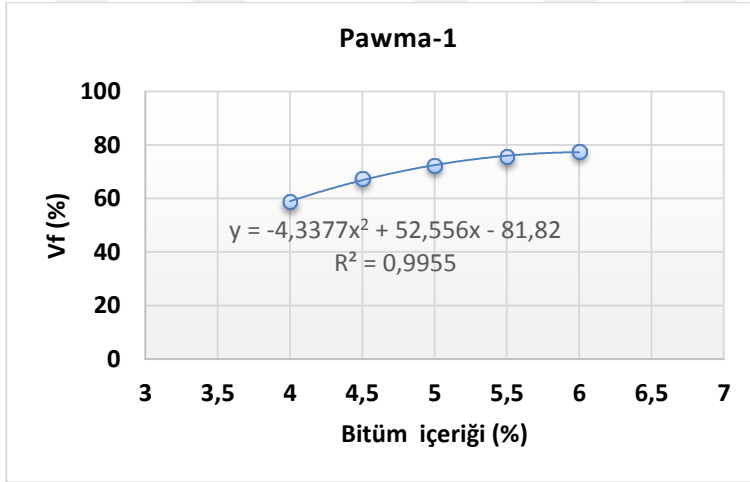
Şekil 6.30. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi



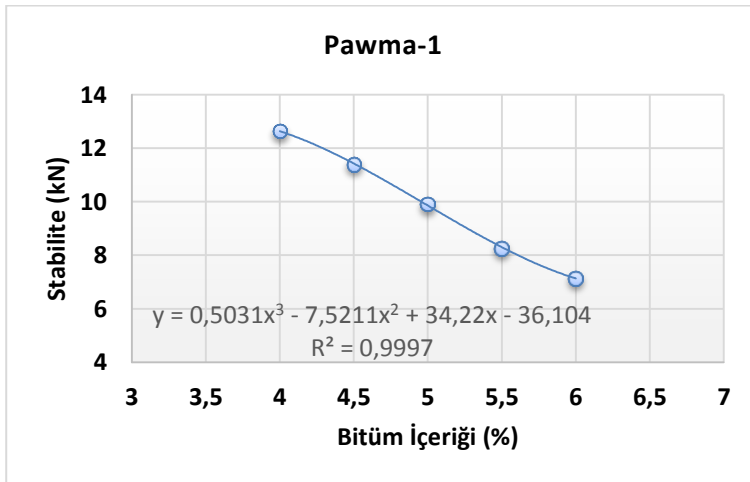
Şekil 6.31. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi



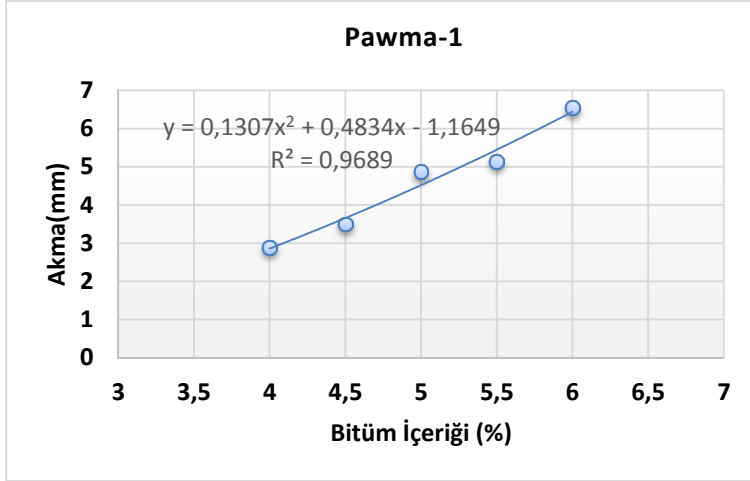
Şekil 6.32. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi



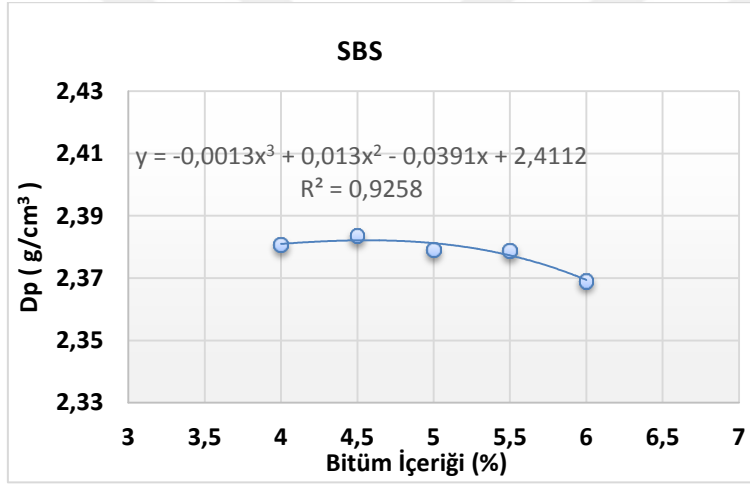
Şekil 6.33. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



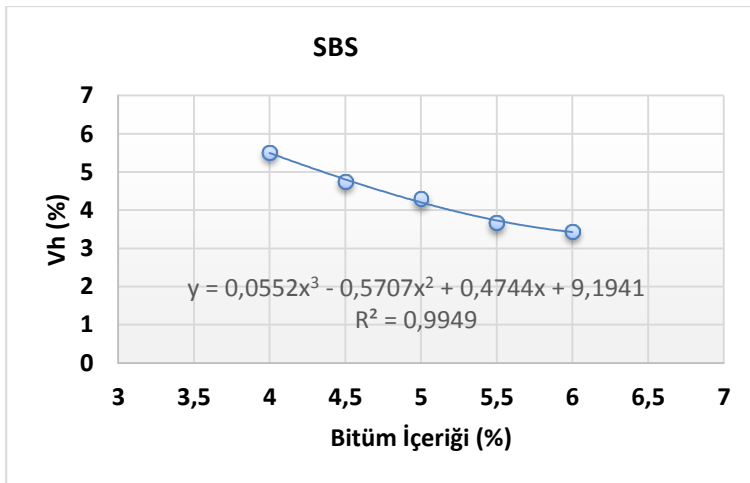
Şekil 6.34. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



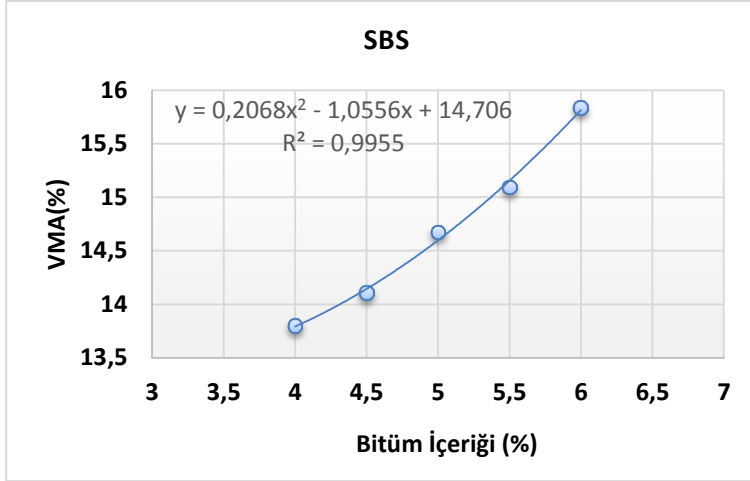
Şekil 6.35. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi



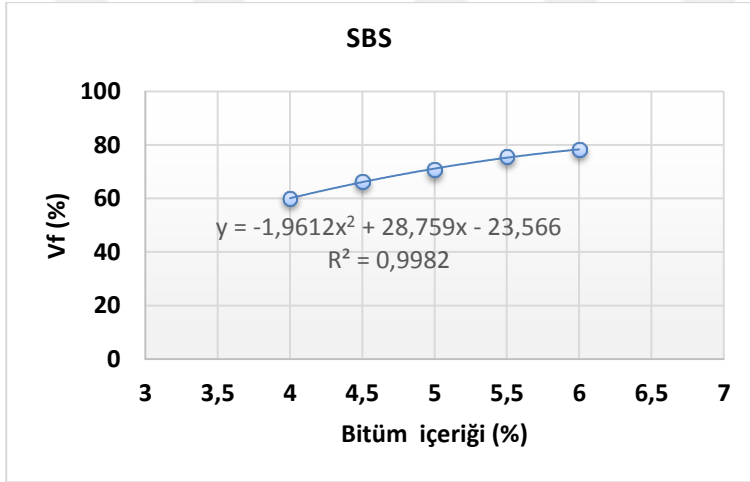
Şekil 6.36. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi



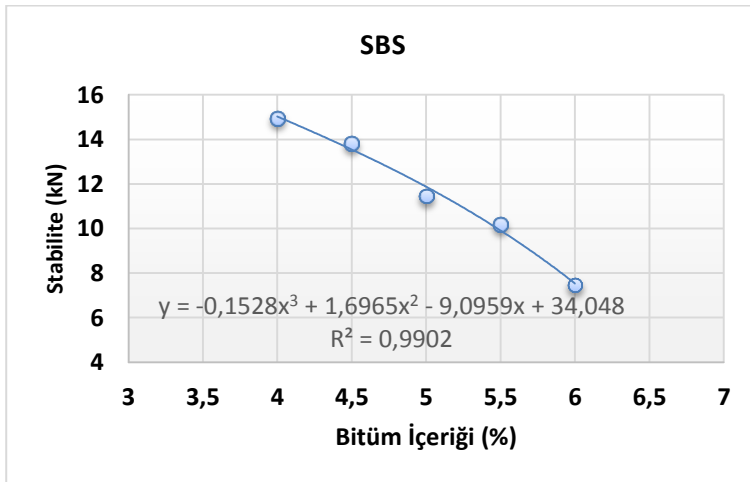
Şekil 6.37. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi



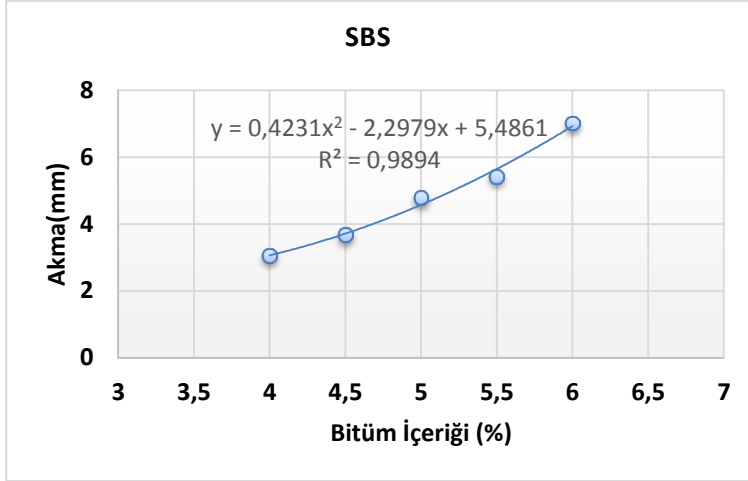
Şekil 6.38. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi



Şekil 6.39. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



Şekil 6.40. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



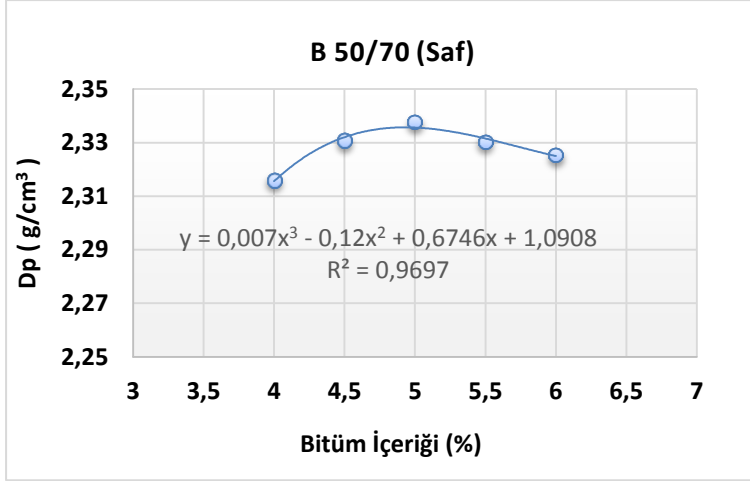
Şekil 6.41. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi

Sönmüş kireç katkısız karışım numunelerinden elde edilen grafikler neticesinde tespit edilen optimum bitüm oranları Tablo 6.15'te gösterilmiştir. Kireç katkısız karışımlar bulunan optimum bitüm oranlarında hazırlanmış ve karışım deneylerinde kullanılmıştır.

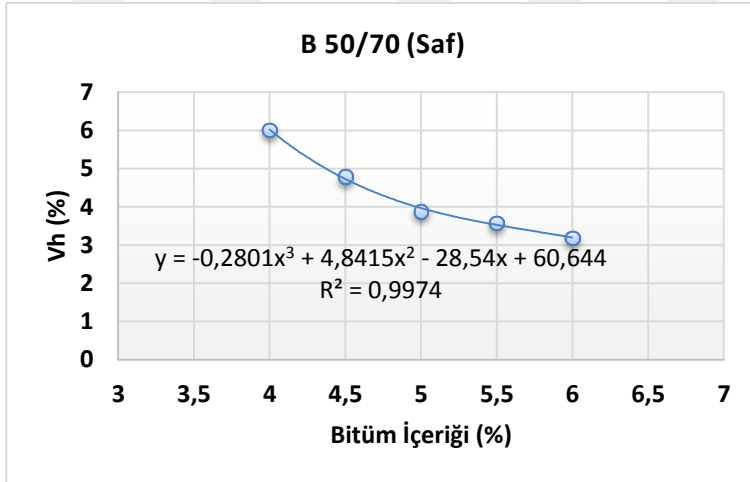
Tablo 6.11. Sönmüş kireç katkısız karışımların optimum bitüm oranları

Özellik	Saf (50/70)	Leadcap	Pawma-1	SBS
Boşluk (%4)	4,8	4,8	4,9	5,2
Stabilite (maks.)	4	4,3	4	4
Özgül ağırlık (maks.)	4,5	4,6	4,6	4,5
Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%70)	4,7	4,7	4,7	4,9
Optimum	4,5	4,6	4,55	4,65

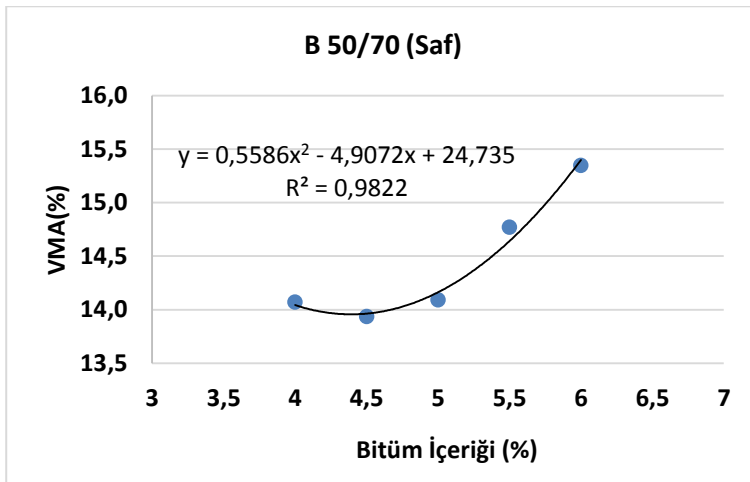
Saf bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı karışımlardan elde edilen grafikler Şekiller 6.42-6.47'de gösterilmiştir. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı karışımlardan elde edilen grafikler Şekiller 6.48-6.53'de gösterilmiştir. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı karışımlardan elde edilen grafikler Şekiller 6.54-6.59'da gösterilmiştir. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı karışımlardan elde edilen grafikler Şekiller 6.60-6.65'de gösterilmiştir.



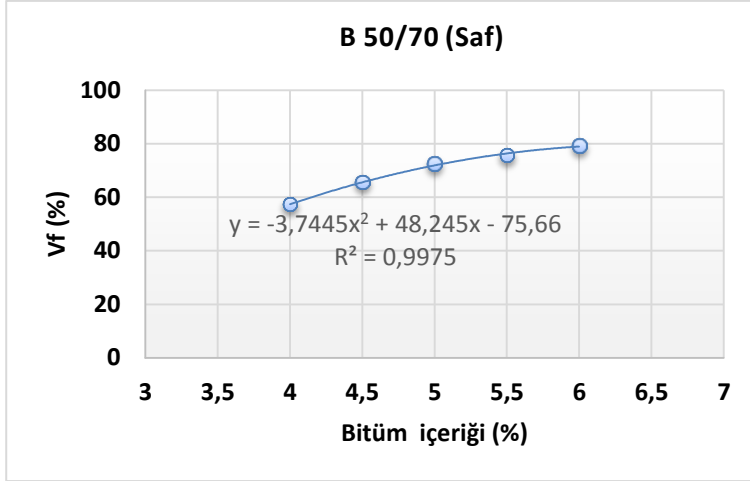
Şekil 6.42. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi



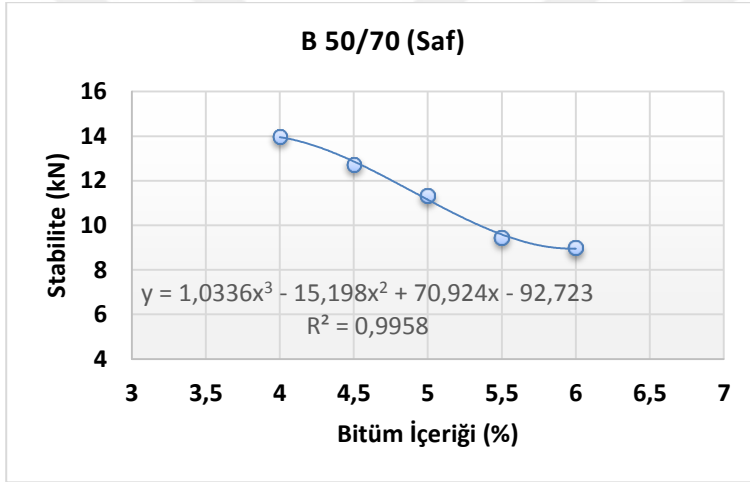
Şekil 6.43. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi



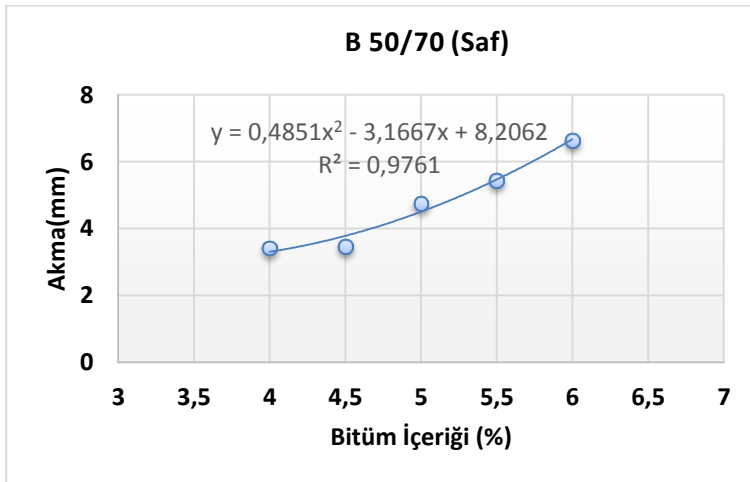
Şekil 6.44. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi



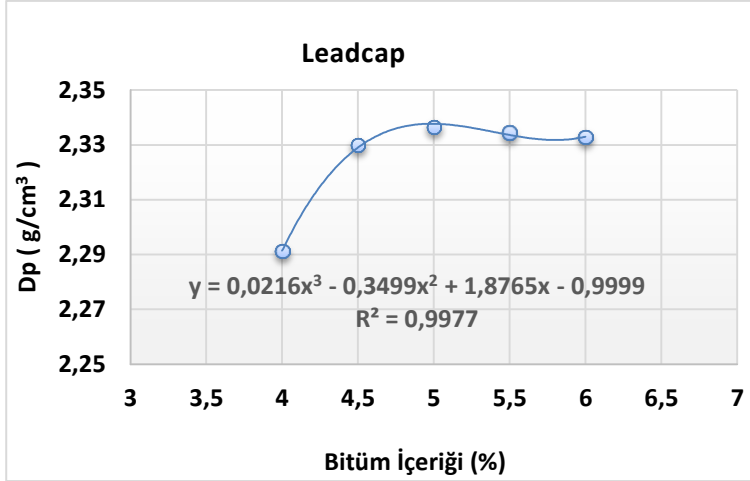
Şekil 6.45. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



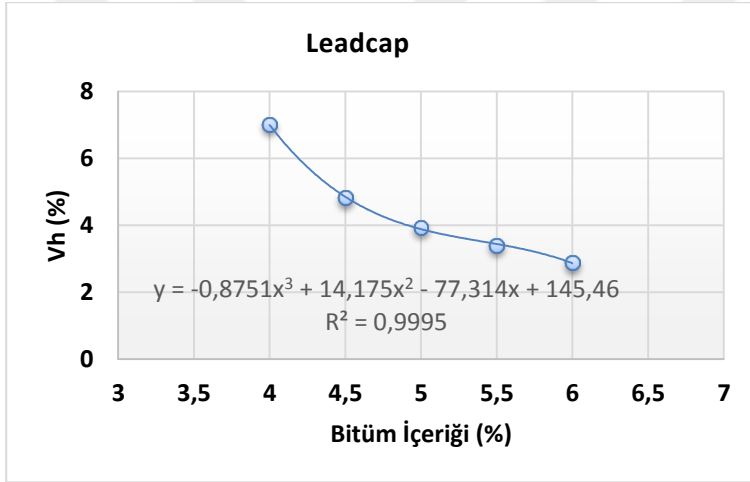
Şekil 6.46. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



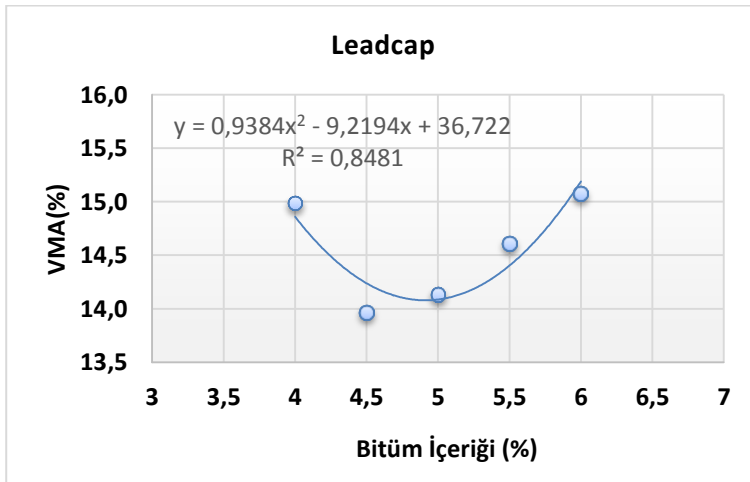
Şekil 6.47. B 50/70 (Saf bitüm) ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi



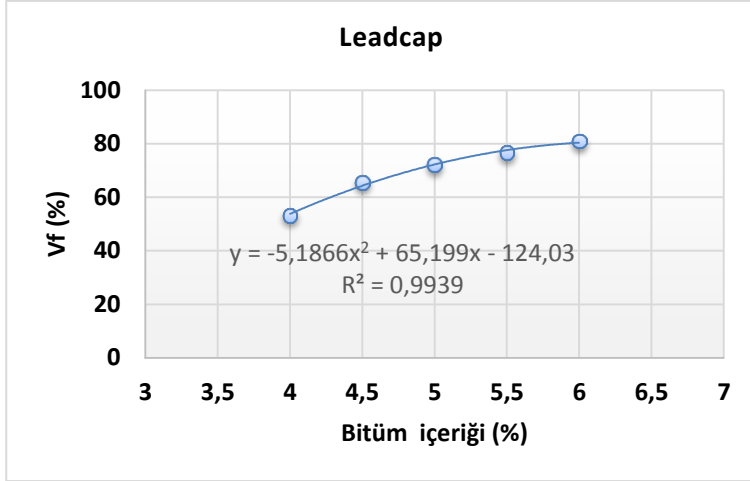
Şekil 6.48 . Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi



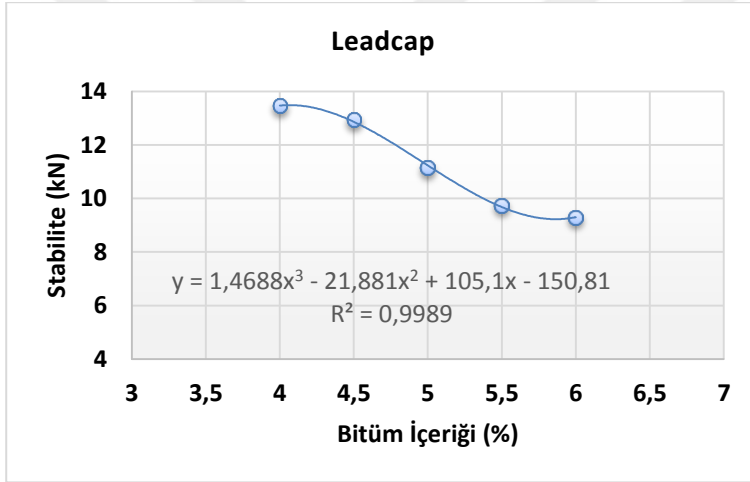
Şekil 6.49. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi



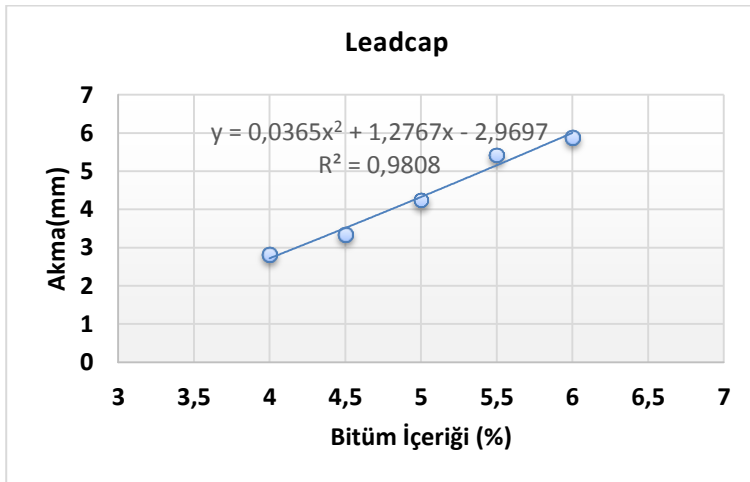
Şekil 6.50. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi



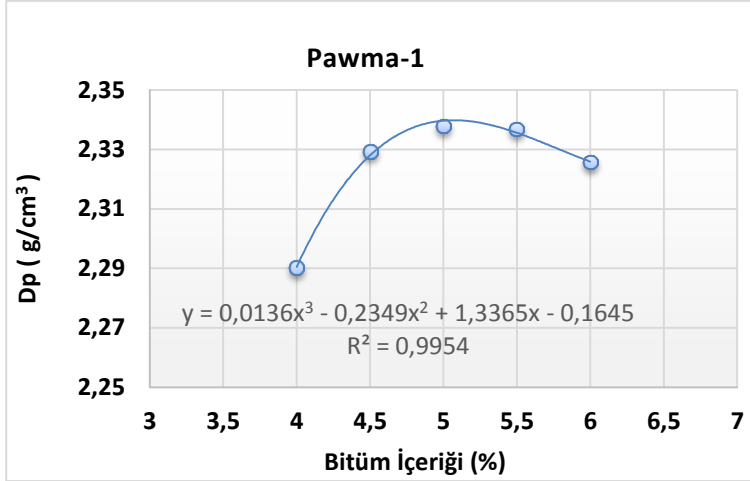
Şekil 6.51. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



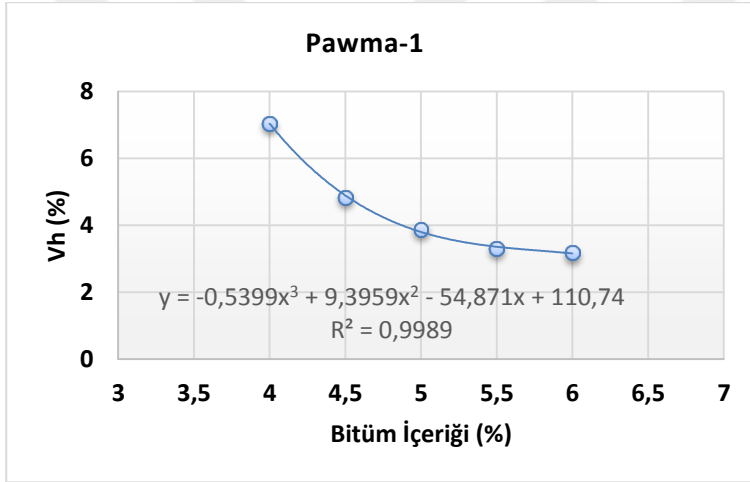
Şekil 6.52. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



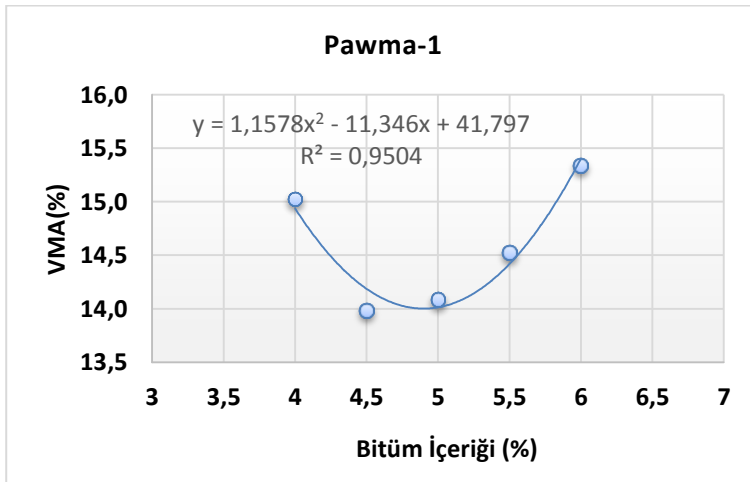
Şekil 6.53. Leadcap modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi



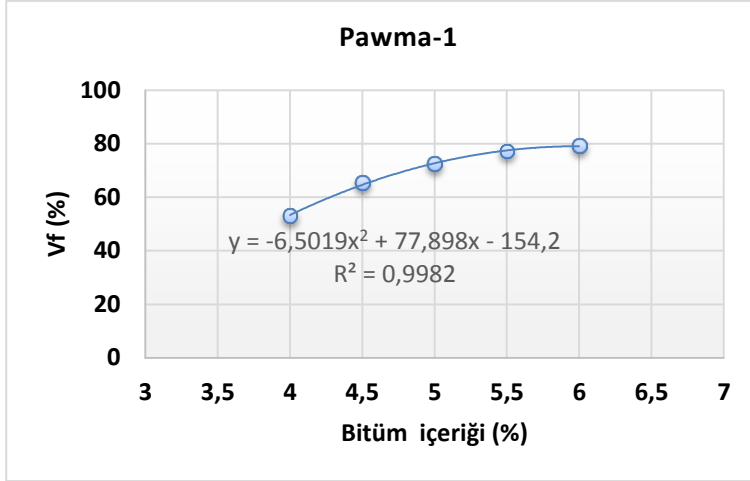
Şekil 6.54. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Dp-%Bitüm ilişkisi



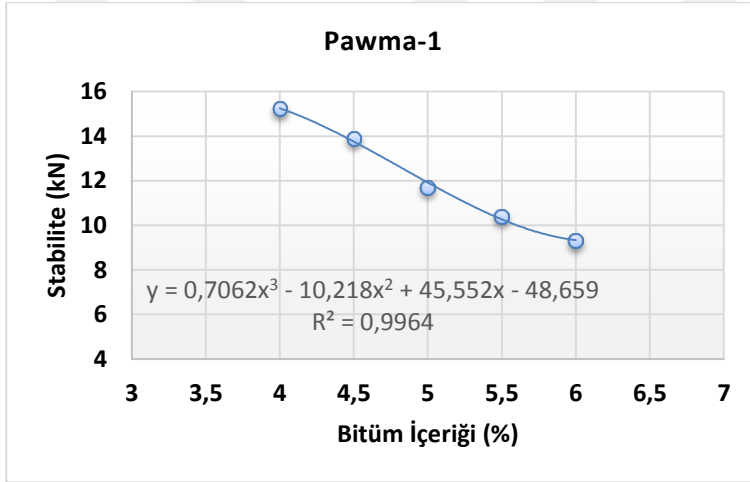
Şekil 6.55. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vh-%Bitüm ilişkisi



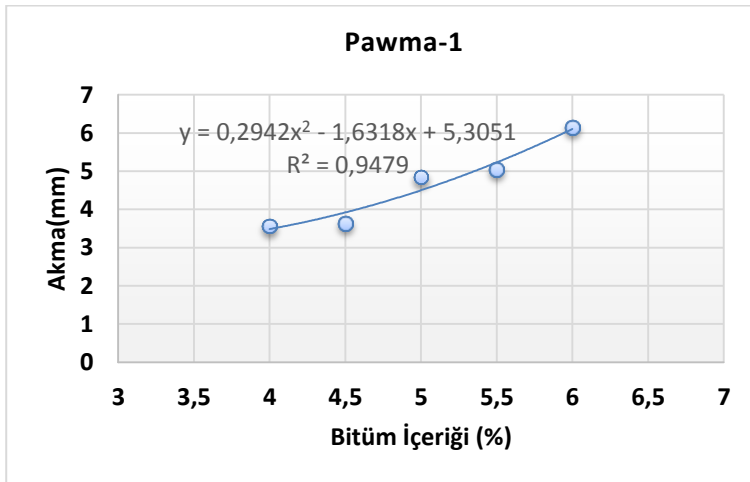
Şekil 6.56. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde VMA-%Bitüm ilişkisi



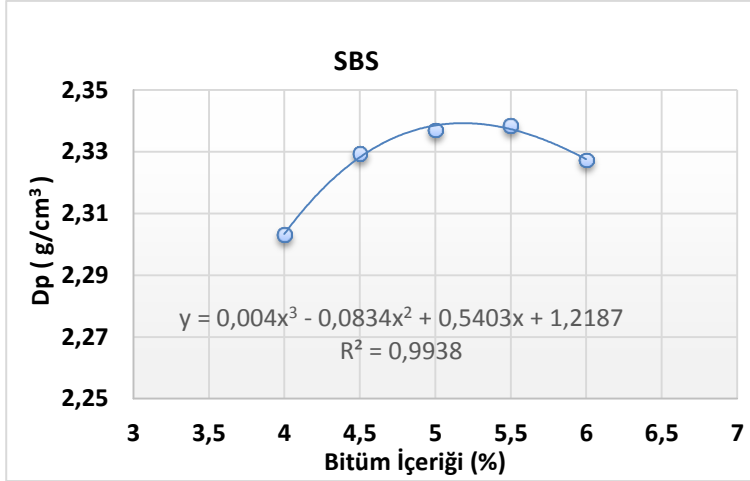
Şekil 6.57. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



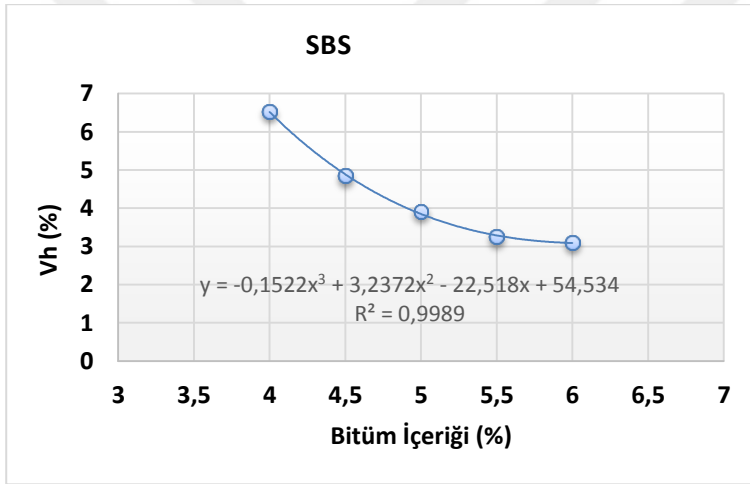
Şekil 6.58. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



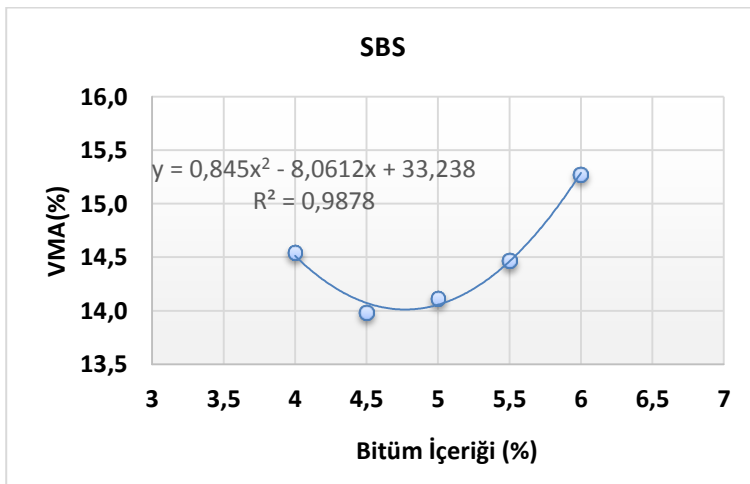
Şekil 6.59. Pawma-1 modifiyeli bitüm ile hazırlanan s. kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi



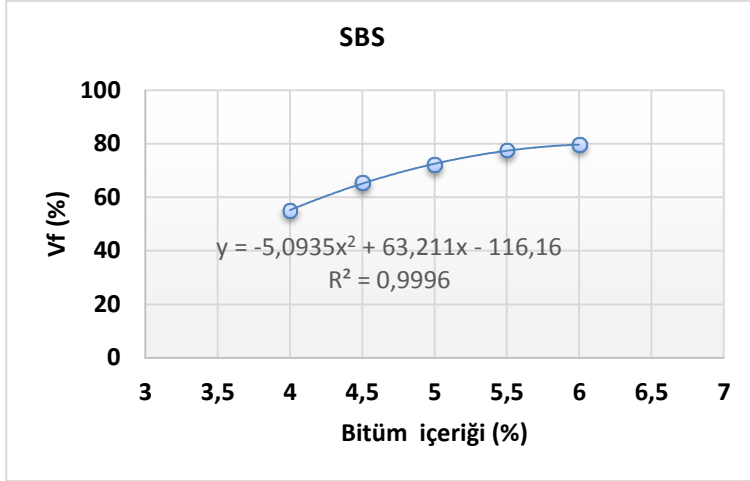
Şekil 6.60. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde D_p -%Bitüm ilişkisi



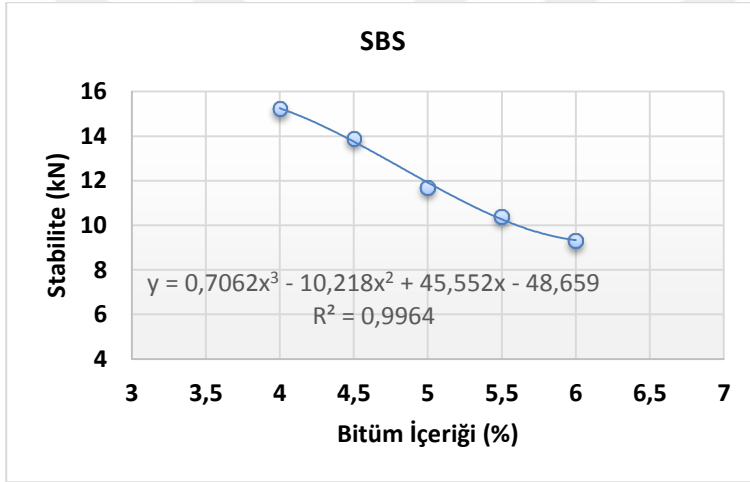
Şekil 6.61. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde V_h -%Bitüm ilişkisi



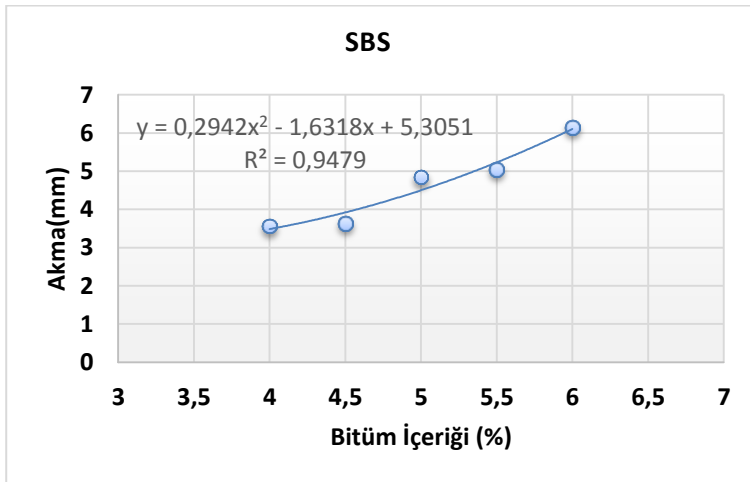
Şekil 6.62. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde VMA -%Bitüm ilişkisi



Şekil 6.63. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Vf-%Bitüm ilişkisi



Şekil 6.64. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Stabilité-%Bitüm ilişkisi



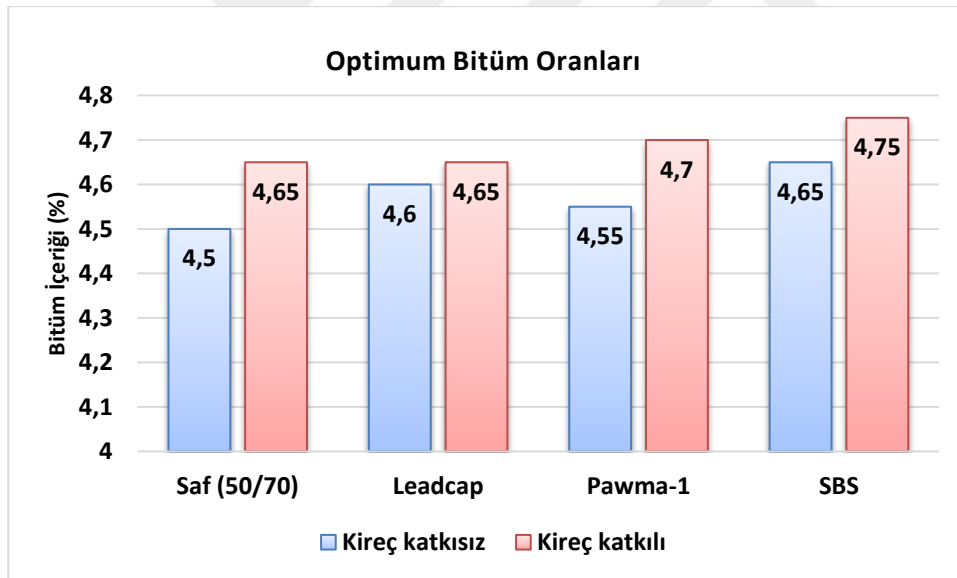
Şekil 6.65. SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan sönmüş kireç katkılı numunelerde Akma-%Bitüm ilişkisi

Sönmüş kireç katkılı karışım numunelerinden elde edilen grafikler neticesinde tespit edilen optimum bitüm oranları Tablo 6.12’de gösterilmiştir. Kireç katkılı karışımlar bulunan optimum bitüm oranlarında hazırlanmış ve karışım deneylerinde kullanılmıştır.

Tablo 6.12. Sönmüş kireç katkılı karışımların optimum bitüm oranları

Özellik	Saf (50/70)	Leadcap	Pawma-1	SBS
Boşluk (%4)	5	4,9	4,9	4,9
Stabilite (maks.)	4	4	4	4
Özgül ağırlık (maks.)	4,8	4,9	5,1	5,3
Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%70)	4,8	4,8	4,8	4,8
Optimum	4,65	4,65	4,7	4,75

Sönmüş kireç katkısı ile karışımların optimum bitüm oranları değişmiştir. Bu değişim Şekil 6.66’da gösterilmiştir.



Şekil 6.66. Sönmüş kireç katkısı ile optimum bitüm oranlarında meydana gelen değişim

Sönmüş kireç katkısı, agrega karışımının inceliğini, dolayısıyla toplam yüzey alanını arttırdığı için bütün karışımların optimum bitüm oranlarını arttırmıştır. En fazla artış saf ve Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülürken en az artış Leadcap modifiyeli karışımda görülmüştür. Kireç katkısız ve katkılı, saf ve modifiye karışımlardan optimum bitüm içeriklerinde 48 adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelerden 24 tanesi Marshall testine

tabi tutulmadan önce 24 saat 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilerek koşullandırılmıştır.

Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış, koşullandırılmamış numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 6.13’de, koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 6.14’te gösterilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış kireç katkı, koşullandırılmamış numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 6.15’de, koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 6.16’da gösterilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış koşullandırılmamış karışımların D_p değerleri Şekil 6.67’de, V_h değerleri Şekil 6.68’de, VMA değerleri Şekil 6.69’da, V_f değerleri Şekil 6.70’de, stabilite değerleri Şekil 6.71’de, akma değerleri Şekil 6.72’de, Marshall oranı değerleri Şekil 6.73’te verilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların Marshall stabilite değerleri Şekil 6.74’te, akma değerleri Şekil 6.75’te, Marshall oranı değerleri Şekil 6.76’da gösterilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış sönmüş kireç katkı koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların Marshall stabilite değerleri Şekil 6.77’de, akma değerleri Şekil 6.78’de, Marshall oranı değerleri Şekil 6.79’da gösterilmiştir.

Tablo 6.13. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış koşullandırılmamış numunelerden elde edilen sonuçlar

Briket No	Koşullandırılmamış			Briket Yüksekliği mm				A g	C g	B g	V cm ³	D _p g/cm ³	D _t g/cm ³	V _h %	VMA %	V _f %	Akma mm	Stab. kg	Düz. Fak.	Düz. Stab.	
	W _a %	W _b %	g	1	2	3	Ort														
SAF(50/70) Optimum																					
1	4,5	4,31	49,5	57,2	57,3	57,7	57,4	1145,18	668,45	1148,52	480,07	2,385	2,502	4,69	14,05	66,64	3,91	1037	1,181	1225	
2	4,5	4,31	49,5	58,1	58,0	57,6	57,9	1142,73	667,13	1146,10	478,97	2,386					3,37	982	1,164	1143	
3	4,5	4,31	49,5	58,6	57,8	57,3	57,9	1142,32	666,19	1145,34	479,15	2,384					3,30	1048	1,164	1220	
ORTALAMALAR												2,385					3,53				1196
LEADCAP Optimum																					
1	4,6	4,4	50,6	57,8	56,9	57,2	57,3	1137,28	664,78	1141,07	476,29	2,388	2,499	4,45	14,03	68,29	2,47	1074	1,184	1271	
2	4,6	4,4	50,6	58,1	58,0	57,7	57,9	1144,61	668,77	1148,01	479,24	2,388					3,27	987	1,164	1148	
3	4,6	4,4	50,6	58,0	58,3	57,7	58,0	1144,13	668,49	1147,75	479,26	2,387					2,62	1038	1,161	1205	
ORTALAMALAR												2,388					2,79				1208
PAWMA-1 Optimum																					
1	4,55	4,35	50,05	57,9	57,5	58,0	57,8	1142,60	667,14	1146,50	479,36	2,384	2,501	4,69	14,15	66,84	2,64	1113	1,169	1301	
2	4,55	4,35	50,05	57,9	58,0	58,2	58,0	1145,67	668,79	1149,48	480,69	2,383					3,69	1084	1,161	1258	
3	4,55	4,35	50,05	58,6	58,4	58,5	58,5	1144,07	668,68	1148,78	480,10	2,383					3,20	1023	1,146	1172	
ORTALAMALAR												2,383					3,17				1244
SBS Optimum																					
1	4,65	4,44	51,15	57,9	57,6	57,4	57,6	1144,10	666,69	1147,61	480,92	2,379	2,497	4,64	14,30	67,56	3,28	1069	1,175	1256	
2	4,65	4,44	51,15	57,5	58,0	58,0	57,8	1143,25	667,18	1146,92	479,74	2,383					3,16	1147	1,169	1340	
3	4,65	4,44	51,15	58,1	57,5	57,7	57,7	1144,63	667,86	1148,30	480,44	2,382					3,30	1075	1,172	1260	
ORTALAMALAR												2,382					3,25				1285

Tablo 6.14. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar

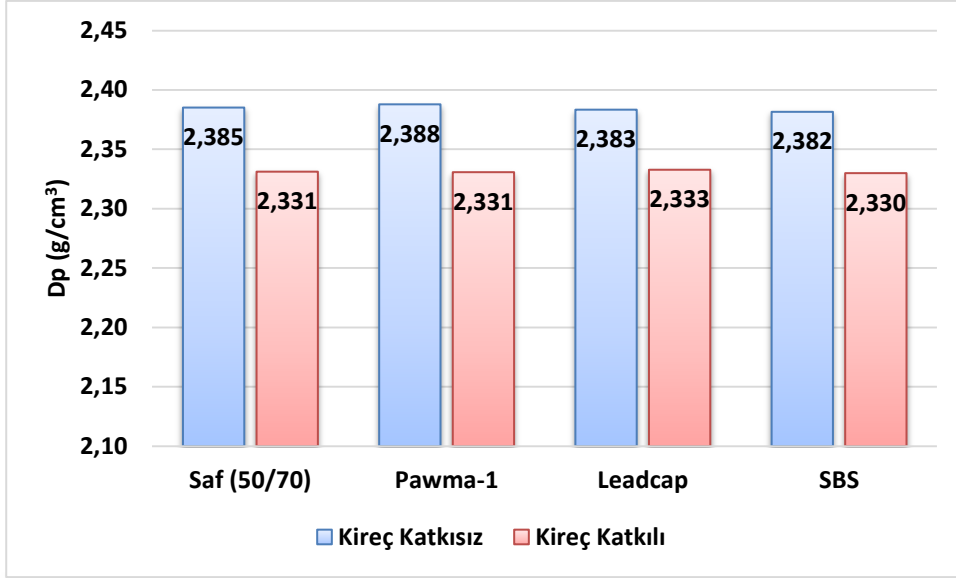
Briket No	Koşullandırılmış			Briket Yüksekliği mm				A g	C g	B g	V cm ³	D _p g/cm ³	D _t g/cm ³	V _h %	VMA %	V _f %	Akma mm	Stab. kg	Düz. Fak.	Düz. Stab.
	W _a %	W _b %	g	1	2	3	Ort													
SAF(50/70) Optimum																				
1	4,5	4,31	49,5	58,7	58,1	58,4	58,4	1143,43	668,09	1147,40	479,31	2,386	2,502	4,67	14,04	66,71	3,37	1003	1,149	1153
2	4,5	4,31	49,5	57,5	57,7	57,5	57,6	1139,02	665,16	1142,46	477,30	2,386					3,89	967	1,175	1137
3	4,5	4,31	49,5	57,9	58,0	57,8	57,9	1144,03	667,43	1147,21	479,78	2,384					3,60	986	1,164	1148
ORTALAMALAR												2,385					3,62			1146
LEADCAP Optimum																				
1	4,6	4,4	50,6	57,4	57,8	57,4	57,5	1143,18	667,09	1146,01	478,92	2,387	2,499	4,47	14,05	68,19	3,11	1033	1,178	1217
2	4,6	4,4	50,6	58,1	57,7	57,9	57,9	1144,47	667,89	1147,35	479,46	2,387					3,81	927	1,164	1079
3	4,6	4,4	50,6	57,6	57,8	57,7	57,7	1145,31	668,50	1148,12	479,62	2,388					3,88	992	1,172	1163
ORTALAMALAR												2,387					3,60			1153
PAWMA-1 Optimum																				
1	4,55	4,35	50,05	57,5	58,0	57,4	57,6	1143,79	667,58	1147,00	479,42	2,386	2,501	4,64	14,11	67,08	3,58	1011	1,175	1188
2	4,55	4,35	50,05	57,8	57,6	58,0	57,8	1144,43	667,83	1147,72	479,89	2,385					3,56	1010	1,169	1180
3	4,55	4,35	50,05	58,2	58,5	58,0	58,2	1143,63	666,99	1146,87	479,88	2,383					3,09	1032	1,155	1191
ORTALAMALAR												2,385					3,41			1186
SBS Optimum																				
1	4,65	4,44	51,15	58,1	58,5	58,3	57,6	1144,08	666,79	1147,90	481,11	2,378	2,497	4,70	14,36	67,25	3,49	998	1,152	1150
2	4,65	4,44	51,15	57,6	58,2	57,8	57,8	1143,16	666,28	1146,93	480,65	2,378					4,36	1021	1,164	1189
3	4,65	4,44	51,15	57,7	57,9	57,3	57,7	1146,03	668,05	1148,91	480,86	2,383					3,35	1052	1,175	1236
ORTALAMALAR												2,380					3,73			1192

Tablo 6.15. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış sönmüş kireç katkı koşullandırılmamış numunelerden elde edilen sonuçlar

Briket No	Koşullandırılmamış			Briket Yüksekliği mm				A g	C g	B g	V cm ³	D _p g/cm ³	D _t g/cm ³	V _h %	VMA %	V _f %	Akma mm	Stab. kg	Düz. Fak.	Düz. Stab.	
	W _a %	W _b %	g	1	2	3	Ort														
SAF(50/70) Optimum																					
1	4,65	4,44	51,15	58,6	58,5	58,2	58,4	1145,80	657,68	1149,63	491,95	2,329	2,443	4,58	14,04	67,35	2,56	1175	1,149	1350	
2	4,65	4,44	51,15	58,1	58,0	58,0	58,0	1146,32	658,97	1149,72	490,75	2,336					3,64	1152	1,161	1337	
3	4,65	4,44	51,15	58,4	58,3	58,1	58,2	1142,84	655,76	1146,60	490,84	2,328					3,32	1165	1,155	1346	
ORTALAMALAR												2,331					3,17				1345
LEADCAP Optimum																					
1	4,65	4,44	51,15	58,9	58,7	58,6	58,7	1144,66	657,76	1148,41	490,65	2,333	2,443	4,60	14,06	67,27	2,58	1127	1,140	1285	
2	4,65	4,44	51,15	58,6	58,0	58,0	58,2	1146,10	658,86	1149,84	490,98	2,334					2,62	1090	1,155	1259	
3	4,65	4,44	51,15	58,7	58,1	58,8	58,6	1144,17	655,75	1147,92	492,17	2,325					2,86	969	1,143	1108	
ORTALAMALAR												2,331					2,69				1217
PAWMA-1 Optimum																					
1	4,70	4,49	51,7	58,8	58,9	58,4	58,7	1146,55	658,35	1150,69	492,34	2,329	2,442	4,46	14,02	68,22	3,36	1069	1,140	1219	
2	4,70	4,49	51,7	58,2	58,6	58,6	58,4	1144,39	657,19	1147,90	490,71	2,332					2,95	1113	1,149	1278	
3	4,70	4,49	51,7	58,1	58,4	57,9	58,1	1146,03	658,88	1149,21	490,33	2,337					2,85	1126	1,158	1304	
ORTALAMALAR												2,333					3,05				1267
SBS Optimum																					
1	4,75	4,53	52,25	58,2	58,9	58,6	58,6	1147,75	658,09	1151,39	493,30	2,327	2,440	4,51	14,17	68,16	2,43	1199	1,143	1370	
2	4,75	4,53	52,25	57,9	57,9	58,4	58,1	1146,00	658,88	1149,20	490,32	2,337					3,17	1173	1,158	1358	
3	4,75	4,53	52,25	57,9	57,7	57,6	57,8	1146,34	656,70	1149,61	492,91	2,326					3,17	1155	1,169	1350	
ORTALAMALAR												2,330					2,92				1360

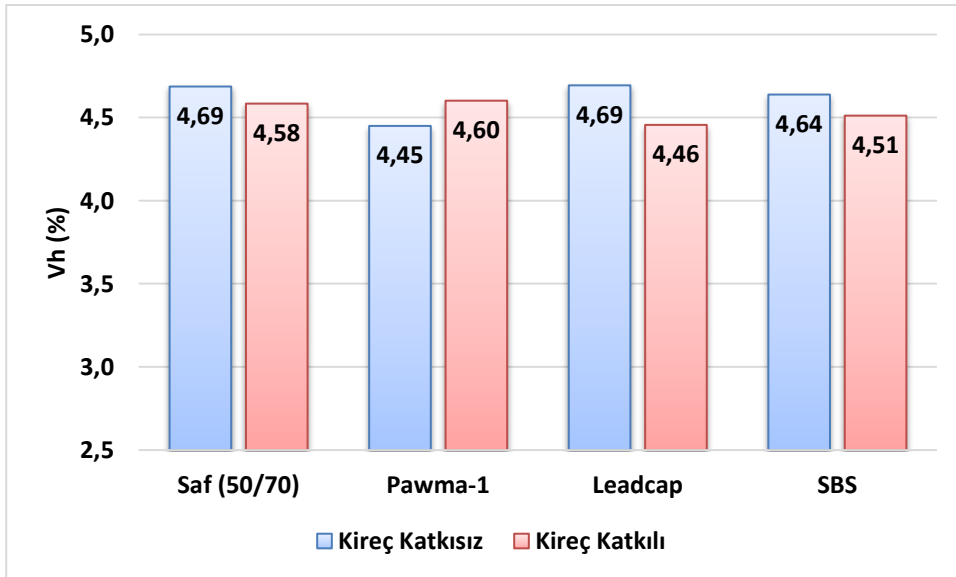
Tablo 6.16. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış sönmüş kireç katkı koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar

Briket No	Koşullandırılmış			Briket Yüksekliği mm				A g	C g	B g	V cm ³	D _p g/cm ³	D _t g/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab. kg	Düz. Fak.	Düz. Stab.	
	W _a %	W _b %	g	1	2	3	Ort														
SAF(50/70) Optimum Koşullandırılmış																					
1	4,65	4,44	51,15	58,8	58,3	58,6	58,5	1141,57	654,72	1145	490,28	2,328	2,443	4,68	14,13	66,88	3,74	1156	1,143	1321	
2	4,65	4,44	51,15	58,9	59,4	59	59,1	1143,57	656,71	1148,1	491,39	2,327					3,90	1101	1,127	1240	
3	4,65	4,44	51,15	59,0	58,5	58,4	58,6	1144,69	656,86	1148	491,14	2,331					2,81	1131	1,149	1300	
ORTALAMALAR												2,329					3,48				1287
LEADCAP Optimum Koşullandırılmış																					
1	4,65	4,44	51,15	57,7	58	58,6	58,1	1143,83	655,93	1146,8	490,87	2,330	2,443	4,57	14,03	67,44	3,11	1084	1,158	1255	
2	4,65	4,44	51,15	58,7	58,3	58,4	58,5	1145,94	657,83	1149,8	491,97	2,329					3,03	970	1,146	1111	
3	4,65	4,44	51,15	57,7	58,1	58,1	58	1144,73	657,35	1147,6	490,25	2,335					3,88	943	1,161	1095	
ORTALAMALAR												2,331					3,34				1154
PAWMA 1 Optimum Koşullandırılmış																					
1	4,70	4,49	51,7	58,4	58,6	58,7	58,5	1144,8	658,96	1148	489,04	2,341	2,442	4,44	14,01	68,32	3,09	1022	1,146	1171	
2	4,70	4,49	51,7	58,8	58,6	58,5	58,6	1148,21	660,27	1152	491,73	2,335					3,07	1068	1,143	1221	
3	4,70	4,49	51,7	58,7	58,5	58,5	58,6	1147,31	657,62	1151,4	493,78	2,324					3,45	1055	1,143	1205	
ORTALAMALAR												2,333					3,20				1199
SBS Optimum Koşullandırılmış																					
1	4,75	4,53	52,25	58,1	58,3	58,5	58,3	1145,55	658,27	1149,4	491,13	2,332	2,440	4,47	14,14	68,35	3,42	1106	1,152	1275	
2	4,75	4,53	52,25	57,6	57,5	57,6	57,6	1146,71	656,84	1149,8	492,96	2,326					3,76	1140	1,175	1339	
3	4,75	4,53	52,25	57,7	58,7	58,8	58,4	1145,56	658,23	1149,1	490,87	2,334					3,83	1120	1,149	1286	
ORTALAMALAR												2,331					3,67				1300



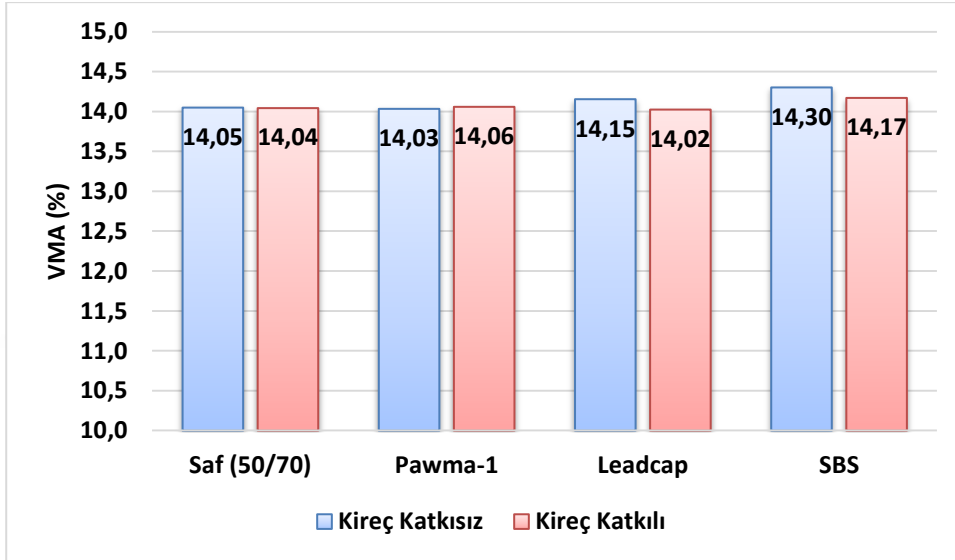
Şekil 6.67. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Dp değerleri

Karışımların hacim özgül ağırlıklarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Sönmüş kireç katkısının hacim özgül ağırlıkları küçük bir oranda azalttığı belirlenmiştir. En büyük hacim özgül ağırlık değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülürken en düşük hacim özgül ağırlık değeri sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



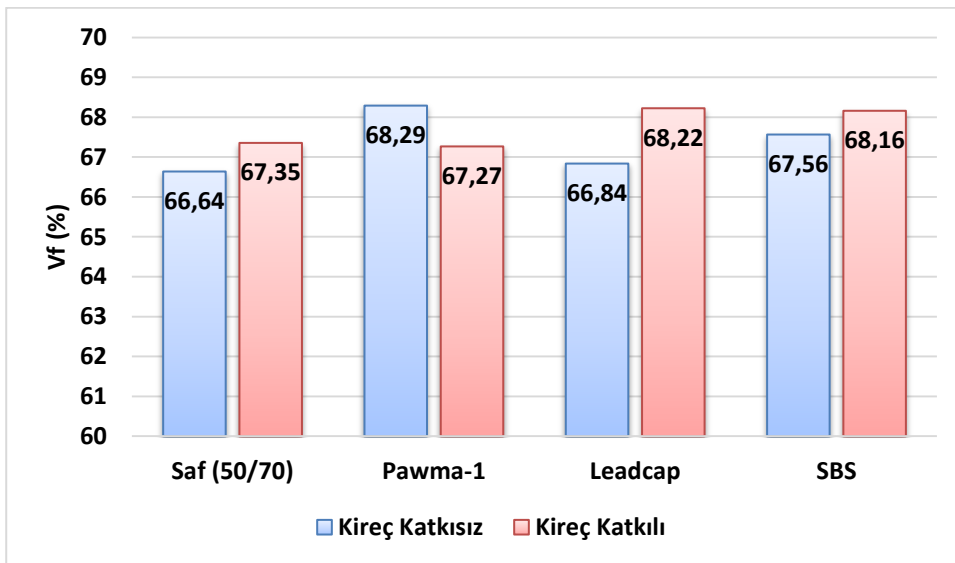
Şekil 6.68. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Vh değerleri

Bütün karışımların boşluk oranı değerleri, %3-5 olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Pawma-1 modifiyeli karışımda sönmüş kireç katkısı boşluk oranını artırırken diğer karışımlarda sönmüş kireç katkısı boşluk oranlarını bir miktar azaltmıştır.



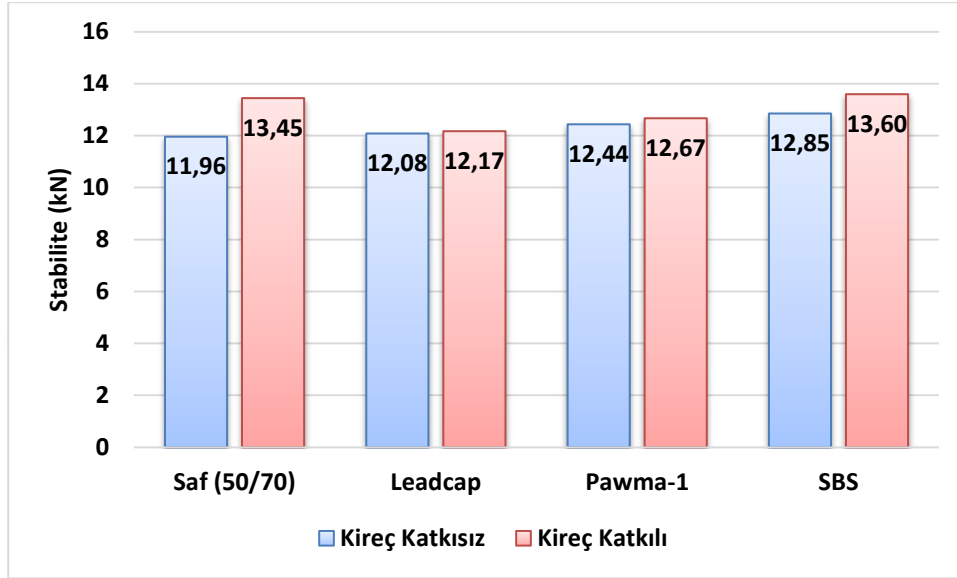
Şekil 6.69. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin VMA değerleri

Bütün karışımların WMA değerleri, min %14 olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Sönmüş kireç katkısının WMA değerlerini önemli oranlarda değiştirmedeği görülmüştür. En yüksek VMA değerleri SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



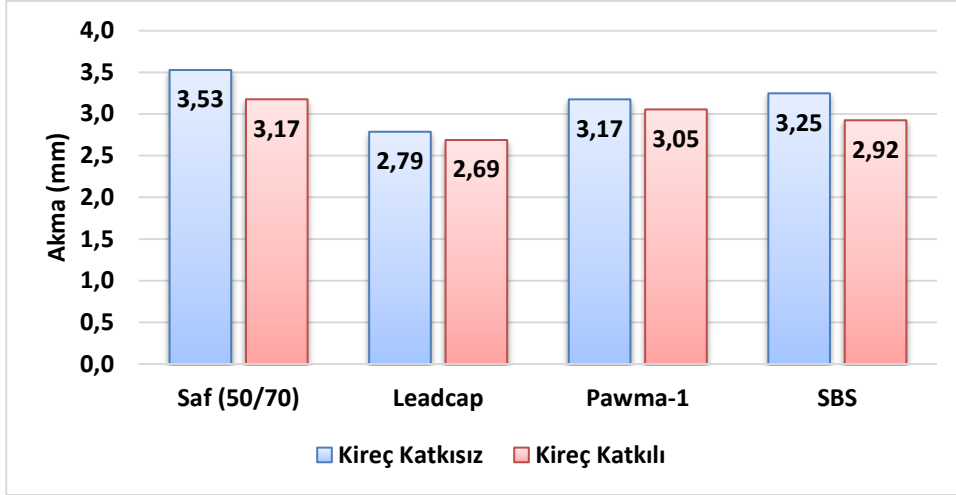
Şekil 6.70. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Vf değerleri

Bütün karışımların V_f değerleri, %65-75 olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Pawma-1 modifiyeli karışımda sönmüş kireç katkısı V_f değerini azaltırken diğer karışımlarda sönmüş kireç katkısı V_f değerlerini bir miktar arttırmıştır.



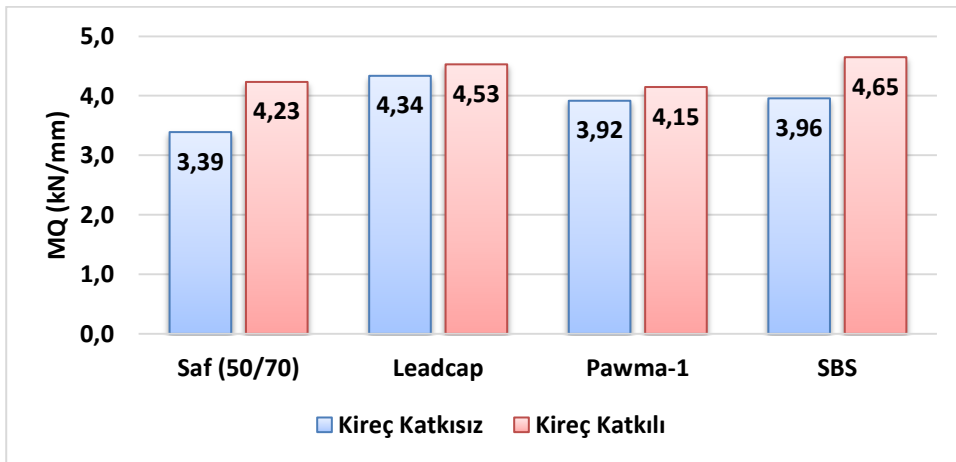
Şekil 6.71. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Stabilite değerleri

Bütün karışımların stabilite değerleri, minimum 9 kN olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Sönmüş kireç bütün karışımların stabilite değerlerini arttırmıştır. En yüksek stabilite değeri sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür. SBS katkısı ile stabilite değeri %7,47 oranında artarken bu artış sönmüş kireç ilavesi ile %13,6 oranına yükselmiştir. Leadcap katkısı ile stabilite değeri %1,03 oranında artarken bu artış sönmüş kireç ilavesi ile %1,77 oranına yükselmiştir. Pawma-1 katkısı ile stabilite değeri %3,99 oranında artarken bu artış ve sönmüş kireç ilavesi ile %5,93 oranına yükselmiştir. B 50/70 (saf) karışımın stabilite değeri kireç ilavesi ile %12,42 oranında artmıştır. Sönmüş kireç katkısının, saf (50/70) bitüm ile hazırlanan karışımlar üzerinde en yüksek oranda olumlu etki yaptığı görülmüştür. Sönmüş kirecin ılık karışım asfaltların stabilite değerlerini arttırdığı görülmüştür fakat bu artışın saf bitüm ile hazırlanan karışımlarda meydana gelen artışa göre çok düşük olması, kirecin olumlu etkisinin düşük karıştırma sıcaklıklarında azaldığını göstermiştir.



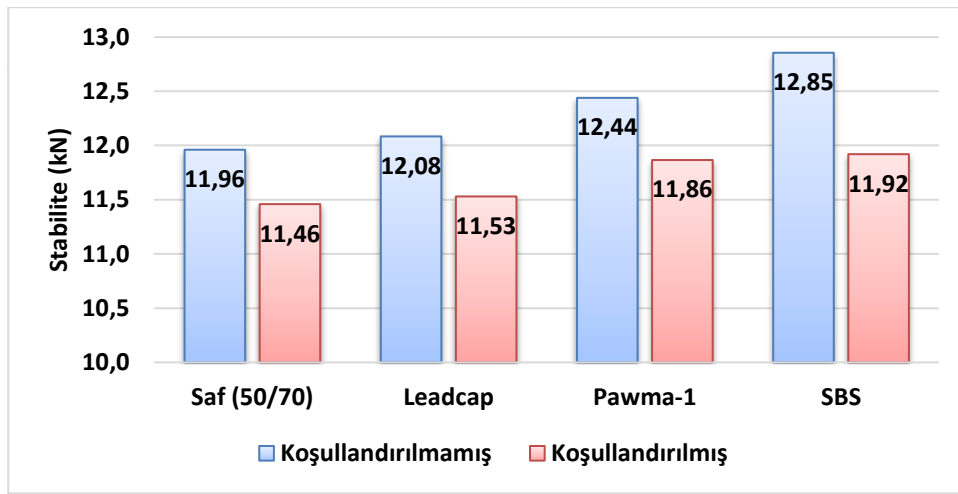
Şekil 6.72. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Akma değerleri

Bütün karışımların akma değerleri, 2-4 mm aralığı olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Tüm karışımlarda kireç katkısı ile akma bir miktar azalmıştır. En düşük akma kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımlarda görülürken en yüksek akma değerleri saf (50/70) karışımlarda görülmüştür. SBS katkısı ile akma değeri %7,93 oranında azalırken, sönmüş kireç ilavesi ile azalma oranı %17,28 olmuştur. Leadcap katkısı ile akma değeri %20,96 oranında azalırken, sönmüş kireç ilavesi ile azalma oranı %23,80 olmuştur. Pawma-1 katkısı ile akma değeri %10,20 oranında azalırken, sönmüş kireç ilavesi ile azalma oranı %13,60 olmuştur. B 50/70 (saf) karışımın akma değeri kireç ilavesi ile %10,20 oranında azalmıştır.



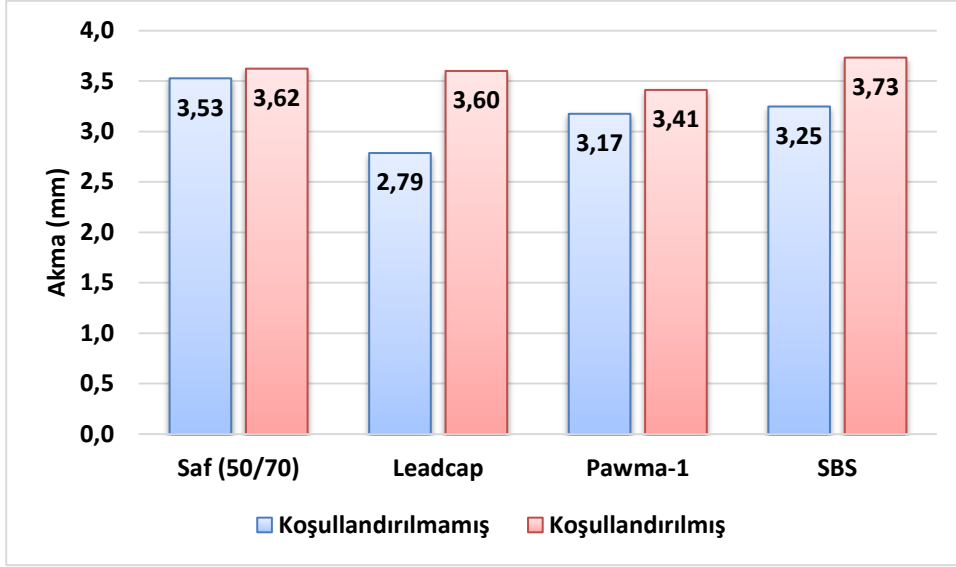
Şekil 6.73. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin Marshall oranı değerleri

Marshall oranı değeri, stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile tespit edilmektedir. Kireç içermeyen modifiye karışımlarda Marshall oranı değerleri artmıştır. Marshall oranı, Leadcap modifiyeli karışımlarda %27,88 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %15,52 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %16,73 oranında artmıştır. Kireç katkısı ile tüm karışımların Marshall oranı değerleri artmıştır. Marshall oranı kireç katkılı, saf (50/70) karışımlarda %24,85 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %4,44 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %5,90 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %17,46 oranında artmıştır.



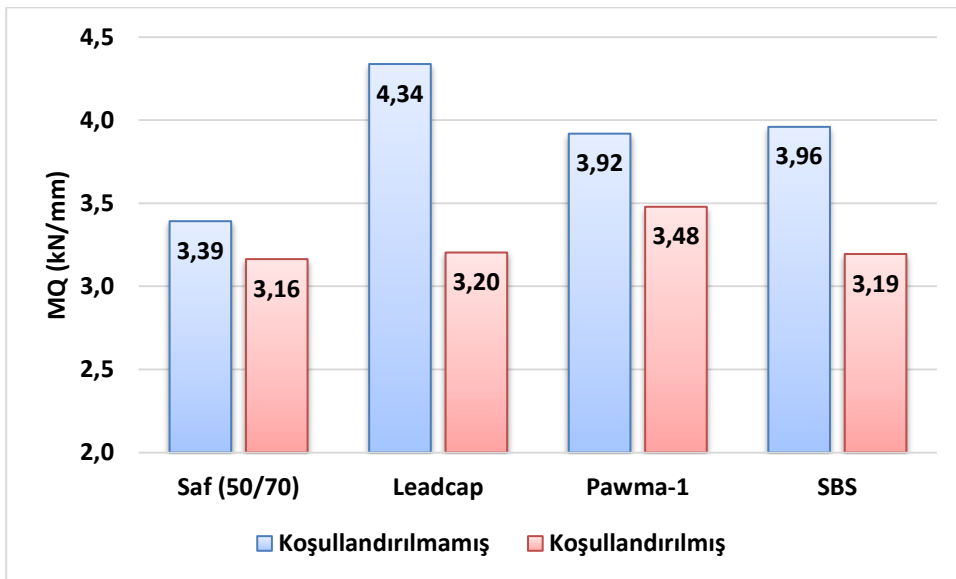
Şekil 6.74. Koşullandırılmış kireç katkısız numunelerin Marshall stabilite değerlerindeki değişim

Koşullandırma neticesinde saf (50/70) karışımlarda %4,19 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %4,58 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %4,61 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %7,27 oranında stabilite değeri azalmıştır. Katkı kullanımı ile nem hasarına karşı dayanım azalmıştır. Koşullandırılmış karışımların stabilite değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülürken en yüksek stabilite değeri SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış karışımlarda stabilite değerleri saf karışımlara oranla Leadcap modifiyeli karışımlarda %0,61 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %3,49 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %4,01 oranında artmıştır.



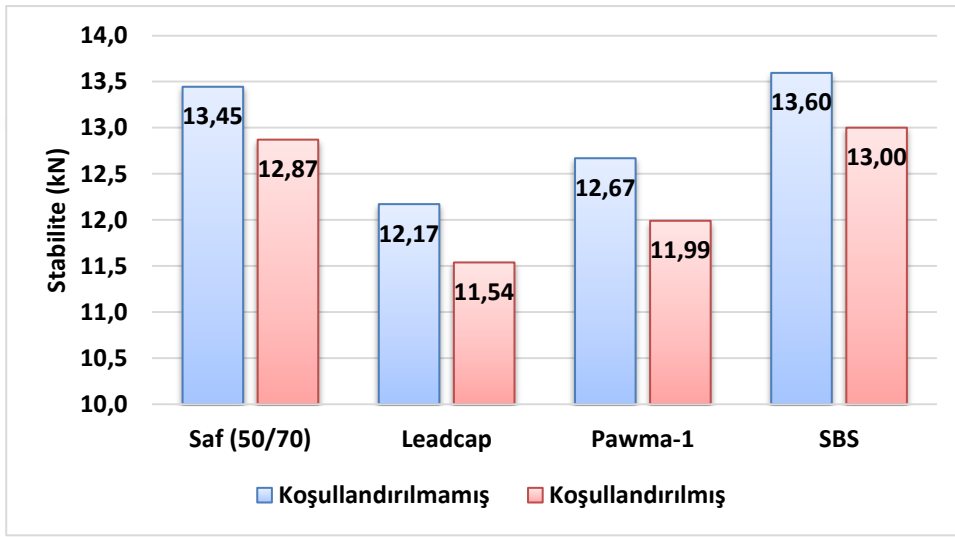
Şekil 6.75. Koşullandırılmış kireç katkısız numunelerin Akma değerlerindeki değişim

Koşullandırma neticesinde saf karışımlarda %2,72 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %29,20 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %7,46 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %4,25 oranında akma değeri artmıştır. Koşullandırılmış numunelerde en düşük akma değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış karışımlarda saf karışımlara oranla, Leadcap modifiyeli karışımlarda %0,55 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %5,8 oranında akma değerleri azalırken SBS modifiyeli karışımlarda %3,03 oranında akma değerleri artmıştır.



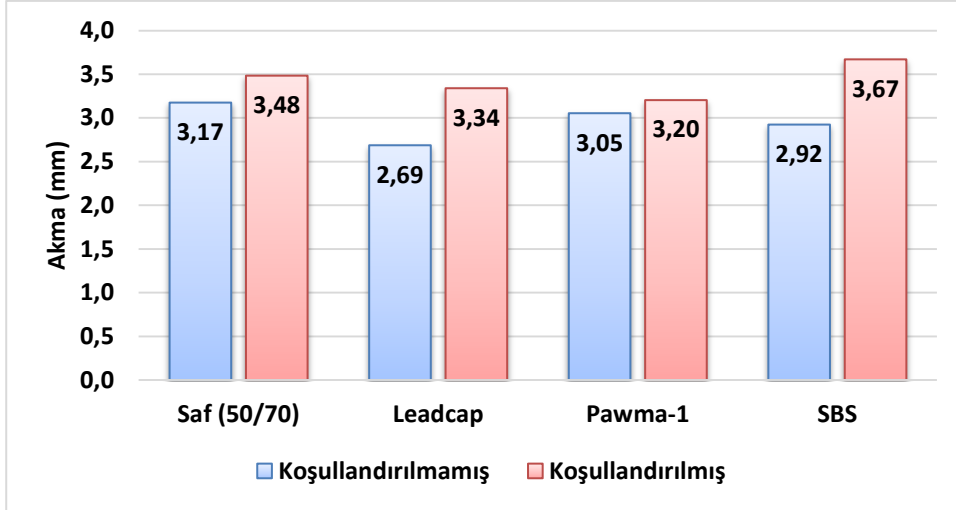
Şekil 6.76. Koşullandırılmış kireç katkısız numunelerin Marshall oranı değerlerindeki değişim

Koşullandırma neticesinde saf karışımlarda %6,73 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %26,15 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %11,23 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %19,32 oranında Marshall oranı değerleri azalmıştır. Koşullandırılmış numunelerde en yüksek Marshall oranı değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış numunelerde saf karışımlara oranla, Leadcap modifiyeli karışımlarda %1,26 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %10,12 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %0,95 oranında Marshall oranı değerleri artmıştır.



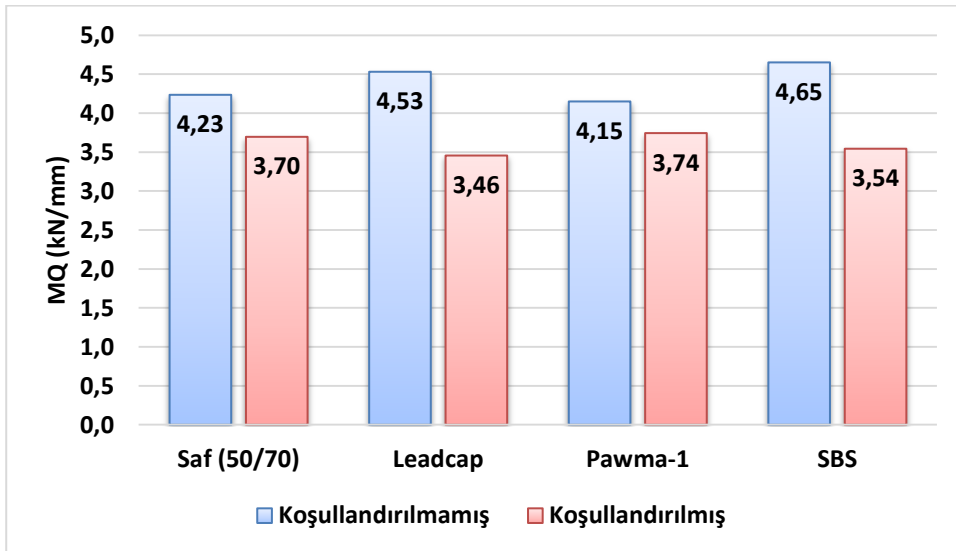
Şekil 6.77. Sönmüş kireç katkıli koşullandırılmış numunelerin Marshall stabilite değerlerindeki değişim

Koşullandırma neticesinde sönmüş kireç katkıli, saf (50/70) karışımlarda %4,27 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %5,20 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %5,36 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %4,37 oranında stabilite değeri azalmıştır. Koşullandırılmış karışımlarda stabilite değerleri saf karışımlara oranla Leadcap modifiyeli karışımlarda %10,33 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %6,83 oranında azalırken, SBS modifiyeli karışımlarda %1,01 oranında artmıştır.



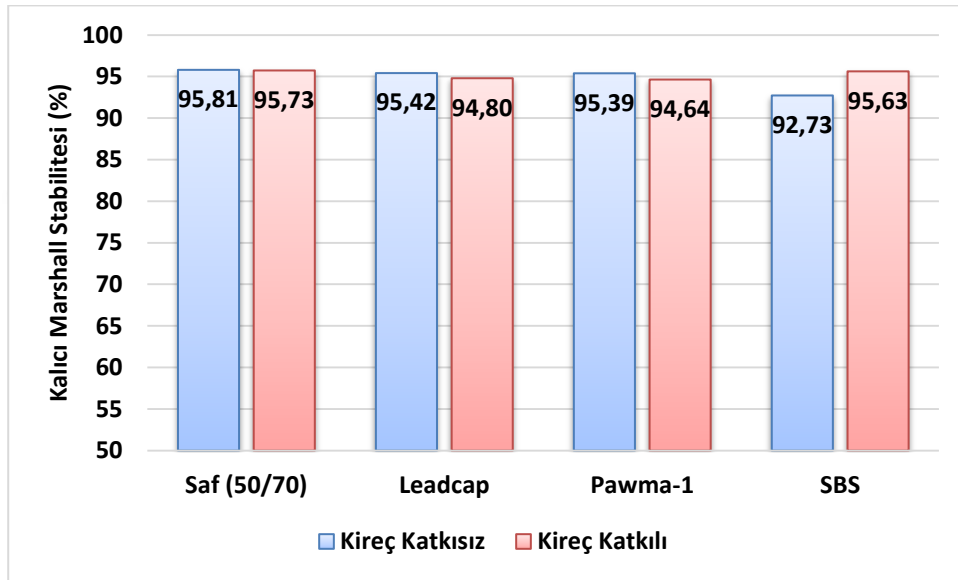
Şekil 6.78. Sönmüş kireç katkıli koşullandırılmış numunelerin Akma değerlerindeki değişim

Koşullandırma neticesinde tüm karışımlarda akma değerleri artmıştır. Saf (50/70) karışımlarda %9,71 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %24,30 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %4,91 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %25,54 oranında bir artış görülmüştür. Koşullandırma neticesinde akma değeri en fazla değişen sönmüş kireç katkıli SBS modifiyeli karışımlar olmuştur. Koşullandırılmış karışımlarda saf karışımlara oranla, Leadcap modifiyeli karışımlarda %4,02 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %8,04 oranında akma değerleri azalırken SBS modifiyeli karışımlarda %5,46 oranında akma değerleri artmıştır.



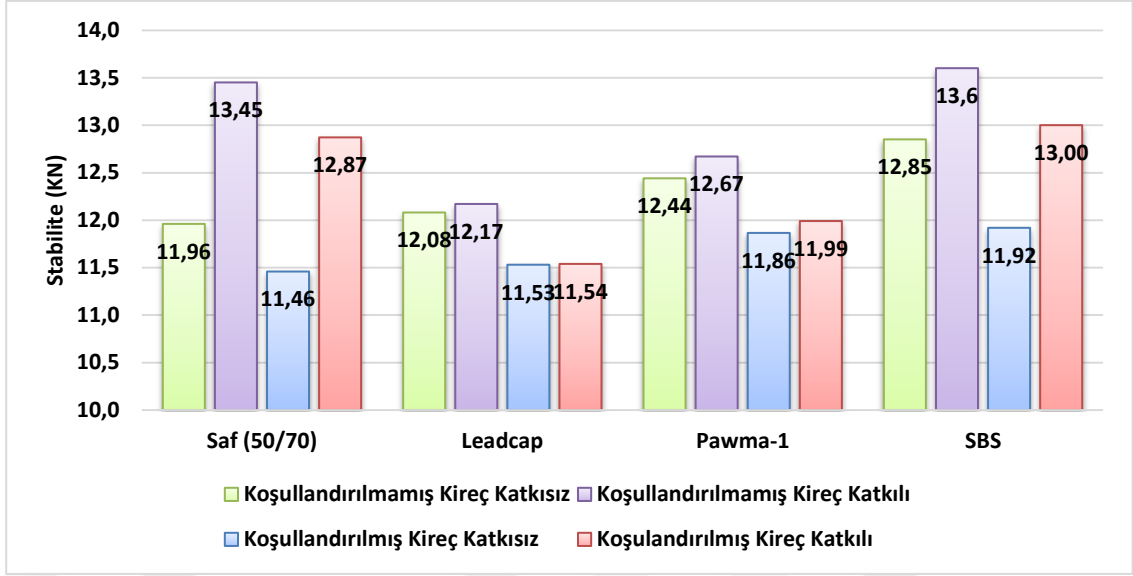
Şekil 6.79. Sönmüş kireç katkıli koşullandırılmış numunelerin Marshall oranı değerlerindeki değişim

Koşullandırma neticesinde sönmüş kireç katkılı saf karışımlarda %12,74 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %23,73 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %9,79 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %23,83 oranında Marshall oranı değeri azalmıştır. Koşullandırılmış numunelerde en yüksek Marshall oranı değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Sönmüş kireç katkılı ve katkısız numunelerin kalıcı Marshall stabilitesi belirlenmiş ve şekil 6.80’de gösterilmiştir.



Şekil 6.80. Numunelerin kalıcı Marshall stabilitesi değerleri

Bütün numunelerin kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinin yüksek oranlarda, birbirlerine yakın olduğu ve numunelerin nem hasarına karşı dayanıklı oldukları görülmüştür. Sönmüş kireç katkısının kalıcı Marshall stabilitesi değerlerini fazla etkilemediği görülmüştür. Şekil 6.81’de bütün numunelerin stabilite değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 6.81. Numunelerin Marshall stabilitelerindeki değişim

Numunelerin stabilite değerlerindeki değişimlere bakıldığında, kirecin yüksek karıştırma sıcaklıklarında etkinliğinin arttığı ve stabiliteyi yüksek oranlarda arttırdığı, düşük karıştırma sıcaklıklarında ise etkinliğinin azaldığı ve stabiliteyi küçük oranlarda arttırdığı görülmektedir.

6.5.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları

Her bir karışım türü için 6 adet $\pm 0,5$ boşluk oranına sahip numune hazırlanmıştır. Bu boşluk oranını sağlamak için Marshall tokmağı ile numunelerin iki yüzüne 30 darbe uygulanmıştır. Koşullandırılacak numunelere 5 dakika süresince vakum uygulanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan kavramlar Tablo 6.17’de, formüller tablonun altında verilmiştir. Koşullandırılmamış karışımlardan elde edilen sonuçlar Tablo 6.18’de, koşullandırılmış karışımlardan elde edilen sonuçlar Tablo 6.19’da, sönmüş kireç katkılı koşullandırılmamış karışımlardan elde edilen sonuçlar Tablo 6.20’de, sönmüş kireç katkılı koşullandırılmış karışımlardan elde edilen sonuçlar Tablo 6.21’de gösterilmiştir. Karışımların ITS değerleri Şekil 6.82’de, ITS değerleri Şekil 6.83’de gösterilmiştir.

Tablo 6.17. Nem hasarına karşı dayanım testi hesaplamalarında kullanılan kavramlar

Hesaplamalarda Kullanılan Kavramalar	
J	Absorbe su hacmi (cm ³)
B'	Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı (gram)
B	Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gram)
S'	Doygunluk derecesi (%)
I	Hava boşluğu hacmi (cm ³)
Va	Hava boşluğu yüzdesi
V	Numune hacmi (cm ³)
TS	Çekme dayanımı (kPa)
P_{mak}	Kırılmaya neden olan maksimum yük (kN)
d	Numune çapı (m)
t	Ortalama numune yüksekliği (m)
TSR	Çekme dayanımı oranı (%)
TS_{yaş}	Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerleri (kPa)
TS_{kuru}	Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerleri (kPa)

$$J = B' - B \quad (6.12)$$

$$I = V_a \times V / 100 \quad (6.13)$$

$$S' = J / I \times 100 \quad (6.14)$$

$$TS = (2 \times P_{mak}) / (\pi \times d \times t) \quad (6.15)$$

$$TSR = (TS_{yaş} / TS_{kuru}) \times 100 \quad (6.16)$$

Tablo 6.18. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Karışım	Numune No	H _{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (g)	Sudaki Ağırlık (g)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (g)	D _p	D _t	Boşluk (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
Saf (50/70)	1	59,6	1145,67	658,35	1151,35	2,324	2,502	7,12	8,31	887,3
	2	59,5	1143,88	658,08	1150,03	2,325		7,07	8,19	875,9
	3	58,9	1144,64	657,98	1151,10	2,321		7,23	7,65	826,5
	Ort									863,2
Leadcap	1	59,4	1145,48	659,04	1152,34	2,322	2,499	7,08	7,37	789,6
	2	58,8	1146,34	660,09	1152,91	2,326		6,92	7,49	810,6
	3	59,6	1143,51	658,49	1150,19	2,326		6,94	7,71	823,2
	Ort									807,8
Pawma -1	1	59,9	1138,98	655,53	1145,23	2,326	2,501	7,00	7,16	760,7
	2	60,0	1146,65	659,16	1153,30	2,320		7,22	7,3	774,2
	3	60,4	1133,19	651,58	1139,16	2,324		7,07	7,21	759,6
	Ort									764,8
SBS	1	59,4	1145,56	658,72	1150,72	2,328	2,497	6,75	9,55	1023,1
	2	59,5	1145,15	659,77	1151,66	2,328		6,77	8,95	957,2
	3	59,9	1147,18	660,07	1154,47	2,320		7,07	8,33	885,0
	Ort									955,1

Tablo 6.19. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

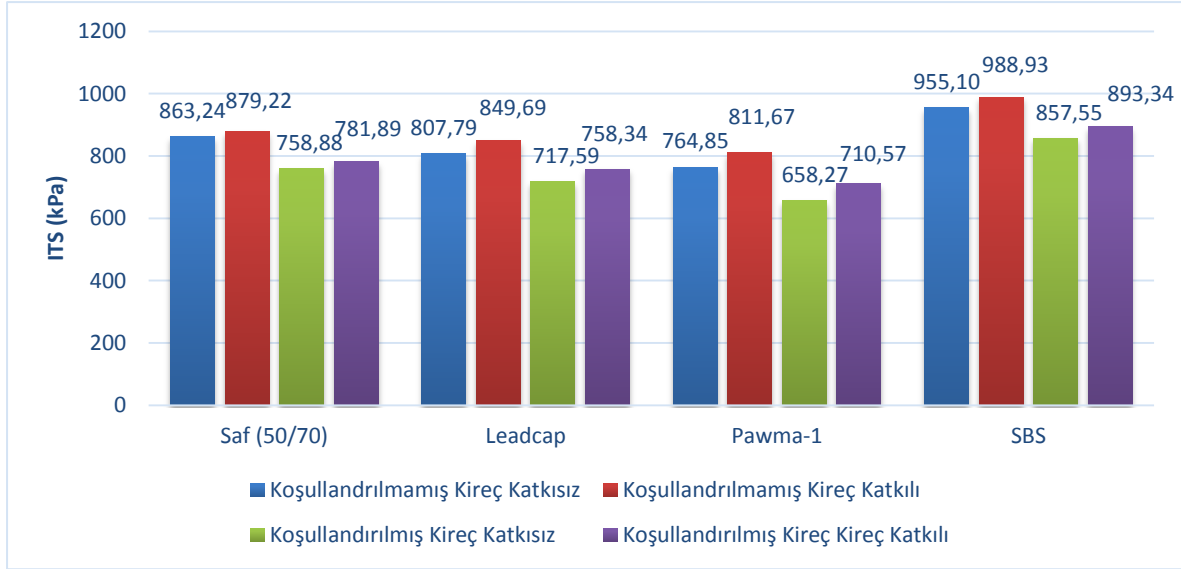
Karışım	Numune No	H _{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (g)	Sudaki Ağırlık (g)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (g)	Vakum Sonrası (g)	D _p	D _t	Boşluk (%)	Doygunluk Derecesi (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
Saf (50/70)	1	59,7	1143,79	658,43	1150,83	1169,29	2,323	2,502	7,16	72,34	7,49	798,4
	2	59,9	1144,44	658,86	1152,21	1171,48	2,320		7,28	75,24	6,68	709,7
	3	59,2	1134,27	653,88	1141,93	1159,52	2,324		7,11	72,76	7,15	768,6
	Ort											758,9
Leadcap	1	59,3	1145,92	660,63	1153,21	1171,32	2,326	2,499	6,91	74,64	6,79	728,7
	2	60,0	1145,73	660,15	1153,30	1172,33	2,323		7,03	76,71	6,69	709,5
	3	59,4	1145,69	659,39	1152,26	1171,39	2,325		6,98	74,69	6,67	714,6
	Ort											717,6
Pawma- 1	1	59,7	1145,27	659,25	1152,85	1172,45	2,320	2,501	7,23	76,19	6,28	669,4
	2	60,4	1144,13	659,58	1152,62	1171,68	2,321		7,21	77,45	6,03	635,3
	3	60,4	1146,34	659,75	1153,44	1172,62	2,322		7,16	74,37	6,36	670,1
	Ort											658,3
SBS	1	58,7	1143,93	658,62	1149,48	1168,17	2,330	2,497	6,67	74,04	8,43	913,9
	2	59,3	1145,67	659,09	1151,52	1170,92	2,327		6,83	75,12	7,82	839,2
	3	59,4	1143,40	656,04	1149,02	1169,98	2,319		7,11	75,79	7,65	819,6
	Ort											857,5

Tablo 6.20. Sönmüş kireç katkıli koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Karışım	Numune No	H _{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (g)	Sudaki Ağırlık (g)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (g)	D _p	D _t	Boşluk (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
Saf (50/70)	1	58,7	1146,45	649,49	1153,26	2,276	2,443	6,85	7,66	830,4
	2	59,9	1146,44	648,46	1152,93	2,273		6,98	8,55	908,3
	3	58,9	1144,44	647,47	1150,70	2,274		6,91	8,32	898,9
	Ort								0	879,2
Leadcap	1	59,8	1144,96	647,32	1151,54	2,271	2,443	7,05	7,89	839,6
	2	59,5	1148,26	649,73	1154,50	2,275		6,88	7,96	851,3
	3	59,4	1146,14	646,75	1152,23	2,267		7,19	8,01	858,1
	Ort									849,7
Pawma -1	1	59,6	1146,56	648,35	1153,42	2,270	2,442	7,04	7,33	782,6
	2	59,4	1147,34	646,69	1153,27	2,265		7,25	7,32	784,2
	3	59,3	1144,58	647,06	1150,65	2,273		6,93	8,09	868,2
	Ort									811,7
SBS	1	59,3	1144,09	645,93	1150,66	2,267	2,440	7,10	9,58	1028,1
	2	59,0	1146,80	647,94	1153,60	2,268		7,05	9,08	979,4
	3	59,3	1144,53	645,31	1150,42	2,266		7,14	8,94	959,4
	Ort									988,9

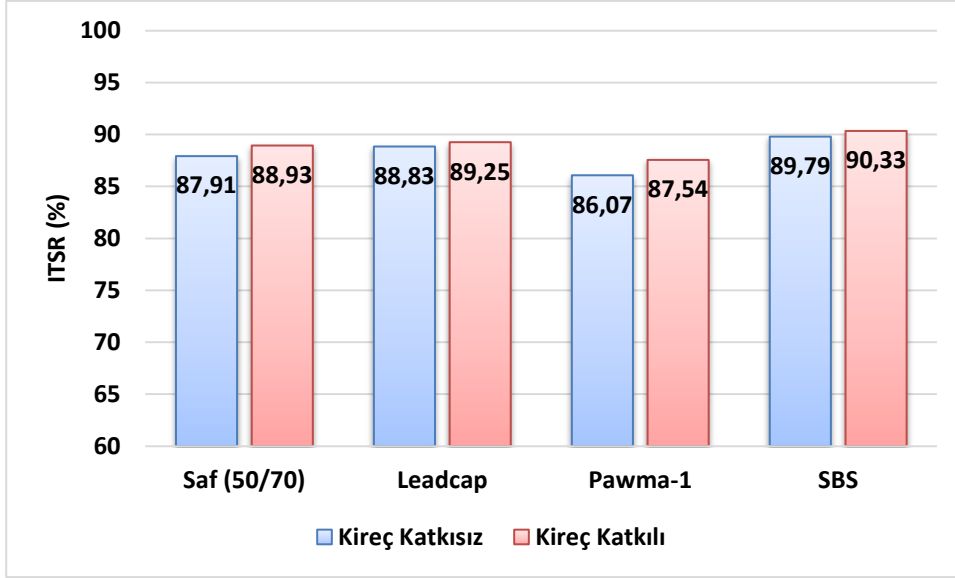
Tablo 6.21. Sönmüş kireç katkı koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Karışım	Numune No	H _{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (g)	Sudaki Ağırlık (g)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (g)	Vakum Sonrası (g)	D _p	D _t	Boşluk (%)	Doygunluk Derecesi (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
Saf (50/70)	1	58,9	1145,50	647,72	1151,93	1172,24	2,272	2,443	7,00	75,71	7,49	809,2
	2	59,9	1147,23	648,70	1155,42	1174,48	2,264		7,33	73,41	7,17	761,7
	3	59,8	1146,10	646,97	1153,06	1173,93	2,265		7,30	75,31	7,28	774,7
	Ort											781,9
Leadcap	1	60,0	1147,95	646,69	1153,28	1175,82	2,266	2,443	7,24	75,95	6,85	726,5
	2	60,3	1146,14	646,75	1152,83	1174,73	2,265		7,30	77,42	7,57	798,9
	3	59,0	1145,12	647,45	1151,63	1171,19	2,271		7,03	73,55	6,95	749,6
	Ort											758,3
Pawma- 1	1	59,5	1147,64	647,40	1154,30	1174,33	2,264	2,442	7,29	72,25	6,95	743,3
	2	59,9	1148,66	647,84	1155,66	1176,69	2,262		7,37	74,86	6,29	668,2
	3	60,0	1144,70	647,87	1152,58	1172,42	2,268		7,12	77,10	6,79	720,2
	Ort											710,6
SBS	1	58,9	1144,64	648,69	1151,78	1169,18	2,275	2,440	6,75	72,23	8,65	934,6
	2	59,3	1144,41	647,22	1151,12	1170,90	2,271		6,92	75,95	8,07	866,0
	3	58,9	1147,28	649,89	1153,27	1171,83	2,279		6,59	73,98	8,14	879,5
	Ort											893,3



Şekil 6.82. Karışımların ITS değerleri

Koşullandırılmamış kireç katkısız karışımlar incelendiğinde ITS değeri, Leadcap modifiyeli karışımlarda %6,42 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %11,39 oranında azalmış, SBS modifiyeli karışımlarda %10,64 oranında artmıştır. Sönmüş kireç katkısı ile bütün karışımların ITS değerlerinde artış meydana gelmiştir. ITS değeri sönmüş kireç katkısı ile saf (50/70) karışımlarda %1,85 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %5,18 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %6,12 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %3,54 oranında artmıştır. En yüksek ITS değeri sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış kireç katkısız karışımlar incelendiğinde ITS değeri, Leadcap modifiyeli karışımlarda %5,44 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %13,26 oranında azalmış, SBS modifiyeli karışımlarda %13,0 oranında artmıştır. Sönmüş kireç katkısı ile bütün koşullandırılmış karışımların ITS değerlerinde artış meydana gelmiştir. ITS değeri sönmüş kireç katkısı ile saf (50/70) karışımlarda %3,03 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %5,68 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %7,95 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %4,17 oranında artmıştır. En yüksek ITS değeri sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



Şekil 6.83. Karışımların ITSR değerleri

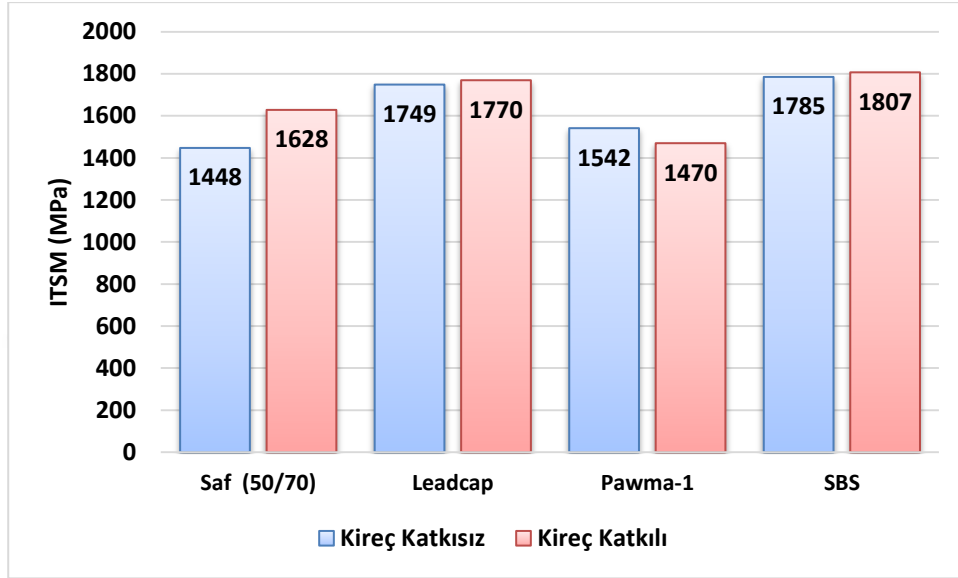
Bütün karışımların ITSR değerlerinin %80'in üzerinde olduğu görülmüştür. Sönmüş kireç katkısı bütün karışımların ITSR değerlerini arttırmıştır. Sönmüş kireç katkısı ile saf karışımlarda %1,16 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %0,47 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %1,70 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %0,60 oranında ITSR değerleri artmıştır. En yüksek ITSR değeri sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür. En düşük ITSR değeri kireç içermeyen Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülmüştür.

Elde edilen sonuçlardan Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli ılık karışım asfaltların çekme dayanımı değerlerinin kontrol numunelerine göre bir miktar azaldığı görülmüştür. Sönmüş kireç katkısı ile Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli ılık karışım asfaltların çekme dayanımı değerlerinin, kontrol numunelerine göre daha yüksek oranlarda arttığı ve kontrol numunelerine yakın çekme değerleri olduğu görülmüştür. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların ITS ve ITSR değerlerine bakıldığında SBS modifiyeli karışımların en olumlu sonuçları verdikleri görülmüştür.

6.5.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri, UMATTA deney aleti kullanılarak 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyde yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5

mikron olarak seçilmiştir. Deneyde poisson oranı 0,35 olarak alınmıştır. Deneyde her bir karışım için 3 adet karışım numunesi hazırlanmıştır. Deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 6.22’de, karışımların ortalama ITSM değerleri Şekil 6.84’de gösterilmiştir.



Şekil 6.84. Karışımların ITSM değerleri

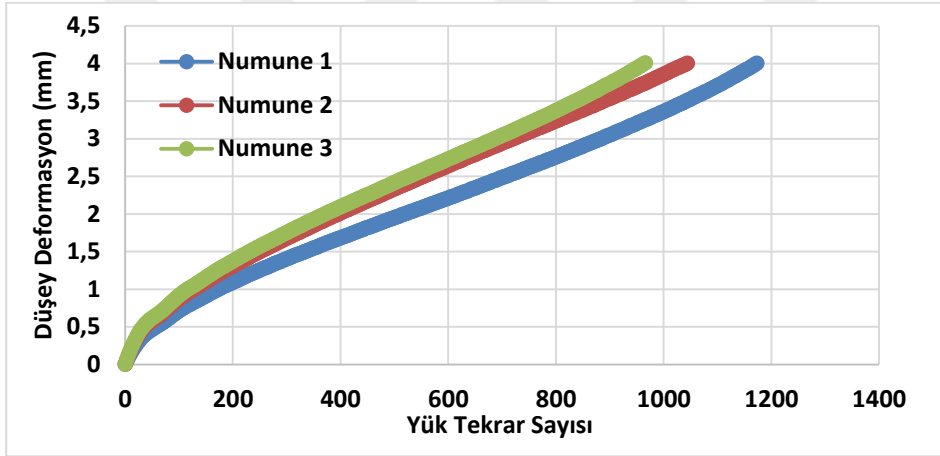
Kireç katkısız karışımlar incelendiğinde, Leadcap modifiyeli karışımlarda %20,81 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %6,49 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %23,33 oranında ITSM değerlerinin arttığı görülmüştür. Kireç katkılı karışımlar incelendiğinde Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %9,72 oranında ITSM değerinin azaldığı, Leadcap modifiyeli karışımlarda %8,67 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %10,97 oranında ITSM değerinin arttığı görülmüştür. Saf (50/70) karışımlara sönmüş kireç ilave edilmesiyle ITSM değeri %12,49 oranında artmıştır. En yüksek ITSM değerleri SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür, kireç katkısı ile bu değerlerde artış görülmüştür. En düşük ITSM değerleri kireç katkısız saf karışımlarda görülmüştür. Kireç katkısı ile ITSM değerlerinde % olarak en büyük artış saf karışımlarda olmuştur.

Tablo 6.22. ITSM Deney sonuçları

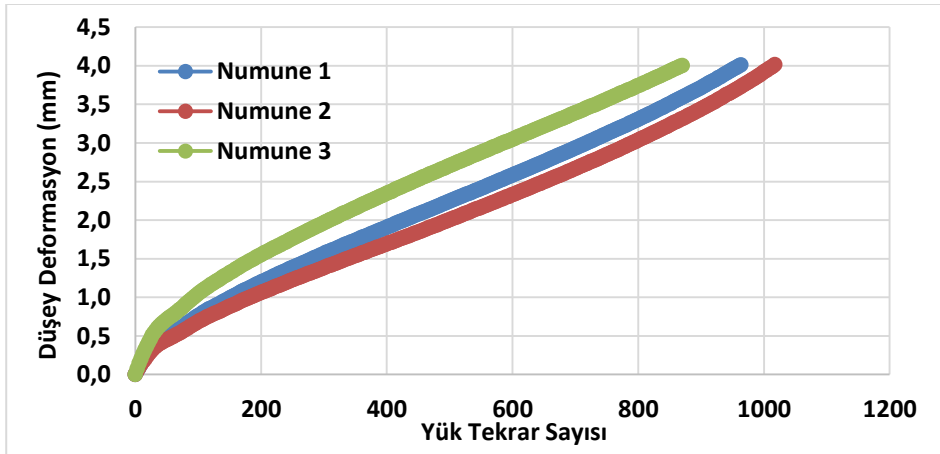
Numune No	Deneme No	Kireç İçermeyen Karışımlar															
		Saf (50/70)			Pawma-1			Leacadap			SBS						
		h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)				
1	1	57,0	1304	1448	58,3	1742	1542	58,0	1705	1749	57,7	1641	1785				
	2		1449			1688			1631			1512					
2	1	57,4	1556		57,7	1439		57,7	1822		57,2	1999					
	2		1537			1577			1891			1875					
3	1	57,5	1450		57,8	1367		57,6	1745		57,2	1735					
	2		1389			1436			1699			1949					
Numune No	Deneme No	Kireç Katkılı Karışımlar															
		Saf (50/70)			Pawma-1			Leacadap			SBS						
		h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)				
1	1	58,2	1513	1628	58,6	1556	1470	58,0	1748	1770	57,9	1913	1807				
	2		1551			1392			1784			1824					
2	1	58,1	1695		58,6	1524		58,4	1785		58,0	1613					
	2		1615			1403			1626			1761					
3	1	58,7	1656		58,5	1530		58,3	1797		57,8	1947					
	2		1740			1415			1877			1784					

6.5.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

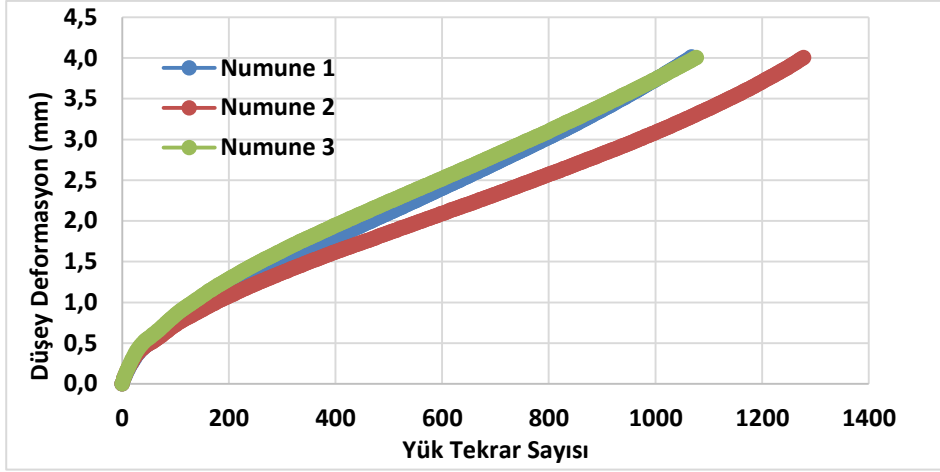
İndirekt çekme yorulma deneyi, numunelere gerilme, kontrollü olarak 300 kPa gerilme seviyesinde uygulanmıştır. Deney 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Yükleme periyodu 1,5 saniye, yük etki süresi 0,124 saniye olarak ayarlanmıştır. Her bir karışım için 3 adet numune hazırlanmıştır. Bu numuneler deneye başlanmadan önce 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Deney, numuneler kırılıncaya ya da düşey deformasyonun %100 olduğu zamana kadar devam ettirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan hiçbir numune kırılmaya uğramamış, bütün numunelerde deformasyon %100 olduğu zaman deney sonlandırılmıştır. Kireç içermeyen karışımların deney sonuçları Şekiller 6.85-6.89’da gösterilmiştir. Kireç katkılı karışımların deney sonuçları Şekiller 6.90- 6.94’de gösterilmiştir.



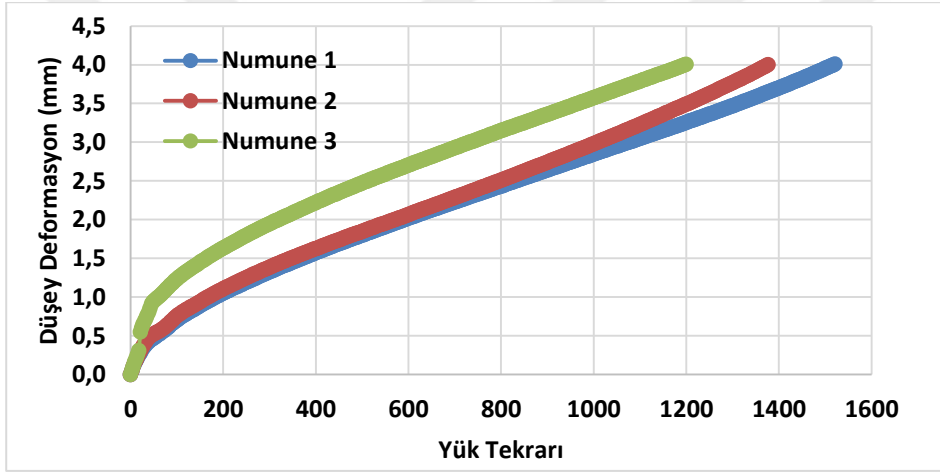
Şekil 6.85. Saf (50/70) karışımların düşey deformasyon-yük tekrür sayısı ilişkisi



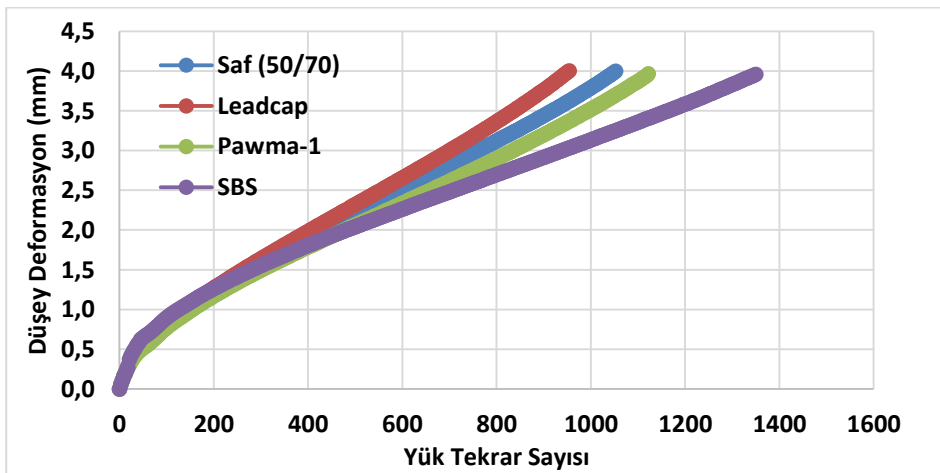
Şekil 6.86. Leadcap modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekrür sayısı ilişkisi



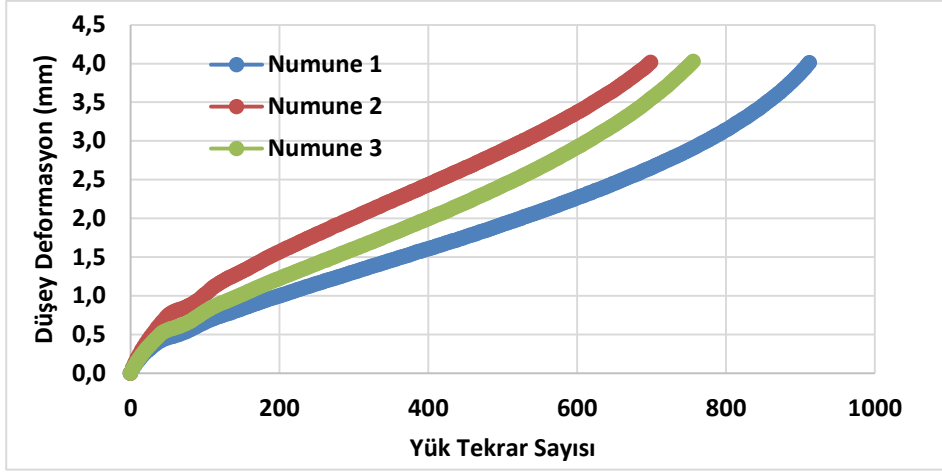
Şekil 6.87. Pawma-1 modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi



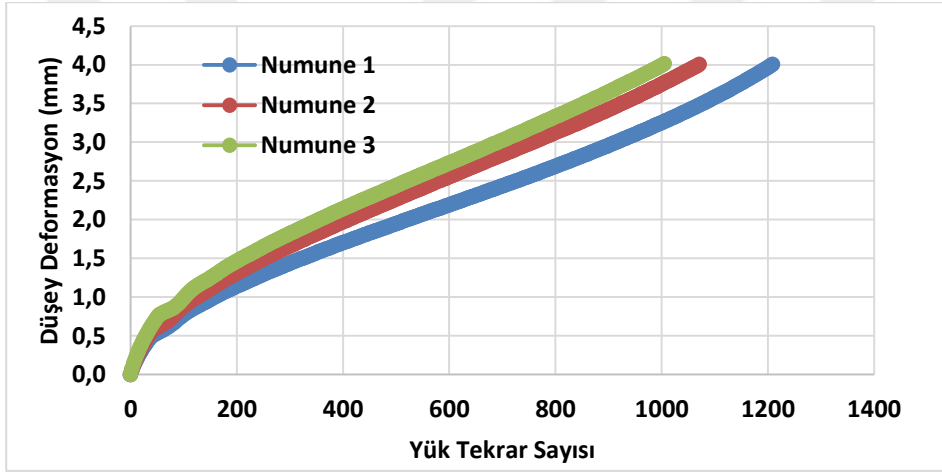
Şekil 6.88. SBS modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi



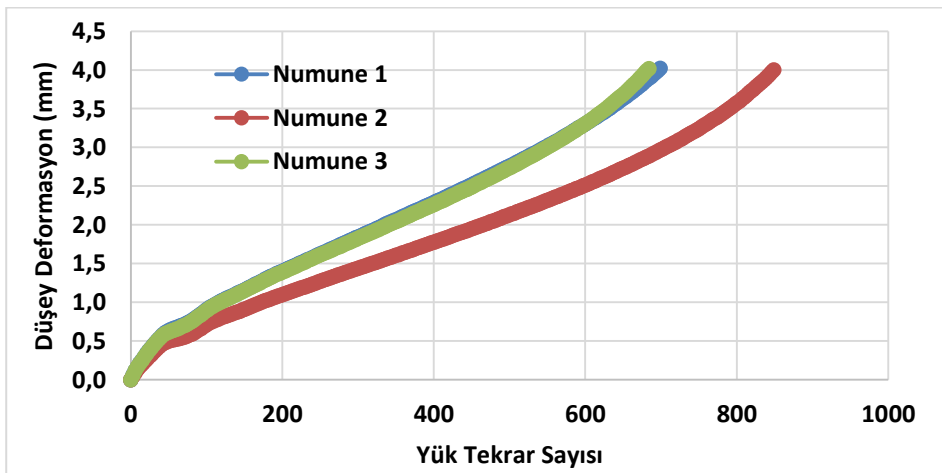
Şekil 6.89. Kireç içermeyen karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi



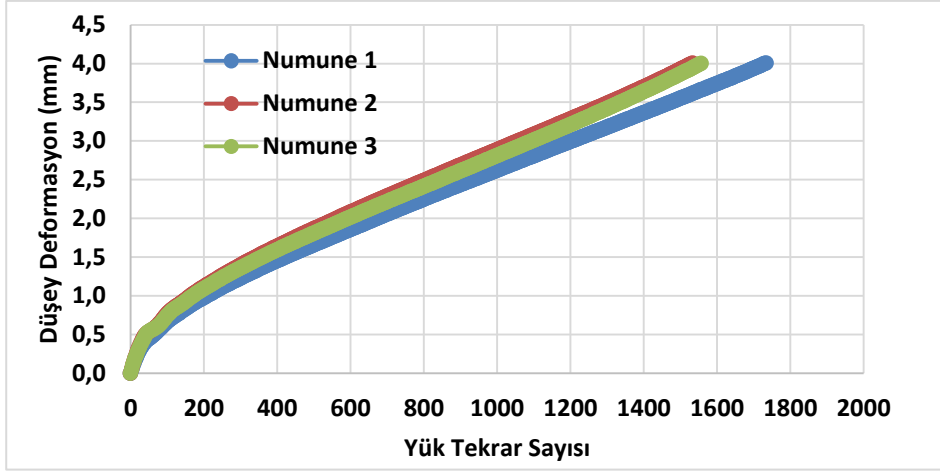
Şekil 6.90. Kireç katkılı saf (50/70) karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi



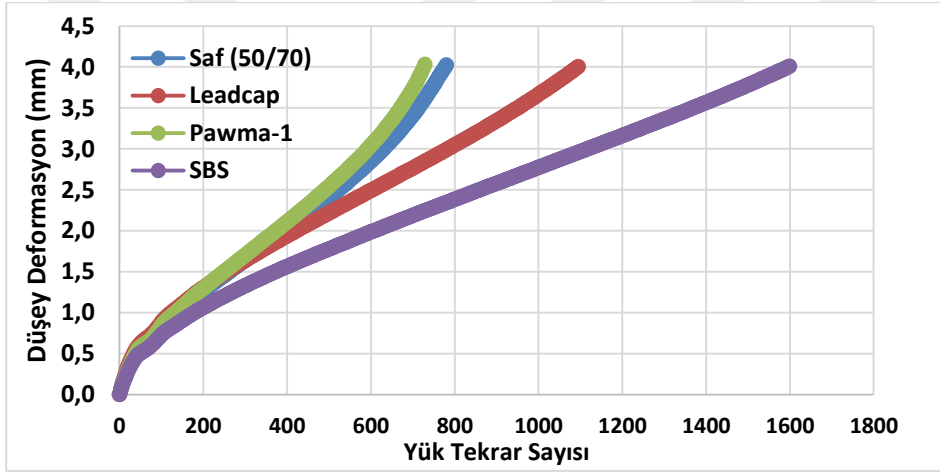
Şekil 6.91. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi



Şekil 6.92. Kireç katkılı Pawma-1 modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi



Şekil 6.93. Kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların düşey deformasyon-yük tekrür sayısı ilişkisi

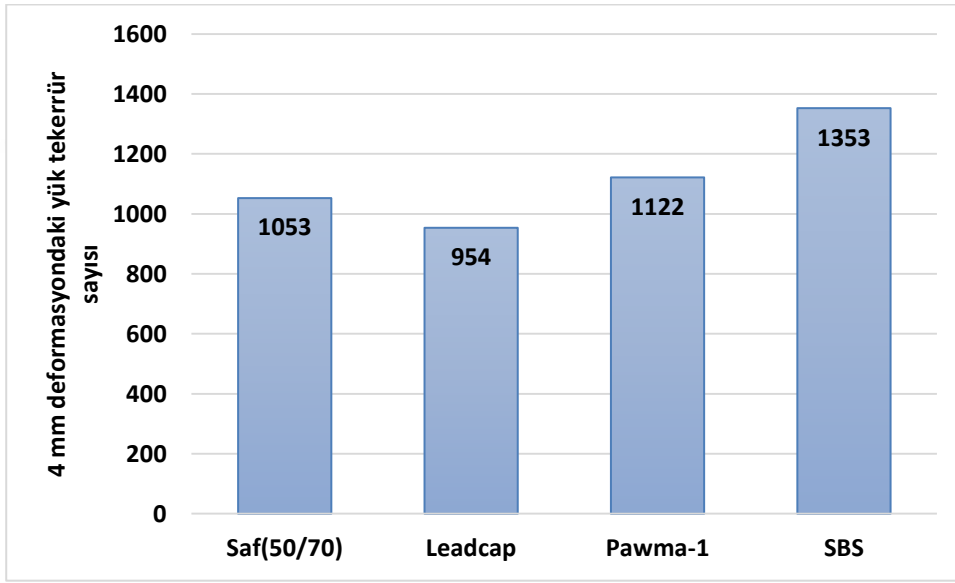


Şekil 6.94. Kireç katkılı karışımların düşey deformasyon-yük tekrür sayısı ilişkisi

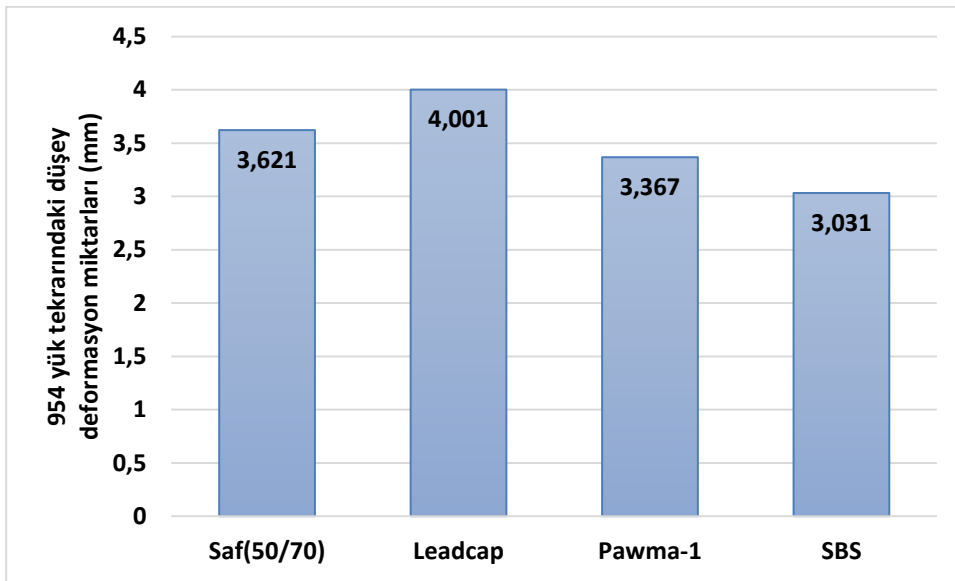
Sonuçların detaylı bir karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla iki farklı değişken belirlenerek, tek bir noktadaki değerler karşılaştırılmıştır. İlk değişken olarak bütün karışımlar için 4 mm deformasyona neden olan yük tekrür sayıları değerlendirilmiştir. İkinci değişken olarak karışımlar incelenerek 4 mm deformasyona neden olan en az darbe sayısı bulunmuş ve bu darbe sayısındaki deformasyonlar değerlendirilmiştir. Kireç içermeyen karışımlar için sonuçlar tablo 6.23’de, kireç katkılı karışımlar için sonuçlar tablo 6.24’de, gösterilmiştir. Bu sonuçların karşılaştırmaları Şekiller 6.95-6.99’da gösterilmiştir.

Tablo 6.23. Kireç içermeyen karışımların yorulma deney sonuçları

Karışım	4 mm deformasyondaki yük tekrar sayısı	954 yük tekrarındaki deformasyon miktarları (mm)
Saf(50/70)	1053	3,621
Leadcap	954	4,001
Pawma-1	1122	3,367
SBS	1353	3,031



Şekil 6.95. Kireç içermeyen karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekrür sayıları

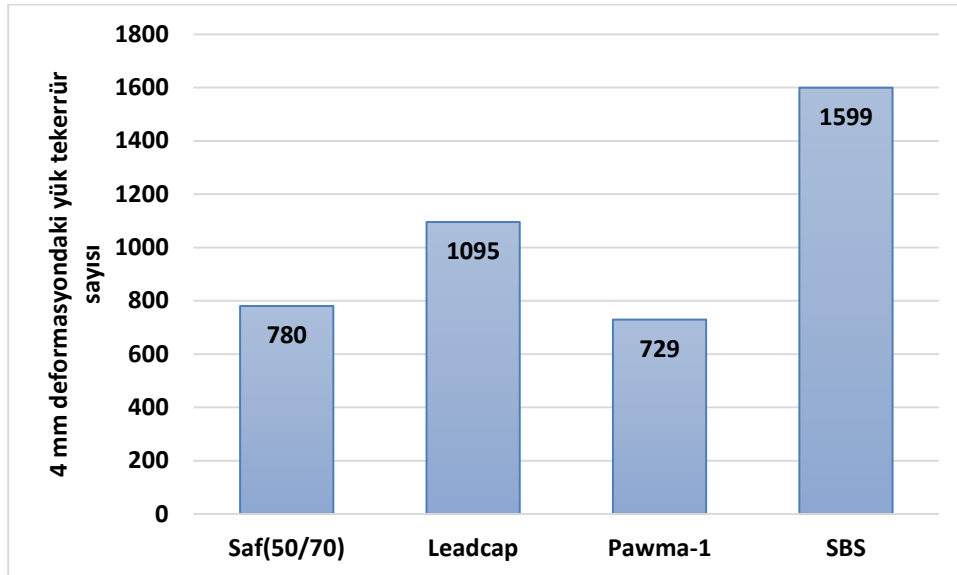


Şekil 6.96. Kireç içermeyen karışımların 954 yük tekrarındaki deformasyon miktarları

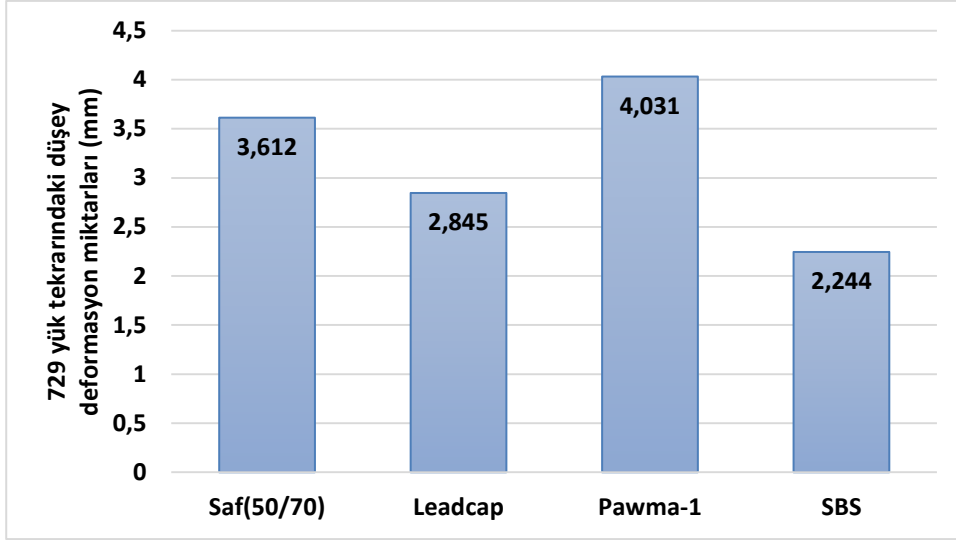
4 mm deformasyona sebep olan yük tekr r sayıları incelendiğinde, kireç içermeyen karışımlar içerisinde SBS modifiyeli karışımlar en yüksek yorulma performansını göstermişlerdir. Leadcap modifiyeli karışımların yorulma performansının azaldığı görülmüştür Leadcap modifiyeli karışımlarda %9,4 oranında azalma görülmüştür. Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %6,55 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %28,49 oranında y k tekr r sayılarında artış görülmüştür. Kireç içermeyen karışımların, 954 y k tekrarındaki düşey deformasyon miktarları incelendiğinde Leadcap modifiyeli karışımlarda %10,49 oranında artış görülmüştür. Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %7,01 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %16,29 oranında deformasyon miktarlarında azalma görülmüştür.

Tablo 6.24. Kireç katkılı karışımların yorulma deney sonuçları

Karışım	4 mm deformasyondaki yük tekrar sayısı	729 yük tekrarındaki deformasyon miktarı (mm)
Saf(50/70)	780	3,612
Leadcap	1095	2,845
Pawma-1	729	4,031
SBS	1599	2,244

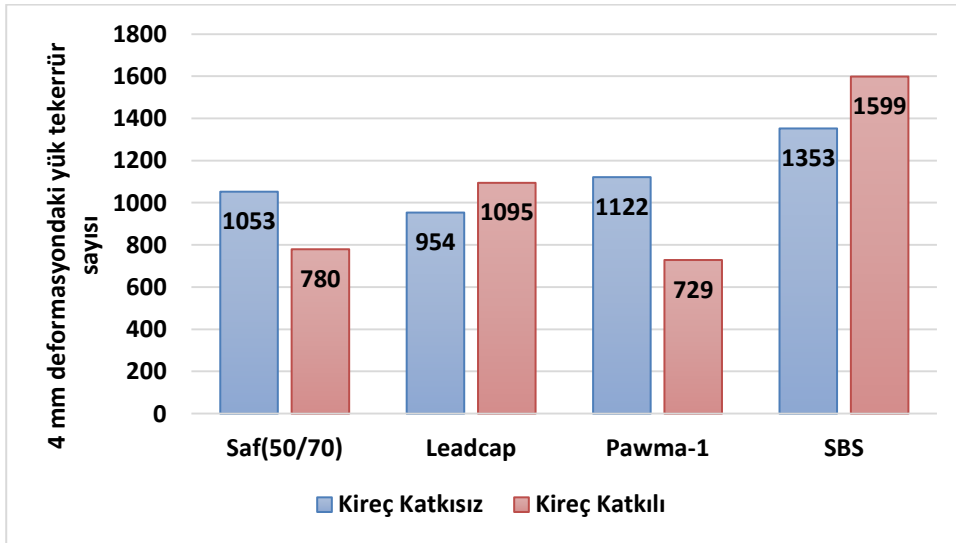


şekil 6.97. Kireç katkılı karışımların 4 mm deformasyondaki y k tekr r sayıları



Şekil 6.98. Kireç katkılı karışımların 729 yük tekrarındaki deformasyon miktarları

4 mm deformasyona sebep olan yük tekrür sayıları incelendiğinde kireç katkılı B 50/70 (saf) karışımlara oranla kireç katkılı Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %6,53 oranında azalma görülmüştür. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımlarda %40,38 oranında, kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda %105,0 oranında yük tekrür sayılarında artış görülmüştür. 729 yük tekrarındaki düşey deformasyon miktarları incelendiğinde Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %11,6 oranında artış görülmüştür. Leadcap modifiyeli karışımlarda %21,23 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %37,87 oranında deformasyon miktarlarında azalma görülmüştür.

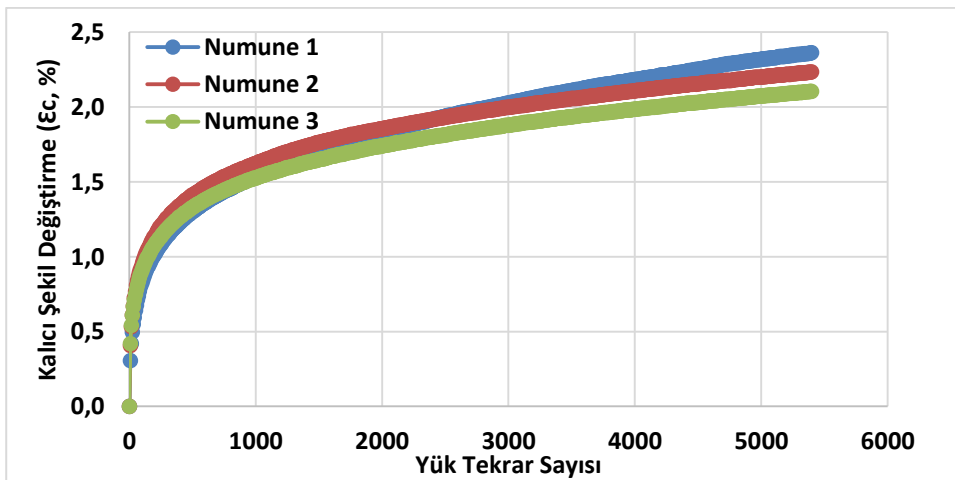


Şekil 6.99. Kireç katkısı ile karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekrür sayılarındaki değişim

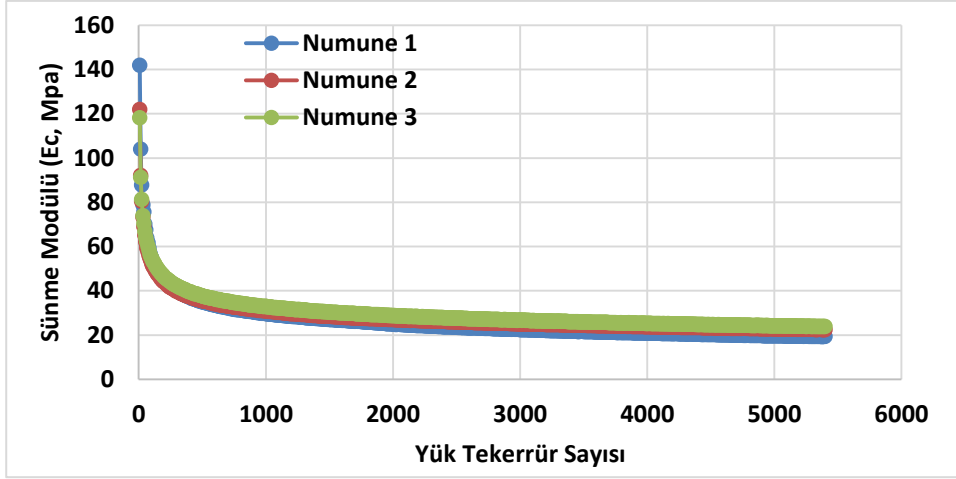
4 mm deformasyona sebep olan yük tekrar sayılarına bakıldığında kireç katkısı ile B 50/70 (saf) karışımlarda %25,93 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %35,03 oranında azalma görülürken, Leadcap modifiyeli karışımlarda %14,78 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %18,08 oranında artış görülmüştür. Kireç katkısı saf (50/70) ve Pawma-1 modifiyeli karışımların yorulma performansını olumsuz yönde etkilerken, Leadcap ve SBS modifiyeli karışımların yorulma performansını iyileştirmiştir. En yüksek yorulma performansı kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımların yorulma performansı, kireç katkısız saf karışımlara oranla %3,9 artmıştır.

6.5.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

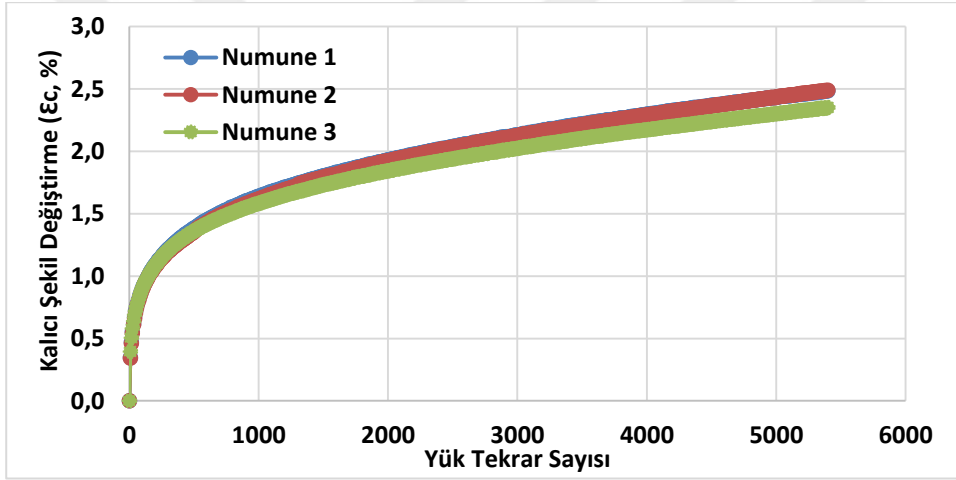
Dinamik sünme deneyi 40°C sıcaklıkta, 500 kPa gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Deneye başlanmadan önce numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılmıştır. Yükleme periyodu 1000 milisaniye olarak alınmıştır. Bu sürenin 500 ms.'si yük etki süresi, 500 ms.'si ise dinlenme süresi olarak seçilmiştir. Her bir karışım türü için 3 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler deneye başlamadan önce 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Deneyde her bir numuneye 5400 darbe uygulandıktan sonra deney sonlandırılmıştır. Kireç içermeyen karışımlardan elde edilen sonuçlar Şekiller 6.100-6.109'da gösterilmiştir. Kireç katkılı karışımlardan elde edilen sonuçlar Şekiller 6.110-6.119'da gösterilmiştir.



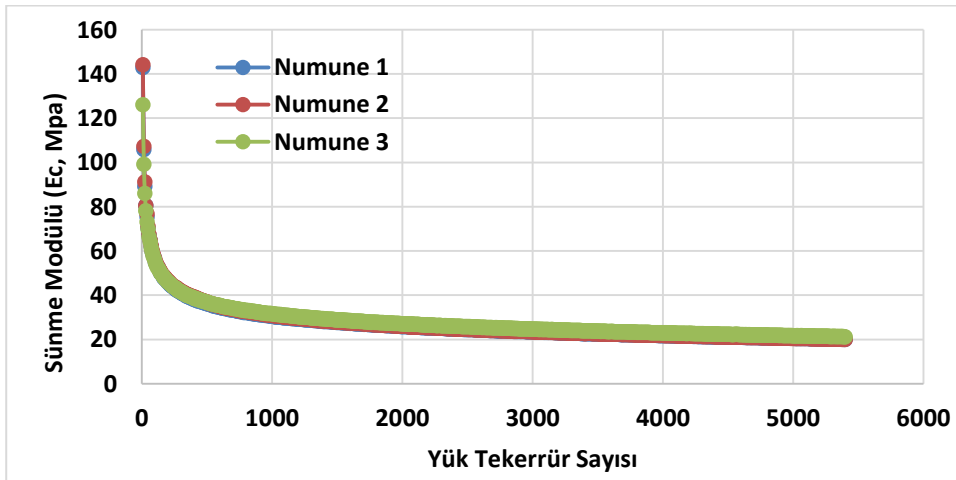
Şekil 6.100. Saf (50/70) karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



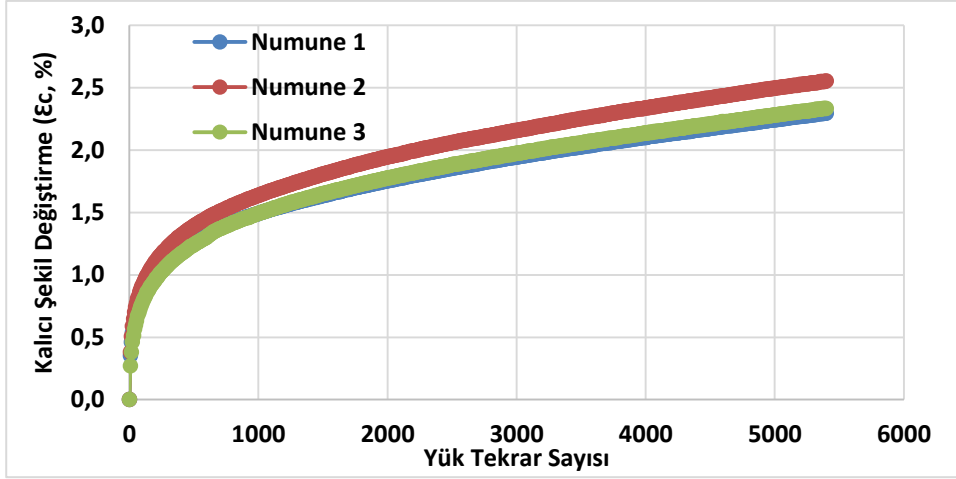
Şekil 6.101. Saf (50/70) karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



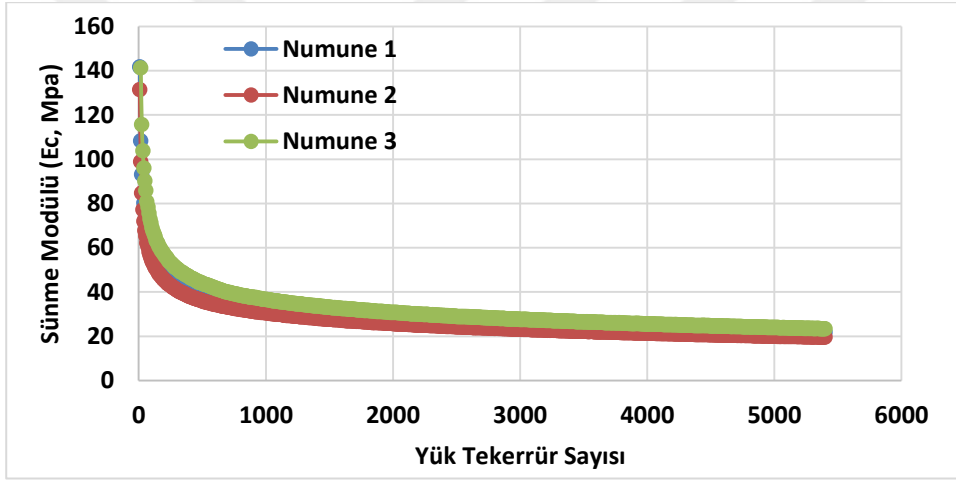
Şekil 6.102. Leadcap modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



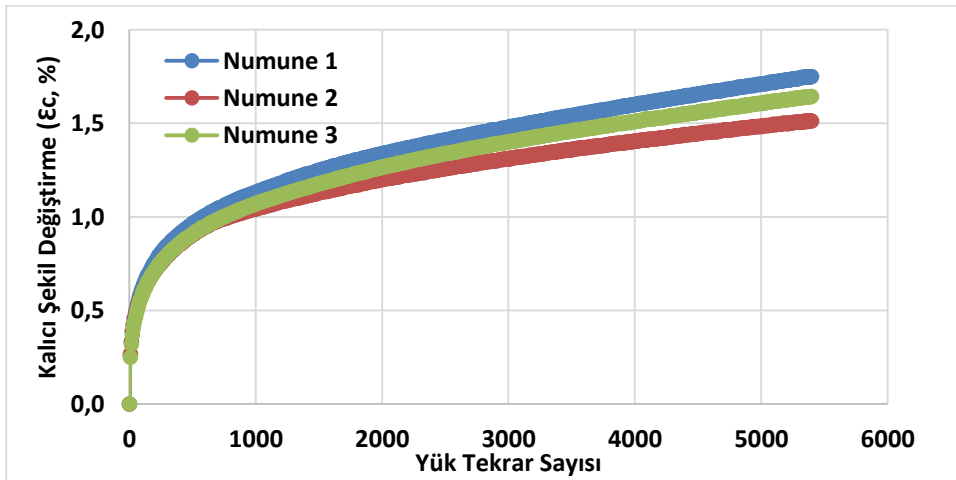
Şekil 6.103. Leadcap modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



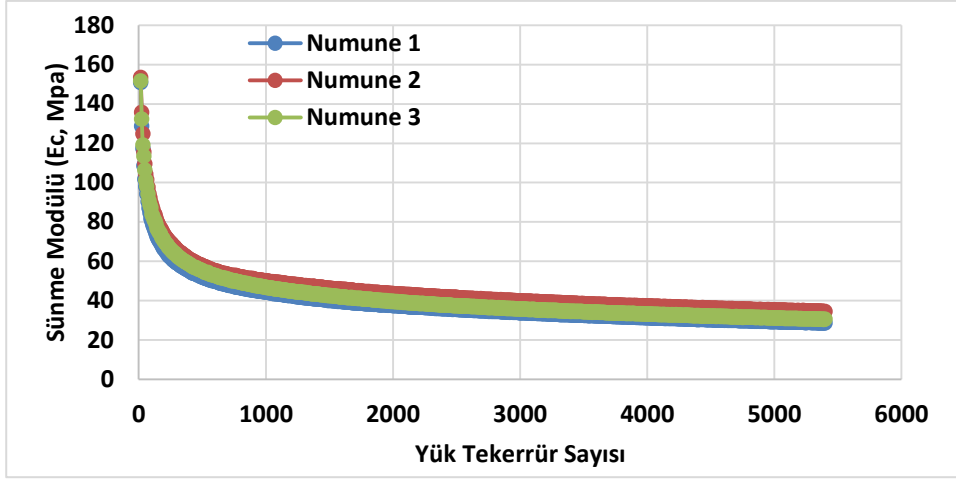
Şekil 6.104. Pawma-1 modifiyeli karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



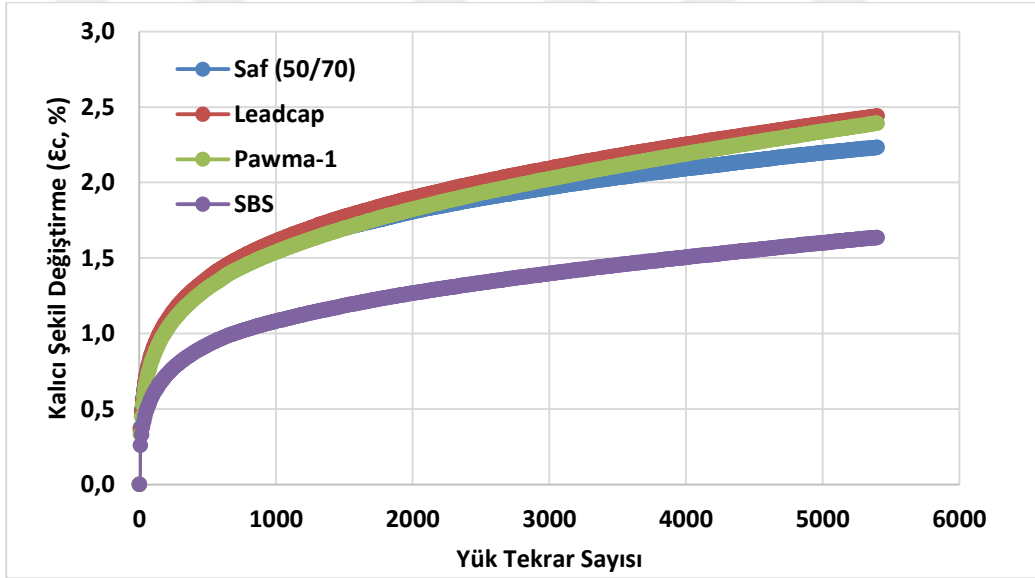
Şekil 6.105. Pawma-1 modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



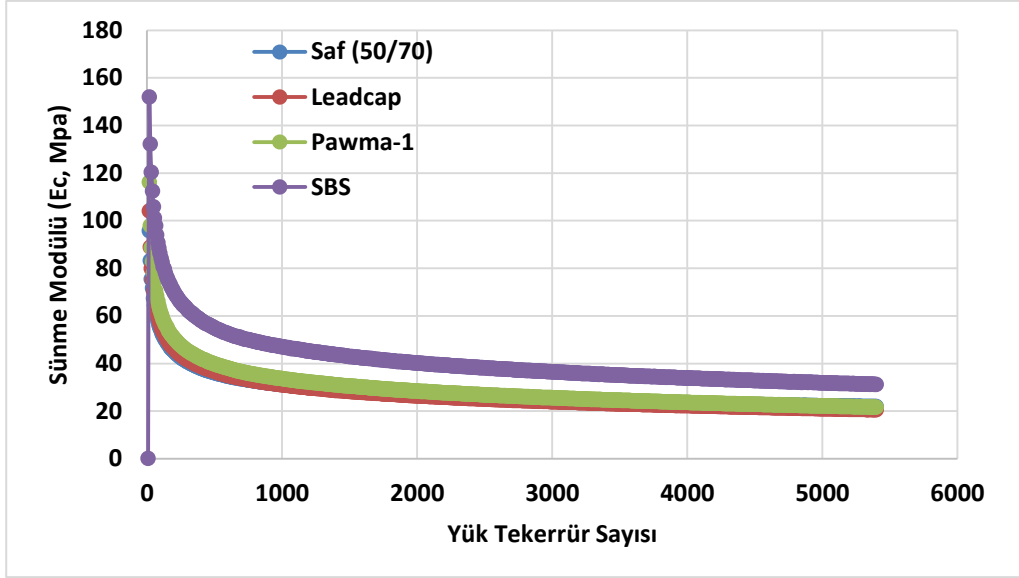
Şekil 6.106. SBS modifiyeli karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 6.107. SBS modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

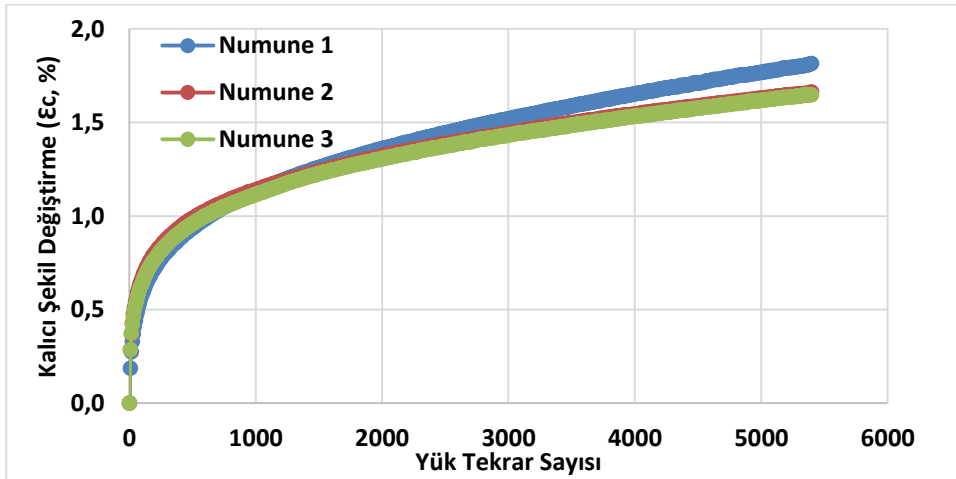


Şekil 6.108. Kireç içermeyen karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

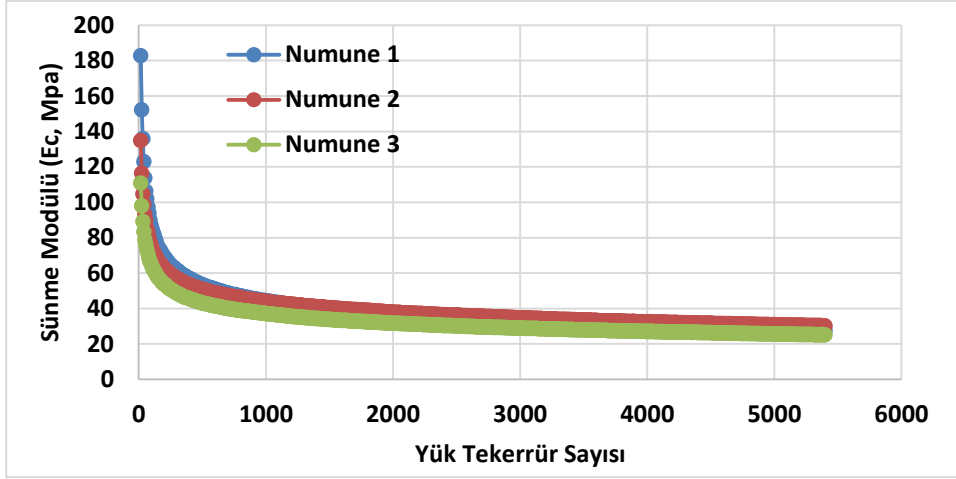


Şekil 6.109. Kireç içermeyen karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

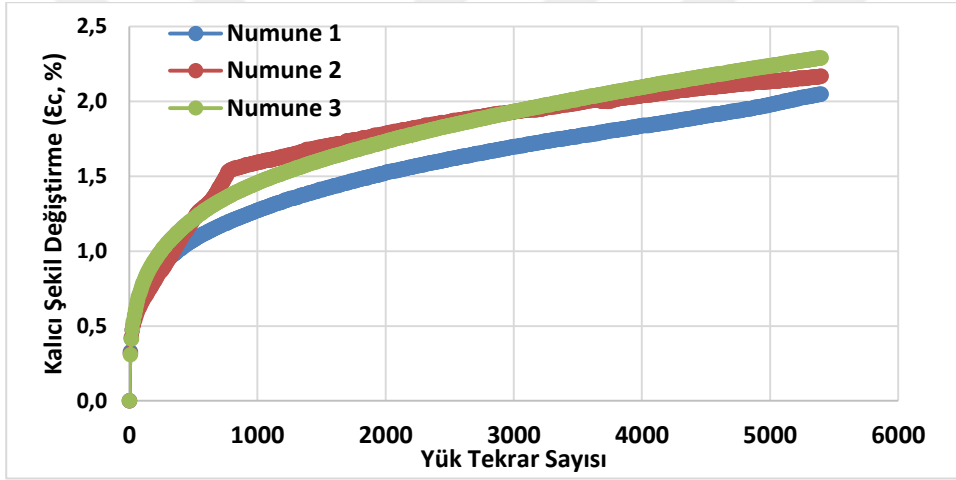
Sonuçlar incelendiğinde, Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli karışımlar ile kontrol numunelerinin kalıcı şekil değiştirme değerleri ve sünme modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. SBS modifiyeli karışımlar en düşük kalıcı şekil değiştirme ve en yüksek sünme modülü değerlerine sahip olmuşlardır.



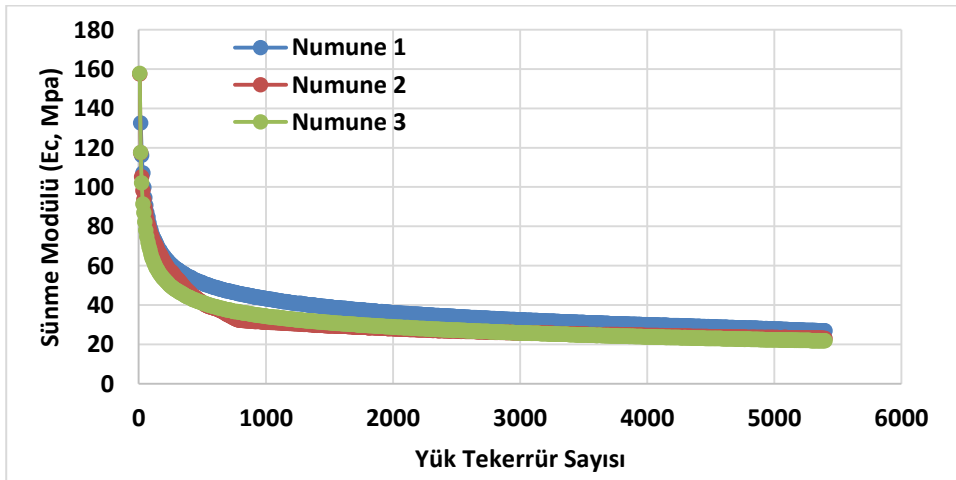
Şekil 6.110. Kireç katkılı saf (50/70) karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



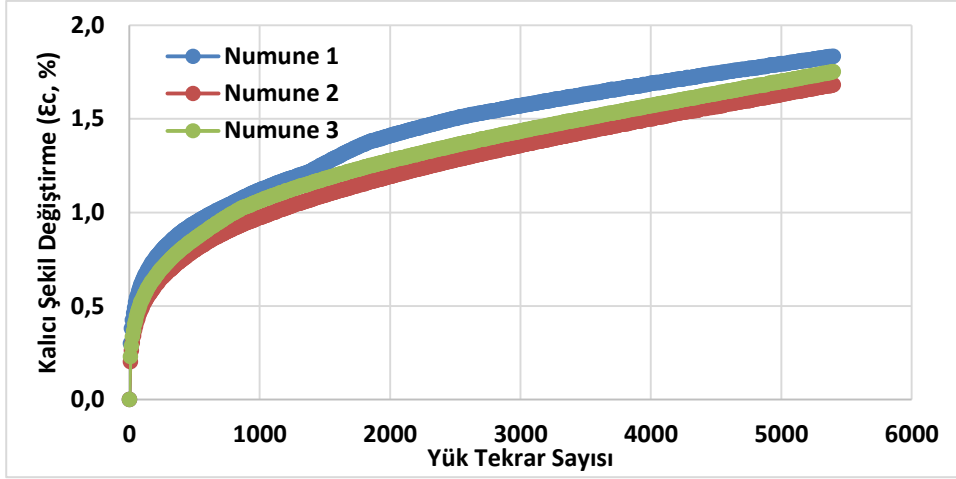
Şekil 6.111. Kireç katkılı saf (50/70) karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi



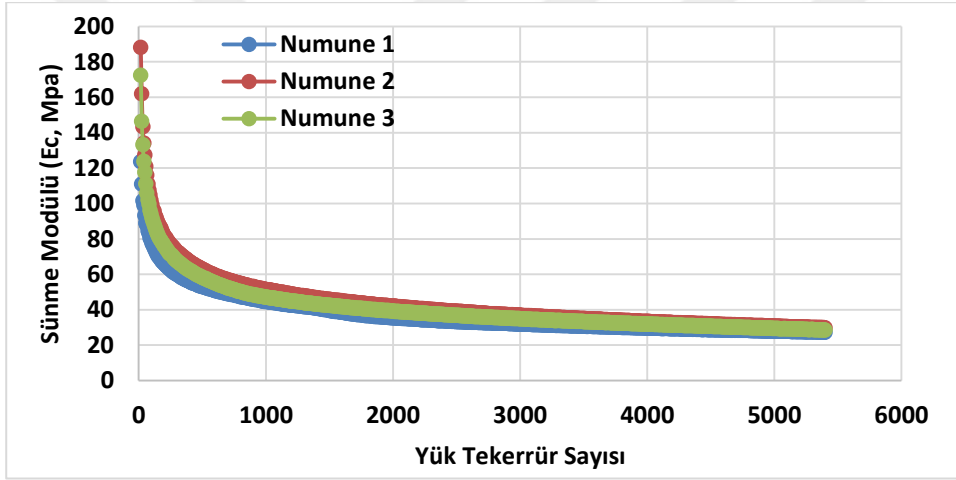
Şekil 6.112. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi



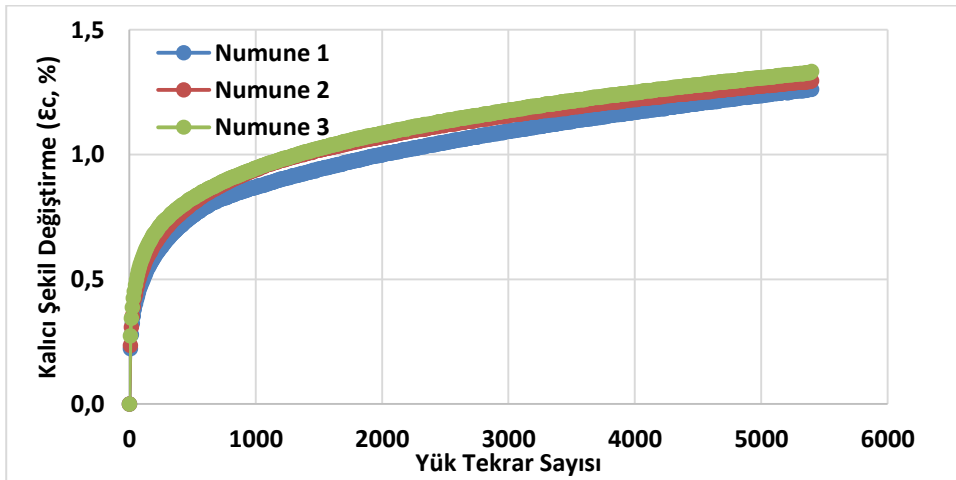
Şekil 6.113. Kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımların Ec-yük tekrar sayısı ilişkisi



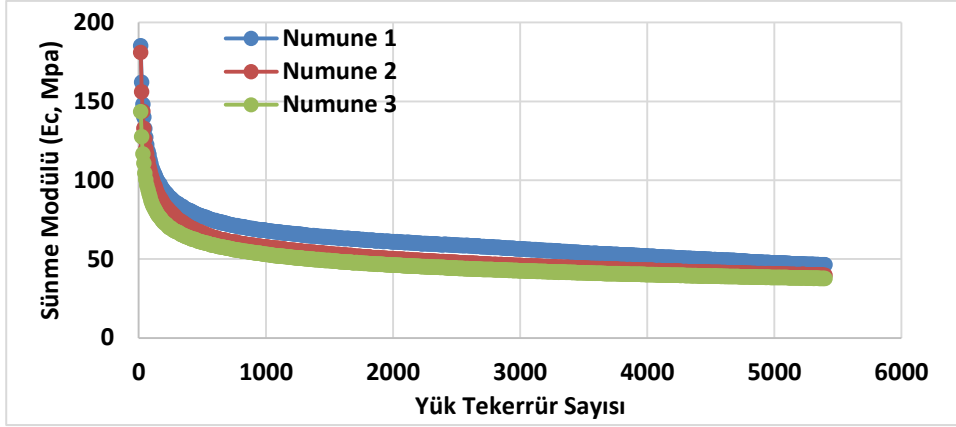
Şekil 6.114. Kireç katkılı Pawma-1 modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



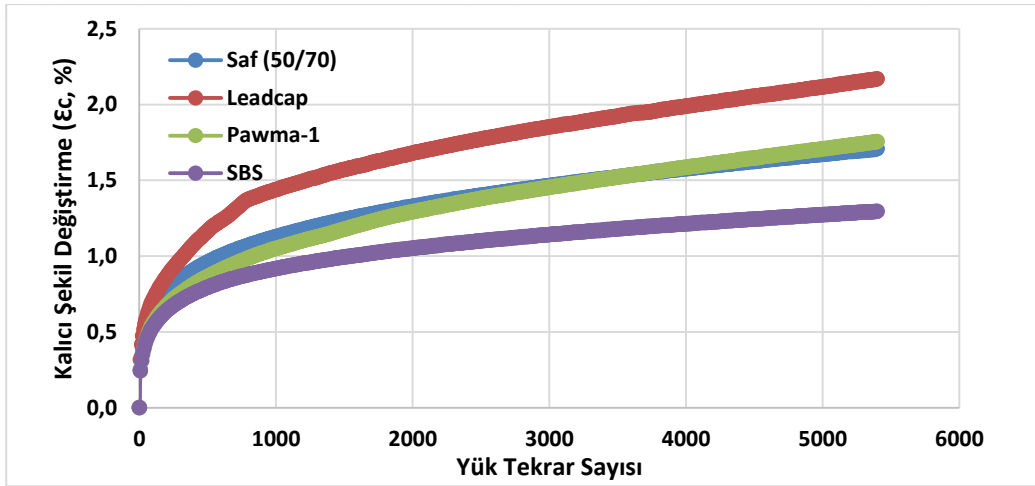
Şekil 6.115. Kireç katkılı Pawma-1 modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



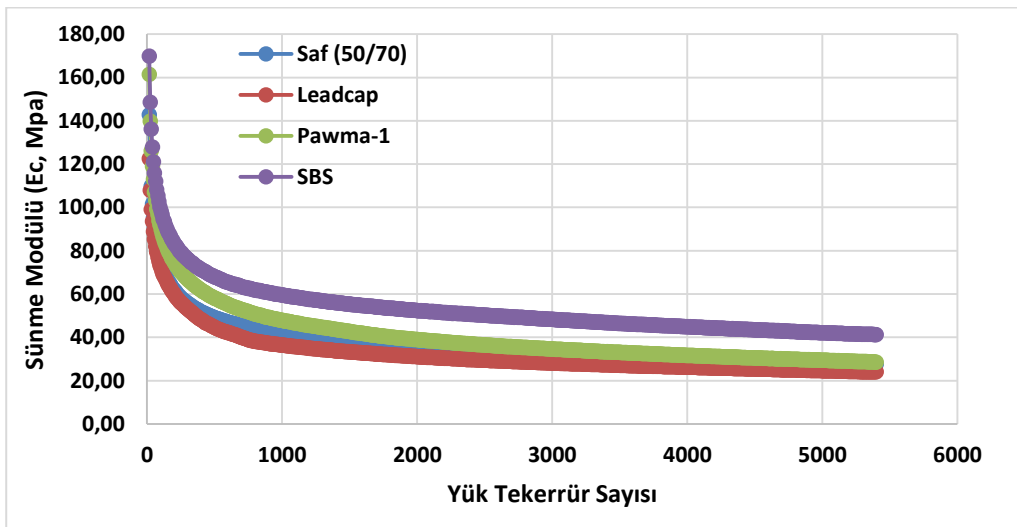
Şekil 6.116. Kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 6.117. Kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 6.118. Kireç katkılı karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

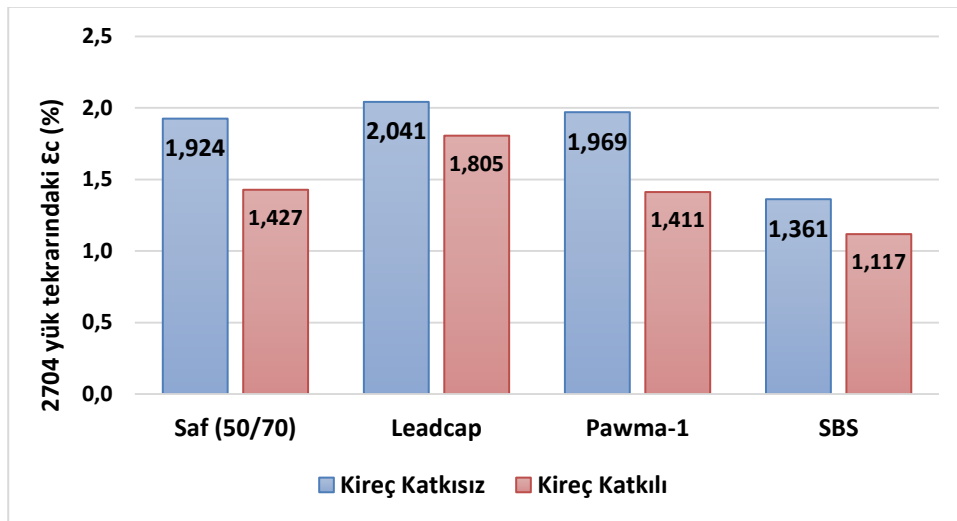


Şekil 6.119. Kireç katkılı karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

Sonuçlar incelendiğinde kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların en düşük kalıcı şekil değiştirme ve en yüksek sünme modülü değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Kireç katkılı, Pawma-1 modifiyeli ve saf karışımların kalıcı şekil değiştirmeleri ve sünme modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. En büyük kalıcı şekil değiştirme ve en düşük sünme modülü değerleri kireç katkılı Leadcap modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Sonuçları detaylı olarak karşılaştırmak için 2704 ve 5400 yük tekrarındaki kalıcı şekil değiştirmeleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 6.25'te ve Şekiller 6.120-6.123'te gösterilmiştir.

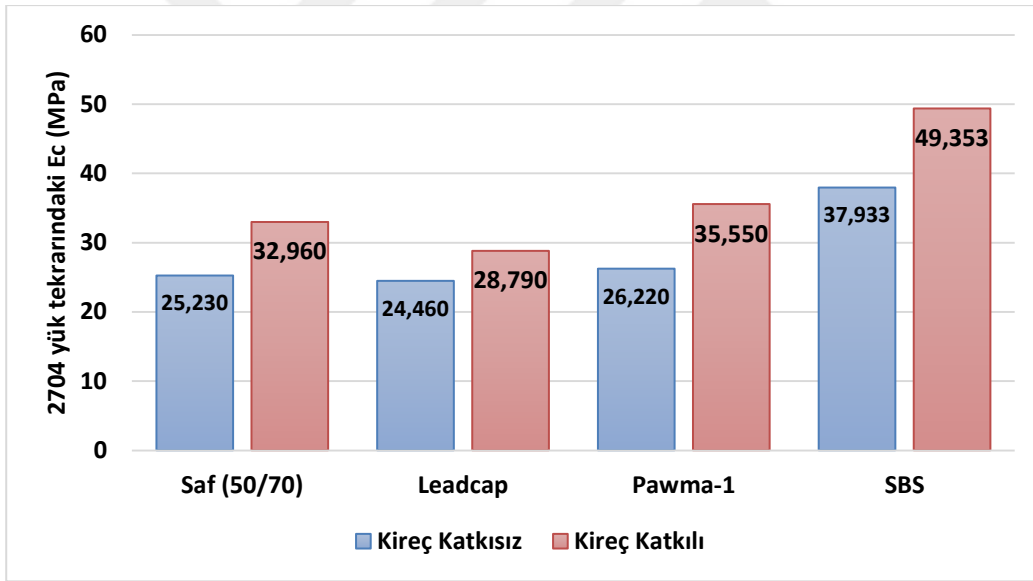
Tablo 6.25. Dinamik sünme deney sonuçları

Kireç İçermeyen Karışımlar	2704 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	2704 yük tekrarındaki E_c (MPa)	5400 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	5400 yük tekrarındaki E_c (MPa)
Saf (50/70)	1,924	25,230	2,232	21,796
Leadcap	2,041	24,460	2,440	20,450
Pawma-1	1,969	26,220	2,392	21,580
SBS	1,361	37,933	1,634	31,153
Kireç Katkılı Karışımlar	2704 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	2704 yük tekrarındaki E_c (MPa)	5400 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	5400 yük tekrarındaki E_c (MPa)
Saf (50/70)	1,427	32,960	1,707	27,573
Leadcap	1,805	28,790	2,168	23,936
Pawma-1	1,411	35,550	1,755	28,503
SBS	1,117	49,353	1,296	41,143



Şekil 6.120. Karışımların 2704 yük tekrarındaki ϵ_c değerleri

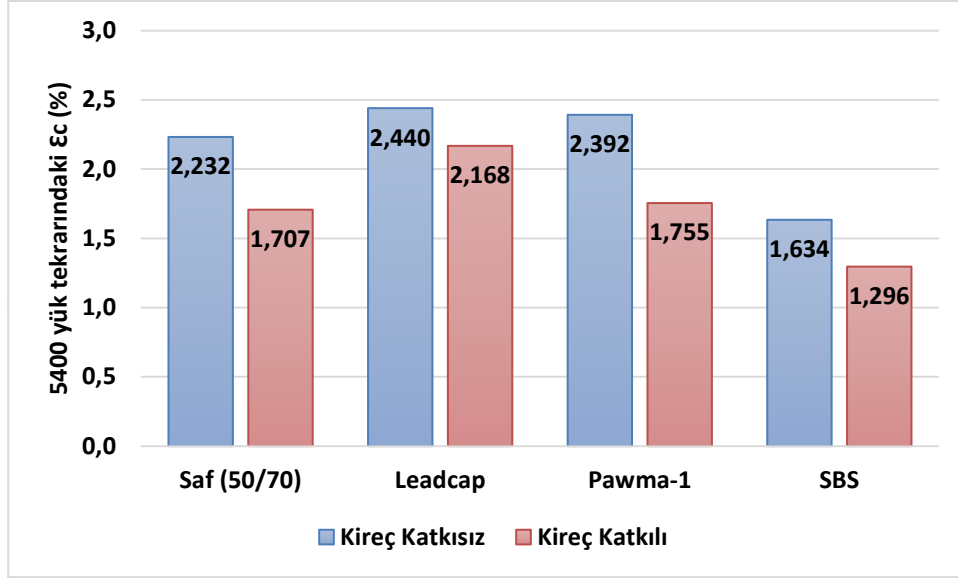
Kireç içermeyen karışımların 2704 yük tekrarındaki E_c değerleri incelendiğinde ılık karışımların E_c değerlerinin çok küçük oranlarda arttığı görülmüştür. Leadcap modifiyeli karışımlarda %6,08 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlar %2,33 oranında E_c değerlerinin artmıştır. SBS modifiyeli karışımlarda %29,26 oranında E_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkısı ile bütün karışımların 2704 yük tekrar sayısındaki E_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkısı ile saf (50/70) karışımlarda %25,83 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %11,56 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %28,33 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %17,93 oranında E_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkılı saf karışımlar ile Pawma-1 modifiyeli karışımların 2704 yük tekrarındaki E_c değerleri oldukça yakın çıkarken, en yüksek E_c değeri Leadcap modifiyeli karışımlarda, en düşük E_c değeri SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



Şekil 6.121. Karışımların 2704 yük tekrarındaki E_c değerleri

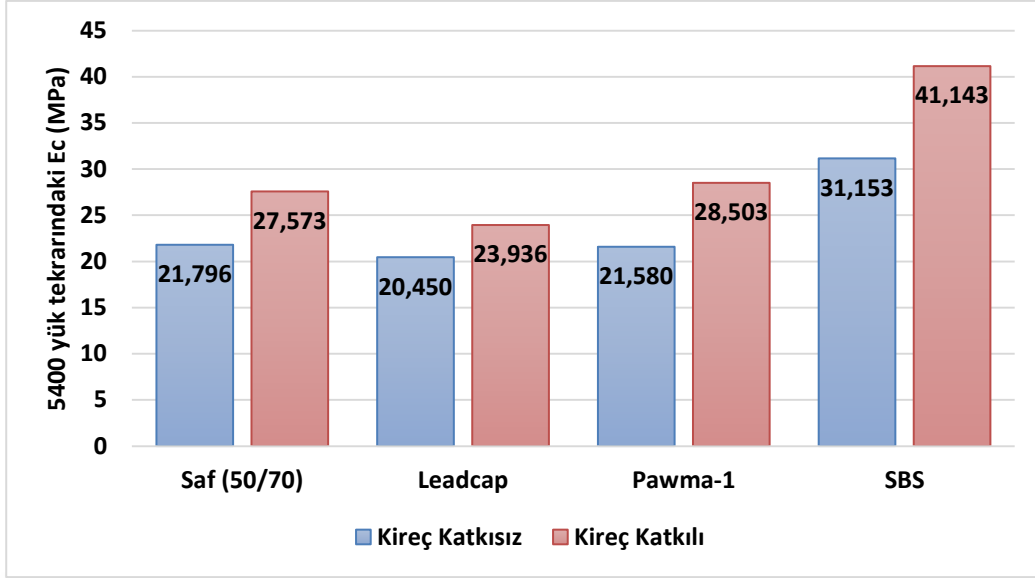
Kireç içermeyen karışımların 2704 yük tekrarındaki E_c değerleri incelendiğinde, Leadcap modifiyeli karışımlarda %3,05 oranında E_c değerlerinin azaldığı, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %3,92 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %50,34 oranında E_c değerlerinin arttığı görülmüştür. Kireç katkısı ile bütün karışımların 2704 yük tekrarındaki E_c değerleri artmıştır. Kireç katkısı ile saf (50/70) karışımlarda %30,63 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %17,70 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %35,58 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %30,11 oranında E_c değerleri artmıştır. Kireç

katkılı saf karışımların 2704 yük tekrarındaki E_c değerleri Leadcap modifiyeli karışımlardan yüksek olurken, SBS ve Pawma-1 modifiyeli karışımlardan düşük olmuştur. En yüksek E_c değerleri kireç katkı SBS modifiyeli karışımlarda görülürken, en düşük E_c değerleri kireç içermeyen Leadcap modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



Şekil 6.122. Karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri

Kireç içermeyen karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri incelendiğinde modifiye ılık karışım numunelerinin E_c değerlerinin küçük oranlarda arttığı görülmüştür. Leadcap modifiyeli karışımlarda %9,31 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %7,16 oranında E_c değerlerinin arttığı görülmüştür. SBS modifiyeli karışımlarda %26,79 oranında E_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkısı ile bütün karışımların 5400 yük tekrar sayısındaki E_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkısı ile saf (50/70) karışımlarda %23,52 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %11,15 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %26,63 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %20,69 oranında E_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kireç katkıli saf karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli karışımlardan düşük olurken, SBS modifiyeli karışımlardan yüksek olmuştur. En düşük E_c değerleri kireç katkıli SBS modifiyeli karışımlarda görülürken, en yüksek E_c değerleri kireç içermeyen Leadcap modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



Şekil 6.123. Karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri

Kireç içermeyen karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri incelendiğinde ılık karışım numunelerinin E_c değerlerinin küçük oranlarda azaldığı görülmüştür. Leadcap modifiyeli karışımlarda %6,17 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %0,99 oranında, E_c değerlerinin azaldığı görülmüştür. SBS modifiyeli karışımlarda %42,93 oranında E_c değerlerinin arttığı görülmüştür. Kireç katkısı ile bütün karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri artmıştır. Kireç katkısı ile saf (50/70) karışımlarda %26,5 oranında Leadcap modifiyeli karışımlarda %17,05 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %32,08 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %32,07 oranında E_c değerleri artmıştır. Kireç katkılı saf karışımların 5400 yük tekrarındaki E_c değerleri Leadcap modifiyeli karışımlardan yüksek olurken, SBS ve Pawma-1 modifiyeli karışımlardan düşük olmuştur. En yüksek E_c değerleri kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülürken, en düşük E_c değerleri kireç içermeyen Leadcap modifiyeli karışımlarda görülmüştür.

Bütün sonuçlar incelendiğinde sönmüş kireç katkısının bütün karışımların sünme performansını arttırdığı görülmüştür. Kireç içeren veya içermeyen Leadcap modifiyeli karışımların sünme performanslarının, kontrol numunelerine göre küçük bir oranda azaldığı görülmüştür. Kireç içeren veya içermeyen Pawma-1 modifiyeli karışımların sünme performanslarının kontrol numunelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Kireç içeren ve içermeyen SBS modifiyeli karışımların sünme performanslarının tüm diğer karışımlardan yüksek olduğu görülmüştür. Sünme ve yorulma deneylerinde kullanılan numune örnekleri şekil 6.124'te gösterilmiştir.



Şekil 6.124. Sünme ve yorulma deneylerinde kullanılan numune örnekleri

7. SONUÇLAR

Tez çalışmasında Pawma-1 ve Leadcap ılık karışım asfalt katkı maddeleri ile SBS katkı maddesi karışım numunelerinde denenmiştir. Hazırlanan modifiye bağlayıcılar üzerinde standart ve Superpave bağlayıcı deneyleri yapılmıştır. Marshall yöntemine göre optimum bitüm içerikleri belirlenmiş ve karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin yarısında %2 oranında sönmüş kireç, filler yerine kullanılmıştır. Ilık karışımlarda agrega ve bağlayıcı malzeme daha düşük sıcaklıklarda karıştırılıp sıkıştırılmıştır.

Bağlayıcı deneyleri sonucunda bütün katkı maddeleri bağlayıcının penetrasyonunu azaltıcı yönde etki yapmışlardır. Leadcap ve Pawma-1 katkıları ile PI değerleri azalırken SBS katkı maddesi PI değerini arttırmıştır. Bütün katkı maddeleri bağlayıcının yumuşama noktasını arttırmıştır. Leadcap ve Pawma-1 katkılı bağlayıcıların viskozitelerinde azalma görülürken, SBS katkılı bağlayıcının viskozitesi artmıştır. Tüm katkı maddeleri $G^*/\sin\delta$ değerini arttırmıştır, SBS modifiyeli bağlayıcıda en yüksek artış görülmüştür.

Leadcap, Pawma-1 ve SBS katkı maddeleri ile stabilite artmıştır. Sönmüş kireç katkısı bu artışın daha fazla olmasını sağlamıştır. Sönmüş kireç katkısının, saf (50/70) bitüm ile hazırlanan karışımlar üzerinde en yüksek oranda olumlu etki yaptığı görülmüştür. Sönmüş kirecin ılık karışım asfaltların stabilite değerlerini arttırdığı görülmüştür fakat bu artışın saf bitüm ile hazırlanan karışımlarda meydana gelen artışa göre çok düşük olması, kirecin olumlu etkisinin düşük karıştırma sıcaklıklarında azaldığını göstermiştir.

Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli ılık karışım asfaltların çekme dayanımı değerlerinin kontrol numunelerine göre bir miktar azaldığı görülmüştür. Sönmüş kireç katkısı ile Leadcap ve Pawma-1 modifiyeli ılık karışım asfaltların çekme dayanımı değerlerinin, kontrol numunelerine göre daha yüksek oranlarda arttığı ve kontrol numunelerine yakın çekme değerleri olduğu görülmüştür. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların ITS ve ITSR değerlerine bakıldığında SBS modifiyeli karışımların en olumlu sonuçları verdikleri görülmüştür.

Leadcap, Pawma-1 ve SBS katkı maddeleri ile ITSM değerleri artmıştır. Sönmüş kireç katkısı ile Pawma-1 modifiyeli karışımların ITSM değerleri azalırken diğer karışımların ITSM değerleri artmıştır. SBS katkılı karışımlarda en yüksek ITSM değerleri görülmüştür.

Pawma-1 ve SBS katkı maddeleri ile yorulma dayanımı artarken Leadcap katkısıyla yorulma dayanımı bir miktar azalmıştır. Sönmüş kireç katkısı ile saf (50/70) ve Pawma-1

modifiyeli karışımlarda yorulma dayanımı azalırken Leadcap ve SBS modifiyeli karışımlarda yorulma dayanımı artmıştır. SBS katkılı karışımlarda en yüksek yorulma dayanımı değerleri görülmüştür.

Sönmüş kireç katkısının bütün karışımların sünme performansını arttırdığı görülmüştür. Kireç içeren veya içermeyen Leadcap modifiyeli karışımların sünme performanslarının, kontrol numunelerine göre küçük bir oranda azaldığı görülmüştür. Kireç içeren veya içermeyen Pawma-1 modifiyeli karışımların sünme performanslarının kontrol numunelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Kireç içeren ve içermeyen SBS modifiyeli karışımların sünme performanslarının tüm diğer karışımlardan yüksek olduğu görülmüştür.

Genel olarak sonuçlar incelendiğinde ılık karışım asfaltlarda stabilite ve ITSM değerleri artmış fakat çekme dayanımı ve sünme modülü değerleri azalmıştır. Sönmüş kireç katkısı ile ılık karışım asfaltlarda çekme dayanımı ve sünme performansları artarak kontrol numunelerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Pawma-1 katkısı yorulma dayanımını bir miktar artırırken Leadcap katkısı küçük bir miktar azaltmıştır. Kireç katkısı ile Leadcap modifiyeli karışımların yorulma performansları iyileşmiştir. Sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlar en iyi sonuçları vermiştir.

Yolun trafiğe erken açılmasının gerektiği yerlerde ya da soğuk iklimli inşaat mevsiminin kısa olduğu bölgelerde Leadcap veya Pawma-1 katkılı ılık karışım asfaltların kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir. Sönmüş kireç katkısının, Leadcap modifiyeli karışımlara uygulanan tüm deneylerde olumlu sonuçlar verdiği görüldüğü için birlikte kullanılmaları faydalı olacaktır. Pawma-1 katkılı karışımlarda ise sönmüş kireç, indirekt çekme rijitlik modülünü ve yorulma ve performansını olumsuz etkilerken diğer deneylerde olumlu etki yapmıştır. Leadcap ve Pawma-1 katkıları ile farklı oranlarda SBS katkısının birlikte kullanımının ilave çalışmalarla değerlendirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., Yusoff, N. I. M., ve Hassan, N. A.** 2016. High temperature characteristics of warm mix asphalt mixtures with nanoclay and chemical warm mix asphalt modified binders. *Journal of Cleaner Production*, 122, 326-334.
- Ağar, E., ve Umar, F.** 1991. *Yol üstyapısı*, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Airey, G.** 2004. Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. *Journal of Materials Science*, 39(3), 951-959.
- Akisetty, C. K., Lee, S.-J., ve Amirkhanian, S. N.** 2009. High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 23(1), 565-573.
- Alataş, T., ve Kizirgil, M. E.** 2012. Saf ve polimer modifiyeli bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının dönel viskozimetre deneyi ile belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 249-256.
- Alataş, T., ve Kizirgil, M. E.** 2013. The effects of using Styrene-Butadiene-Styrene and fly ash together on the resistance to moisture-induced damage, permanent deformation and fatigue of hot mixture asphalt. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(5), 1030-1039.
- ASTM-C127.** 2012. Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate: American Society for Testing and Materials Philadelphia, PA.
- ASTM-C128.** 2012. Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate: American Society for Testing and Materials Philadelphia, PA.
- Banerjee, A., de Fortier Smit, A., ve Prozzi, J. A.** 2012. The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. *Fuel*, 97, 603-611.
- Bayazit, M.** 2012. Bitümlü ılık karışımların neme karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
- Bayazit, M., Ünvermez, A., ve Taşdemir, Y.** 2012. Investigation of Warm Mix Asphalt Mixtures. *10th International Congress on Advances in Civil Engineering*, , Middle East Technical University, Ankara.
- Birliker, R. Y.** 1998. Bitümlü karışımlara eklenebilecek katkıları ile bu tip bitümlü karışımların davranışlarının araştırılması ve bir yorulma eğrisi tahmin modeli. *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Biro, S., Gandhi, T., ve Amirkhanian, S.** 2009. Determination of zero shear viscosity of warm asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 23(5), 2080-2086.
- Chevron, B. M. M.** 1977. Chevron USA. *Asphalt Division*, California.
- Cong, P., Zhang, Y., ve Liu, N.** 2016. Investigation of the properties of asphalt mixtures incorporating reclaimed SBS modified asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 113, 334-340.
- Cong, Y., Huang, W., ve Liao, K.** 2008. Compatibility between SBS and Asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 26(3), 346-352.

- Cucalon, L. G., Yin, F., Martin, A. E., Arambula, E., Estakhri, C., ve Park, E. S. 2015. Evaluation of Moisture Susceptibility Minimization Strategies for Warm-Mix Asphalt: Case Study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 05015002.
- D'Angelo, J. A., Harm, E. E., Bartoszek, J. C., Baumgardner, G. L., Corrigan, M. R., Cowser, J. E., . . . Newcomb, D. E. 2008. Warm-mix asphalt: European practice.
- Das, P. K., Tasdemir, Y., ve Birgisson, B. 2012. Low temperature cracking performance of WMA with the use of the Superpave indirect tensile test. *Construction and Building Materials*, 30, 643-649.
- Demir, M. 2011. SBS, EVA VE reaktif terpolimer kullanılarak bitim modifikasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Deniz, M. T. 2011. *Bitümlü Bağlayıcılar ve Asfalt Emülsiyonları*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- Dokandari, P. A., Oner, J., Topal, A., ve Sengoz, B. 2014. Organik Ilık Karışım Asfalt Katkı Maddesinin Bitümlü Karışımların Yaşlanma Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(9), 332-337.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y., ve Isacson, U. 2006. Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220—low temperature performance. *Fuel*, 85(7), 989-997.
- Gençtürk, G. 2011. Sönmüş kireç ile çimento ve pr plast kullanımının asfalt kaplamaların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Harvey, J. T., Deacon, J. A., Tsai, B.-W., ve Monismith, C. L. 1995. Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California. *University of California, Berkeley, Institute of Transportation Studies, Asphalt Research Program, CAL/APT Program*.
- Hesami, S., Roshani, H., Hamed, G. H., ve Azarhoosh, A. 2013. Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 47, 935-941.
- Ilıcalı, M. 2001. *Asfalt ve uygulamaları*, İSFALT, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- Jenks, C., Jencks, C., Harrigan, E., Adcock, M., Delaney, E., ve Freer, H. 2011. NCHRP Report 673: A manual for design of hot mix asphalt with commentary. *Washington, DC: Transportation research board of the National academies*.
- Johansson, L. 1995. Influence of hydrated lime on bitumen hardening. *Kth infrastruktur och samhaellsplanering rapport*(95: 8).
- Jones, G. 1997. The effect of hydrated lime on asphalt in bituminous pavements. *NLA Meeting, Utah DOT*.
- Kakade, V. B., Reddy, M. A., ve Reddy, K. S. 2016. Effect of aging on fatigue performance of hydrated lime modified bituminous mixes. *Construction and Building Materials*, 113, 1034-1043.

- Kaloush, K., Witczak, M., Roque, R., Brown, S., D'Angelo, J., Marasteanu, M., ve Masad, E.** 2002. Tertiary flow characteristics of asphalt mixtures. *Asphalt Paving Technology* 2002.
- Kaya, D.** 2014. Ilık karışım asfaltların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Keçeciler, A. F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., ve Gökçe, A. F.** 1990. *Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı*. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Khodaii, A., Tehrani, H. K., ve Haghshenas, H.** 2012. Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 165-170.
- Kim, H., Jeong, K.-D., Lee, M. S., ve Lee, S.-J.** 2014. Performance properties of CRM binders with wax warm additives. *Construction and Building Materials*, 66, 356-360.
- Kim, S., Lee, S.-J., Yun, Y.-B., ve Kim, K. W.** 2014. The use of CRM-modified asphalt mixtures in Korea: Evaluation of high and ambient temperature performance. *Construction and Building Materials*, 67, 244-248.
- Kim, T. W., Baek, J., Lee, H. J., ve Choi, J. Y.** 2013. Fatigue performance evaluation of SBS modified mastic asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 48, 908-916.
- Kim, Y. R., Zhang, J., ve Ban, H.** 2012. Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation. *Construction and Building Materials*, 31, 204-211.
- Kök, B. V.** 2007. Bitümlü sıcak karışımların üretiminde yeni bir karıştırma yönteminin araştırılması. *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fıratlı Üniversitesi, Elazığ.
- Kök, B. V., Yılmaz, M., ve Kuloğlu, N.** 2011. Asfaltit ve SBS Modifiyeli Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 14(3).
- Köse, H.** 2015. Bitümlü ılık karışımların kimyasal buz çözücülere karşı direncinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
- Kuloğlu, N.** 2001. Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler. *Türk J Engin Environ Sci*, 25, 61-67.
- Kuloğlu, N., Karakaş, A. S., Kök, B. V., ve Yılmaz, M.** 2013. Bitümlü Sıcak Karışımların Arazi Performanslarının Değerlendirilmesi. *10.Ulaştırma Kongresi*, İzmir.
- Kumar, P., Mehndiratta, H., ve Singh, V.** 2008. Use of fly ash in bituminous layer of pavement. *Indian Highways*, 8, 41-50.
- Lee, J., Kim, Y. R., Lee, J., Kwon, S.-A., ve Yang, S.-C.** 2011. Comprehensive Laboratory Performance Evaluation of WMA with LEADCAP Additives.
- Lee, S.-J., Amirkhanian, S. N., Park, N.-W., ve Kim, K. W.** 2009. Characterization of warm mix asphalt binders containing artificially long-term aged binders. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2371-2379.
- Lesueur, D., Little, D., ve Epps, J.** 1998. Effect of hydrated lime on the rheology, fracture and aging of bitumen and asphalt mixtures. *Lhoist HMA Symposium*, Dusseldorf, Germany.

- Liang, M., Liang, P., Fan, W., Qian, C., Xin, X., Shi, J., ve Nan, G.** 2015. Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers. *Materials & Design*, 88, 177-185.
- Liang, R. Y.** 2008. Refine AASHTO T283 resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage for superpave.
- Little, D. N., Epps, J. A., ve Sebaaly, P. E.** 2006. Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. *National Lime Association*.
- Lu, X., ve Isacsson, U.** 1997. Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 11(1), 23-32.
- Mansourian, A., Razmi, A., ve Razavi, M.** 2016. Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers. *Construction and Building Materials*, 117, 37-46.
- Mazumder, M., Kim, H., ve Lee, S.-J.** 2016. Performance properties of polymer modified asphalt binders containing wax additives. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(2), 128-139.
- McGennis, R. B., Shuler, S., ve Bahia, H. U.** 1994. *Background of Superpave asphalt binder test methods*, Federal Highway Administration, Office of Technology Applications.
- MEGEP, M.** 2006. Agrega deneyleri-5. *İnşaat Alanı*.
- Metli, M.** 2007. The Effect of SBS based polymer modified bitumen and bituminous mixtures on the performance of pavements. *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Modarres, A.** 2013. Investigating the toughness and fatigue behavior of conventional and SBS modified asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 47, 218-222.
- Mohammad, L., ve Abadie, G.** 2000. Puppala. "Mechanistic Evaluation of Hydrated Lime in HMA Mixtures." *Transportation Research Board*.
- Muthen, K.** 1998. Foamed asphalt mixes-mix design procedure. *Transportation Research Record*, 898, 290-296.
- Orhan, F.** 2012. *Bitümlü karışımlar laboratuvar çalışmaları*. Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Önal, M. A., ve Kahramangil, M.** 1993. *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*. Ankara, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Pellinen, T., Christensen, D., Rowe, G., ve Sharrock, M.** 2004. Fatigue-Transfer Functions: How Do They Compare? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1896), 77-87.
- Prowell, B. D., Hurley, G. C., ve Frank, B.** 2011. *Warm-mix asphalt: Best practices*, National Asphalt Pavement Association Lanham, Md, USA.
- Read, J., ve Whiteoak, D.** 2003. *The shell bitumen handbook*, Thomas Telford, London.
- Rogge, D., Leahy, R., ve Blair, R.** 1995. Cold In-Place (CIP) Recycling with Lime. *Transportation Research Institute, State University, Corvallis*.
- Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D., ve DelRio-Prat, M.** 2011. Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2304-2311.

- Sargand, S. M., Figueroa, J. L., Edwards, W., ve Al-Rawashdeh, A. S. 2009. Performance assessment of warm mix asphalt (WMA) pavements: Ohio Research Institute for Transportation and the Environment.
- Shafiei, A., ve Namin, M. L. 2014. Experimental investigation on the effect of hydrated lime on mechanical properties of SMA. *Construction and Building Materials*, 70, 379-387.
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y., ve Zhang, Y. 2011. Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(2), 886-891.
- Shirini, B., ve Imaninasab, R. 2016. Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 107, 165-171.
- Silva, H. M., Oliveira, J. R., Peralta, J., ve Zoorob, S. E. 2010. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1621-1631.
- Su, K., Maekawa, R., ve Hachiya, Y. 2009. Laboratory evaluation of WMA mixture for use in airport pavement rehabilitation. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2709-2714.
- Şengöz, B., ve Işıkyakar, G. 2008. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905.
- Şengöz, B., ve Oylumluoğlu, J. 2013. Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen. *Construction and Building Materials*, 45, 173-183.
- Şengül, C. E., Oruç, S., İskender, E., ve Aksoy, A. 2013. Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance. *Construction and Building Materials*, 41, 777-783.
- Tayfur, S., Ozen, H., ve Aksoy, A. 2007. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2), 328-337.
- Temren, Z. 2009. *Yollar Türk Milli Komitesi, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara.
- Terzi, S. 2000. Mermer toz atıkların asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- TS-1367-2. 2010. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSEN-1426. 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSEN-1427. 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSEN-12591. 2011. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-kaplama sınıfı bitümler-özellikler. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSEN-12607-1. 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini *Bölüm 1: RTFOT yöntemi*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Tunç, A. 2001. *Yol malzemeleri ve uygulamaları*, Atlas Yayıncılık, İstanbul.
- Tunç, A. 2004. *Esnek kaplama malzemeleri el kitabı*, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.

- Turan, M. A.** 2012. SBS ve sönmüş kireç katkılı sıcak asfalt karışımlarda tekerlek izi direncinin marshall oranı yaklaşımı ile değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Ullidtz, P.** 1987. *Pavement Analysis. Developments in Civil Engineering*, 19.
- URL-1.** AR-GE ile yeni ürünler geliştiriliyor. 2017, <http://yolteknolojileri.com.tr/icerik/10016/ar-ge-ile-yeni-urunler-gelistiriliyor>,
- URL-2.** Introducing a novel warm mix additive: Leadcap. 2017, <http://www.leadcapwma.com/index.html>
- URL-3.** Ucuz ve çevreci asfalt türkiye yollarında. 2017, <http://www.tubitak.gov.tr/tr/haber/ucuz-ve-cevreci-asfalt-turkiye-yollarinda>,
- URL-4.** Ilık Karışım Asfalt Teknoloji ve Uygulamaları Çalıştayı. 2017, <https://www.tubitak.gov.tr/tr/haber/ilik-karitim-asfalt-teknoloji-ve-uygulamaları-calistayı>,
- URL-5.** Kraton Polymers İle İnovasyon Sürüşü. 2017, http://kraton.com/products/hima/documents/GR_TR.pdf
- URL-6.** Kireç 2016, http://www.askimya.com/kirec-877_tr_cd.html 2017
- Ünvermez, A.** 2011. Bitümlü ılık karışımların mekanik etüdü. *Yüksek Lisans Tezi*, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Yozgat.
- Verhasselt, A., ve Choquet, F.** 1993. Comparing field and laboratory aging of bitumens on a kinetic basis. *Transportation Research Record*(1391).
- Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., ve Fan, Y.** 2002. Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts. *Polymer Testing*, 21(3), 295-302.
- Xiao, F., ve Amirkhanian, S. N.** 2010. Effects of liquid antistrip additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1649-1655.
- Xiao, F., Punith, V., ve Amirkhanian, S. N.** 2012. Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures. *Fuel*, 94, 144-155.
- Xiao, F., Zhao, P. W., ve Amirkhanian, S. N.** 2009. Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3144-3151.
- Yılmaz, M.** 2011. Asfaltitin bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması. *Doktora*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Yılmaz, M., ve Kök, B. V.** 2008. Stiren-Butadien-Stiren modifiyeli bitümlü bağlayıcıların süperpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyesinin ve işlenebilirliğinin belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4), 811-819.
- Yılmaz, M., Kök, B. V., ve Yamaç, Ö. E.** 2015. Determination of rheological properties of polymer and natural asphalts modified binders after storage stability test. *Sigma*, 33, 157-165.
- Zaniewski, J. P., ve Pumphrey, M. E.** 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. *Asphalt technology program*, 107.

ÖZGEÇMİŞ

Akın İSTEK, 1980 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Mehmetçik İlköğretim Okulu, Elazığ Anadolu Lisesi ve Fatih lisesinde tamamlamıştır. 2000 yılında, Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazanmıştır. 2004 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra, aynı yıl, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne bağlı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. 2007 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak İnşaat Yüksek Mühendisi unvanı almıştır. 2007-2010 yılları arasında Giresun Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı'nda mühendis olarak görev yapmıştır. 2010 yılından itibaren Fırat Üniversitesi Keban Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Geoteknik Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.